

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ "МИСиС"
ИНСТИТУТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ (ИТАСУ)**

На правах рукописи



ДО ЧИ ТХАНЬ

**Разработка алгоритмов управления вентиляционной системой
метанообильных шахт Вьетнама с использованием моделей
прогнозной аналитики**

Специальность: 05.13.06.

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
(промышленность)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н. ТЕМКИН И.О.

Москва – 2018

Содержание

Введение.....	4
Глава 1. Анализ условий отработки угольных пластов и причин аварий в шахтах Вьетнама. Использование информационных технологий и систем для повышения безопасности горных работ	10
1.1. Анализ горно-геологических и горнотехнических условий на шахтах Вьетнама	10
1.2. Обзор аварий в шахтах мира.	15
1.3. Анализ причин пожаров и взрывов в шахтах Вьетнама	18
1.4. Структура систем газового мониторинга шахты	23
1.4.1. Правила установки датчиков метана по горным выработкам шахты....	25
1.4.2. Системы мониторинга рудничного газа на угольных шахта Мао Хе....	27
1.5. Обзор моделей прогноза газодинамических процессов и алгоритмов управления вентиляцией шахт.....	29
1.5.1. Обзор основных подходов к построению моделей прогнозирования концентрации метана	30
1.5.2. Алгоритмы управления вентиляцией.....	32
1.5.3. Модели прогнозной аналитики в задачах управления вентиляцией шахт.....	33
1.6. Выводы.....	35
Глава 2. Принципы построения аналитической платформы мониторинга аэрогазодинамических процессов и управления вентиляцией в шахтах.....	37
2.1. Основные задачи, решаемые в рамках аналитической платформы	37
2.2. Структура информационной базы интеллектуальной аналитической платформы	39
2.3. Экспертное описание газодинамических процессов.....	46
2.4. Использование специальных (индикативных) переменных для решения задачи распознавания газодинамических ситуаций	56
2.5. Выводы	64

Глава 3. Нейросетевые модели распознавания газодинамических ситуаций и прогнозирования динамики концентрации метана.....	65
3.1. Моделирование газодинамических процессов	65
3.2. Анализ данных. Процедура построения моделей	68
3.3. Алгоритм выбора наилучшей НС	75
3.4. Нейросетевые модели прогнозирования аэрогазодинамических явлений и процессов на основе ИНС Элмана	80
3.5. Выводы.....	87
Глава 4. Разработка алгоритма управления вентиляторами местного проветривания с использованием нейросетевых моделей.....	90
4.1. Нейросетевые модели управления вентиляционной системой шахт	90
4.2. Использование вентиляторов местного проветривания	97
4.2.1 Пример расчета вентилятора для проветривания выработки на шахте Мао Хе «Лава № V9A ».....	
4.3. Разработка алгоритма управления скоростью привода асинхронного двигателя ВМП с нейросетевой настройкой параметров ПИ-регулятора.....	101
4.3.1. Схема управления приводом.....	101
4.3.2. разработка алгоритма нейросетевой адаптации параметров PI-регулятора скорости привода асинхронного двигателя ВМП в шахте Мао Хе (Вьетнам).....	105
4.3.3. Результаты моделирования.....	109
4.4. Разработка системы мониторинга концентрации метана и автоматического управления ВМП в шахте Мао Хе (Вьетнам).....	113
4.5. Выводы.....	123
Заключение.....	124
Список литературы.....	135
Приложение	138
Список сокращений	148

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. В настоящее время во Вьетнаме более 60% добычи угля (общий объем в 2017 году – около 50 млн. тонн) осуществляется подземным способом. Большинство из 25 расположенных на севере страны в провинции Куангнинь шахт, в том числе и шахта Мао Хе, характеризуются высоким уровнем метанообильности угольных пластов. Существенные колебания значений концентрации метана в различных выработках шахт от смены к смене, не говоря уже о внезапных выбросах метана и связанных с ними взрывах пыли-газо-воздушной смеси, являются в настоящее время серьезными факторами, влияющими на безопасность ведения горных работ. В период с 1995г. по настоящее время на шахтах Вьетнама произошло 8 взрывов метана, погибли 72 человека. Сегодня во Вьетнаме вопросам повышения безопасности ведения горных работ в метанообильных шахтах уделяется огромное внимание. Причины повышения концентрации метана в шахтных выработках неплохо изучены и связаны, либо с реакцией горного массива на процессы добычи, либо с отказами оборудования, либо с системными нарушениями вентиляционных режимов. Среди конкретных и наиболее часто встречающихся причин, обычно выделяют такие как: выбросы угля и газа, обрушение кровли, пережатие вентиляционных труб, отключение системы дегазации, проведение буровзрывных работ, отключение вентиляторов, нарушения в вентиляционной системе. Методы борьбы с метаном на шахтах реализуются за счет проведения профилактических и других организационно-технических мероприятий, таких как: ежегодные оценки метанообильности и метаноносности пластов на шахтах; повышенные требования к взрывозащищенности электрооборудования, прошедшего тестирование на взрывобезопасность; периодическое обучение шахтеров на курсах по безопасности горных работ на угольных шахтах. Однако, основным направлением повышения безопасности ведения подземных горных работ сегодня является создание систем мониторинга аэрогазодинамических процессов и управления шахтной вентиляцией. Значительный вклад в развитие теории и практики разработки моделей

аэрогазодинамических процессов, а также алгоритмов управления в шахтных вентиляционных системах (ШВС) внесли известные ученые: Р.А. Абрамов, Л.А. Бахвалов, В.А. Бойко, А.А. Волков, И.Н. Засухин, Р. Левер (Lever), А.Г. Мамиконов, Л.М. Местер, Н.Н. Петров, Л.А. Пучков, Р. Рамани (Ramani), В.А. Святный, Л.П. Фельдман, Р.Б. Тянь, С.В. Цой, С.З. Шкундин. В результате их исследований были созданы принципы построения автоматизированных систем управления ШВС и промышленные образцы подобных систем. Сегодня в этой сфере создаются системы нового поколения, для которых требуются универсальные платформенные решения, способные интегрировать различные методы прогнозной аналитики и управления. В настоящее время на шахте Мао Хе ведутся работы по созданию и внедрению аппаратно-программного комплекса мониторинга безопасности угольной шахты по газовому фактору. Базовыми функциями для данной системы являются регистрация и хранение всей поступающей с объекта управления сенсорной информации, а также удобное визуальное представление этой информации диспетчерскому персоналу. Однако, не менее важным для данной системы является разработка специализированных моделей, алгоритмов и соответствующих программных инструментов, способных в рамках единой платформы оказывать поддержку диспетчеру в распознавании и анализе опасных газодинамических ситуаций, а также принятии управленческих решений при возникновении необходимости оперативного изменения режимов вентиляции и запуска системы автоматического управления вентиляторами местного проветривания.

Исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что данное направление исследования является актуальным, а результаты исследований будут востребованы промышленностью.

Цель работы - повышение безопасности и эффективности ведения горных работ за счет применения в рамках единой аналитической платформы специализированных моделей, алгоритмов и программ, обеспечивающих высокую степень точности решения задач анализа газодинамических явлений и управления вентиляционными режимами.

Основная идея работы заключается в комплексном использовании инструментов прогнозной аналитики для решения задач распознавания и интерпретации газодинамических ситуаций, а также управления вентиляционной системой на основе нейросетевых моделей и алгоритмов.

Основные задачи исследований:

1. Провести анализ проблем контроля газодинамических процессов, распознавания и прогноза опасных явлений с учетом условий отработки угольных пластов и причин аварий в шахтах Вьетнама. Провести анализ существующих моделей, алгоритмов и систем, предназначенных для решения комплекса задач, связанных с повышением безопасности горных работ по газовому фактору.

2. Разработать комплекс процедур обработки и анализа различных видов информации (данные систем мониторинга и экспертные оценки), необходимых для построения и функционирования аналитической платформы.

3. Разработать набор нейросетевых моделей, обеспечивающих требуемую точность решения задач распознавания газодинамических явлений и прогнозирования газодинамических процессов.

4. Разработать алгоритм управления вентиляторами местного проветривания (ВМП) с использованием методики нейросетевой настройки параметров регулирования режимов их работы.

5. Разработать программные инструменты, реализующие разработанные модели и алгоритмы, а также осуществить проверку их работоспособности с использованием имитационного моделирования и на основе реальных экспериментальных данных шахты Мао Хе.

Методология и методы исследования, используемые для решения поставленных задач: экспериментально-статистические методы и подходы, элементы теории системного анализа, элементы теории автоматизированного и автоматического управления, технологии интеллектуального анализа данных.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Механизмы построения и функционирования аналитической платформы, обеспечивающей решение задач распознавания прогноза и управления в рамках системы мониторинга аэрогазодинамических процессов в шахте.
2. Модели распознавания газодинамических и интерпретации газодинамических ситуаций, позволяющие обеспечить раннее обнаружение аномалий в развитии газодинамических процессов за счет использования специальных переменных, формируемых в процессе трансформации параметров мониторинга, а также модели прогнозирования газодинамических процессов, необходимые для своевременной выработки управляющих решений по изменению вентиляционных режимов.
3. Алгоритм управления вентилятором местного проветривания, отличающийся использованием механизма нейросетевой (НС) – настройки параметров.

Новизна научных исследований заключается:

- в разработке оригинальных НС-моделей распознавания и прогнозирования газодинамических явлений, которые строятся с использованием специальных переменных, учитывающих характерные особенности газодинамических реализаций, а также с учетом ряда горно-физических и горно-технических факторов;
- в разработке алгоритма управления вентиляторами местного проветривания (ВМП) с нейросетевой подстройкой параметров регулятора режимов их работы, обеспечивающего повышение эффективности функционирования вентиляционной системы при соблюдении правил безопасности в отношении состава рудничной атмосферы.

Обоснованность и достоверность положений, выводов и рекомендаций обеспечивается:

- анализом представительного объема статистической информации, описывающей аэрогазодинамические процессы в шахтах РФ и Вьетнама;
- корректным использованием методов первичного статистического анализа информации, обоснованным применением методов машинного обучения и инструментов прогнозной аналитики (НС-модели), теоретически обоснованным

построением алгоритмов управления активными элементами вентиляционной системы.

- положительными результатами экспериментального моделирования алгоритмов с использованием реальных ситуаций и аэрогазодинамических режимов шахты Мао Хе.

Научное значение диссертации заключается:

- в формировании функциональной структуры аналитической платформы, необходимой для решения комплекса задач шахтной аэрогазодинамики;
- в разработке процедуры распознавания и прогнозирования газодинамических явлений и процессов на основе нейросетевых моделей;
- в разработке моделей управления воздушораспределением в вентиляционных системах шахт, а также оригинального алгоритма управления ВМП с НС подстройкой параметров.

Практическое значение исследования заключается в разработке программных инструментов аналитической платформы, встроенной в систему непрерывного мониторинга концентрации метана на добычном участке шахты, которые проходят апробацию в рабочем режиме на шахте Мао Хе. После тестирования и внесения возможных модификаций разработки автора будут приняты к эксплуатации и включены в состав программного обеспечения автоматизированной системы управления шахты Мао Хе.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2017», Международной научно-практической конференции «50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли» (Москва, 13-16 ноября 2017), I-ой Международной научно-практической конференции «Шаг в будущее: Искусственный интеллект и цифровая экономика» (Москва, 4-5 декабря 2017), а также на научных семинарах кафедры «Автоматизированные системы управления» НИТУ «МИСиС» (2016 – 2018 гг.).

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 7 печатных работах, 3 из которых в издании из перечня рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, списка использованной литературы из 115 источников, включает 53 рисунка и 8 таблиц.

Автор выражает глубокую признательность научному руководителю профессор, д.т.н. Темкину Игорю Олеговичу, а также коллективу кафедры АСУ, и института ИТАСУ НИТУ МИСиС за внимание и поддержку, инженерно-техническим работникам шахты «Мао Хе» за оказанную помощь при проведении шахтных исследований и при подготовке материалов диссертации.

Глава 1. Анализ условий отработки угольных пластов и причин аварий в шахтах Вьетнама. Использование информационных технологий и систем для повышения безопасности горных работ

1.1. Анализ горно-геологических и горнотехнических условий на шахтах Вьетнама

Национальная корпорация по добыче угля и других минеральных ископаемых Вьетнама «ВИНАКОМИН» была создана 10 октября 1994 г. В настоящее время около 95% угольной продукции во Вьетнаме производится на шахтах объединения «ВИНАКОМИН». В частности, угольной продукции в 2015 г. было произведено 43,5 млн т. «ВИНАКОМИН» управляет более чем 25 угольными шахтами и 6 карьерами. Большая часть запасов угля расположена в северной части страны – в провинции Куангнинь, где добывается антрацит, а в южной части страны в дельте Красной реки добывается бурый уголь. Помимо этих угольных месторождений небольшие запасы угля расположены в центральной части страны [36,37,38,39].

Уголь во Вьетнаме является основным видом энергетического сырья. На территории страны известно около ста угольных месторождений и углепроявлений разной степени изученности. Основные действующие угледобывающие предприятия расположены в северной части страны. Разведанные и предварительно оцененные запасы углей категорий А+В+С1+С2 Вьетнама составляют 20,9 млрд т, в том числе каменных – 20 млрд т и бурых – 900 млн т. По некоторым оценкам, прогнозные ресурсы угля страны достигают 57–70 млрд т (в т.ч. каменные – 20 млрд т, бурые – 37–50 млрд т) [37,41].

Наибольшее промышленное значение имеет каменноугольный бассейн Куангнинь на северо-востоке страны. В разрезе угленосных отложений отмечается от десяти угольных пластов мощностью 2-8 м (на западе) до двадцати пластов мощностью от 10-15 до 30-40 м (на востоке). Максимальная суммарная мощность угольных пластов составляет 16 м на западе и 136 м на востоке. Угли бассейна относятся к антрацитам с влажностью 1-3%, зольностью 7-15%, реже до 30% (месторождение Мао Хе); содержанием летучих веществ 2,8-8,7%, серы общей – 0,2-1,2%, с высшей теплотой сгорания 33,5-39,2 МДж/кг. Метаморфизм углей увеличивается с глубиной и по лицевалу (с востока на запад). Запасы углей составляют 3,6 млрд т.

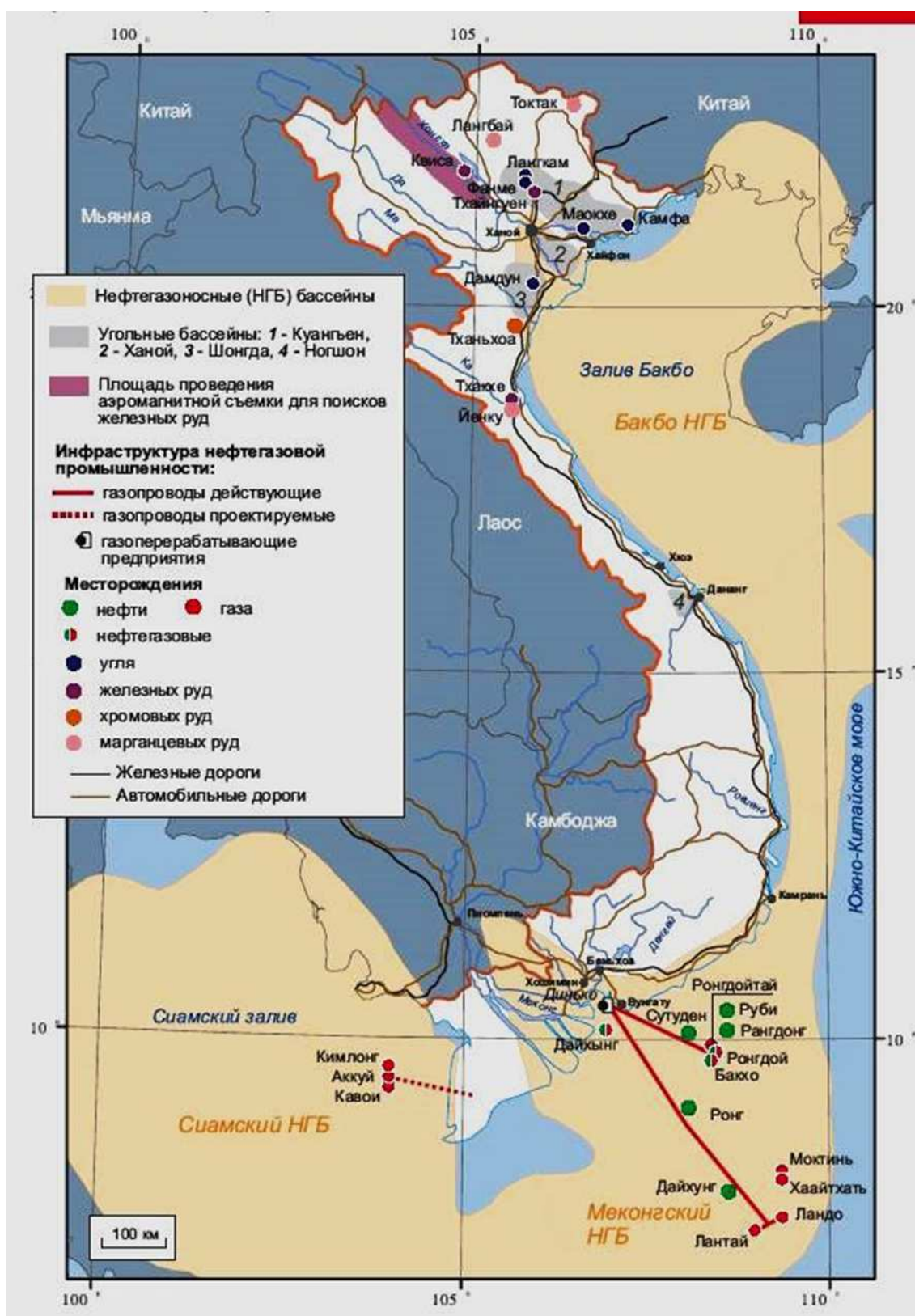


Рис. 1.1. Каменноугольный бассейн Куангнинь во Вьетнаме

Наиболее крупные месторождения бассейна: Камфа, Хон Гай, Уонг Би, Ванг Зань, Мао Хе, Донг Триеу. Во всех перечисленных месторождениях, за исключением трёх последних, угли относятся к антрацитам и полуантрацитам.

Уголь во Вьетнаме является основным видом энергетического сырья. В настоящее время потребность в угле во Вьетнаме составляет не менее 60 млн т в год. Основными потребителями угля являются ТЭЦ и металлургическая промышленность. Фактические объемы добычи в 2013 г., по данным компании ВИНАКОМИН составили 40,4 млн т. Из них 14,3 млн т экспортированы за рубеж. Выполнение перспективных планов добычи угля во Вьетнаме (рис.1.2) возможно только при более полной реализации имеющегося потенциала угольных месторождений и действующих шахт [37, 39, 40].

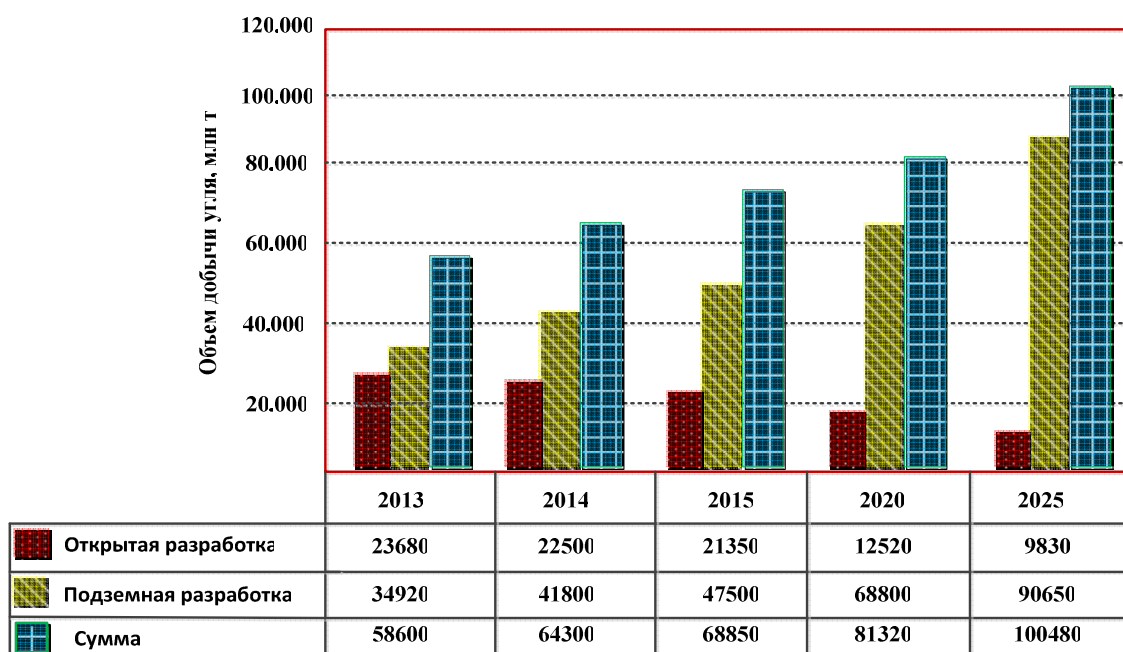


Рис.1.2.Планируемые объемы добычи угля во Вьетнаме с 2013 до 2025 г.

Наибольшее промышленное значение имеет каменноугольный бассейн Куангнинь, расположенный на северо-востоке страны, с запасами углей более 4,1 млрд т. В разрезе угленосных отложений данного бассейна отмечается от 10 угольных пластов мощностью 2-16 м на западе до 20 пластов мощностью от 10-15 до 30 - 40 м на востоке. Угли бассейна относятся к антрацитам с влажностью 1-3 %, зольностью 7-30 % (месторождение Мао Хе), содержанием летучих веществ 2,8-8,7 %, серы общей 0,2-1,2 %, с высшей теплотой сгорания 33,5-39,2 МДж/кг. Метаморфизм углей увеличивается с глубиной с востока на запад [37, 38, 39].

В условиях месторождения Куангнинь наибольшую сложность представляет отработка угольных пластов под объектами, расположенными на поверхности (рис.1.3), что связано с необходимостью использования технологий, исключающих опасные деформации данных объектов при их подработке. По данному фактору только на месторождении Мао Хе осложнена отработка более 23 млн т ликвидных антрацитов.



Рис.1.3. Распределение запасов месторождения Мао Хе под объектами различного назначения.

Применяемые в настоящее время на шахтах Вьетнама технологии отработки мощных крутых пластов, предусматривающие управление кровлей в очистных забоях полным обрушением (рис.1.4), не могут быть использованы под объектами, расположенными на поверхности. Опускание поверхности при использовании этих технологий составляет от 1 до 3 м, углы наклона границ мульды сдвижения 60° - 70° . При таких параметрах мульды сдвижения сохранить объекты на поверхности практически невозможно [40,41].

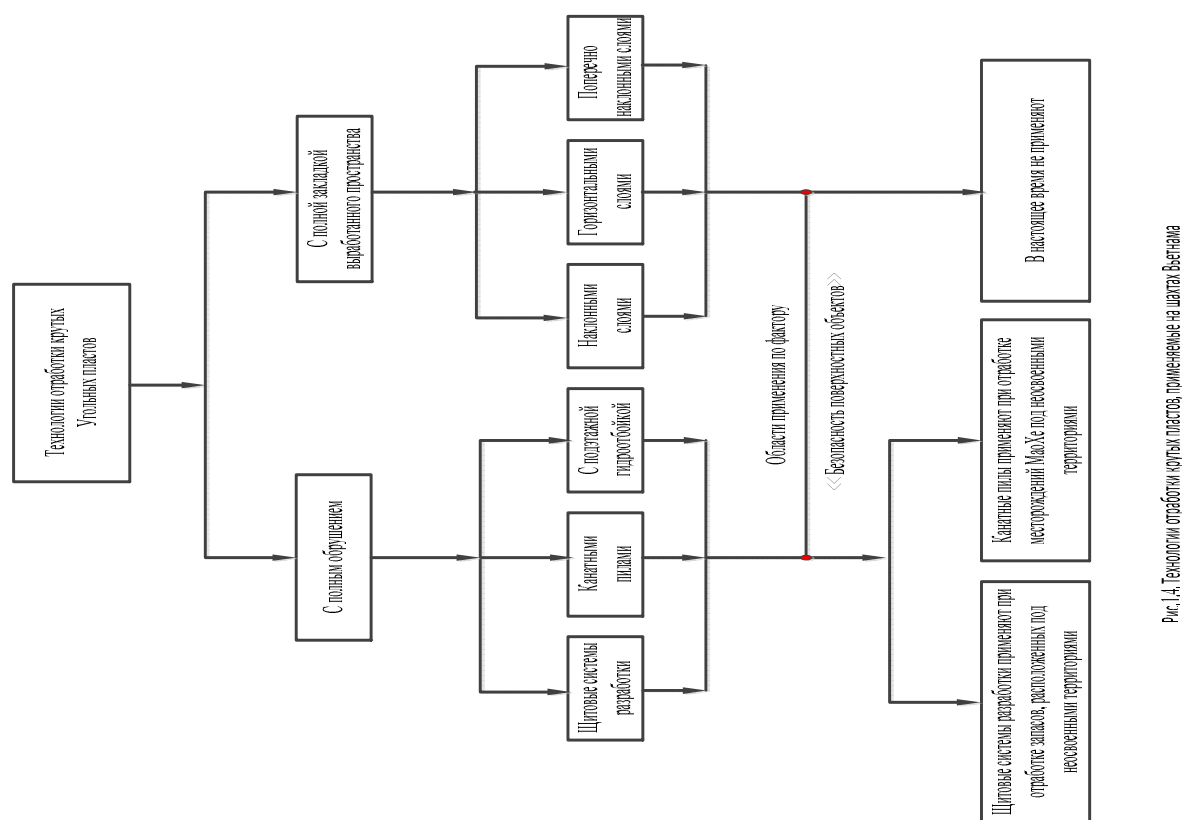
К числу перспективных способов, создающих объективные предпосылки для отработки мощных крутых угольных пластов под объектами, расположенными на поверхности, относятся технологии с полной закладкой выработанного пространства [40].

Реализация этих технологий наиболее эффективна при отработке в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях: пластов осложненных дизъюнктивными геологическими нарушениями, склонных к самовозгоранию

углей, при значительной обводненности вмещающих пород, при залегании в кровле пласта трудно обрушающихся пород, при отработке сближенных пластов, а также пластов, опасных по внезапным выбросам угля и газа.

С увеличением глубины горных работ экономическая и социальная эффективность использования технологий с полной закладкой выработанного пространства возрастает. Мировой опыт отработки месторождений твердых полезных ископаемых свидетельствует о том, что полная закладка выработанного пространства позволяет, как правило, сохранить земную поверхность и расположенные на ней промышленные и экологические объекты от разрушения.

Прочностные и деформационные параметры закладочного материала, его допустимая усадка, полнота закладки выработанного пространства и другие характеристики определяют в зависимости от значимости объектов на поверхности (рис.1.4) и горно-геологических условий залегания угольного пласта.



1.2. Обзор аварий в шахтах мира

Добыча угля во всех странах мира сопровождалась авариями и катастрофами, в результате которых пострадали миллионы горнорабочих. Перечень только наиболее крупных аварий и катастроф, происшедших в XX-XXI веке на зарубежных шахтах, представлены в таблице 1.1, свидетельствует о большом количестве человеческих жертв на угольных предприятиях [86].

В мире ежегодно травмируются до 200 тыс. шахтеров в том числе 6-10 тыс. чел. со смертельным исходом. Наибольшее число травм происходит на шахтах Китайской народной республики (КНР), где ежегодно в результате несчастных случаев на угольных шахтах гибнет более 1000 шахтеров, а в 1995 году число погибших в этой стране превысило 10 тыс. 400 горняков. Только в период с 1990 по 2000 г. в КНР произошло 27 мощных взрывов газа и пыли, в результате которых погибло 1908 человек [86].

За последние 30 лет даже на относительно мало аварийных польских шахтах произошло 15 взрывов метановоздушной смеси, при этом пострадало 426 человек, в т. ч. 219 - смертельно [86]. В этот период имели место 17 катастрофических взрывов газа и пыли на шахтах Российской Федерации, Югославии, Японии, а также в Федеративной Республике Германия, Турции, Перу, Тайване, Мозамбике и др. Наибольшее число смертельно пострадавших в целом и на 1 млн. тонн добычи угля среди ведущих угледобывающих стран приходится на Китай и Украину.

В других же странах, кроме КНР, при значительном росте добычи угля число смертельных случаев снизилось в два и более раз. Особенно характерен низкий уровень травматизма на угольных предприятиях Австралии и США. Резко уменьшился такой травматизм на 1 млн. т добычи в ЮАР, где достаточно сложные горно-геологические условия в угольных шахтах.

В период с 1995г. по настоящее время на шахтах объединения «ВИНАКОМИН» Вьетнама произошло 8 взрывов метана, погибли 72 человек. Обобщение по указанным авариям приведено в табл. 1.2.

Таблица 1.1 – Наиболее крупные катастрофы, происшедшие во Вьетнаме и зарубежных угольных шахтах в XX-XXI веках [86].

Год	Страна	Наименование шахты (фирмы, компании, города, штата, бассейна)	Причины аварии	Число смертельно по страдавших
1	2	3	4	5
1908	Германия	Радбод, Вестфалия	Взрыв	335
1908	США	Мариани, г. Питсбург	Взрыв	300
1908	США	Ш.Общества св. Павла Черри	Взрыв	260
1909	США	Черри	Пожар	267
1910	Мексика	Паоло	Пожар	200
1910	Англия	Ш. № 3, Халтон	Пожар	344
1911	США	Ш. Никевилле, штат Тенеси	Пожар	202
1911	США	Претория	Пожар	341
1912	Япония	Юбари, остров Иессо	Взрыв	283
1913	Англия	Сенгенгенидд	Взрыв	439
1913	Англия	Юниверсал, Кардифф	Взрыв	427
1914	Колумбия	Хильрест, Кельгтон	Взрыв	206
1942	Япония	Хонкейко, Маньчжурия	Взрыв	1527
1946	Германия	Гимберг	Взрыв	404
1958	Индия	Анансоль	Взрыв	218
1962	Германия	Луизенталь	Взрыв	299
1963	Япония	Микава	Взрыв	457
1965	Индия	Бохори	Взрыв	375
1965	Югославия	Добрня	Взрыв	375
1965	Япония	Яmano	Взрыв	331
1969	Мексика	Барратерано	Взрыв	300
1969	США	Консол № 9, Консолидейшн Коул	Взрыв	78
1972	Родезия	Банки	Взрыв	400
1975	Польша	Силезия	Взрыв	34
1975	Индия	Часнала	Взрыв	431
1975	Индия	Дханабад штат Бихар	Взрыв	272
1982	Англия	Кардован	Взрыв	40
1983	ЮАР	Хлобейн	Взрыв	64
1985	Франция	Симон	Взрыв	22
1988	ЮАР	Видпнатерсранд	Взрыв	32
1988	Япония	Минами Юбара	Взрыв	61
1989	Перу	Наска	Взрыв	205
1989	Югославия	Скотка	Взрыв	90
1990	Югославия	Добрня	Взрыв	178
1992	Россия	Им. Шевякова ПО Юкузбассуголь	Взрыв	25
1992	Турция	Казлу	Взрыв	201
1993	Россия	ш.Центральная, Челябинскуголь	Взрыв	26
1995	Россия	ш.Первомайская, Северокузбассуголь	Взрыв	45
1997	Россия	ш.Заряновская ПО Южкузбассуголь	Взрыв	67
1997	Россия	ш.Центральная ПО Воркутауголь	Взрыв	62
1997	Россия	Баренцбург, Шпицберген	Взрыв	23
1997	Турция	Армушкук	Взрыв	217
1998	Китай	Ляонинь	Взрыв	77
1999	Китай	Северо-восточный бассейн	Взрыв	48
1999	Украина	им.А.Ф.Засядько	Взрыв	39
2000	Китай	Мучунгун	Взрыв	118
2000	Украина	им.Н.П.Баранова	Взрыв	80
2007	Украина	им.А.Ф.Засядько	Взрыв	104
2007	Россия	Ульяновская	Взрыв	111
2007	Россия	Юбилейная	Взрыв	39
2008	Казахстан	Абайская	Взрыв	39
2010	Россия	Распадская	Взрыв	93
2013	Россия	Шахта № 7 - Киселёвск	Взрыв	8
2015	Украина	им.А.Ф.Засядько	Взрыв	32

*Соединённые Штаты Америки (США); Южно-Африканская Республика (ЮАР).

Таблица 1.2. Аварии на шахтах объединения «ВИНАКОМИН»

№	Шахты	Годы	Смены	Время	Погибшие
1	Камфа	1997	II	15:00	1
2	Маохе	1999	I	8:00	19
3	Донг бак	1999	II	19:30	1
4	Шуойлай	2002	I	8:30	7
5	909	2002	II	19:00	6
6	Тхонгтхат	2006	I	8:30	8
7	Хечам	2008	III	1:20	11
8	86-Донгбак	2012	III	5:30	4
9	Шуойлай	2012	II	20:30	11
10	Донг вонг	2014	II	19:30	6
Итого					72

Анализ аварий во Вьетнаме, связанных со взрывами метана, показал, что около 70% аварий связано с неисправностью приборов и в следствие ненадлежащего исполнения требований технической безопасности. Также замечено, что большинство аварий произошли в бремсбергах, в понедельник утром, после двух выходных дней (взрывы произошли на шахтах Камфа, Маохе, Тхонгтхат, Хечам, 86-Донгбак), что свидетельствует о нарушении режимов вентиляции выработок в выходные дни [30,37,40,41].

Некоторые угольные шахты характеризуются высокими метанообильностью и метаноносностью угольных пластов: Маохе, Хечам, Куангхань и др. Категории по метанообильности и метаноносности для шахт установлены в 2014 г. решением Министерства Промышленности и Торговли Вьетнама (Номер: 1541/QĐ-VСТ, опубликовано 06.03.2014). Данные приведены в табл.1.3 [51].

Выбросы метана и связанная с ним взрывоопасность пыли-газо-воздушной смеси в настоящее время являются одними из самых опасных явлений, сопутствующих добыче каменного угля. Выделение метана является в то же время и опасным загрязнением земной атмосферы. Разработка угольных пластов на шахтах, опасных по метану, требует применения специальных технических мер, недопускающих превышение безопасной величины концентрации газа в рудничном воздухе.

Таблица 1.3. Данные по метанообильности и метаноносности для некоторых шахт, за 2012 год.

№	Шахты	Метанообильность, м ³ /Тсут.добычи	Метаноносность, м ³ /Т	Категория шахт
1	Тхонгхат	3,379	1,723	I
2	Зыонгхи	8,466	3,922	II
3	Куангхань	13,24	7,355	III
4	Хечам	10,380	5,023	III*
5	Маохе	22,880	4,217	Сверхкатегорные
Примечание: III* – категория для шахты Хечам, базируется (по правилам для Вьетнама - VN 01:2011/ВСТ, издан 15.02.2011) на данных только о метаноносности угольного пласта [50].				

Основным способом является, в настоящее время, применение вентиляционных схем, обеспечивающих необходимые аэрологические условия в выработках. Однако для обеспечения гарантированных условий безопасности на угольных шахтах Вьетнама требуется, как дальнейшая модификация схем, так и разработка новых подходов к дегазации угольных пластов.

1.3. Анализ причин пожаров и взрывов в шахтах Вьетнама

Категорийность шахт (рудников) по газу - разделение угольных шахт по степени опасности, устанавливаемое по газообильности выработок выемочных участков и шахт (рудников) в целом.

Угольные шахты по метану подразделяются на следующие категории:

I – до 5 м³/т; (количество метана выделяющегося в сутки на 1т. среднесуточной добычи, м³);

II – 5 – 10 м³/т;

III – 10 – 15 м³/т;

IV (сверхкатегоричные) – свыше 15 м³/т или с суфлярными выделениями газа;

V – шахты, разрабатывающие пласты, опасные или угрожаемые по внезапным выбросам угля или газа;

VI – шахты, в которых происходят выбросы породы с выделением метана.

Плановые замеры дебита метана производятся в шахтах негазовых, I и II категорий не менее одного раза в месяц, в шахтах III категории – двух раз в месяц и в сверхкатегорных и опасных по внезапным выбросам угля и газа – трех раз в месяц. На рисунке 1.5 представлено распределение угольных шахт по метанообильности [15, 18, 30, 31].



Рис.1.5. Распределение угольных шахт по метанообильности

В настоящее время подземная добыча угля во Вьетнаме характеризуется следующими условиями:

- Доля добычи угля из шахт опасных по метану, внезапным выбросам и горным ударам – 90%;
- Доля пластов опасных по взрывчатости угольной пыли – 65%;
- Доля пластов склонных к самовозгоранию – 61%;
- Доля пластов опасных по внезапным выбросам угля и газа – 49%;
- Доля пластов опасных по горным ударам – 22%.

С каждым годом наблюдается повышение уровня концентрации горных работ и рост производительности очистных забоев. Стремительный рост нагрузок на очистные забои закономерно приводит к тому, что многие современные шахты переходят к структуре «шахта - лава», когда вся шахтная угледобыча сосредоточивается в одном высокопроизводительном очистном забое. В этих

условиях резко возрастают требования к качеству проектов подготовки и отработки выемочных участков, обеспечению требований промышленной безопасности [37,41]. Вместе с тем, поля таких шахт включают, как правило, свиту пластов, в которой выемка пластов производится поочередно, что необходимо учитывать при планировании горных работ.

В настоящее время на большинстве шахт во Вьетнаме используются схемы подготовки выемочных участков спаренными выработками с оставлением не извлекаемых ленточных целиков, что обеспечивает большую эффективность и безопасность горных работ по сравнению с бесцеликовыми схемами. Длина лав в отдельных случаях превышает 300 метров, длина выемочных участков достигает 2000 и более метров. Целики между выемочными участками на смежных пластах на действующих шахтах оставляются параллельно, под углом или практически перпендикулярно друг другу. Это приводит к формированию зон повышенного горного давления (ПГД) самой разнообразной формы и размеров.

При подготовке выемочных участков спаренными выработками на высоко газоносных пластах в ряде случаев приоритет отдается возвратноточным или комбинированным схемам проветривания в сочетании с комплексными схемами дегазации и изолированным отводом метановоздушной смеси (МВС).

Метан – это простейший углеводород, бесцветный газ без запаха, химическая формула - CH_4 . Мало растворим в воде, легче воздуха примерно в 2 раза. Накапливаясь в закрытом помещении, в смеси с воздухом метан при концентрациях 5,0-15,0 % (по объему) взрывоопасен.

Особенностью метана как опасного производственного фактора является отсутствие у работников ощущения опасности, поскольку он не имеет цвета и запаха. Метан слабо ядовит в больших концентрациях, однако, его действие может усиливаться наличием других токсичных газов. Кроме того, метан относится к группе «парниковых» газов, причем в этом аспекте он является более активным, чем диоксид углерода (углекислый газ). Поэтому выделение его как

в горные выработки, так и в атмосферу Земли из вентиляционных и дегазационных систем шахт приводит к ухудшению состояния природной среды.

Категория шахты по метану определяет уровень «жесткости» требований газового режима, обеспечивающих безопасность работ, а также требований к системам защиты от взрывов. Допустимые концентрации метана в выработках (табл. 1.4) устанавливаются исходя из его взрывчатых свойств [37, 41,51].

Таблица 1.4

Место замера	Допустимая концентрация метана
В поступающих струях (средняя по сечению)	не более 0,5
В исходящих струях забоев, выемочных и подготовительных участков (средняя по сечению).	не более 1,0
В исходящей струе пласта, крыла, блока или шахты в целом (средняя по сечению).	не более 0,75
В местных скоплениях (в любой точке потока).	не более 2,0
В дегазационных трубопроводах.	менее 3,5 или более 25,0

В угольном регионе Вьетнама добывается антрацит с высокой концентрацией CH_4 , в зависимости от степени метаморфизма и глубине угольного пласта, подземных рудников, которые колеблется в диапазоне от $1 \div 3 \text{ м}^3 / \text{т}$.

Взрывчатые свойства метана усиливает угольная пыль, т.е. уголь, размельченный до порошкообразного состояния. Взвешенная в воздухе горючая пыль представляет собой взрывчатую аэрозоль. Пыль представляет собой также и профессиональную вредность, вызывает различные заболевания органов дыхания. Угольная пыль образуется при следующих производственных операциях:

- отбойке угля комбайнами и взрывных работах;
- бурении шпуров;
- погрузке угля погрузочными машинами;
- транспортировке угля конвейерами;

- погрузке на погрузочно-разгрузочных пунктах.

Согласно статистическим данным по наиболее метанообильным шахтам Вьетнама (рис. 1.6) основными причинами загазирования (т.е. превышения допустимой концентрации горючего вещества) за последние 10 лет были отключение электроэнергии (35 %), прочие причины (21 %) и остановки вентилятора местного проветривания ВМП (22%), не связанные с отключением электроэнергии (13 %).

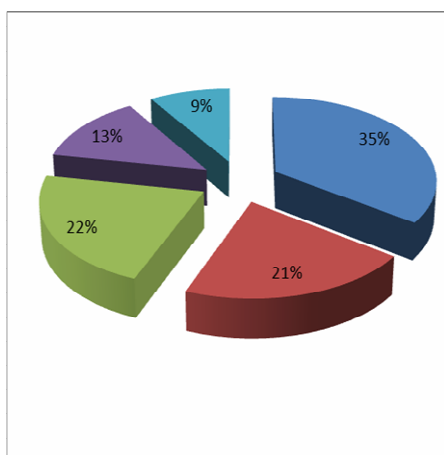


Рис. 1.6. Распределение причин за газирования шахтных выработок.

- отключение электроэнергии
- остановки ВМП по причинам, не связанным с отключением электроэнергии
- нарушение целостности (отставание) вентиляционных трубопроводов от забоя
- местное скопление метана
- прочие причины

Взрывы метана приводят не только к поражению людей, материальным потерям предприятия и потере запасов ценного полезного ископаемого, но и массовым выбросам газообразных и пылевых продуктов взрыва в земную атмосферу. При этом загрязняется также почвенный слой на значительном расстоянии от предприятия, т.к. эти продукты разносятся ветровыми потоками. Загрязняется и водный бассейн, т.к. вредные вещества, образующиеся в результате горения угля (в т.ч. смолы, фенолы и др.), подземными водами выносятся в акватории водоемов на поверхности.

Поэтому предотвращение взрывов метана и угольной пыли имеет существенное значение для снижения вредного влияния угледобывающих предприятий на окружающую среду.

Как правило, подземный взрыв переходит в пожар, и наоборот, эндогенный пожар (возникающий по причине самовозгорания угля) может приводить к воспламенению и взрыву метана.

Для предупреждения взрывов метана в шахте применяют следующие меры:

- использование рациональных технологических систем разработки и вентиляции выемочных участков;
- дегазация угольных пластов, выработанного пространства и других источников метановыделения;
- надежная изоляция отработанных участков и погашение выработок.

Реальное сокращение выделения метана будет обеспечено тогда, когда газ из дегазационных систем будет полностью полезно использоваться, а не выбрасываться в атмосферу.

Предотвращение воспламенения и взрыва метана в шахтах:

- недопущение открытого огня, искрения;
- применение электрооборудования во взрывобезопасном исполнении;
- ограничение буровзрывных работ;
- выполнение требований пылегазового режима шахты.

Комплекс мероприятий для борьбы с шахтной пылью:

- орошение на всех пунктах пылеобразования;
- предварительное увлажнение угольных пластов;
- мокрое бурение или пылеотсос из шпуров;
- установка туманообразователей или водяных завес;
- проветривание в выработках в соответствии с правилами безопасности (ПБ).

1.4. Общая структура системы газового мониторинга шахты

Системы газового контроля шахты с использованием средств контроля телемеханической аппаратуры и вычислительной техники начали вводиться в эксплуатацию в развитом мире с конца 60-х годов 20-го века. В настоящее время в странах с развитой горнодобывающей промышленностью, таких как Япония, Польша, Австралия, США, Великобритания т.д., используют различные типы систем мониторинга шахтных проявлений метана на базе современ-

ных информационных технологий. Общая структура системы мониторинга рудничного газа состоит из двух основных частей (рис. 1.7).

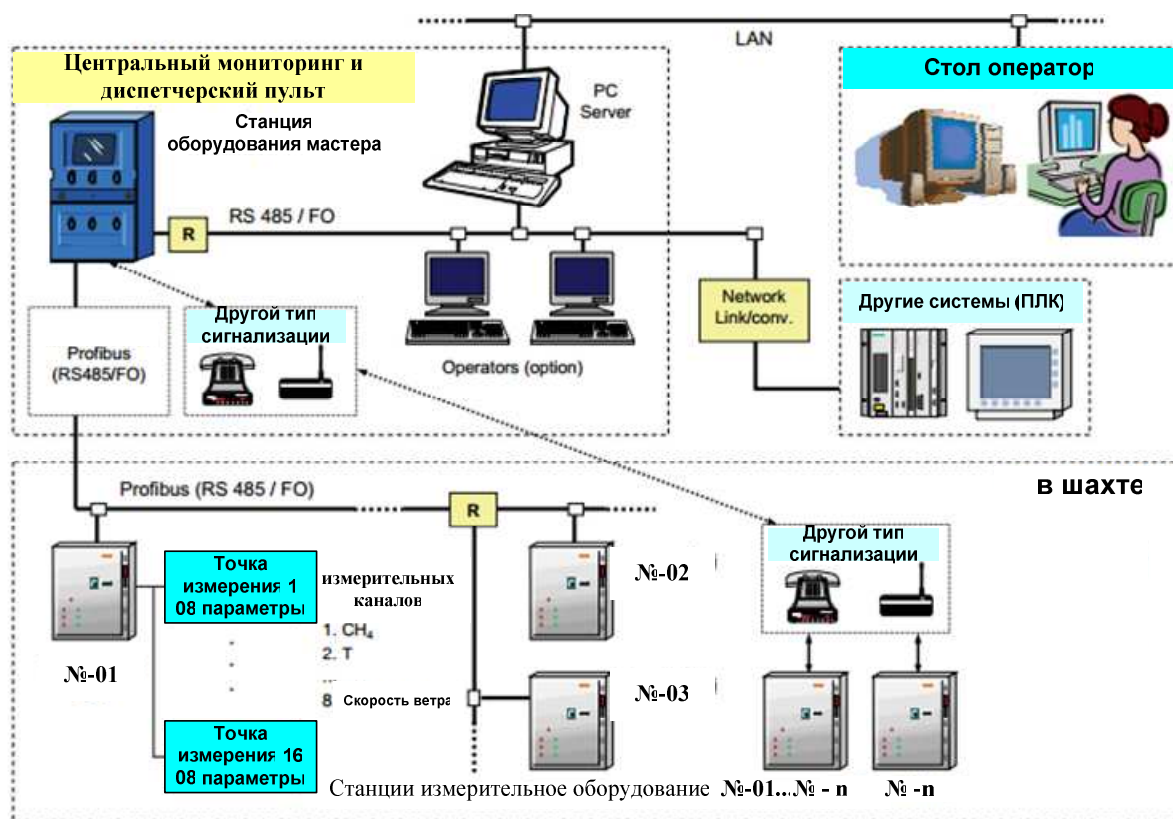


Рис 1.7. Общая структура системы газового мониторинга шахты

А. Устройства на земле

Отдел центрального мониторинга (производственно-диспетчерский отдел). Источником питания для системы мониторинга является источник непрерывного, когда сбой питания возникает с резервной электрической сети или работы генератора. Все параметры системы находятся в отделе центрального мониторинга отделе. Производственный отдел может использовать информацию, но не может вмешиваться в систему; обслуживающий персонал может понять состояние метана в добычах участках через локальную сеть.

Б. Устройства в шахте

- датчики метана (CH_4), которые установлены для контроля метана в лавах, а также в откаточных выработках, вентиляционных выработках, выемочных выработках т.д.;

- датчики скорости воздуха, которые, как правило, устанавливаются в тех же выработках, а также в вентиляционных стволах вентилятора главного проветривания (ВГП);
- устройства преобразования и передачи сигналов;
- автоматические выключатели, обеспечивающие отключение электроэнергии, когда концентрации метан (CH_4) превышает заданный порог ($> 1,2\%$).

1.4.1. Правила установки датчиков метана по горным выработкам шахты

Датчики метана в соответствии с требованиями правил безопасности располагаются:

- в призабойном пространстве тупиковой выработки на расстоянии 3-5 м от забоя;
- в исходящей струе тупиковой выработки - на расстоянии 10-20 м от устья последней;
- у ВМП с электрическими двигателями (для шахт, опасных по внезапным выбросам угля и газа) – на расстоянии не менее 10 м, от вентилятора со стороны забоя тупиковой выработки; в 5-10 м в сторону забоя при расположении ВМП в выработке с исходящей струей; не более 5 м от ВМП со стороны подхода вентиляционной струи при последовательном проветривании подготовительных выработок;
- у передвижной высоковольтной подстанции – на расстоянии 10-15 м от подстанции в сторону забоя под кровлей на стороне, противоположной вентиляционному трубопроводу;
- у распределительного пункта на штреке при щитовой системе разработки, на расстоянии 10-15 м от распределительного пункта;
- в исходящей струе очистной выработки - на вентиляционном штреке в 10-20 м от сопряжения его с очистным забоем;
- в исходящей струе очистной выработки при щитовой системе разработки с буровзрывным способом выемки угля – на входной сбойке в 3 м от входной печи и на вентиляционном штреке в 3-5 м от забоя рассечки;
- в местах сопряжения очистных выработок с участками вентиляционных штреков (бремсбергов), оставляемых в выработанном пространстве для отвода мета-

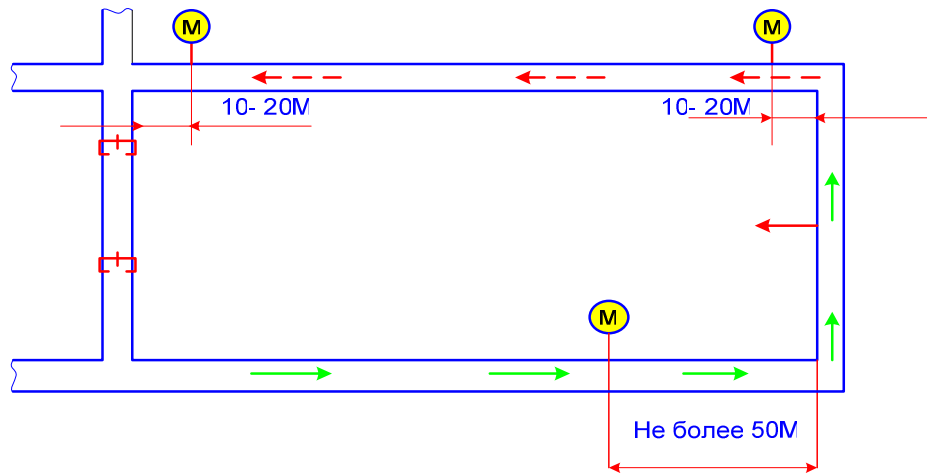


Рис 1.11. Схема размещения датчиков метана при столбовой системе разработки

1.4.2. Системы мониторинга рудничного газа на угольных шахта Мао Хе

Во Вьетнаме, после взрыва газа в 1999 году на шахте Мао Хе, когда погибли 19 человек, институт горной науки и техники начал активное сотрудничество с рядом зарубежных компаний, в частности из Польши и Японии, по внедрению устройств и системы мониторинга газа. На рис 1.12 представлена схема компьютерной системы мониторинга метана - THY- 2000, разработанная японской фирмой KСМЕ.

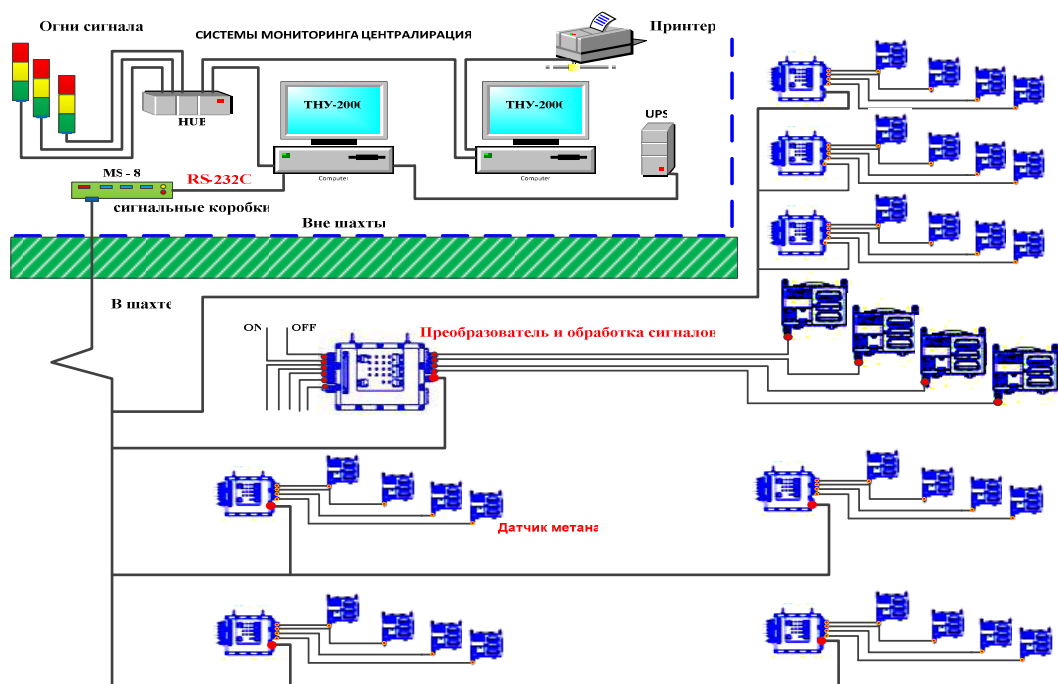


Рис.1.12. Структурная схема централизованной компьютерной системы мониторинга рудничного газа THY-2000.

Система предназначена для обеспечения мониторинга в различных режимах работы шахты круглогодично:

- Количество рабочих дней в году: 365/365 дней. Количество рабочих часов в день: 24/24 часов.

Основным элементом системы является датчик метана - MS-08-01, представленный на рис.1.13.



Рис 1.13. Датчик метана MS-08-01

- Основные характеристики модели: MS-08-01
 - Номинальное напряжение: 15В постоянного тока
 - Максимальное потребление тока: 60 мА.
 - Оптические принципы измерения: Диапазон измерения концентрации (0 ~ 10)% CH₄.
 - Точность диапазона измерений (0 ~ 2)% CH₄: ± 0,2%; (2 ~ 5)% CH₄: ± 0,25%; (5 ~ 10)% CH₄: ± 0,5%.
- Внешние условия:
 - Влажность среды < 95%.
 - Температура окружающей среды: (5-40)⁰С
 - Отсутствие ударов и вибрации.
 - Оборудование для обеспечения искробезопасности ExiadI.
 - Размер: 267 (Ш) x 196 (В) x 102 (Г) мм
 - Вес 4 кг.

- Производитель: КСМЕ (Япония).

1.5. Обзор моделей прогноза газодинамических процессов и алгоритмов управления вентиляцией шахт

Хорошо известно, что процесс подземной угледобычи представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных технологий, эффективное и безопасное функционирование которого невозможно без системной координации этих процессов. Одно из важнейших мест в ряду этих процессов занимают аэрогазодинамические процессы, управление которыми обеспечивается при помощи вентиляционных систем. Аэрогазодинамические процессы обладают рядом особенностей. Эти процессы: невозможно строго описать уравнениями математической физики, чаще используются эмпирические зависимости и модели; они

- многокритериальные, с отсутствием строгих критериев оптимальности;
- многомерные, с изменяющейся топологией и нелинейными связями между параметрами; стохастические и нестационарные, испытывающие воздействие неконтролируемых факторов.

Общепринятая неформальная постановка задачи управления вентиляцией звучит так: «Обеспечить за счет изменения режимов работы вентиляционной системы (как правило, имеются ввиду режимы функционирования вентиляторов главного проветривания, вентиляторов местного проветривания, а также размеры регулируемых сечений определенных выработок сети) такие расходы воздуха, в важнейших точках контроля аэрогазодинамических процессов, которые были бы достаточны для поддержания величины концентрации метана на допустимом уровне». Отметим, что основными точками контроля концентрации метана являются лава и исходящая вентиляционная струя участка (полученные в процессе контроля динамические реализации выступают в качестве важнейших индикаторов). Более формально эта постановка выглядит так:

Задача управления проветриванием шахты в общем виде заключается в том, что в шахтной вентиляционной сети (ШВС) необходимо определить такие законы изменения аэродинамических характеристик регуляторов расхода воз-

духа и управляемых напоров воздуха, при которых концентрации метана в исходящих струях будут удовлетворять условию:

$$C_k(t) \leq C_k^*, k = 1, 2, \dots, p_1$$

при возможном выполнении ряда дополнительных ограничений:

- расходы воздуха в контролируемых ветвях ограничены значениями

$$q_i^{\min} \leq q_i(t) \leq q_i^{\max}, i = 1, 2, \dots, p_2;$$

- управляющие воздействия ограничены техническими характеристиками регуляторов;

- управляющие воздействия удовлетворяют условию минимума мощности, затрачиваемой на проветривание:

$$F(R) = \min \sum_{i=1}^N r_i |q_i|^3,$$

Можно выделить три основных направления исследований, которые исторически сложились в сфере разработки методов и моделей управления вентиляцией метанообильных шахт:

1. Прогнозирование динамики концентрации метана на различных временных интервалах.
2. Определение объемов и скорости перемещения воздушных масс, необходимых для своевременного разбавления и выноса метана из опасных зон.
3. Определение режимов функционирования активных элементов вентиляционной системы, моделей и алгоритмов перераспределения воздуха в условиях сложной топологической структуры вентиляционной сети.

1.5.1. Обзор основных подходов к построению моделей прогнозирования концентрации метана

Можно выделить несколько подходов к решению задачи прогнозирования, сложившихся на сегодняшний день. Очевидно, что динамика концентрации метана зависит от комплекса факторов, таких как: состояние горного массива, работа вентиляционной системы, режим работы добычного комбайна, а также от ряда других технологических факторов. В 60-70е годы прошлого века

значительные усилия ученых были направлены на поиск аналитических зависимостей, позволяющих прогнозировать изменение концентрации метана в зависимости от различных горно-геологических, горнотехнических и горно-технологических факторов. Определенные успехи в этом направлении были достигнуты такими учеными, как А.А. Волков, А.А. Дзидзигури, И.Н. Засухин, Ф.С. Клебанов, Н.Н. Петров, Л.А. Пучков [12,28,29,44,45], однако использовать эти модели в системах оперативного управления, особенно в тот период, было практически невозможно. Другое направление исследований было связано с построением различных классов «кибернетических моделей». Предполагалось, что аэрогазодинамические процессы на добычных участках (объектах автоматического управления), достаточно адекватно описываются уравнениями вида:

$$\frac{dC_k}{dt} = f_k(C_k(t), Q(t), G(t), t), k = 1, 2, \dots, m,$$

где $C_k(t)$ - концентрация метана в исходящей струе k -го выемочного участка;

$G(t)$ - интегральный дебит метана для k -го участка.

В ряде работ В.А. Бойко, Л.М. Местера, В.А. Святного, Л.П. Фельдмана [6,8,26,74], предлагалось строить алгоритмы прогноза и управления на основе различных типов классических моделей (передаточных функций) аэрогазодинамики участка. Определение динамических характеристик объекта выполнялось при этом с помощью корреляционных функций путем решения уравнения Винера-Хопфа.

Разработка математической модели объекта с изложенных позиций опирается на предположение о линейности и стационарности объекта в определенных пределах изменения управляющего воздействия и на определенном интервале времени.

В работе [61] отмечается, что динамические свойства выработанного пространства, обуславливающего дополнительный вынос метана, могут не проявляться при обработке реализаций, полученных в процессе нормальной эксплуатации (без существенного изменения расходов воздуха). Поэтому, рекомендуется строить математическое описание объекта на основе обработки результатов активного эксперимента. В работах Л.А. Бахвалова, И.О. Темкина [7] рас-

сматривается широкий спектр статистических алгоритмов прогнозирования концентрации метана и управления газодинамическими процессами на основе АРПСС моделей. При этом делается попытка учесть нестационарные свойства некоторых газодинамических процессов, протекающих под воздействием определенных факторов, для прогнозирования определенных переходных газодинамических режимов.

1.5.2. Алгоритмы управления вентиляцией

Работы в области автоматизации процессов управления вентиляцией ведутся с начала 60-х годов прошлого века. Большой вклад в развитие теоретических основ и практической реализации таких систем внесли коллективы институтов - ГУА, ДГИ, ДонУГИ, ДПИ, ИГД АН Каз. ССР, ИГД им. А.А. Скочинского, ИГД СО РАН, КНИУИ, МакНИИ, МГИ. Значительный вклад в решение проблемы внесли работы российских ученых, а также ученых Казахстана, Украины: Р.А.Абрамова, Л.А.Бахвалова, В.А. Бойко, А.А. Волкова, М.А. Патрушева, Н.Н. Петрова, В.Я. Потемкина, Р.Б. Тяна, С.В. Цоя, а также ряда других, в результате которых были созданы первые системы управления вентиляцией.

Алгоритмы управления общешахтной вентиляцией, ориентированные, в первую очередь, на управление воздухораспределением, целесообразно разбить на два класса - оптимизационные алгоритмы, в которых не используются данные от датчиков, и алгоритмы управления в замкнутом контуре с использованием оперативной информации. Алгоритмы первого класса подробно исследовались С.В. Цоем, Е.М. Роговым, Г.К. Рязанцевым, Ф.А. Абрамовым, Р.Б. Тяном, В.Я. Потемкиным, А.А. Волковым, К.Г. Акутиным [1,2,11,12] и широко используются для решения задач оптимизации сетей. Использование же этих алгоритмов в замкнутом контуре управления не целесообразно из-за значительных затрат машинного времени.

В большей степени на использование в системе автоматизированного или автоматического управления ориентированы алгоритмы оперативного управления воздухораспределением Р.Б. Тяна, В.Я. Потемкина, Л.П. Фельдмана, Б.А.

Клепикова, В.А.Святного, И.М.Местера, в которых, однако, абсолютно не учитывается стохастический и нестационарный характер отдельных параметров ШВС.

В ряде работ, выполненных в МГИ, рассматриваются статистические подходы к решению воздухораспределительных задач, развивающие идеи нелинейного статистического оценивания применительно к сетевым уравнениям Кирхгофа [20]. Подробная классификация статистических моделей и методов управления проветриванием в ШВС дана в монографии Л.А. Пучкова и Л.А. Бахвалова [44,45,46]. Интересный подход, основанный на динамическом расчете депрессий и оперативном «связывании» вентиляционной сети за счет устранения несоответствий по расходам воздуха и давлениям, предложен в работах С.З. Шкундина и его учеников. Подход, по-видимому, обеспечивает возможность оперативно и достаточно точно решать задачу естественного воздухораспределения, однако, не исследовался в задачах управления.

Говоря в целом о проблеме автоматизированного управления вентиляцией можно выделить несколько основных этапов развития данного направления.

В результате выполненных работ на первом этапе были созданы системы автоматизированного контроля за газовыми режимами в шахтах, нашедшие широкое применение как на территории СНГ, так и за рубежом. Подобные системы значительно улучшили и расширили возможности оперативного контроля газовой обстановки и существенно повысили безопасность ведения горных работ. Дальнейшее развитие систем автоматизированного контроля позволило создать ряд экспериментальных систем автоматизированного управления вентиляцией с дистанционной, операторской отработкой требуемых режимов воздухораспределения.

1.5.3. Модели прогнозная аналитики в задачах управления вентиляцией шахт

Еще в 80-е годы прошлого века стало понятно, что методы и модели, предлагаемые в рамках парадигмы искусственного интеллекта, вполне уместны

и, возможно, эффективны при решении различных задач, связанных с аэрогазодинамикой шахт. В РФ были разработаны принципы интеллектуального управления вентиляцией шахт, построен ряд моделей и алгоритмов прогноза и управления с использованием экспертных правил и искусственных нейронных сетей [92]. Однако, значительных практических результатов в 80-90-е годы получить не удалось.

Дело в том, что часть условий (наряду с ранее перечисленными), которые, как считается, являются необходимыми для успешного применения методов ИИ, не могли быть выполнены:

- отсутствовала возможность оперативно собирать и хранить в достаточном объеме экспериментальную и фактическую информацию по технологическим процессам, по предприятиям и, конечно, по отрасли в целом;
- экспертное сообщество выглядело разобщенным; сформировавшиеся в области управления аэрогазодинамикой школы не находили общего языка, что не позволило построить действительно работоспособные системы;
- отсутствовала соответствующая мотивация со стороны руководства отрасли

В последние 15-20 лет, параллельно с интенсивным развитием и внедрением в различные области новой платформенной технологии обработки и анализа информации (аналитические платформы), появилось значительное количество работ, в которых авторы применяют для решения различных шахтных вентиляционных задач отдельные инструменты прогнозной аналитики. Так, например, в работах [55] авторы с использованием значительного числа обучающих примеров, формируют дерево продукционных правил для оценки рисков возникновения аварийных ситуаций в метанообильных шахтах (выбросы угля, выбросы газа, взрывы газозвдушной смеси, пожары), опираясь на ряд горно-геологических и горно-технологических показателей. В работе [57] для задачи прогнозирования роста концентрации метана используются нечеткие формализмы. Достаточно общий подход к оценке работоспособности вентиляционной системы в целом, с анализом возможностей применения отдельных инструментов для решения тех или иных задач предложен в работе [63]. В последние не-

сколько лет, как известно, значительное внимание при управлении сложными объектами уделяется построению ПИД-регуляторов с нейросетевой подстройкой параметров. В работе [17], например, обсуждается возможность применения такого подхода к задаче управления вентиляционной установкой. В системе комплексного мониторинга безопасности (задача более широкая, нежели анализ газодинамики и управление шахтной вентиляцией), созданной при участии ИПКОН РАН реализованы технологии экспертного анализа различных реализаций. Таким образом, можно констатировать, что сегодня проявляется определенный интерес к использованию методов прогнозной аналитики для решения задач управления вентиляцией. Возможность создания аналитической платформы для интеллектуального мониторинга аэрогазодинамических процессов и управления вентиляцией шахты, сегодня обусловлена рядом факторов:

- наличием измерительных устройств и систем, в которых реализуются различные физические принципы контроля разнообразных параметров технологических процессов и горного массива (электрические, механические, акустические, аэрогазодинамические, гидроаналитические, пространственно-навигационные, лазерные и др.);
- постепенным включением в технологические процессы роботизированных и автономных робототехнических устройств;
- развитием аппаратно-программных средств, обеспечивающих непрерывный мониторинг множества параметров, характеризующих «ежесекундное» состояние шахты.

Однако, комплексных решений в данной области пока не предложено.

1.6. Выводы

1. Проведенный анализ процессов подземной угледобычи показал, что сегодня во Вьетнаме вопросы повышения безопасности ведения горных работ в метанообильных шахтах являются чрезвычайно актуальными. При этом используется комплекс организационно-технических мероприятий, а именно: проводятся ежегодные оценки метанообильности и метанообильностей пластов

на шахтах используется взрывозащищенное электрооборудование, применяются взрывчатые вещества и детонаторы, протестированные по условиям безопасного использования на шахтах; проводится периодическое обучение шахтеров на курсах по безопасности горных работ на угольных шахтах.

2. Наряду с этими мерами важнейшую роль в поддержании высокой эффективности угледобычи при обеспечении требуемого уровня безопасности играют системы комплексного мониторинга и управления в вентиляционных системах шахт по газовому фактору, внедрение элементов которых идет уже около 20-ти лет.

3. Информационные технологии сегодня позволяют искать комплексные решения для задач анализа и прогноза газодинамических ситуаций, опирающиеся как на экспертный опыт и суждения, так и на значительные объемы оперативной сенсорной информации различного типа, которая аккумулируется системой мониторинга. В связи с этим представляется весьма своевременной разработка аналитической платформы для построения моделей распознавания, прогнозирования и управления, как элемента системы мониторинга.

4. Использование эффективных инструментов обработки и трансформации данных, а также краткосрочного прогнозирования значений концентрации метана в определенных точках шахтной вентиляционной сети, должно способствовать повышению точности прогнозов, а, следовательно, повышению эффективности процессов управления вентиляцией.

5. Основное место в системе управления вентиляционными режимами занимают вентиляторы местного проветривания. Для разработки эффективных алгоритмов управления вентиляцией необходимо:

- разработать набор нейросетевых моделей, обеспечивающих требуемую точность решения задач распознавания газодинамических явлений и прогнозирования газодинамических процессов.
- разработать алгоритм управления вентиляторами местного проветривания (ВМП) с использованием гибкой настройки параметров регулирования режимов их работы.

Глава 2. Принципы построения аналитической платформы мониторинга аэрогазодинамических процессов и управления вентиляцией в шахтах

2.1. Основные задачи, решаемые в рамках аналитической платформы

Как известно, геофизические процессы, развивающиеся во времени и пространстве, в результате воздействия технологий на горный массив являются нелинейными, стохастическими с различными периодами не стационарности. Их поведение определяется большим количеством параметров, часть из которых сложно контролировать или оценивать. Именно поэтому, важным является вопрос выбора такого набора параметров, который можно было бы корректно и эффективно использовать в различных процедурах: идентификации моделей, распознавания газодинамических процессов и ситуаций, прогнозирования изменений основных индикаторов и управления ключевыми показателями.

Более детально, комплекс функциональных задач, которые должны решаться аналитической платформой, включает следующие:

- а. анализ газодинамических реализаций с целью выявления признаков – индикаторов, характеризующих определенные процессы или ситуации, и последующей их интерпретации;
- б. распознавание нештатных ситуаций на основе анализа газодинамических индикаторов и других параметров мониторинга с целью оценки рисков опасного развития технологических процессов;
- с. прогнозирование (при появлении необходимости изменения режимов работы ВМП) динамики концентрации метана в определенных зонах шахтной вентиляционной системы;
- д. вычисление возможных изменений величин расходов воздуха, необходимых для снижения риска развития аварийных ситуаций, в нескольких ключевых ветвях вентиляционной системы при запуске механизма управления (ВМП);
- е. определение моментов запуска и отключения САУ ВМП, а также оперативная подстройка параметров PI-регуляторов частоты вращения основного исполнительного механизма.

Одним из направлений разработки этой системы является создание специализированной программной платформы, позволяющей обрабатывать большие массивы разнородной информации, выполнять анализ с использованием современных инструментов прогнозной аналитики, осуществлять визуализацию возможных ситуативных решений с целью выбора наиболее эффективных. Основные функциональные элементы такой платформы представлены на рис.2.1



Рис. 2.1. Основные функциональные элементы современных инструментов прогнозной аналитики

В настоящей работе не рассматривается часть из представленных функциональных элементов, а в данной главе основное внимание уделено вопросам подготовки информационных массивов для разработки и использования моделей двух типов, а именно:

1. Моделей распознавания предаварийных ситуаций на основе анализа и интерпретации динамики концентрации метана в определенных точках вентиляционной сети.

2. Моделей прогноза динамики концентрации метана для использования в системе оперативного планирования режимов работы ВМП.

2.2. Структура информационной базы интеллектуальной аналитической платформы

Рассмотрим вначале общие вопросы структурирования и классификации информации, необходимой для управления рассматриваемыми процессами. В работе [64] было показано, что эффективность реализации интеллектуальных систем управления (к этому типу систем может быть отнесена и система, элементы которой разрабатываются в работе) зависит от объема и организации взаимодействия разнородных знаний.

В общем случае, при формировании информационной базы для интеллектуального мониторинга отдельных процессов и управления шахтой в целом, мы будем иметь дело со следующими типами информации:

I_0 – архивы оперативной сенсорной информации, получаемой при помощи мониторинговых систем, включая:

- данные о физических параметрах горно-технологических процессов;
- данные о параметрах состояния технологического оборудования;
- данные диспетчерского контроля и управления.

I_Φ – информационные массивы фактографической информации, включая:

- геологические информационные базы;
- технологические информационные базы, содержащие детальные планы и схемы ведения горных работ;
- информационные базы, в которых хранятся основные параметры и рабочие характеристики технологического оборудования.

I_T – массивы текстовой информации (архивы научно-технических журналов монографий, патентов и тд.), которые должны быть каким-то образом структурированы для последующей экстракции определенных фактических научных знаний. Эти знания могут быть ранжированы по уровню надежности (достоверности) и глубине и, возможно (?) разделены на три уровня:

К1 - фундаментальные знания - универсальные (устоявшиеся, классические) физические законы в форме уравнений математической физики и т.п.

К₂ - эмпирические знания - обобщения экспериментальных исследований и практического опыта, которые могут быть выражены в форме закономерностей, т.е. устойчивых тенденций, а также аналитических или графо-аналитических зависимостей

К3 - эвристические знания - отражение конкретного практического опыта специалистов в форме классических продукционных или нечетких правил.

Очевидно, что база знаний системы мониторинга технологических процессов в шахте может содержать правила различной структуры. В данной работе, в основном, использовались правила вида: $F_1(I_o, I''_o, I_{om}) \rightarrow S$, где

I_o – контролируемые аэрогазодинамические параметры;

I''_o - искусственные переменные, полученные в результате различных трансформации реализаций $C(t)$ – концентрация метана и $Q(t)$ – расход воздуха;

I_{om} – параметры, описывающие состояние добычного комбайна;

S - множество распознаваемых газодинамических ситуаций, включающее технологические нарушения (отказы технологического оборудования), газодинамические явления и процессы, часть которых может трактоваться как аварийные.

Общая структура взаимодействия основных информационных блоков аналитической платформы, в ходе которого осуществляется формирование наборов, необходимых для построения моделей (dataset) представлена на рис.2.2. Поскольку, основу данной процедуры составляет экспериментальная информация, то следует провести классификацию основных видов шахтной информации.

Взаимодействие информационной базы с внешней средой осуществляется при помощи автоматических сенсорных устройств, используемых для контроля основных параметров мониторинга.

Экспертная информация - это любая информация, поступающая от профессионалов-аналитиков или оперативно-диспетчерского персонала. Эта информация, представленная в невербальной форме, требует предварительной обработки и структурирования (при этом могут быть использованы лингвистические переменные с нечеткими функциями принадлежности или специальные оценочные функции)

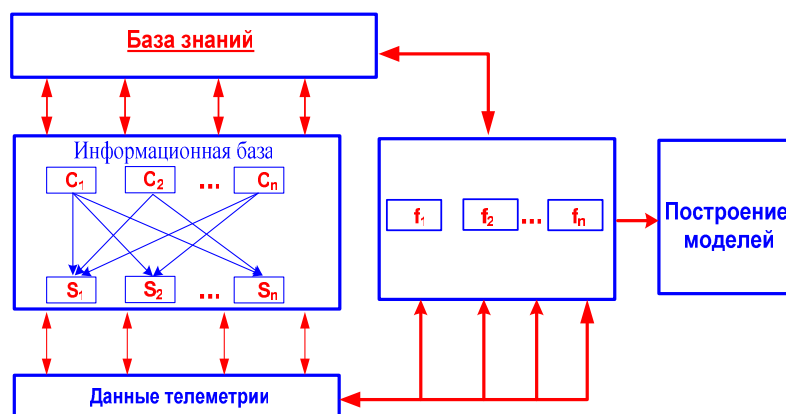


Рис 2.2. Обобщенная схема формирования и функционирования аналитической платформы

Здесь f_1, f_2, \dots, f_n – набор заранее настраиваемых функций, осуществляющих последовательность преобразований исходных массивов информации (первичная обработка, трансформация, формирование и включение искусственных переменных). На рис. 2.3. представлена последовательность всех задач, при решении которых использовались подготовленные в рамках аналитической платформы информационные массивы. Основное внимание в главе 2 уделяется конкретным процедурам, позволяющим на основе экспертного анализа и статистической обработки выделить, наблюдая за поведением индикатора (в качестве которого выступает значение - $C(t)$ в различных зонах добычного участка) набор информативных признаков - характерных особенностей в изменении $C(t)$, с помощью которых можно построить работоспособную систему распознавания газодинамических явлений и ситуаций.

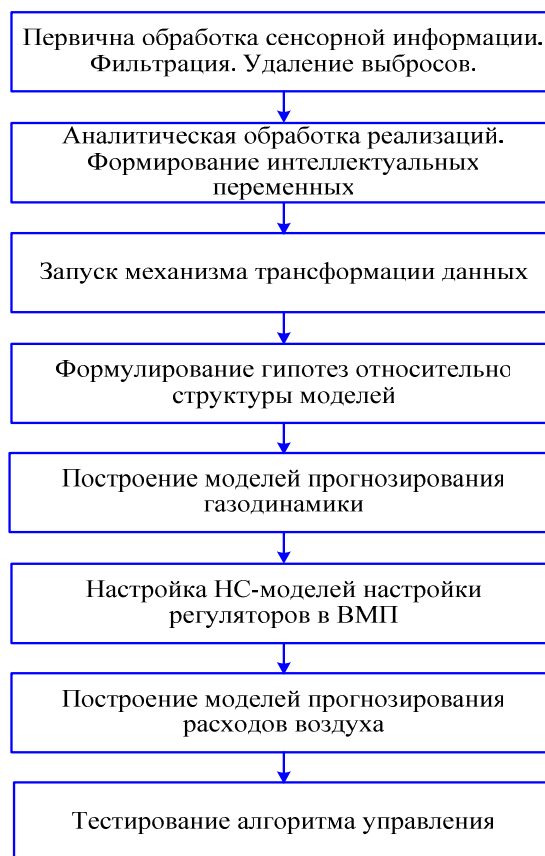


Рис. 2.3. Основные функциональные задачи, решаемые в рамках аналитической платформы

Очевидно, что первый вопрос, на который необходимо дать ответ при построении информационной базы аналитической платформы такой: что представляет собой экспериментальная информация? Иными словами, необходимо определить ее структуру, способы измерения, динамику изменения параметров и, наконец, оценить статистические характеристики динамических процессов.

Параметры мониторинга горно-производственных процессов, контролируемые системой, могут быть классифицированы следующим образом:

1. По типам процессов, которые они характеризуют:
 - 1.1. Основные технологические процессы.
 - 1.2. Вспомогательные технологические процессы.
 - 1.3. Обеспечивающие процессы.
2. По физической сущности измеряемых величин:
 - 2.1. Электрические.
 - 2.2. Электро-механические.

2.3. Механические (динамические режимы).

2.4. Механические (статика).

2.5. Акустические.

2.6. Аэродинамические.

2.7. Газодинамические.

2.8. Микроаналитические.

2.9. Газоаналитические.

3. По функциональным классам задач, для которых используют средства контроля.

3.1. Диагностика состояния оборудования.

3.2. Контроль параметров шахтной атмосферы.

3.3. Контроль состояния массива.

3.4. Контроль экологического состояния.

3.5. Диагностика систем контроля и управления различными технологическими процессами и подсистемами.

4. По математической природе и способам формального описания процессов.

4.1. Детерминированные.

4.2. Стохастические.

4.1.1. Непрерывные.

4.1.2. Импульсные.

4.2.1. Стационарные.

4.2.2. Нестационарные.

4.2.(1,2)1 - Линейные.

4.2.(1,2)2 - Нелинейные.

5. По степени структурированности.

5.1. Структурированные процессы (S_1).

5.2. Слабоструктурированные процессы (S_2).

5.3. Неструктурированные процессы (структурирование возможно) (S_3).

5.4. Неструктурированные процессы (S_4).

Формальная количественная оценка, позволяющая сравнить реализации по степени структурированности, может быть получена при помощи процедур трансформации исходных реализаций и введения специальных информационных индексов.

Формирование базы знаний аналитической платформы, и ее последующая корректировка в ходе оперативного контроля аэрогазодинамических и технологических параметров - это процесс, который включает в себя несколько этапов и который предполагает использование разнообразных алгоритмов обработки разнотипных данных.

Выбор способа обработки экспериментальных реализаций зависит от требований, предъявляемых к универсальности системы и ее конкретного назначения.

В целом, можно говорить о двух классах систем, в рамках которых могут быть применены разрабатываемые методы и алгоритмы. К первому классу отнесем системы, которые предназначены для анализа и прогноза газодинамических процессов, а также оперативного управления вентиляцией конкретных угольных шахт. Будем называть эти системы локальными интеллектуальными системами управления. Ко второму классу следует отнести системы, ориентированные на комплексное решение проблем безопасности горнопромышленных объектов с различными геотехнологическими характеристиками. Эти системы можно назвать глобальными мониторинговыми системами. В настоящей работе основное внимание уделено первому классу систем. Относительно выбора наиболее адекватных форм представления экспертной информации, необходимо отметить следующее:

1. При формировании базы знаний, необходимой для работы аналитической платформы ряд факторов, определяющих характер газодинамических процессов и, в конечном итоге, влияющих на безопасность ведения горных работ, может в явном виде не присутствовать в экспертных правилах.

К этим факторам следует отнести такие характеристики объекта, которые относительно неизменны, то есть такие, период существенного качественного

изменения значений которых несоизмерим с периодом эффективной реакции системы:

A_1 - характеристики угольного пласта (геометрические, геомеханические, физико-химические).

A_2 - характеристики вмещающих пород, необходимые для оценки влияния выработанных пространств на газовый баланс добычного участка.

A_3 - технология обработки пластов и соответствующая ей схема вентиляции добычного участка.

Эти факторы выступают в качестве объекта субъективной оценки экспертов, но могут не рассматриваться в качестве независимых информационных сущностей базы знаний. Обобщенная модель деятельности эксперта в этом случае имеет вид:

$$\exists: A_1 \times A_2 \times A_3 \times E \rightarrow R \vee I, \quad (2.1)$$

где E - множество экспериментальных данных доступных эксперту;

R - база продукционных правил;

I - множество элементарных высказываний (примеров), заданных в табличной форме.

2. При формировании более универсальной базы знаний, наряду с необходимостью решения задачи (1) появляется проблема установления формальных зависимостей между глобальными информационными параметрами ($A_1 \div A_3$) и конкретными характеристиками газодинамических процессов.

В этом случае исходная концептуальная модель наряду с параметрами $A_1 \div A_3$, должна содержать также такие информационные сущности, как

A_4 - схема вентиляции;

A_5 - исходное аэрогазодинамическое состояние (газо-воздушный баланс до начала газодинамического явления);

A_6 - места установки датчиков концентрации метана и скорости воздуха.

Построение концептуальной продукционной модели является крайне сложной задачей. Поэтому будем считать, что исходная информация может быть представлена, либо в форме факторной таблицы, соответствующей различным ситуациям на объекте, либо в невербальной текстовой форме [58,66,89].

Текстовое описание обычно имеет место при апостериорном анализе аварийных ситуаций в шахтах, которое осуществляется группой компетентных экспертов. Формализация этих описаний требует использования специальных алгоритмов. Схема процесса формирования базы знаний аналитической платформы представлена на рис. 2.4.

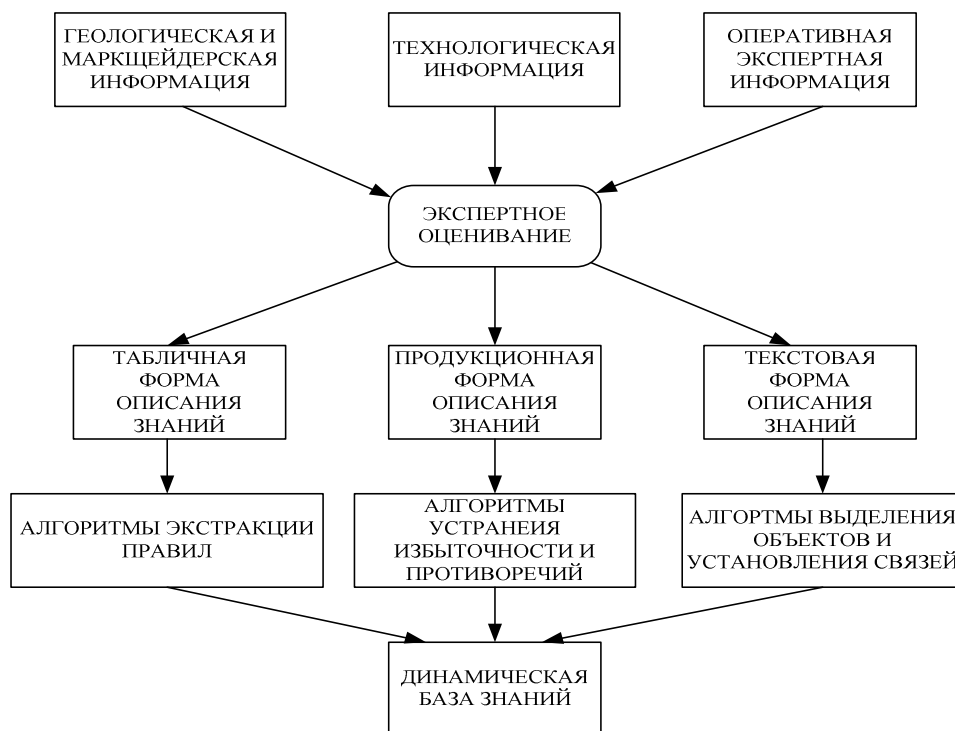


Рис 2.4. Функциональная схема процедуры формирования базы знаний

2.3. Экспертное описание газодинамических процессов

Как отмечалось ранее, экспериментальная информация, получаемая, как в автоматическом режиме, т.е. в процессе оперативного мониторинга, так и в результате специальных исследований, играет существенную роль в формировании базы знаний системы.

Воздействие на горный массив различных технологий приводит к естественному изменению физических параметров, характеризующих его состояние. Определенные комбинации значений этих параметров приводят к необратимым изменениям состояния горного массива, что в свою очередь ведет к неадекватным и непрогнозируемым реакциям среды на воздействие технологии, т.е. к возникновению аварийных горно-технологических ситуаций.

Таким образом, сочетание в рамках мониторинговой системы, контроля физико-химических параметров среды, с контролем состояния технологического оборудования (различного назначения) может обеспечить идентификацию текущей ситуации и прогнозирования ее изменения с позиций предупреждения ее аварийного развития и повышения технологической безопасности в целом.

При подземной разработке газообильных угольных месторождений, в качестве важнейшего и наиболее исследованного индикатора различных геотехнологических ситуаций выступает концентрация метана, измеряемая в различных точках шахтной вентиляционной сети.

Кроме того, и с позиции безопасности ведения горных работ, важнейшей компонентной рудничной атмосферы следует назвать инертный газ метан – CH_4 , который прямо или косвенно является причиной 85% всех тяжелых аварий при разработке подземных угольных месторождений. Поэтому в качестве основного источника информации для формирования базы знаний системы используются многочисленные диаграммы изменения концентрации метана, полученные с помощью аппаратуры регистрации и записи $C_{\text{CH}_4} \%$ в различных точках добычного участка шахты. На рис. 2.5. представлены примеры динамических реализаций метана, зарегистрированные в различные периоды времени на исходящей вентиляционной струе участка шахты Мао Хе.

Опытный эксперт, анализируя подобные динамические реализации, может достаточно точно восстановить оперативную технологическую обстановку, так как:

-технологические процессы, связанные с изменением состояния добычных и транспортных комплексов, энергетических и вентиляционных систем;

- различные нарушения планового регламента;
- горно-геологические явления, связанные с технологическим воздействием на массив;
- проявляются в них достаточно ярко.

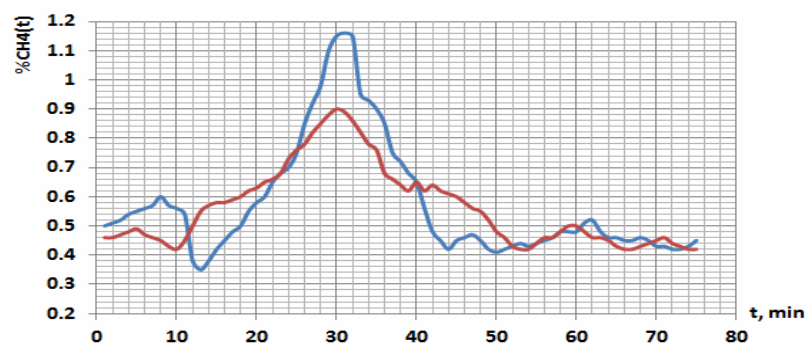
Существуют различные способы математического описания газодинамических процессов, в частности, широкое распространение нашел статистический подход, при котором тем или иным явлениям ставятся в соответствие функции распределения, корреляционные функции или спектральные плотности. Однако эксперт, визуально изучая метан-грамму, не пользуется этим математическим аппаратом для интерпретации причин возникновения газодинамических явлений. Он описывает явления, оперируя такими понятиями, как “длительность загазованного состояния”, “скорость нарастания концентрации метана”, “максимальный скачок амплитуды”, и сопоставляя результаты визуального анализа с имеющейся в его “базе знаний” информацией, выдвигает предположения о возможных причинах, вызвавших характерное газодинамическое проявление.

Использование статистической теории распознавания, основанной на корреляционно-спектральных методах, наталкивается на ряд ограничений, обусловленных спецификой решаемой проблемы:

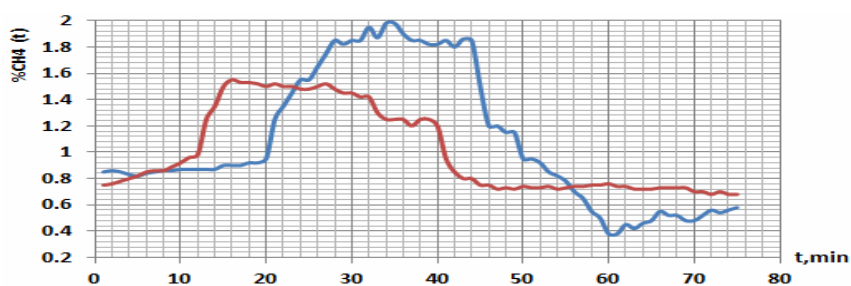
- наличие существенных нелинейностей в эмпирических реализациях;
- отсутствие полноценного исходного статистического материала, который позволил бы построить эффективные и состоятельные статистические модели, учитывающие многообразие горно-геологических и горно-технологических условий проявления газодинамических процессов.

В связи с этим, основной упор сделан на использовании т.н. интеллектуальных переменных, формируемых в результате различных трансформаций исходных реализаций для «кодирования» динамических процессов, с последующим использованием результатов при конструировании алгоритмов распознавания, классификации и интерпретации газодинамических явлений [58,62,66] :

буровзрывные работы (БВР)



Отключение вентиляторами местного проветривания, замена вентиляционных труб



Отключение автоматической газовой защиты

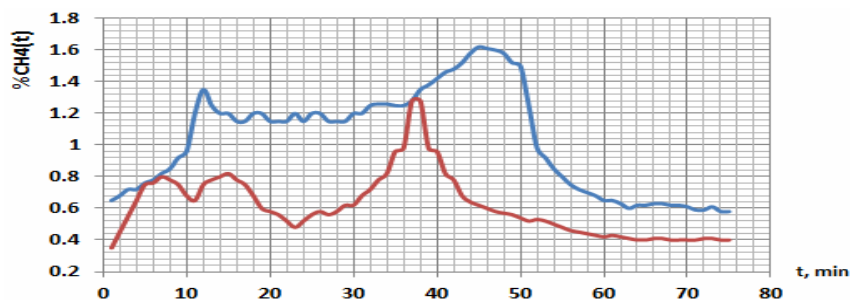


Рис. 2.5. Примеры реализаций концентрации метана в исходящей вентиляционной струе участка, соответствующие реальным явлениям и процессами

Вначале остановимся на условиях (будем называть их внешними факторами), которые определяют поведение газодинамических реализаций. Можно выделить следующие группы.

А1. Горно-геологические факторы, такие как:

- геометрические характеристики угольного пласта;
- вмещающие породы;
- газоносность пласта;
- наличие суфляров;

- комплексные характеристики углей (влажность, зольность, выход летучих, теплота сгорания, содержание серы, крупность отбитого угля);
- разведанные нарушения пласта (характеристики ложной, непосредственной и основной кровли).

A2. Горно-технологические факторы:

- пространственно-временные характеристики добычного участка;
- способ выемки угля;
- способ откатки;
- особенности буро-взрывных работ;
- план развития участка.

A3. Вентиляционные факторы:

- схема проветривания участка;
- схема вентиляционной системы в целом, включая топологию сети, а также количество и координаты мест установки пассивных и активных средств регулирования, а также средств контроля аэрогазодинамических параметров.
- характеристики технических средств вентиляционной системы.

Перечисленные факторы можно рассматривать как достаточно консервативную внешнюю среду, образующую фон для протекания газодинамических процессов.

Рассмотрим теперь более детально процессы и явления, вызывающие характерные флуктуации $C_{CH_4}(t)$ в шахтной вентиляционной сети.

S_1 - основные технологические процессы, осуществляющие воздействие на горный массив, в соответствии с плановым регламентом;

S_{11} - буровзрывные работы;

S_{12} - работа добычного комбайна;

S_{13} - обрушение кровли забоя.

S_2 - нарушение или существенные изменения в системе вентиляции и дегазации:

S_{21} - отключение вентилятора местного проветривания;

S_{22} - подвешивание или замена вентиляционных труб;

S_{23} - пережатие вентиляционных труб;

S_{24} - отключение системы дегазации;

S_{25} - отключение подстанции, т.е. обесточивание аппаратуры АГЗ;

S_{26} - резкое изменение аэродинамического режима за счет внезапного увеличения сопротивления некоторых горных выработок (в частности, открытие и закрывание вентиляционных дверей или регуляторов расхода воздуха).

S_3 - нарушения в системе контроля:

S_{31} - различные виды неисправностей средств контроля;

S_{32} - неисправности (шумы) в каналах передачи информации (в частности, повреждение силовых кабелей);

S_{33} - неисправность средств регистрации информации.

S_4 - горно-физические явления:

S_{41} - резкие выбросы угля и газа, которые в зависимости от реальной технологической ситуации и доступной информации можно рассматривать как внезапные или как прогнозируемые;

S_{42} - горные удары;

S_{43} - суфлярные газовыделения;

S_{44} - пожары в призабойной зоне.

Таким образом, поведение газодинамических индикаторов, может быть представлено в форме функциональной зависимости вида:

$$C_i = \varphi_i(\{A_1\}\{A_2\}\{A_3\}\{S_1\}\{S_2\}\{S_3\}\{S_4\}), i = \overline{1, P} \quad (2.2)$$

где P - количество индикаторов (точек контроля).

Практически, процедура идентификации причин, вызвавших флюктуацию $C_{CH4}(t)$, и интерпретация всей ситуации в целом представляет собой процесс поиска по дереву решений, где элементы A_{ij}, S_{ij} - выступают в качестве вершин.

В результате анализа специальной литературы, а также изучения примеров экспертных описаний различных классов газодинамических явлений был сформулирован ряд достаточно общих неформальных правил, относительно рассматриваемых явлений, а также определены основные экспертные признаки для их описания и классификации.

1. Одним из наиболее характерных газодинамических портретов отличаются процессы проведения буровзрывных работ. Газодинамические реализации этих процессов отличаются легко узнаваемым передним и задним фронтами. Известны несколько подходов к описанию поведения $C_{CH4}(t)$ на исходящей вентиляционной струе участка с помощью аналитических зависимостей [66].

2. Газодинамические реализации, получаемые при работе добычного комбайна, имеют достаточно характерный вид. Процесс распознавания этого технологического процесса (если он не контролируется автоматически) значительно облегчается, если используются эмпирические данные нескольких индикаторов, регистрируемых, например, в исходящей вентиляционной струе лавы, в свежей струе участка или на исходящей участка.

3. При проведении БВР и комбайновой выемки возможна неадекватная реакция горного массива на технологическое воздействие. В этом случае, процесс следует интерпретировать как опасное газодинамическое явление, и учитывать при построении базы знаний интеллектуальной системы обеспечения аварийной безопасности.

4. Газодинамическая реализация, вызванная обрушением кровли, имеет характерный вид для всех газодинамических реализаций данного класса процессов.

Аналогичная ситуация наблюдается для одного из подклассов нарушения режима вентиляции, связанного с остановкой вентилятора местного проветривания.

5. Нарушение режима вентиляции, связанное с отключением автоматической газовой защиты, имеет характерный передний и задний фронт для всех газодинамических реализаций данного класса процессов. Передний фронт данного процесса по форме совпадает с передним фронтом процесса, вызванного проведением БВР, однако задний фронт не подчиняется закономерности, характерной для процесса, вызванного проведением БВР, однако задний фронт не подчиняется закономерности [66].

$$\frac{C_{\max} - C_0}{\lg t} = \text{const}$$

6. Действия различных помех в канале связи, таких как силовая наводка на линию, а также неисправности сенсорных устройств (отключения смещения и др.) определенным образом интерпретируются через газодинамические кривые, которые отличаются характерным высокочастотным спектром с незначительной амплитудой отклонений.

7. Некоторые свойства горного массива, например, малая газоносность пласта, высокая анизотропия угля, наличие трещин и т.д., приводят к неадекватной газовой реакции горного массива на технологическое воздействие. Газодинамические реализации процессов, вызванных неадекватным формированием устойчивого состояния массива, имеют характерный вид для каждого класса процесса. Форма газодинамической реализации процесса, вызванного попаданием в трещину (выделение газа из суфляров) совпадает с формой газодинамической реализации процесса, вызванного остановкой ВМП. Для идентификации необходимо использовать дополнительную информацию о состоянии системы вентиляции в целом.

8. Отключение системы дегазации вызывает газодинамический процесс, который имеет характерный передний и задний фронт. Однако, форма газодинамической реализации процесса, совпадает с аналогичной формой, вызванной

остановкой ВМП. Таким образом, идентификация возможна, если используются несколько индикаторов, в том числе, значения скорости воздуха в исходящей струе лавы.

9. Резкое изменение режима вентиляции (например, уменьшение сечения выработок) приводит к характерной газодинамической картине. Однако, форма переходного процесса определяется вентиляционной схемой участка, а также исходными аэрогазодинамическими условиями. Иными словами, в данном случае также необходимо использовать несколько индикаторов аэрогазодинамических процессов [45,46].

В результате работы с экспертами был определен набор лингвистических термов (словарь информативных признаков) образующих систему координат, в которой можно описывать рассмотренные выше процессы и явления, которые включает следующие:

P_1 - максимальная амплитуда опасного превышения уровня концентрации (A_{\max}), которая определяется как наибольшее абсолютное значение C_{CH_4} на интервале $[t_0, t_f]$.

P_2 - время нарастания (t_H), $C_{CH_4}(t)$ от начала опасного превышения уровня (момент t_0) до величины A_{\max} .

P_3 - время спада (t_c), $C_{CH_4}(t)$ до постоянного уровня C_0 .

P_4 - длительность процесса (T_{\max}), определяется либо с помощью экспертных оценок величин t_f , t_0 в результате анализа метан грамм, либо на основе фактической (план) информации.

P_5 - градиент нарастания концентрации метана $\frac{\Delta C(t)}{\Delta t}$. Способ задания величин - $\Delta C(t)$ и характерного временного периода Δt зависит от конкретного набора реализаций, предъявленных для экспертного анализа. В общем случае может быть задан вектор

$$\{g_1, g_2, \dots, g_k, g_x\}, g_1 = \frac{C(t_0 + \Delta t) - C(t_0)}{\Delta t};$$

$$g_2 = \frac{C(t_0 + 2\Delta t) - C(t_0)}{2\Delta t}, g_k = \frac{C(t_0 + k\Delta t) - C(t_0)}{k\Delta t};$$

$$g_x = \frac{A_{\max} - C_0}{t_H - t_0}.$$

P_6 - общая площадь загазованная (S), определяемая как

$$\int_{t_0}^{t_x} C(t)dt, \sum_{i=1}^{n-1} C(i\Delta t)\Delta t, n = \frac{t_x - t_0}{\Delta t}$$

P_7 - разность фоновых уровней до и после наблюдаемого газодинамического явления (ΔC_Φ).

К перечисленным признакам могут быть добавлены еще два, характеризующих динамику процессов:

P_8 - количество условных минимумов метан грамме n_{\min} ;

P_9 - количество условных максимумов на метан грамме n_{\max} .

Таким образом, это множество параметров определяет “палитру красок”, при помощи которых может быть “изображено” любое газодинамическое явление $\Omega = \{A, B, C, \dots, Y, Z\}$. Каждый из параметров P_1, P_2, \dots, P_m на основе экспертных оценок разбивается на 5+7 интервалов, заключенных между $P_{i\min}, P_{i\max}$. Теперь любое явление может быть автоматически описано при помощи вектора:

$E_i(a_{i1}, b_{i2}, c_{i3}, d_{i4} \dots), i_1 = \overline{1, N_1}; i_2 = \overline{1, N_2}; i_m = \overline{1, N_m}; N_1, N_2, \dots, N_m$ - количество интервалов для каждого параметра.

Множество векторов: $EX = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$, таким образом, описывает в пространстве заданных параметров Ω рассматриваемые нами газодинамические явления.

2.4. Использование специальных (индикативных) переменных для решения задачи распознавания газодинамических ситуаций

Основная идея рассматриваемого подхода заключается в построении алгоритмов распознавания газодинамических ситуаций на основе поиска индикативных параметров газодинамических процессов. Рассмотренный ранее способ обработки результатов экспертного анализа экспериментальных реализаций с использованием заранее определенного экспертами набора информативных признаков имеет ряд недостатков:

1. Необходимо наличие квалифицированных экспертов, способных вырабатывать общие, согласованные принципы оценки того или иного явления. Очевидно, что на практике выполнения этого требования весьма трудно обеспечить.

2. Попытка реализовать возможности систем управления за счет использования ряда дополнительных параметров оперативного контроля, таких например, как горное давление (средствами геоакустического контроля) или температура в около забойной области, потребует длительных дополнительных исследований, прежде чем эксперты смогут оперировать лингвистическими терминами, адекватными данному физическому процессу.

3. Поскольку поведение индикаторов существенно зависит от геофизических характеристик пласта и вмещающих пород, от технологии отработки, от схемы вентиляции участка и начальных аэрогазодинамических условий, экспертные оценки могут считаться адекватными только для конкретных геотехнологических условий. То есть, полученные в результате формальные описания (логико-лингвистические модели) будут иметь локальный характер.

Как отмечалось ранее, изменение концентрации метана во времени - $C\%_{CH_4}(t)$ в различных зонах добычного участка, представляет собой сложный динамический стохастический процесс, структура которого неоднородна и формируется как результат суперпозиции динамических составляющих низкой, средней и высокой частоты. При этом, если высокочастотная часть спектра процесса может рассматриваться, как чисто случайный процесс, инициируемый

воздействием многочисленных неконтролируемых факторов, проявляющихся на относительно коротких временных интервалах $\Delta t \approx 1 \div 5$ мин, а также погрешностью измерительной аппаратуры, то характер остальной части спектра определяется воздействием конкретных геотехнологических факторов. Иными словами, концентрация метана может рассматриваться как чувствительный индикатор любых процессов и явлений:

- состояния угольного пласта;
- конкретных технологических воздействий на горный массив;
- определенных технологических операций;

а также нештатных ситуаций, вызванных отказами или авариями технологического оборудования.

В этом смысле, наиболее характерным является поведение концентрации метана в зонах, непосредственно примыкающих к при забойному пространству, а именно, в исходящей вентиляционной струе лавы и добычного участка, так как добычной участок является основным источником $C_{CH_4}(t)$ в шахтной вентиляционной сети.

Если подойти к описанию поведения индикатора с качественных позиций, умышленно упрощая проблему, можно считать, что при отсутствии технологического воздействия на массив и, в целом, каких-либо технологических операций, а также предполагая, что горное давление является постоянной величиной (по крайней мере на достаточно длительном временном интервале), $C_{CH_4}(t)$ может рассматриваться, как стационарный в широком и узком смысле процесс, с постоянным средним $e(t)$ и дисперсией $\sigma^2(t)$, возможные флуктуации обусловлены такими факторами, как: колебание атмосферного давления, стохастичность аэродинамических параметров и рядом других. В то же время, воздействие факторов геофизической или технологической природы будет вызывать колебания концентрации метана, которые можно рассматривать как переходный процесс. Эти процессы, имеют, как правило, достаточно устойчивую

экспертную интерпретацию в смысле определения возможных причин, вызывающих появление интервалов не стационарности.

В работах Пучкова Л.А. и Темкина И.О. рассматривались отдельные вопросы, связанные с кодированием газодинамических реализаций и исследованием поведения концентрации метана, в качестве индикатора [43, 45, 55, 57]. Данный индикатор представляет собой некоторый случайный процесс $x(t)$, который может быть представлен в виде суммы детерминированной и случайной составляющей $x(t)=x(t)+e(t)$. Случайную компоненту будем считать нормально распределенной случайной величиной $M\{e(t)\}=0; M\{e(t_i)e(t_i)\}=\delta_{ij}\sigma_e$. Такое допущение, как показано в работе [15] не сказывается существенным образом на качестве статистических моделей идентификации и прогнозирования и, следовательно, может быть использовано нами. Вопрос определения величины σ_e для конкретного индикатора не является серьезной проблемой и допускает различные подходы, в частности, может быть, либо использована априорная информация о характеристиках измерительных устройств, либо осуществлено статистическое оценивание данного параметра S^2 , при обработке тестовых экспериментальных реализаций.

Определим интервал времени $[t_0^i, t_H^i]=T$, как интервал экспертного анализа или обучения. Величина этого интервала на практике, может выбираться, в зависимости от решаемой проблемы:

- если речь идет о формировании глобальной информационной системы, то $[t_0^i, t_H^i]$ выбирается в соответствии с реальной длительностью переходного процесса, вызванного воздействием i -го фактора;

- для интеллектуальной системы управления, ориентированной на оперативный контроль процессов, с целью раннего обнаружения аномальностей и идентификации причин, вызвавших флуктуацию метана, выбор интервала $[t_0, t_n]$, обусловлен требованиями, предъявляемыми к оперативности принимаемых решений. Поскольку регистрация параметров мониторинга в условиях шахтной вентиляционной сети осуществляется в дискретные моменты времени,

а интервал контроля Δt зависит от технических параметров используемых сенсорных устройств, пропускной способности каналов связи и характеристик телекоммуникационного оборудования, процесс $x(t)$, можно представить в виде вектора:

$$\tilde{x}(t) = \{\tilde{x}(t_1), \tilde{x}(t_2), \dots, \tilde{x}(t_n)\}; n = \frac{T}{\Delta t} + 1$$

Учитывая, что влияние случайной составляющей может быть априорно оценено.

$$X(S_i) = \{x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i\} \quad (2.14)$$

$$X(S_i \wedge S_j) = \{x_1^{i \wedge j}, x_2^{i \wedge j}, \dots, x_n^{i \wedge j}\},$$

Будем называть (2.10) динамическим образом явлений $S_i, S_j, i, j, = 1, m$; m - общее количество рассматриваемых явлений.

Динамический образ задает некоторую траекторию поведения индикатора. Характер этой траектории определяется взаимодействием трех глобальных факторов:

Φ_1 - реакция массива на воздействие технологических процессов или на изменение окружающей среды, в частности, изменение режима вентиляции. Воздействие этого фактора на поведение индикатора можно охарактеризовать, как “возмущающую или выталкивающую силу”, ведущую к увеличению значений координат индикатора $X_i \in [O, M]$, (M - верхняя граница изменения концентрации метана).

Φ_2 - воздействие вентиляционной и дегазационной систем, заключающееся в разбавлении выделяющегося из забоя и выработанного пространства метана и обеспечивающей снижение метанообильности пласта. Этот фактор определим как “стабилизирующую или поддерживающую силу” ведущую, в конечном итоге, к снижению значений координат индикатора.

Φ_3 - характеристики среды, то есть начальных условий, в рамках которых осуществляется анализ поведения индикатора. К этим характеристикам следует

отнести реальную газоносность пласта и сложившийся газо-воздушный баланс в пределах добычного участка. Назовем этот фактор “силой давления”.

Поскольку количественная оценка комплексного влияния этих факторов на изменение координат индикатора, не представляется возможной, так как может быть осуществлена только в условиях существования некоторого универсального закона шахтной аэрогазодинамики, для решения задач классификации и распознавания газодинамических явлений попытаемся разработать некоторые инвариантные эмпирические индексы, опирающиеся на формально-логическое описание процессов.

Для того, чтобы перейти к такому описанию, прежде всего, отметим, что траектория индикатора для любого процесса или явления, может быть охарактеризована такими понятиями, которые непосредственно не связаны с количественными оценками, но могут трактоваться, как субъективные инварианты данного явления.

К таким термам можно отнести следующие понятия:

1. Колебательность траектории индикатора, т.е. количество точек перегиба, $x_{i-1} < x_i \wedge x_i > x_{i+1}; x_{i-1} > x_i < x_{i+1}$; точки $x_i, i = \overline{2, n-1}$ удовлетворяющие этому условию назовем точками перегиба;

2. Общая тенденция траектории, которая выражается через некоторое соотношение между начальной x_1 и конечной точкой траектории. Анализ газодинамических реализаций показывает, что в 95% случаев (выполняется условие) $x_n > x_1$, хотя количественное соотношение $(x_n - x_1)$ зависит от взаимодействия факторов $\{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3\}$.

3. Однородность траектории, которая может быть определена как мера характеризующая устойчивость траектории на определенных временных интервалах.

Рассматриваемая траектория может быть представлена, как совокупность (последовательность) отношений, между отдельными ее элементами. В случае,

если использовать бинарные отношения порядка, не вводя при этом нечетких описаний, имеем три возможных типа отношений:

$$\begin{aligned} A_1(x_i, x_{i+1}) - \text{''быть равными''}; & - x_i = x_{i+1} \\ A_2(x_i, x_{i+1}) - \text{''быть меньше''}; & - x_i < x_{i+1} \\ A_3(x_i, x_{i+1}) - \text{''быть больше''}; & - x_i > x_{i+1} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Естественным развитием структурных отношений (2.15) является формирование структурных классов на основе логических цепочек:

$$A_K(x_i, x_{i+1}) \wedge A_K(x_{i+1}, x_{i+2}) \wedge \dots \wedge A_K(x_{i+\gamma}, x_{i+\gamma+1}), \quad (2.16)$$

где $k = \{1, 2, 3\}$

Для случая $\gamma = 1$, получаем девять структурных классов, имеющих следующий вид:

$$\begin{aligned} A_1(x_i, x_{i+1}) \wedge A_1(x_{i+1}, x_{i+2}) & \rightarrow C_1 \\ A_1(x_i, x_{i+1}) \wedge A_2(x_{i+1}, x_{i+2}) & \rightarrow C_2 \\ A_1(x_i, x_{i+1}) \wedge A_3(x_{i+1}, x_{i+2}) & \rightarrow C_3 \\ A_2(x_i, x_{i+1}) \wedge A_1(x_{i+1}, x_{i+2}) & \rightarrow C_4 \\ A_2(x_i, x_{i+1}) \wedge A_2(x_{i+1}, x_{i+2}) & \rightarrow C_5 \\ A_2(x_i, x_{i+1}) \wedge A_3(x_{i+1}, x_{i+2}) & \rightarrow C_6 \\ A_3(x_i, x_{i+1}) \wedge A_1(x_{i+1}, x_{i+2}) & \rightarrow C_7 \\ A_3(x_i, x_{i+1}) \wedge A_2(x_{i+1}, x_{i+2}) & \rightarrow C_8 \\ A_3(x_i, x_{i+1}) \wedge A_3(x_{i+1}, x_{i+2}) & \rightarrow C_9 \end{aligned} \quad (2.17)$$

Классы C_1, C_5, C_8 - назовем классами устойчивой тенденции; C_2, C_3, C_4, C_7 - классами неустойчивой тенденции; C_6, C_9 - классами смены тенденций.

Таким образом, любая траектория индикатора может быть представлена в виде набора сегментов-классов:

Траектория А: $C_4 C_2 C_1 C_6 C_7 C_2 C_6 C_8 C_7 C_3 C_9 C_1$

Траектория В: $C_1 C_6 C_9 C_1 C_1 C_1 C_6 C_{18} C_{18} C_{19} C_6 C_9$

Полученные таким образом цепочки классов C_i можно рассматривать как своеобразный код, соответствующей конкретной реализации индикатора.

Теперь нетрудно перейти к количественным оценкам структурных особенностей траекторий индикаторов.

Для этого введем несколько вспомогательных индексов, общей вид которых задается выражением:

$$\varepsilon_i = \frac{M_i}{N}$$

где N - общее количество сегментов ($n - 2$);

M_i - количество сегментов, относящихся к определенным классам.

Например, M_i - количество сегментов характеризующих смену тенденций C_6, C_9 .

M_2 - количество сегментов, соответствующих неустойчивым тенденциям: C_2, C_3, C_4, C_7 ;

M_3 - количество сегментов устойчивого поведения индикатора (рост, спад, равновесие) C_1, C_5, C_8 .

Тогда ε_1 - можно определить как индекс колебательности, характеризующий взаимодействие Φ_1 и Φ_3 ;

ε_2 - индекс неустойчивости поведения индикатора;

ε_3 - индекс устойчивости индикатора.

Кроме того, могут быть использованы индексы (характеризующие общую тенденцию поведения индикатора, в частности индекс роста $\varepsilon_4 = \frac{M_4}{N}$, где M_4 - количество сегментов, типа C_1, C_2, C_4 и индекс спада $\varepsilon_5 = \frac{M_5}{N}$, M_5 - количество сегментов типа C_3, C_7, C_8 .

Перечисленные индексы, образуют некоторый базовый вектор, характеризующий конкретную траекторию индикатора.

$$E_i = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5\}$$

Для траекторий, рассмотренных выше, в качестве примере соответствующие вектора имеют вид:

$$E_A = \{0,25; 0,5; 0,25; 0,42; 0,3\};$$

$$E_B = \{0,5; 0,0; 0,5; 0,3; 0,16\}$$

Результаты вычислений, выполненных для 50 траекторий индикаторов, соответствующих различным геотехнологическим и газодинамическим явлениям и процессам, в различных горно-геологических условиях показали, что разброс значений индексов внутри одного класса газодинамических ситуаций может быть весьма значительным и достигать 25-30%.

Разброс значений индексов внутри интервалов объясняется, по-видимому, двумя обстоятельствами:

- отсутствием достаточной информации относительно точности измерительной аппаратуры, погрешностей регистрирующих устройств и геотехнических условий, в которых проводились измерения;

- зависимостью поведения индикатора от геотехнологического окружения [66].

Более корректный способ характеристики газодинамических явлений опирается на использование энтропийных оценок вида: $I_s = -\sum \varepsilon_i \log \varepsilon_i$.

Для представленных выше цепочек имеем: $I_A = 1.5$; $I_B = 1.0$.

В целом для некоторых классов газодинамических ситуаций при анализе коротких реализаций (5-7 значений) получены следующие результаты:

Буровзрывные работы - < 1.0 ;

Нарушение режима вентиляции - > 1.5

Отключение систем дегазации - $1.1 \div 1.3$

Следует подчеркнуть, что общность энтропийных оценок может быть существенно повышена при одновременном использовании нескольких индикаторов, так как при этом появляется возможность более точно учесть влияние факторов Φ_2 и Φ_3 . Однако, более важно, что энтропийные оценки и рассмотренные выше индексы $\varepsilon_1 \div \varepsilon_5$ могут служить удобным инструментом для формирования обучающих наборов (обучающих образов) при построении НС – моделей распознавания и прогноза газодинамических ситуаций.

2.5. Выводы

В целом, результаты исследований, выполненных в настоящей главе могут быть суммированы следующим образом:

1. Сформулированы основные задачи, которые должны решаться в рамках аналитической платформы.
2. Определены основные классы информационных массивов, которые необходимы для формирования информационной базы аналитической платформы. Показано, что информационная база должна формироваться на основе экспертной и сенсорной информации.
3. Представлена общая схема функционирования аналитической платформы, основное назначение которой состоит в подготовке необходимых информационных таблиц (в результате первичной обработки, анализа и трансформации сенсорной информации) и построении моделей распознавания, прогноза и управления.
4. Выполнена классификация газодинамических процессов, по ряду критериев, которая позволила объединить некоторые из них в рамках унифицированных экспертных описаний.
5. Разработана процедура экспертного анализа газодинамических реализаций и обработки его результатов включающая следующие основные этапы.
 - выделение фрагментов реализаций, характерных (по мнению экспертов) для определенных физико-технологических явлений;
 - формальное описание выделенных фрагментов, с целью корректного решения задачи классификации, рассмотрены два подхода: первый состоит в использовании лингвистических термов, введенных экспертами; второй заключается в использовании формальных индексов. Второй подход представляется нам более предпочтительным, так как Экспериментальные исследования показали, что разработанные индексы являются инвариантными к различным горно-геологическими условиям и, что важно, могут быть использованы для оперативного (краткие интервалы наблюдений) распознавания ситуаций в рамках системы мониторинга шахты Мао Хе.

Глава 3. Нейросетевые модели распознавания газодинамических ситуаций и прогнозирования динамики концентрации метана

3.1. Моделирование газодинамических процессов

Хорошо известно, что целью управления вентиляцией метанообильных шахт, является поддержание концентрации метана в горных выработках на уровне, отвечающем нормам безопасности. Превышение определенных норм ($C_{CH_4} > 1,2\%$) ведет к обязательному отключению электроэнергии и, следовательно, сказывается на производственных показателях. Грубые нарушения и игнорирование этих требований обычно ведут к катастрофам.

Именно поэтому, вопросы построения моделей и сама процедура моделирования газодинамических процессов играют существенную роль при разработке и внедрении систем мониторинга и управления в вентиляционных системах шахт.

Поскольку основными источниками выделения метана в шахтную атмосферу являются добычные участки, то степень загазованности шахтной атмосферы определяется концентрацией C_{CH_4} на исходящей вентиляционной струе добычного участка. Многообразие горно-геологических условий добычи, а также соответствующих им технологических схем отработки угольных пластов, обуславливают невозможность строгого аналитического описания процессов выделения газа, перемешивания метана и воздуха, а также переноса газо-воздушной смеси.

В то же время, учитывая, что связь концентрации метана и расхода воздуха в исходящей вентиляционной струе участка, зависит от топологической структуры горных выработок, примыкающих к выработанному пространству, можно представить эту общую функциональную зависимость в виде:

$$F \left\{ \vec{A}, \frac{dC_i(t)}{dt}, Q(t), G_{np}(t), G_{rb}(t), C(t) \right\} \quad (3.1)$$

где \vec{A} - вектор параметров, определяющих геометрические характеристики зоны смещения;

$Q(t), C(t)$ - расход воздуха и концентрация метана в исходящей вентиляционной струе участка;

$Q_{\text{пр}}(t)$ - выделения газа из лавы, обусловленные производственным процессом на участке, и зависящие от интенсивности углетока из лавы.

$Q_{\text{вп}}(t)$ - выделения газа из массива угля, фильтрация из выработанного пространства и примыкающих выработок.

Можно сказать, что $G_{\text{бр}}(t)$ зависит, как от реакции массива на различные горно-технологические и геотехнические процессы и явления, так и от величины начального потока метана, который обусловлен также ненулевой концентрацией метана в свежей вентиляционной струе участка.

В общем виде, суммарное газовыделение в пределах добычного участка определяется следующим образом:

$$G(t) = G_{\text{пр}}(t) + G_{\text{вп}}(t) = f[\{S_i(t), Q_0(t), C_0(t)\}] \quad (3.2)$$

где $S_i(t), i = \overline{1, m}$ - рассмотренные нами подробно ранее факторы горно-технологической и геофизической природы;

$Q_0(t), C_0(t)$ - некоторые начальные условия ($C_0(t)$ - концентрация метана в свежей вентиляционной струе; $Q_0(t)$ - расход воздуха в выработках непосредственно примыкающих к лаве и выработанному пространству).

Известно, что увеличение газовыделения, в условиях стабилизированного аэродинамического режима ведет к нарастанию концентрации метана в исходящей струе. При определенных допущениях, касающихся особенностей распространения газозоудной смеси по горной выработке можно считать, что спектральные характеристики и общий вид процесс $C_{\text{CH}_4}(t)$ в исходящей вентиляционной струе совпадают с аналогичными параметрами процессов $C_i(t)$, контролируемых в выработках, примыкающих к лаве, а интенсивность процесса определяется протяженностью вентиляционного штрэка и связана с местом расположения в нем средств контроля.

Таким образом, рассматривая концентрацию метана на выходе участка, как аддитивный процесс, будем считать, что $C_1(t) = \phi\{S_i(t)\}$ т.е., что характер нарастания определяется влиянием некоторого геотехнологического процесса или горно-технических факторов (в том числе, нерегламентированных или аварийных). Общий вид модели:

$$\hat{C}_1[n+p] = \phi\{C[n], \dots, C[n-k], G(t)\}, \quad (3.3.)$$

где p – интервал прогноза $p = [1 \ 5]$; k – глубина запаздывания $k = [2,3,4,5]$;

Исследования переходных газодинамических процессов при резком изменении расхода воздуха в исходящей вентиляционной струе участка, показывают, что их вид существенно зависит от начальных условий $Q_0(t), C_0(t)$, и может варьироваться от плавного снижения до скачкообразного. Общим для этих процессов является выполнение условия: если $Q(t_k) \gg Q_0(t_0)$ то $C(t_k) \gg C_0(t_0)$, где $t_k - t_0 = \tau$ – величина, зависящая от топологии участка и газообильности пласта.

Таким образом, будем считать, что увеличение расхода воздуха приводит к интенсификации процессов перемешивания и выноса метана, то есть, в конечном итоге, к снижению концентрации метана в исходящей вентиляционной струе участка.

Для упрощенного описания динамики концентрации метана при взаимодействии с воздухом в 80-е и 90-е годы неоднократно использовались модели авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС), которые хорошо описывают линейные квазистационарные случайные процессы. Общий вид моделей задается выражением:

$$\hat{C}_1[n] = \sum_{i=1}^{K_1} \alpha_i C[n-i] - \sum_{j=1}^{K_2} \beta_j Q[n-j] \quad (3.4)$$

Сегодня для построения моделей прогноза активно применяются значительно более мощные инструменты – искусственные нейронные сети, которые ранее упоминались нами в обзоре литературы. Основное внимание в настоящей главе посвящено разработке двух типов нейросетевых моделей: моделей

распознавания причин, вызвавших нарастание концентрации метана и моделей прогнозирования динамики концентрации метана.

3.2. Анализ данных. Процедура построения моделей

Конечной целью разработки системы комплексного мониторинга аэрогазодинамических процессов и управления вентиляцией шахты является создание специализированной программной платформы, позволяющей обрабатывать большие массивы разнородной информации, выполнять анализ с использованием современных инструментов прогнозной аналитики.

В данной главе рассматривается два типа моделей, а именно:

1. Модели распознавания газодинамических ситуаций (характерных участков нестационарности реализаций) на основе данных мониторинга в определенных точках вентиляционной сети и их последующей интерпретации.

2. Модели прогноза динамики концентрации метана для оперативного планирования режимов работы ВМП или, при использовании систем автоматического управления ВМП, для формирования значений задающих параметров.

На начальном этапе исследований был осуществлен экспертный анализ динамических реализаций концентрации метана в различных точках контроля нескольких добычных участков шахты Мао Хе (рис.3.1). При этом рассматривались различные горно-технологические ситуации.

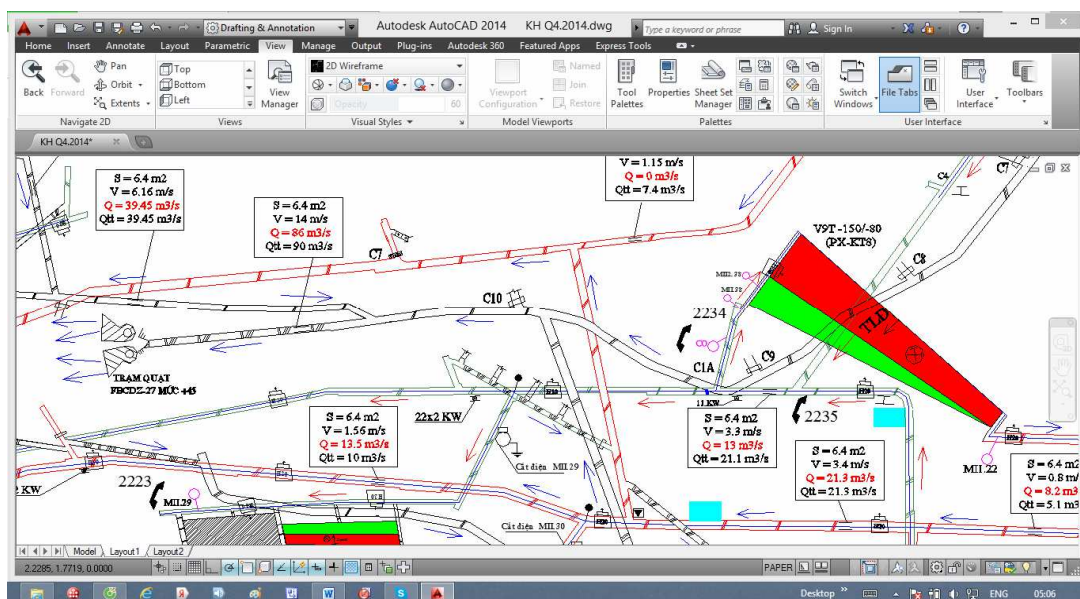


Рис. 3.1. Схема вентиляции шахты МаоХе

Была проведена классификация газодинамических явлений, осуществлен выбор индикаторов и определен класс моделей для решения поставленных задач.

В прошлом при попытке создать системы управления вентиляцией по газовому фактору исследователи, используя при этом различные подходы: эмпирический (зависимости, основанные на принципах физического моделирования), статистический (АРПСС и другие регрессионные модели), функциональный (линейные и нелинейные аналоги передаточных функций из теории автоматического управления), неоднократно сталкивались с одной проблемой. Суть ее в том, что корреляция между $Q(t)$ и $C(t)$, измеренных в различных точках вентиляционной сети, существует и является достаточно устойчивой в стационарных режимах. Однако, оперативное изменение $Q(t)$ с целью снижения концентрации метана, в случае резкого ее изменения, не дает желаемого результата из-за распределенности и инерционности объекта, а также существенной нелинейности процессов разбавления [66].

Это означает, что основные усилия необходимо направить не на попытки создания громоздких систем оперативного перераспределения воздуха, а на создание инструментов, позволяющих максимально точно оценить текущую газодинамическую ситуацию и выдать надежный прогноз ее развития для заблаговременного изменения режимов работы вентиляционных установок. На основании изучения структуры известных аналитических платформ, а также инструментария, представленного в различных библиотеках прогнозной аналитики, в качестве основного средства решения задач был выбран нейросетевой подход. Применение искусственных нейронных сетей для решения задач прогнозирования газодинамики имеет достаточно давнюю историю [54], и сегодня, при наличии большого количества специализированных библиотек, эти подходы активно применяются [63,64].

Была проведена классификация и выделены несколько групп процессов и явлений (газодинамических ситуаций), вызывающих характерные флуктуации $C_{CH_4}(t)$ в шахтной вентиляционной сети шахты Мао Хе [66].

S_1 - основные технологические процессы, осуществляющие воздействие на горный массив, в соответствии с плановым регламентом, в том числе:

S_{11} - буровзрывные работы; S_{12} - работа добычного комбайна; S_{13} - обрушение кровли забоя.

S_2 - нарушение в системе вентиляции и дегазации, а именно:

S_{21} - отключение вентилятора местного проветривания;

S_{22} - подвешивание или замена вентиляционных труб; S_{23} - пережатие вентиляционных труб; S_{24} - отключение системы дегазации; S_{25} - отключение подстанции, т.е. обесточивание аппаратуры АГЗ; S_{26} - резкое изменение аэродинамического режима за счет внезапного увеличения сопротивления некоторых горных выработок;

S_3 - нарушения в системе контроля;

S_4 - горно-физические явления:

S_{41} - резкие выбросы угля и газа; S_{42} - горные удары; S_{43} - суфлярные газовыделения; S_{44} - пожары в при забойной зоне.

Известно, что на основе экспертного анализа может быть определен набор вполне достоверных индикативных параметров (характерных особенностей реализации $C(t)$), с помощью которых можно построить работоспособную систему распознавания перечисленных ранее явлений [60,62]. К этим индикаторам относятся такие, например, как:

P_1 - максимальная амплитуда опасного превышения уровня концентрации (A_{max}), которая определяется как наибольшее абсолютное значение C_{CH_4} на интервале $[t_0, t_f]$;

P_2 - время нарастания $(t_H), C_{CH_4}(t)$ от начала опасного превышения уровня (момент t_0) до величины A_{max} ;

P_3 - время спада $(t_c), C_{CH_4}(t)$ до постоянного уровня C_0 ;

P_4 - длительность процесса (T_{max}).

Однако, эти индикаторы, которые можно эффективно использовать для анализа газодинамических ситуаций, а также для проектирования систем контроля и построения баз данных, невозможно применять в задаче раннего обнаружения нарушений и прогнозирования нештатных ситуаций.

В качестве основных индикативных параметров предлагается использовать градиентные и энтропийные параметры. индикатора предлагается использовать градиент нарастания концентрации метана $\frac{DC(t)}{Dt}$. В общем случае задавался вектор, состоящий из набора разностей различного порядка (не более 5-7 элементов) и (или) индексов, правила вычисления которых описаны в параграфе 2.5:

$$\{g_1, g_2, \dots, g_k, g_n\}, g_1 = \frac{C(t_0 + Dt) - C(t_0)}{Dt}; \quad (3.5)$$

$$g_2 = \frac{C(t_0 + 2Dt) - C(t_0)}{2Dt}, g_k = \frac{C(t_0 + kDt) - C(t_0)}{kDt}$$

Процесс обработки и анализа экспериментальных данных, полученных при помощи системы аэрогазодинамического контроля шахты MaoXe, включал в себя следующие этапы [66]:

1. Выделение набора характерных признаков-индикаторов. Уточнение типов и структуры данных. Разработка простых алгоритмов для оперативного вычисления признаков и формирования обучающих наборов (dataset). При формировании обучающих наборов использовались простые процедуры трансформации пространства исходных образов, такие например как: вычисление простых (d) или сезонных (Δ) разностей:

$\varphi_L(X): \{x_2 - x_1, x_3 - x_2, \dots, x_N - x_{N-1}\}$, или более сложные трансформации:

$$\varphi_L(X) = \frac{x_{i+1} - x_i}{x_i - x_{i-1}} = \frac{dx_i}{dx_{i-1}}$$

В результате, для каждого из рассматриваемых процессов и явлений формировались обучающие и тестовые наборы (пример, Таблица 3.1).

Таблица 3.1. Пример обучающего набора и результаты обучений.

Время	X1	X2	X3	X4	X5	Y	Результаты обучения (ВЫХОДЫ)	
T, мин	$C_i(t)$	$C_{i-1}(t)$	$C_{i-2}(t)$	$C_{i-3}(t)$	G(t)	$C_{i+1}(t)$	Выходные данные	Ошибки
1	0.76	0.78	0.72	0.72	1	0.68	0,699997910987568	2,08901243226034e-06
2	0.78	0.72	0.72	0.68	1	0.7	0,679994051973332	5,94802666842309e-06
3	0.72	0.72	0.68	0.7	1	0.7	0,680000665338718	-6,65338718341957e-07
4	0.72	0.68	0.7	0.7	1	0.7	0,650013782287915	-1,37822879152649e-05
5	0.68	0.7	0.7	0.7	1	0.68	0,650008221523168	-8,22152316815039e-06
6	0.7	0.7	0.7	0.68	1	0.68	0,660007801551932	-7,80155193180754e-06
7	0.7	0.7	0.68	0.68	1	0.65	0,650007972297537	-7,97229753723983e-06
8	0.7	0.68	0.68	0.65	1	0.65	0,649995910326858	4,08967314213804e-06
9	0.68	0.68	0.65	0.65	1	0.66	0,680000563178522	-5,63178522372532e-07
10	0.68	0.65	0.65	0.66	1	0.65	0,720013429363084	-1,34293630835725e-05
11	0.65	0.65	0.66	0.65	1	0.65	0,720004113026392	-4,11302639213851e-06
12	0.65	0.66	0.65	0.65	1	0.68	0,679994614590808	5,38540919237107e-06
13	0.66	0.65	0.65	0.68	1	0.72	0,670007883782992	-7,88378299143577e-06
14	0.65	0.65	0.68	0.72	1	0.72	0,680005438791077	-5,43879107739453e-06
15	0.65	0.68	0.72	0.72	1	0.68	0,679997556452078	2,44354792211521e-06
16	0.68	0.72	0.72	0.68	1	0.67	0,650002381076620	-2,38107662009490e-06
17	0.72	0.72	0.68	0.67	1	0.68	0,669992891734258	7,10826574257251e-06
18	0.72	0.68	0.67	0.68	1	0.68	0,620019837415983	-1,98374159832149e-05
19	0.68	0.67	0.68	0.68	1	0.65	0,580019514962259	-1,95149622584934e-05
20	0.67	0.68	0.68	0.65	1	0.67	0,560003114476793	-3,11447679257615e-06
21	0.68	0.68	0.65	0.67	1	0.62	0,560030904275342	-3,09042753420252e-05
22	0.68	0.65	0.67	0.62	1	0.58	0,580037807285845	-3,78072858447931e-05
23	0.65	0.67	0.62	0.58	1	0.56	0,580033054559340	-3,30545593403286e-05
24	0.67	0.62	0.58	0.56	1	0.56	0,580019176720868	-1,91767208683746e-05
25	0.62	0.58	0.56	0.56	1	0.58	0,600018300567637	-1,83005676365200e-05
26	0.58	0.56	0.56	0.58	1	0.58	0,600020919780446	-2,09197804463823e-05
27	0.56	0.56	0.58	0.58	1	0.58	0,630018487408282	-1,84874082818087e-05
28	0.56	0.58	0.58	0.58	1	0.6	0,650018395639055	-1,83956390551465e-05
29	0.58	0.58	0.58	0.6	1	0.6	0,650020639785159	-2,06397851586493e-05
30	0.58	0.58	0.6	0.6	1	0.63	0,680008968229115	-8,96822911444772e-06
31	0.58	0.6	0.6	0.63	1	0.65	0,675204744909746	0,0447952550902545
32	0.6	0.6	0.63	0.65	1	0.65	0,720029443313808	-2,94433138082750e-05
33	0.6	0.63	0.65	0.65	1	0.68	0,749989647096240	1,03529037596140e-05
34	0.63	0.65	0.65	0.68	1	0.72	0,750009431227907	-9,43122790697526e-06
35	0.65	0.65	0.68	0.72	1	0.72	0,759999511715854	4,88284146116236e-07
36	0.65	0.68	0.72	0.72	1	0.75	0,749996207589110	3,79241089021320e-06
37	0.68	0.72	0.72	0.75	1	0.75	0,729995550572515	4,44942748467625e-06
38	0.72	0.72	0.75	0.75	1	0.76	0,699999862232599	1,37767401153788e-07
39	0.72	0.75	0.75	0.76	1	0.75	0,679999566253305	4,33746695005510e-07
40	0.75	0.75	0.76	0.75	1	0.73	0,699998113250318	1,88674968204516e-06
41	0.75	0.76	0.75	0.73	1	0.7	0,700001813611016	-1,81361101647681e-06
42	0.76	0.75	0.73	0.7	1	0.68	0,719997226142926	2,77385707414535e-06
43	0.75	0.73	0.7	0.68	1	0.7	0,729987769085088	1,22309149117594e-05
44	0.73	0.7	0.68	0.7	1	0.7	0,689993765442452	6,23455754822366e-06
45	0.7	0.68	0.7	0.7	1	0.72	0,690007033078749	-7,03307874938552e-06
46	0.68	0.7	0.7	0.72	1	0.73	0,660002685091279	-2,68509127854255e-06
47	0.7	0.7	0.72	0.73	1	0.69	0,659999772561731	2,27438269440050e-07
48	0.7	0.72	0.73	0.69	1	0.69	0,680003482451421	-3,48245142067771e-06
49	0.72	0.73	0.69	0.69	1	0.66	0,650006037966068	-6,03796606746254e-06
50	0.73	0.69	0.69	0.66	1	0.66	0,669993328810400	6,67118959984947e-06

51	0.69	0.69	0.66	0.66	1	0.68	0,660004130798830	-4,13079883010425e-06
52	0.69	0.66	0.66	0.68	1	0.65	0,650018323925039	-1,83239250391987e-05
53	0.66	0.66	0.68	0.65	1	0.67	0,680001755409594	-1,75540959390652e-06
54	0.66	0.68	0.65	0.67	1	0.66	0,710581870339413	0,0494181296605866
55	0.68	0.65	0.67	0.66	1	0.65	0,780003635521734	-3,63552173410220e-06
56	0.65	0.67	0.66	0.65	1	0.68	0,719990774820353	9,22517964685454e-06
57	0.67	0.66	0.65	0.68	1	0.76	0,720024920547710	-2,49205477100833e-05
58	0.66	0.65	0.68	0.76	1	0.78	0,679973084892939	2,69151070610985e-05
59	0.65	0.68	0.76	0.78	1	0.72	0,699982713111387	1,72868886133548e-05
60	0.68	0.76	0.78	0.72	1	0.72	0,700003239760368	-3,23976036764595e-06
61	0.76	0.78	0.72	0.72	1	0.68	0,699997910987568	2,08901243226603e-06
62	0.78	0.72	0.72	0.68	1	0.7	0,679994051973332	5,94802666842309e-06
63	0.72	0.72	0.68	0.7	1	0.7	0,68000665338718	-6,65338718341957e-07
64	0.72	0.68	0.7	0.7	1	0.7	0,650013782287915	-1,37822879152649e-05
65	0.68	0.7	0.7	0.7	1	0.68	0,650008221523168	-8,22152316815039e-06
66	0.7	0.7	0.7	0.68	1	0.68	0,660007801551932	-7,80155193180754e-06
67	0.7	0.7	0.68	0.68	1	0.65	0,650007972297537	-7,97229753723983e-06
68	0.7	0.68	0.68	0.65	1	0.65	0,649995910326858	4,08967314213804e-06
69	0.68	0.68	0.65	0.65	1	0.66	0,680000563178522	-5,63178522372532e-07
70	0.68	0.65	0.65	0.66	1	0.65	0,720013429363084	-1,34293630835725e-05
71	0.65	0.65	0.66	0.65	1	0.65	0,720004113026392	-4,11302639213851e-06
72	0.65	0.66	0.65	0.65	1	0.68	0,679994614590808	5,38540919237107e-06
73	0.66	0.65	0.65	0.68	1	0.72	0,670007883782992	-7,88378299143577e-06
74	0.65	0.65	0.68	0.72	1	0.72	0,680005438791077	-5,43879107739453e-06
75	0.65	0.68	0.72	0.72	1	0.68	0,679997556452078	2,44354792211521e-06
76	0.68	0.72	0.72	0.68	1	0.67	0,650002381076620	-2,38107662009490e-06
77	0.72	0.72	0.68	0.67	1	0.68	0,669992891734258	7,10826574257251e-06
78	0.72	0.68	0.67	0.68	1	0.68	0,620019837415983	-1,98374159832149e-05
79	0.68	0.67	0.68	0.68	1	0.65	0,580019514962259	-1,95149622584934e-05
80	0.67	0.68	0.68	0.65	1	0.67	0,560003114476793	-3,11447679257615e-06
81	0.68	0.68	0.65	0.67	1	0.62	0,560030904275342	-3,09042753420252e-05
82	0.68	0.65	0.67	0.62	1	0.58	0,580037807285845	-3,763972851586493e-05
83	0.65	0.67	0.62	0.58	1	0.56	0,580033054559340	-3,30545593403286e-05
84	0.67	0.62	0.58	0.56	1	0.56	0,580019176720868	-1,91767208683746e-05
85	0.62	0.58	0.56	0.56	1	0.58	0,600018300567637	-1,83005676365200e-05
86	0.58	0.56	0.56	0.58	1	0.58	0,600020919780446	-2,09197804463823e-05
87	0.56	0.56	0.58	0.58	1	0.58	0,630018487408282	-1,84874082818087e-05
88	0.56	0.58	0.58	0.58	1	0.6	0,650018395639055	-1,83956390551465e-05
89	0.58	0.58	0.58	0.6	1	0.6	0,650020639785159	-2,06397851586493e-05
90	0.58	0.58	0.6	0.6	1	0.63	0,680008968229115	-8,96822911444772e-06
91	0.58	0.6	0.6	0.63	1	0.65	0,675204744909746	0,0447952550902545
92	0.6	0.6	0.63	0.65	1	0.65	0,720029443313808	-2,94433138082750e-05
93	0.6	0.63	0.65	0.65	1	0.68	0,749989647096240	1,03529037596140e-05
94	0.63	0.65	0.65	0.68	1	0.72	0,750009431227907	-9,43122790697526e-06
95	0.65	0.65	0.68	0.72	1	0.72	0,759999511715854	4,88284146116236e-07
96	0.65	0.68	0.72	0.72	1	0.75	0,749996207589110	3,79241089021320e-06
97	0.68	0.72	0.72	0.75	1	0.75	0,729995550572515	4,44942748467625e-06
98	0.72	0.72	0.75	0.75	1	0.76	0,699999862232599	1,37767401153788e-07
99	0.72	0.75	0.75	0.76	1	0.75	0,679999566253305	4,33746695005510e-07
100	0.75	0.75	0.76	0.75	1	0.73	0,699998113250318	1,88674968204516e-06
101	0.75	0.76	0.75	0.73	1	0.7	0,700001813611016	-1,81361101647681e-06
102	0.76	0.75	0.73	0.7	1	0.68	0,719997226142926	2,77385707414535e-06
103	0.75	0.73	0.7	0.68	1	0.7	0,729987769085088	1,22309149117594e-05
104	0.73	0.7	0.68	0.7	1	0.7	0,689993765442452	6,23455754822366e-06
105	0.7	0.68	0.7	0.7	1	0.72	0,690007033078749	-7,03307874938552e-06
106	0.68	0.7	0.7	0.72	1	0.73	0,660002685091279	-2,68509127854255e-06
107	0.7	0.7	0.72	0.73	1	0.69	0,659999772561731	2,27438269440050e-07
108	0.7	0.72	0.73	0.69	1	0.69	0,680003482451421	-3,48245142067771e-06
109	0.72	0.73	0.69	0.69	1	0.66	0,650006037966068	-6,03796606746254e-06
110	0.73	0.69	0.69	0.66	1	0.66	0,669993328810400	6,67118959984947e-06
111	0.69	0.69	0.66	0.66	1	0.68	0,660004130798830	-4,13079883010425e-06
112	0.69	0.66	0.66	0.68	1	0.65	0,650018323925039	-1,83239250391987e-05
113	0.66	0.66	0.68	0.65	1	0.67	0,680001755409594	-1,75540959390652e-06
114	0.66	0.68	0.65	0.67	1	0.66	0,710581870339413	0,0494181296605866
115	0.68	0.65	0.67	0.66	1	0.65	0,780003635521734	-3,63552173410220e-06
116	0.65	0.67	0.66	0.65	1	0.68	0,719990774820353	9,22517964685454e-06
117	0.67	0.66	0.65	0.68	1	0.76	0,720024920547710	-2,49205477100833e-05
118	0.66	0.65	0.68	0.76	1	0.78	0,679973084892939	2,69151070610985e-05
119	0.65	0.68	0.76	0.78	1	0.72	0,699982713111387	1,72868886133548e-05
120	0.68	0.76	0.78	0.72	1	0.72	0,700003239760368	-3,23976036764595e-06

2. Разработка алгоритмов обучения и тестирования нейросетевых структур, проведение последовательной селекции с целью поиска наилучшего соответствия для различных классов явлений. Разработка соответствующих программных модулей. Определение конкретной ИНС (структура + все весовые коэффициенты), которая может быть напрямую использована в режиме оперативного мониторинга

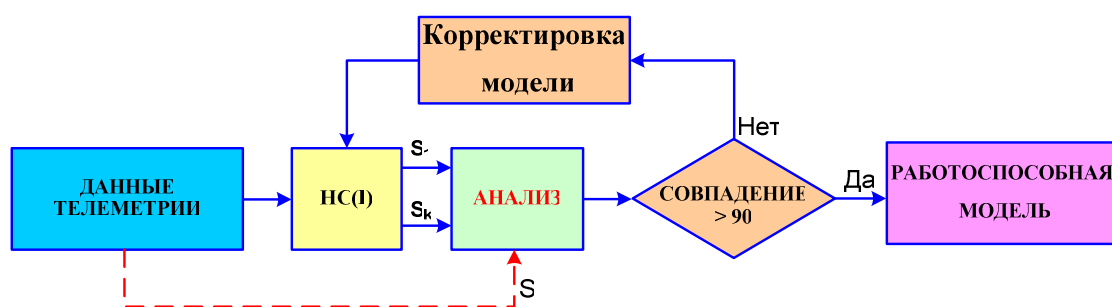
$L: X_{ij} \rightarrow N_i$, где N_i – нейронная сеть, являющаяся наилучшей с позиций критериев распознавания и прогнозирования для данного класса процессов или явлений.

3. Разработка алгоритма интерпретации результатов, то есть проверки достоверности и сравнения выдвинутых гипотез: $F\{N_1, N_2, \dots, N_m\}: X \rightarrow S_k$

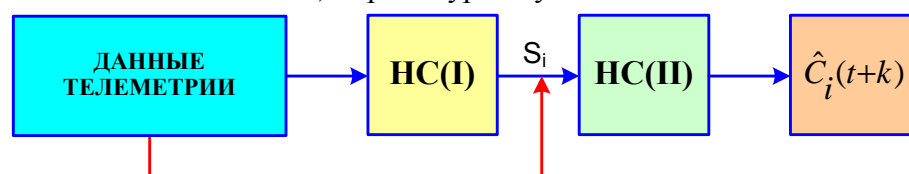
4. Реализация разработанных алгоритмов в виде работоспособного программного модуля, пригодного для отладки и настройки в условиях реального объекта.

В работе предлагается использовать оригинальную схему решения задач распознавания и прогнозирования газодинамических процессов и ситуаций, включающую в себя два типа нейросетевых моделей (рис. 3.2):

- моделей раннего обнаружения и распознавания газодинамических ситуаций, проявляющих себя через характерное изменение индикаторной переменной;
- моделей прогнозирования динамики этой индикаторной переменной (концентрации метана).



а). Процедура обучения



б). рабочий режим

Рис. 3.2 . Схема работы механизма распознавания и прогноза газодинамических явлений

3.3. Алгоритм выбора наилучшей НС

Суть решаемой задачи состоит в синтезе конкретной НС-модели, обеспечивающей приемлемую точность распознавания при ограниченном количестве обучающих наборов. Под синтезом структуры сети будем понимать процедуру, включающую выбор топологии сети, обеспечивающей устойчивую сходимость и заданную точность процесса обучения, а также определение значений весовых коэффициентов. Упрощенная модель НС в функциональном виде может быть представлена следующим образом:

$$\hat{Y}[k] = f(x_L, \{A\}) = \varphi(B_n[k] \varphi(B_{n-1}[k] \dots \varphi(B_1[k], x_L) \dots)), \quad (3.6)$$

где $\hat{Y}[k]$ - вектор выходных значений ИНС на k -ом шаге обучения;

$\{A\}$ – множество весовых коэффициентов, которые являются элементами структурных матриц B_1, B_2, \dots, B_n (для сети $n - 1$ промежуточными слоями);

$\varphi()$ – активационные функции, образующие традиционный функциональный базис;

x_L – множество обучающих образов.

Квадратичный критерий качества обучения можно записать в виде:

$$F_L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^M (Y_i^* - Y_i^j[k])^2, \quad (3.7)$$

где $Y_i^j[k]$ – выход ИНС, соответствующий входному обучающему образу x_j^i на k -ом шаге обучения;

Y_i^* – выходной образ, представляющий собой заданный на множестве индикаторов выход i -го класса.

В то же время конечной целью процедуры распознавания, если выразить ее в тех же квадратичных формах является минимизация критерия:

$$F_T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{T_i} (Y_i^* - \hat{Y}_i^j[k])^2, \quad (3.8)$$

где X_T – это множество образов, которые не использовались в процедуре обучения.

Способность к правильному распознаванию у нейросетевой модели N_1 выше, чем у модели N_2 , если $F_T(N_1) < F_T(N_2)$. Однако, на практике, из-за проявления эффекта «переобученности», часто наблюдается ситуация, когда $F_L(N_1) < F_L(N_2)$, но $F_T(N_1) > F_T(N_2)$. В работе представлен алгоритм построения нейросетевой модели, минимизирующей ошибку распознавания на тестовом множестве. Очевидно, что такие модели будут более эффективны в реальной ситуации.

Введем некоторую эмпирическую оценку, характеризующую степень близости между образами, принадлежащими одному классу и степень удаленности образов, относящихся к разным классам. Способ вычисления оценки зависит от выбранного метода предварительной обработки траекторий индикаторов, т.е. от способа задания образов. В частности, в качестве меры близости может быть использована корреляционная функция. Однако, корреляционные функции, как отмечалось ранее, в силу характерных особенностей траекторий индикаторов являются достаточно грубым средством вычисления оценок.

С учетом рассмотренных в работе способов описания траекторий индикаторов в пространстве градиентных параметров или логико-информационных (энтропийных) индексов, более удобной и универсальной нам представляется геометрическая трактовка близости между образами, в рамках которой расстояние между образами вычисляется в соответствии с выбранной метрикой.

Теперь для множества образов X_1, X_2, \dots, X_{K_i} (K_i – общее количество образов, в результате анализа всего экспериментального материала были отнесены к i -му классу) вычислим оценку:

$$V_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{K_i-1} \sum_{j=1}^{K_i} d(x_i, x_j), N_i = K_{i-1} * K_i / 2 \quad (3.9)$$

представляет собой усредненное расстояние между образами i -го класса. Будем трактовать V_i как эмпирическую оценку внутриклассового сходства образов.

Аналогично вычислим оценки близости образов принадлежащих двум различным классам i и j : $W_{ij} = \frac{1}{N_{ij}} \sum_{i=1}^{K_i} \sum_{j=1}^{K_j} d(x_i, x_j)$, $N_{ij} = K_i K_j$, в результате усреднения V_i , W_{ij} ,

$i, j = \overline{1, m}$ по всем классам получим интегральные оценки исходного пространства обучения: $\bar{V} = \frac{1}{m} V_i$; $\bar{W} = \frac{1}{m(m-1)/2} \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^m W_{ij}$

Ясно, что в “идеальном” случае, когда $\bar{V} \rightarrow 0$ и $\bar{W} \rightarrow \infty$ минимизация SS_E при обучении нейронной сети на любом подмножестве $X_L \subseteq X_K$ обеспечит минимизацию ошибки распознавания. Если $\bar{W} \gg \bar{V}$ или $\bar{W} > \bar{V}$, то можно предположить несколько гипотез, объясняющих этот факт:

1. Имеются ошибки при определении соответствия между образами (траектории индикаторов) и заданными классами. Причина этого либо в неполной и неточной экспериментальной информации, либо в некомпетентности экспертов.
2. Выбранные индикаторы не являются достаточно информативными.
3. Используемый способ предварительной обработки индикаторных переменных неадекватен решаемой задаче.

Первые два предположения связаны, в основном, с общей организацией работ по созданию подобных систем, а соответствующие проблемы обсуждались нами ранее. Последняя гипотеза имеет непосредственное отношение к проблеме обучения НС. Поэтому в алгоритм обучения включен комплекс пре процессинговых функций-генераторов обучающих образов.

Разработанный алгоритм обучения включает следующие этапы:

1. Исходный набор образов, полученный в результате конкретной процедуры обработки траекторий индикаторов произвольно разбивается на два подмножества X_L, X_T

2. Осуществляется шаг обучения, заключающийся в выполнении итерационной процедуры $a_{ij}[n] = f(a_{ij}[n-1])$ для всех весовых коэффициентов при однократном прогоне обучающих образов.

3. Вычисляются значения $F_L[n]$.

4. Через построенную на шаге сеть пропускается текстовый набор и вычисляется $F_T[n]$.

5. Выполняется сравнение $F_L[n]$ и $F_T[n]$.

6. Процедура повторяется до тех пор, пока некоторая величина $\psi\{F_L[n], F_T[n]\}$ не достигает минимального значения.

Исследования показали, что $F_L[n]$ достаточно устойчиво и монотонно стремится к нулю или достаточно малой величине при $n \rightarrow \infty$. В тоже время поведение $F_T[n]$ существенно зависит от отношения $\frac{v}{w} = \theta$

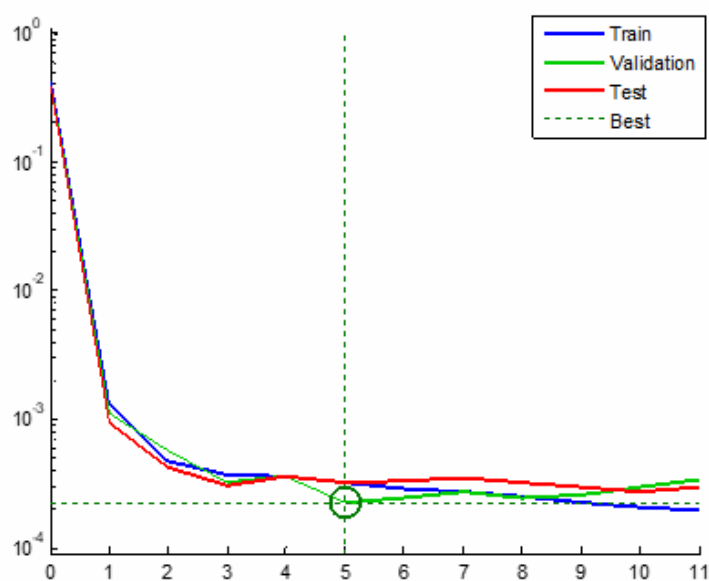


Рис.3.3. Процесс обучения нейросети $N(i_5, h_{10}, 0_1)$

С позиций здравого смысла ясно, что, чем больше величина θ , тем меньшую роль играет степень первоначальной обученности сети, т.е. обучение необходимо прекращать, в случае, если $F_T[n]$ становится больше $F_L[n]$.

Однако, исследования НС различной топологии, построенных на независимом наборе образов X^* показали, что точность распознавания зависит от соотношения $F_L[n]$ и $F_T[n]$ более сложным образом. В результате была предложена эмпирическая зависимость $F_L[n]$ и $F_T[n]$, которую будем рассматривать как критерий оптимальности в схеме, когда обучение и тестирование осуществляется параллельно.

Критерий имеет следующий вид:

$$\frac{F_T[n]}{F_L[n]} > \frac{p}{n} (1 + \theta) \quad (3.10)$$

где p - количество связей в промежуточных слоях ИНС;

n - количество промежуточных узлов.

Для простой однослойной сети (при использовании, например, радиально-базисных функций) в случае разделимости обучающих образов, критерием прекращения обучения будет выполнение условия: $F_L[n] > F_T[n]$.

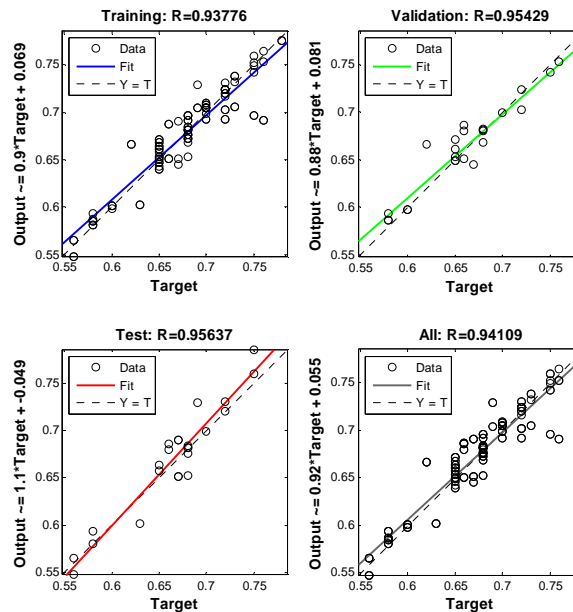


Рис 3.4. Регрессионный анализ результатов обучения нейронной сети ($N(i_5, h_{10}, o_1)$)

Показатели ошибок прогнозирования временного ряда следующие: среднеквадратическая ошибка $MSE = 2.2505e-4$, средняя абсолютная ошибка на обучающей выборке. Коэффициент корреляции на рисунке 3.5 $R = 0.94109$.

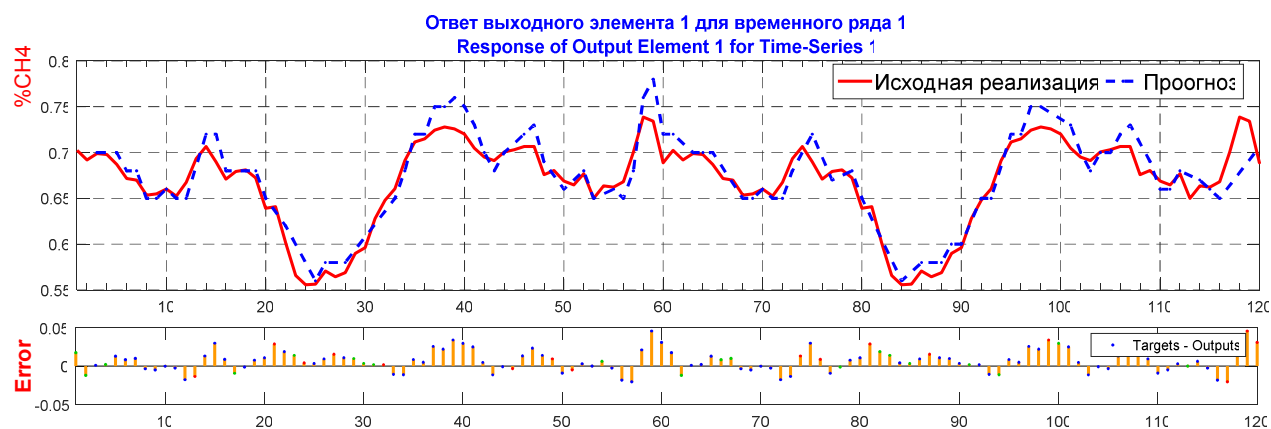


Рис. 3.5. Результаты моделирования значения концентрации с $N(i_5, h_{10}, 0_1)$

3.4. Нейросетевые модели прогнозирования аэрогазодинамических явлений и процессов на основе ИНС Элмана

Задача прогнозирования развития газодинамических процессов является самостоятельной важной задачей, решению которой посвящено значительное количество исследований.

В качестве основного инструмента моделирования была использована ИНС Элмана. Рекуррентная нейронная сеть Элмана [18, 61, 64, 92] представляет собой синхронную, бинарную двухслойную сеть с обратной связью от выхода к входу скрытого слоя (рис. 3.6). Каждый скрытый нейрон имеет свой аналог в контекстном слое, образующем совместно с внешними входами сети входной слой. В качестве функции активации нейронов скрытого слоя обычно используются сигмоидальные функции. Выходной слой состоит из линейных нейронов, однонаправленно связанных только с нейронами скрытого слоя. Рекуррентная структура сети Элмана позволяет учитывать непосредственное влияние сигналов в момент $(n - 1)$ на поведение сети в момент n .

Отличающая от классической feed forward сети наличием, так называемого контекстного слоя, узлы которого используются для запоминания выходных значений узлов промежуточного слоя на предыдущем шаге.

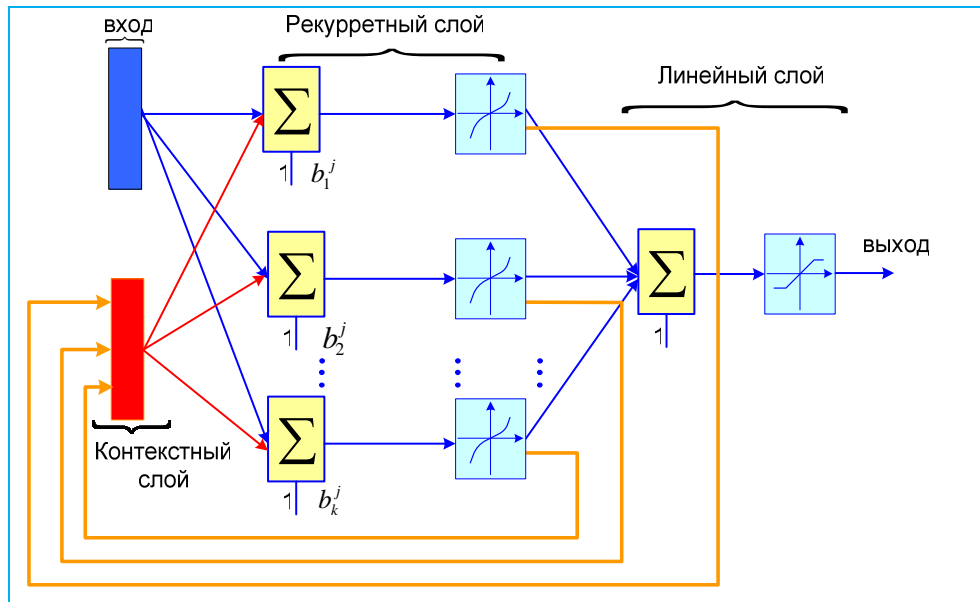


Рис.3.6. Структурная схема рекуррентной нейронной сети Элмана

Тем самым в нейросетевом базисе обеспечивается «переход» к разностным схемам обучения. Применительно к задаче прогнозирования динамических процессов это означает, что исследуется не исходная реализация. А её нелинейная разность $y'(t) = \varphi\{dy(t)\}$.

Подбор наилучшей топологии сеть осуществляется в соответствии с рассматриваемой выше методикой.

При построении НС-модели, общий вид которой определяется выражением:

$$\hat{x}[i+k] = \varphi_{НС}(\{A\}, \tilde{x}[i], x[i-1], \dots, x[i-m]), \quad (3.11)$$

варьировались такие параметры, как – глубина запаздывания – m и шаг прогноза k . В результате было установлено, что k не влияет на точность получаемых решений, а оптимальное значение изменяется в диапазоне $3 \div 5$. Схема экспериментов была аналогична той, которую мы использовали в задаче распознавания.

Множество обучающих образов, в котором пара «вход-выход» задается например, в виде:

$$\langle \tilde{x}[i-3], \tilde{x}[i-2], \tilde{x}[i-1], \tilde{x}[i], \tilde{x}[i+1] \rangle \quad (3.12)$$

Разбивалось на два подмножества. Сеть обучалась на первой половине выборки и тестировалась на второй, при этом построенная ИНС использовалась как генератор прогнозных значений.

3.4.1. Проведение экспериментов

В вычислительных экспериментах использовались наборы данных, представляющие собой временные ряды (1-2 часа наблюдений, с интервалом регистрации 1-3 мин.) значений концентрации метана в условиях действия определенного горно-технологического фактора. Эти наборы данных о концентрации метана в шахте Мао Хе по минутам ($t = 70$ мин, $t = 120$ мин) разбивались на две части: 75- 85 % данных рассматривались в качестве обучающего набора и 15-25 % - в качестве тестирующего набора.

Процесс обучения был построен на использовании метода обратного распространения в соответствии с алгоритмом Levenberg-Marquart. Моделирование осуществлялось при помощи библиотеки Neural Network Toolbox IDE MatLab. На рис. 3.7 показана общая структура сети NARX, специально предназначенной для прогнозирования временных рядов [18].

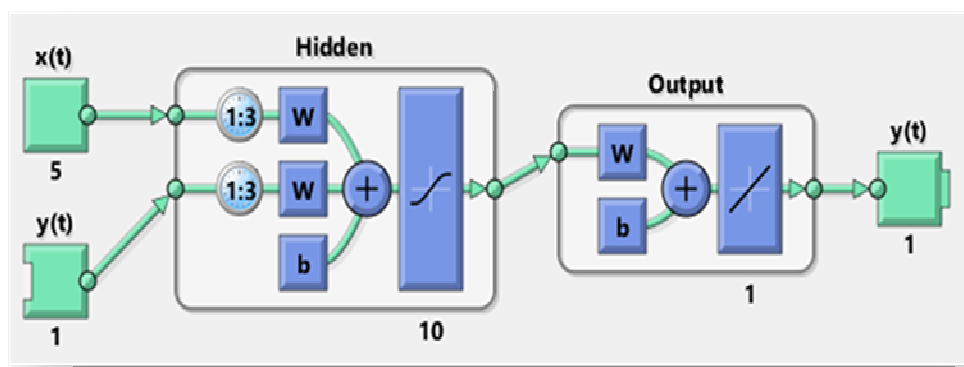


Рис 3.7. Структура сети NARX

Для осуществления прогнозирования наиболее приемлемой оказалась сеть следующей структуры: $N(i_4, h_{10}^1, o_1)$, $\Delta t = 3$.

Далее приведем результаты построения НС-моделей прогноза, соответствующих определенным классом горно-технологических факторов (газодинамических ситуаций).

А). Ситуация - буровзрывные работы

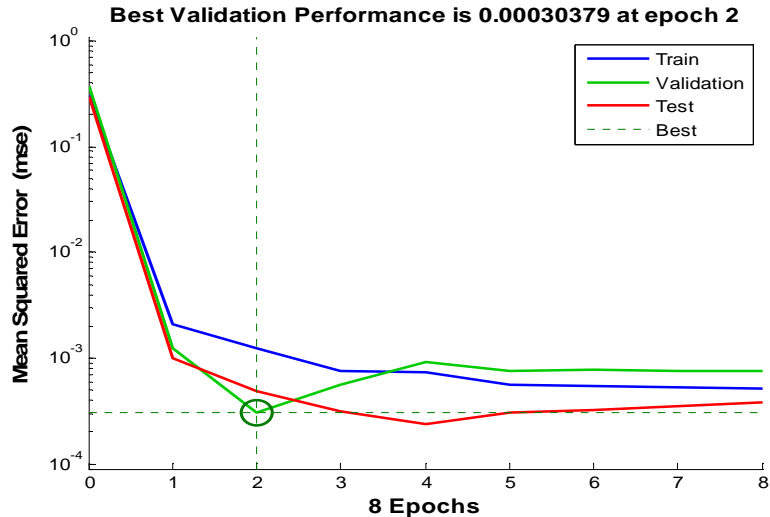


Рис 3.8. Процесс обучения нейросети 8 эпох (Epochs)

Показатели ошибок прогнозирования временного ряда следующие: среднеквадратическая ошибка (буровзрывные работы $SS_E(S_1) = (MSE) = 3.0379e-4$), средняя абсолютная ошибка на обучающей выборке. Коэффициент корреляции (R) является мерой того, насколько хорошо цели нейронной сети могут отслеживать изменения в выходных сигналах (0 – корреляция отсутствует; 1 – абсолютная корреляция). Было обнаружено, что коэффициент корреляции близок к 1 (На рисунке 3.9, $R = 0.98085$).

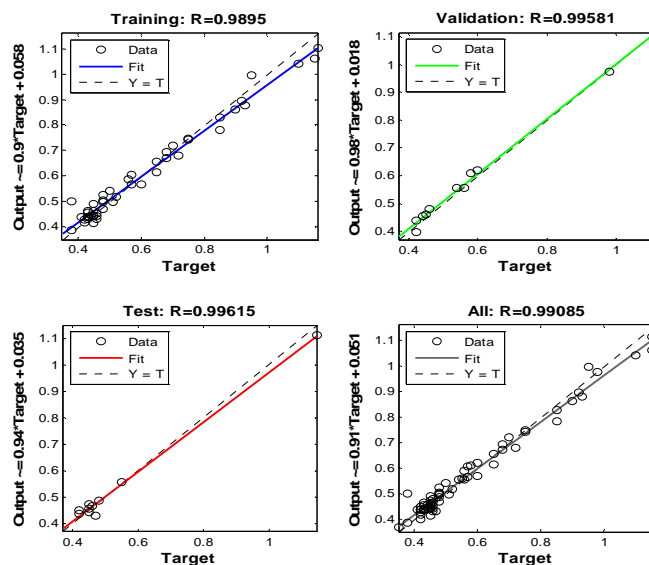


Рис 3.9. Регрессионный анализ результатов обучения нейронной сети.

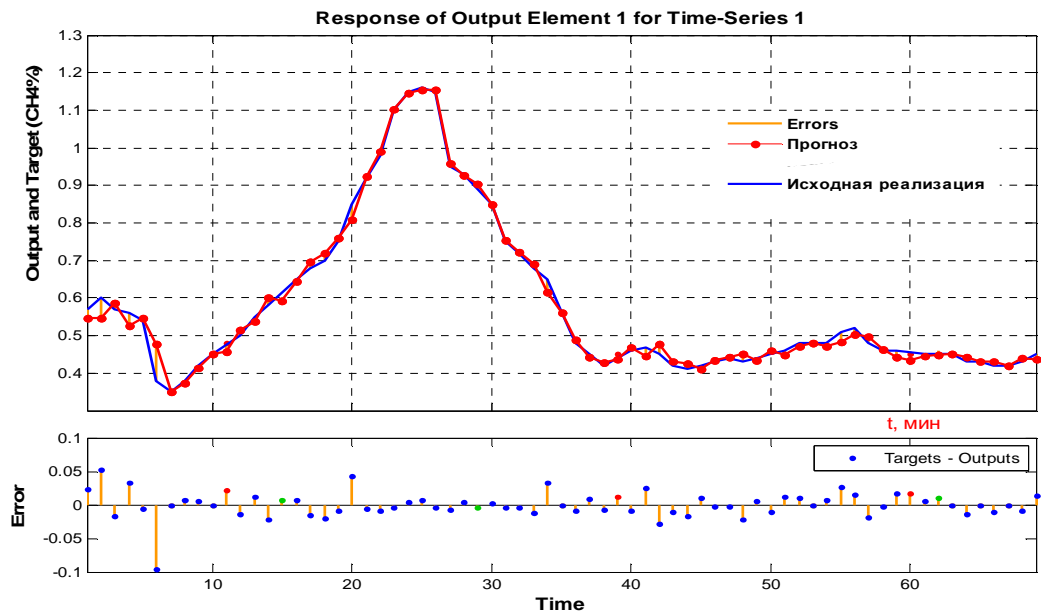


Рис 3.10. Результаты прогнозирования газодинамических процессов на основе НС моделей (случай буровзрывные работы)

Б. Ситуация - нарушение режима вентиляции технического характера.

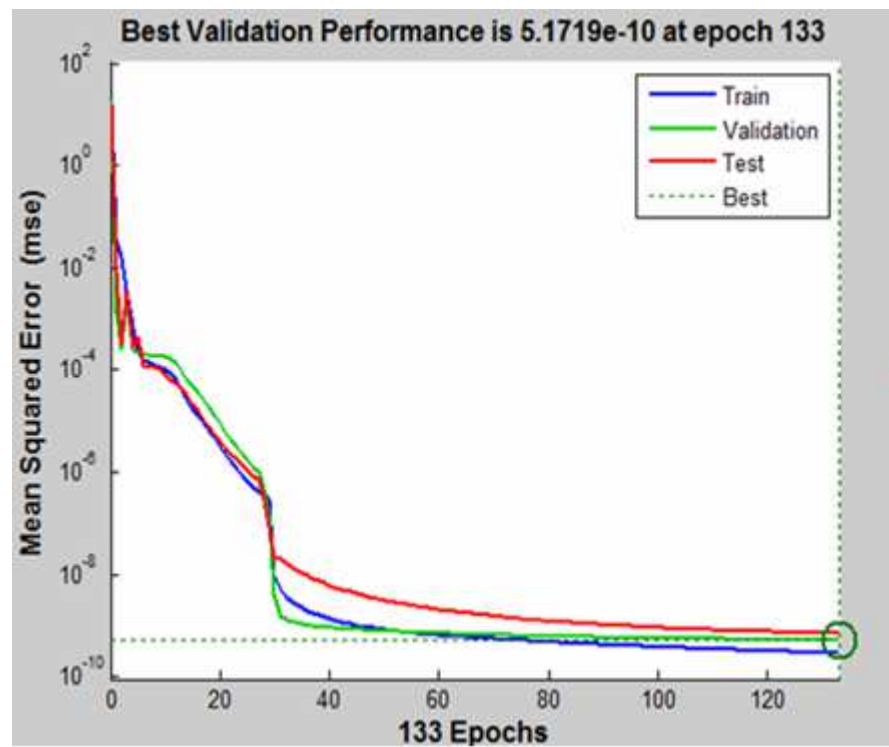


Рис 3.11. Процесс обучения нейросети 133 эпох (Epochs)

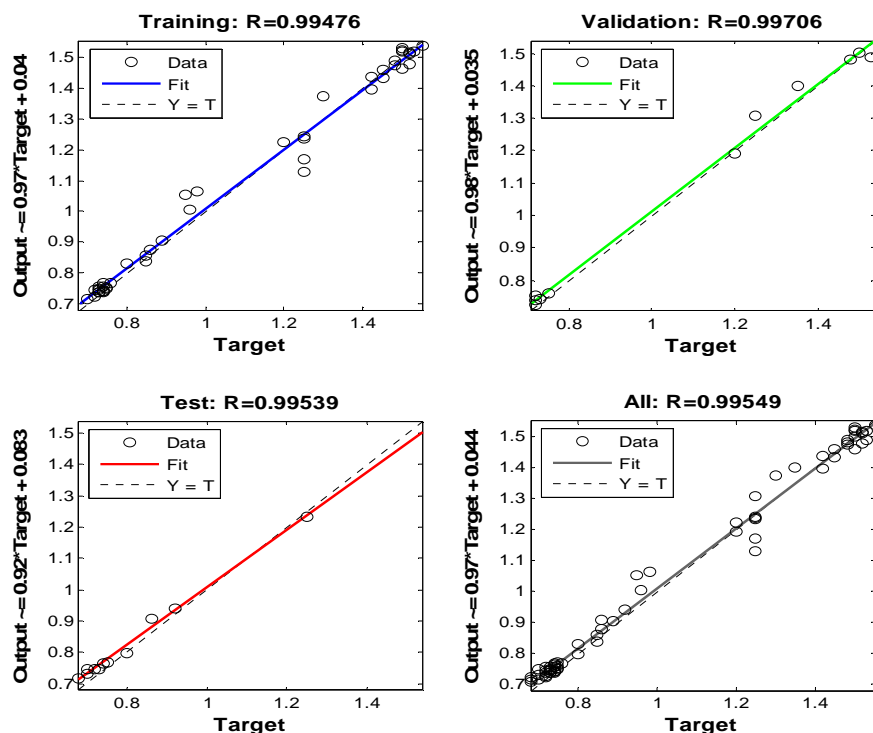


Рис 3.12. Регрессионный анализ обучения нейронной сети.

Показатели ошибок прогнозирования временного ряда следующие: среднеквадратическая ошибка (Нарушение режима вентиляции технического характера ($SS_E(S_2) = (MSE) = 5.1719e-10$), средняя абсолютная ошибка на обучающей выборке. Коэффициент корреляции на рисунке 3.13, $R = 0.99549$.

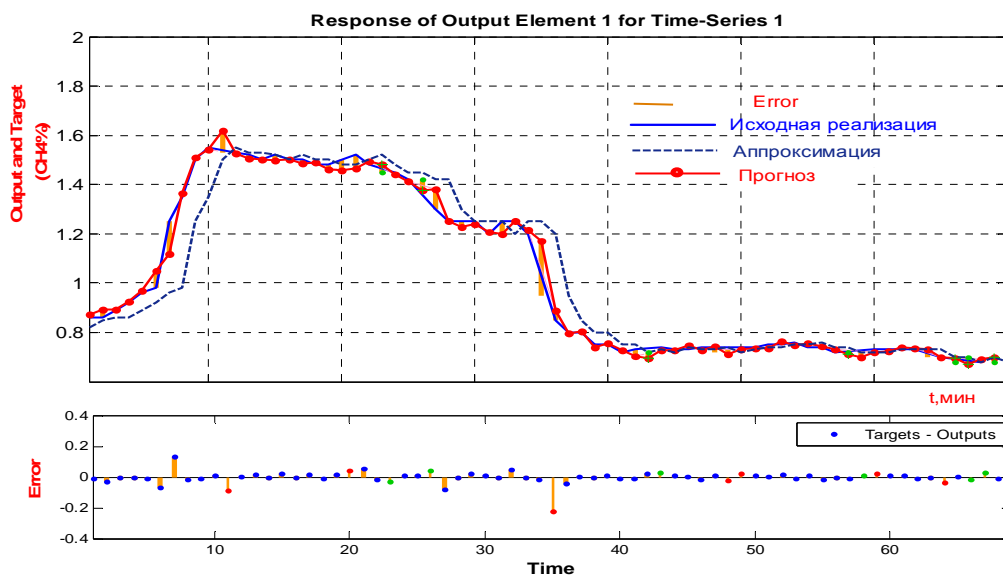
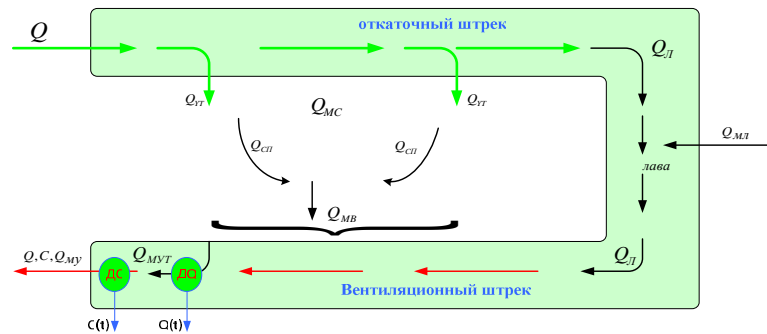


Рис 3.13. Результаты прогнозирования газодинамических процессов на основе ИНС моделей (случай нарушение режима вентиляции технического характера)

В). Ситуация – фильтрация газа из выработанного пространства выемочного участка.



Обобщенная схема движения газовоздушной смеси в выработках и выработанном пространстве выемочного участка: Q - дебит воздуха на участке; C - концентрация метана в исходящей струе участка; Q_{CH_4} - дебит метана из спутника; Q_{MB} - общий дебит метана из выработанного пространства;

Q_{MY} - общий дебит метана в исходящей струе участка; Q_{ML} - дебит метана из лавы; Q_{ym} - утечки воздуха в выработанное пространство; ДС, ДQ – датчики соответственно концентрации метана и расхода воздуха.

Рис 3.14. Обобщенная схема движения газовоздушной смеси в выработках и выработанном пространстве выемочного участка.

Для осуществления прогнозирования наиболее приемлемой оказалась сеть следующей структуры: $N(i_5, h_{10}, O_1)$, $\Delta t = 3$.

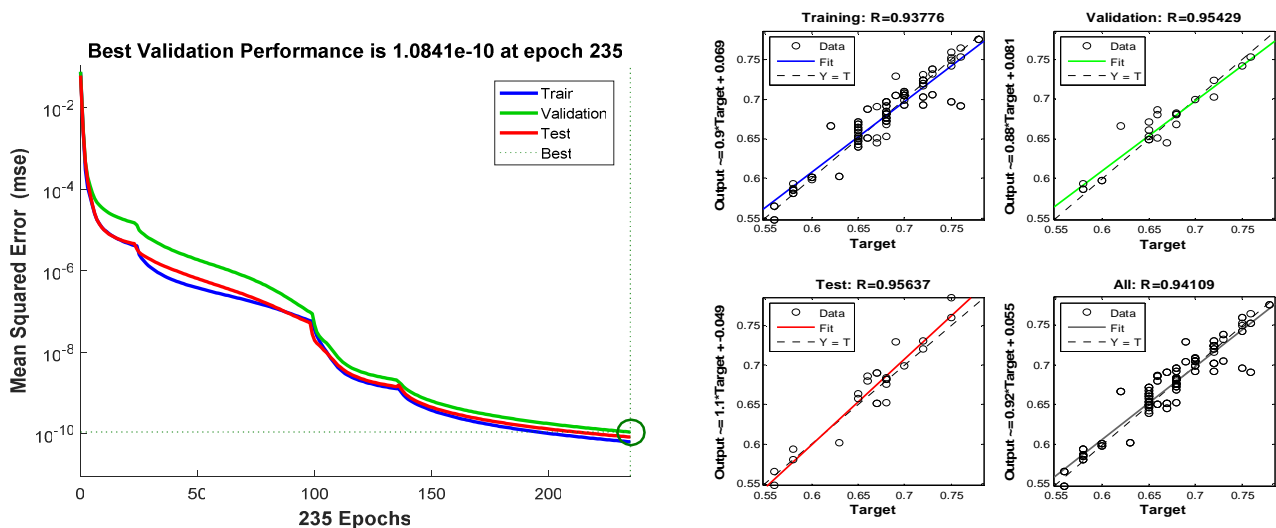


Рис 3.15. Процесс обучения нейросети 235 эпох (Epochs) и Регрессионный анализ результатов обучения нейронной сети.

Показатели ошибок прогнозирования временного ряда следующие: среднеквадратическая ошибка $MSE = 1.0841e-10$, средняя абсолютная ошибка на

обучающей выборке. Коэффициент корреляции, соответствующий результатам прогноза по построенной модели (рис.3.16), составил $R = 0.94109$.

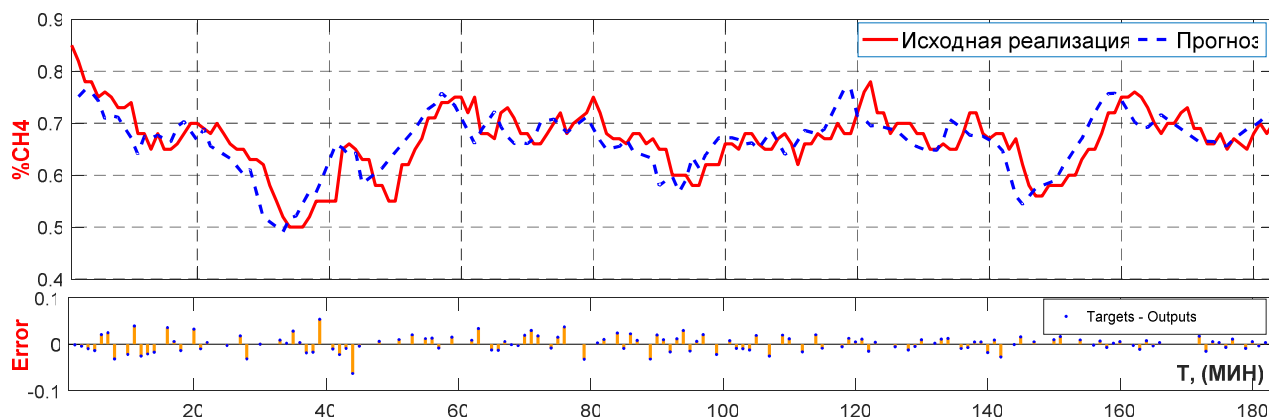


Рис. 3.16. Результаты моделирования значения концентрации

3.5. Выводы

В проведенных компьютерных экспериментах исследовались три класса газодинамических ситуаций. Каждый класс был представлен различным числом образов (7-10 реализаций). Моделирование и исследование НС- структур осуществлялось в среде MATLAB. При разработке соответствующих программных модулей, осуществляющих последовательную селекцию нейросетевых структур, были использованы open source ресурсы библиотеки anaconda. Анализ НС с целью определения оптимальной осуществлялся на различных комбинациях обучающих и тестовых наборов. В ходе вычислительных экспериментов исследовались НС структуры вида: $N(i_5, h_{p1}^1, o_1)$, а p_1 изменялись в диапазоне (5 ÷ 10).

В результате для каждого класса были выбраны НС: $N1(i_5, h_{10}^1, o_1)$, $N2(i_5, h_7^1, o_1)$, $N3(i_5, h_5^1, o_1)$, наиболее подходящие для решения задач распознавания и прогнозирования. При решении задачи оперативного распознавания явлений ошибки в процентах составили: S_1 - 2.4%, S_2 - 7.2%, S_3 - 8,3%.

При использовании построенных моделей для прогноза на интервале тестирования = 120мин, $\Delta t = 3$, средняя ошибка прогноза по всем явлениям составила $S = 5.1\%$, что является приемлемым, не только для имитационного мо-

делирования исследуемых процессов и явлений, но и для практики прогнозирования в реальных условиях.

Проведенные исследования показали, что:

1. процесс формирования образов является неформальной задачей, а результаты распознавания существенно зависят от конкретных горно-геологических условий и используемых индикаторов;

2. метод решения задачи распознавания на базе НС обратного распространения должен включать две основные процедуры: пре-процессинговые операции, заключающиеся в обработке траекторий индикаторов, с целью формирования набора обучающих образов; селекция нейросетевых структур по критериям скорости и точности обучения;

3. при любой скорости обучения наблюдается определенная зависимость между погрешностью обучения и точностью распознавания. Она имеет противоречивый характер и зависит, как от структуры пространства обучения, так и от топологии сети;

4. разработанный алгоритм с параллельным тестированием и обучением в условиях заданной структуры нейросети и характеристик пространства обучения, является работоспособным и позволяет решать поставленные задачи;

5. основным, но ожидаемым (в связи со структурой и механизмом обучения) недостатком построенных на основе разработанного алгоритма ИНС является невозможность их адаптивной подстройки в случае проявления неприемлемых ошибок распознавания ($>10\%$);

6. указанный недостаток может быть устранен при отладке и настройке программного модуля в системе мониторинга шахты МаоХе за счет уточнения требуемого периода обновления моделей распознавания.

7. виды пре-процессинговых операций, заключающихся в обработке траекторий индикаторов, с целью формирование набора обучающих образов требуют дальнейшего изучения и развития;

8. применение нейронных сетей для текущего прогнозирования концентрации обеспечивает необходимую точность, предъявляемую к прогнозу значений концентрации метана;

9. апробация способа показала его работоспособность и возможность осуществлять текущий прогноз в реальном времени для оперативного управления газовой обстановкой в условиях неравномерности концентрации метана на больших глубинах разработки и при высокой нагрузке на очистной забой.

Глава 4. Разработка алгоритма управления вентиляторами местного проветривания с использованием нейросетевых моделей

4.1. Нейросетевые модели управления вентиляционной системой шахт

Как отмечалось в Главе 1, еще в 90-е годы прошлого века были, в принципе, разработаны идеология и некоторые элементы системы интеллектуального управления аэрогазодинамическими процессами в шахтах. При разработке этой системы основное внимание уделялось вопросам создания баз знаний, необходимых для поддержки диспетчерского персонала при принятии решений в нестандартных ситуациях (рис.4.1).

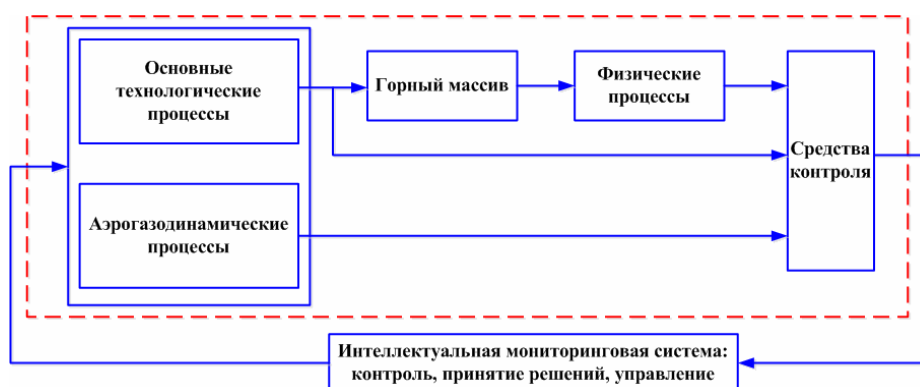


Рис. 4.1. Концептуальная схема взаимодействия интеллектуальной мониторинговой системы с технологическими процессами в шахте

Однако, вопросы управления вентиляционными режимами с обеспечением оперативного перераспределения воздуха между шахтными выработками, в целом, не были решены. Во многом, такое положение объясняется структурой систем управления вентиляцией, которая считалась основной в это время. Такая система включала в себя мощный вентилятор главного проветривания (ВГП), управление которым в оперативном режиме - сложная и опасная для всего газо-воздушного баланса шахты задача, а также пассивные регуляторы, устанавливаемые на добычных участках. Управление строилось на оперативном изменении положений регуляторов (створки, шторы и т.д.), что позволяло изменить площадь сечения выработки и, следовательно, скорость (а значит и

расход) воздуха. Это очень громоздкая схема, которая в реальной практике требует огромных затрат энергии на нагнетание в шахтные выработки значительных объемов воздушных масс, которые требуются для оперативного перераспределения. В шахтах Вьетнама сегодня реализуется другая концепция, которая опирается на использование компактных, устанавливаемых непосредственно в лаве регулируемых вентиляторов местного проветривания (ВМП).

Как отмечалось ранее, алгоритмы управления вентиляционной сетью в целом и работой ВМП, в частности, являются частью комплексной системы мониторинга аэрогазодинамики шахты, а необходимые для их функционирования модели формируются в рамках интеллектуальной аналитической платформы. Очевидно, что базовыми функциями для данной системы являются регистрация и хранение всей поступающей с объекта управления сенсорной информации, а также удобное визуальное представление этой информации диспетчерскому персоналу.

Однако, важное место в системе занимают разработанные при участии автора специальные программные инструменты, которые позволяют выполнять оперативный анализ газодинамических режимов и технологических ситуаций с использованием современных технологий прогнозной аналитики. Кроме того, этот программный комплекс должен осуществлять поддержку принятия оперативных решений, в частности, запускать систему управления вентиляторами местного проветривания с целью кратковременной корректировки режимов вентиляции и изменения расхода воздуха в конкретных ветвях шахной вентиляционной сети (ШВС) с учетом прогнозных значений концентрации метана, а также координировать воздухораспределение по шахте в целом [69,93]. Кратко перечень задач выглядит следующим образом:

1. Анализ газодинамических реализаций и интерпретация ситуации.
2. Прогнозирование изменения концентрации метана в определенных зонах шахной вентиляционной системы.
3. Определение необходимых значений расходов воздуха в определенных ветвях вентиляционной системы.

4. Оценка возможностей перераспределения воздуха. Определение задающих воздействий для регулятора ВМП.

5. Определение моментов запуска и отключения САУ ВМП, а также оперативная подстройка параметров PI-регуляторов частоты вращения основного исполнительного механизма.

На рис. 4.2 представлена схема функционирования платформы в рамках системы комплексного мониторинга шахты.

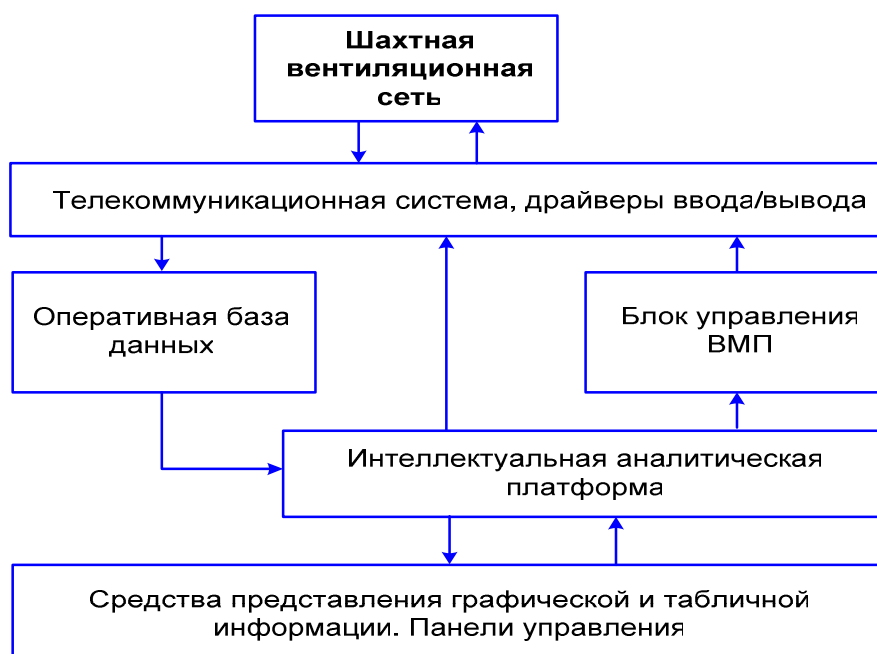


Рис 4.2. Схема функционирования аналитической платформы.

Проблема построения математических моделей и синтеза эффективных алгоритмов управления ШВС является принципиально важной для решения задачи определения рационального (с учетом противоречивости критериев эффективности и безопасности) воздушного баланса.

Одним из основных достоинств НС, которое позволяет применить этот инструмент при решении сетевых вентиляционных задач, является возможность оперативного обучения НС в рамках различных парадигм с целью предварительной настройки НС на заданную вентиляционную сеть и ее до обучения (адаптации) в процесс взаимодействия с объектом управления.

Будем считать, что процесс обработки задающих воздействий на регулирующие органы (ВМП) является практически безынерционным по сравнению с длительностью переходных процессов по газу и воздуху $t_{\gamma} \ll t_{\theta} \ll t_c$.

На рис.4.3 показано место нейросетевого регулятора в схеме управления перераспределением воздуха в ветвях вентиляционной системы.

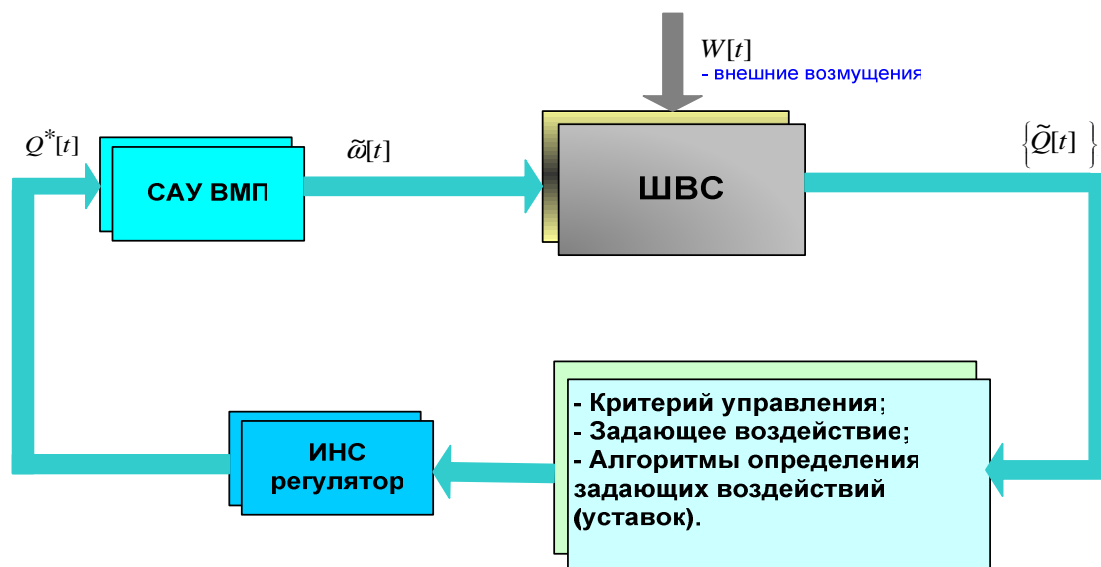


Рис.4.3. Обобщенная схема управления вентиляцией с использованием ИНС

Пусть $\{q_1(t), q_2(t), \dots, q_m(t)\}$ – множество значений расходов воздуха, которые регистрируются в on-line режиме с заданной периодичностью в базовых (наиболее значимых с позиций безопасности ведения работ) ветвях ШВС. Данное множество представим в виде двух непересекающихся подмножеств: $Q_R\{q_1(t), q_2(t), \dots, q_{m_1}(t)\}$ и $Q_c\{q_1(t), q_2(t), \dots, q_{m_2}(t)\}$, соответствующих расходам в ветвях, в которых непосредственно установлены ВМП (назовем их ветвями-донорами), и расходам в остальных контролируемых ветвях (ветви-акцепторы). При этом, заметим, что $m = m_1 + m_2$. Используя данные наблюдений за определенный период t_0, t_1, \dots, t_n расходов воздуха в ветвях ШВС при изменении режимов работы ВМП (например, в ремонтную смену), получим некоторую обучающую таблицу, которая может быть использована для начальной настройки нейронной сети. Задача синтеза заданного воздухо-

распределения может быть сформулирована следующим образом: найти такие $Q_R(t)$, чтобы выполнялось условие $Q_c(t) = Q^*(t)$. Решение этой задачи может быть получено с помощью нейросетевой схемы обратного распространения [69]:

$$Q_R[i] = f\{Q_c[i]\}, i = \overline{1, N};$$

где N - количество наблюдений.

Если предположить гипотетически, что в ШВС отсутствуют нестационарные возмущения, а контролируемые параметры измеряются без ошибок, тогда задача синтеза заданного воздухораспределения может быть сформулирована как задача сетевого управления ШВС на основе ВМП.

$$\omega[i] = \phi\{Q_c[i]\} \quad (4.1)$$

Основная проблема, которая возникает при использовании подобной схемы перераспределения воздушных потоков в вентиляционной системе шахты, заключается в том, что в силу особенностей горно-технологических процессов, топология вентиляционной системы постоянно меняется. То есть, на практике весьма реальной будет ситуация, когда $|q^*[n+1] - \hat{q}[n+1]| \gg E$, где E – некоторое допустимое расхождение между наблюдаемым реально и требуемым (заданным) значениями расхода воздуха.

Данная проблема может быть решена с использованием двух подходов:

1. Путем адаптации параметров PI – регуляторов в САУ ВМП, определяющих расход воздуха в ветвях-донорах.
2. За счет оперативной подстройки нейросетевой модели перераспределения воздушных потоков между ветвями-донорами и ветвями-акцепторами.

Вопросы, связанные с настройкой параметров регуляторов с использованием НС представляют отдельный класс задач и рассматриваются в завершении данной главы. Второй подход реализуется через разработанный механизм перераспределения потоков воздуха в вентиляционной системе, основные этапы которого состоят в следующем:

1. Выбор структуры нейросетевой модели и начальное обучение сети

$$L_1: \{Q_C^*([i]); Q_R([i])\} \rightarrow N(W, \varphi), \quad (4.2.)$$

где $i = \overline{1, N}$; N – количество наблюдений;

W – обобщенный вектор весовых коэффициентов;

φ – активационные функции.

2. Тестирование степени адекватности $N(W, \varphi)$ на реальной вентиляционной сети (VN) в широком диапазоне значений \vec{Q}_R .

Практическая отработка на объекте зафиксированных в ветвях-донорах расходов. Определение ошибок, которые дает построенная модель перераспределения воздуха:

$$VN: Q_R([i]) \rightarrow \tilde{Q}_C([i]);$$

$$|\tilde{Q}_C([i]) - Q_C^*([i])| = E$$

3. Повторное обучение нейронной сети

$$L_2: \{E([i]); Q_C^*([i]);$$

$$Q_R([i])\} \rightarrow N'(\omega', \varphi),$$

где $E([i])$ фиксируется на некотором минимальном уровне, например, $E^*([i]) = 0,05 Q_m([i])$.

4. Повторение этапов 2,3 до того момента, когда $E([i])$ достигнет заданного значения погрешности.

Предположенный механизм был реализован на основе инструментов машинного обучения библиотеки Scikit-learn. Вычислительные эксперименты осуществлялись с использованием специально разработанных с учетом граф-схемы реального объекта (рис.4.4) имитационных моделей.

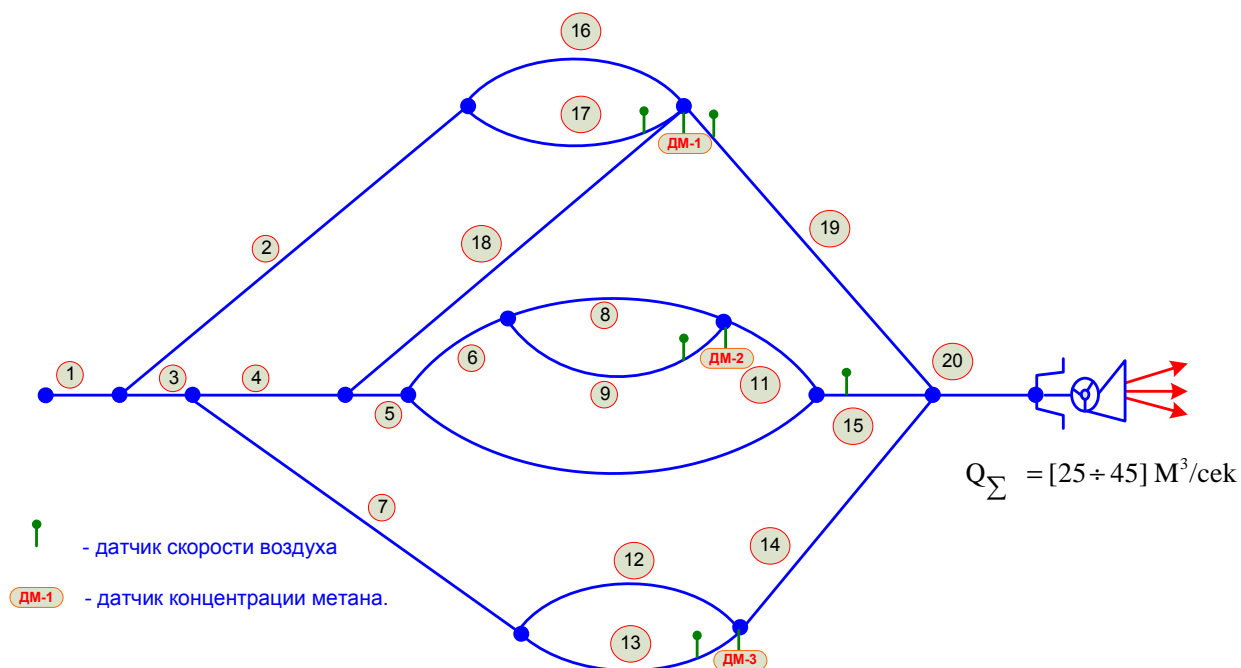


Рис 4.4. Топологическая схема вентиляционной сети участков добычи «Шахта Мао Хе»

1- Воздухоподающий ствол; 2—16-й северное крыло конвейерный штрек; 3—16-й Северное крыло откаточный штрек; 4—центральный уклон; 5—1-й конвейерный ходок 15 гор; 6—2-й конвейерный ходок 15 гор; 7—16-й северный конвейерный ходок; 8—15-й северное крыло вентиляционный штрек; 9—лава 9Т; 10—лава 9V; 11— бортовой ходок 15 гор; 12 – южное крыло ходок гор; 13 – лава 9А; 14 – южное крыло вентиляционный штрек; 15 – вентиляционный штрек, выходящий на скважину; 16 – лава 9АТ; 17 – северное крыло конвейерный ходок; 18—14-й северное крыло откаточный штрек; 19 –14-й северное крыло вентиляционный штрек; 20 – вентиляционный скважина № 02.

$V_{17} = [0,24 - 0,581]$; $V_9 = [0,268 - 0,681]$; $V_{13} = [0,183 - 0,321]$; $V_{15} = [1,8 - 2,2]$; $V_{19} = [2,5 - 2,9]$, [M/cek]

$q_{17} = [2,976 - 7,085]$; $q_9 = [2,755 - 5,196]$; $q_{13} = [2,235 - 3,917]$; $q_{15} = [11,5 - 14,6]$; $q_{19} = [16-18,5]$ [M³/cek]

В результате исследований в качестве нейросетевой модели управления перераспределением расходов воздуха была выбрана трехслойная сеть радиально-базисных функций вида: $N(i_6, h_{12}, O_6)$.

Тестирование работы модели осуществлялись в течение нескольких реальных ремонтных смен на шахте Мао Хе (Республика Вьетнам). Устойчивые значения ошибки в диапазоне 6-10% от величины регистрируемого расхода

воздуха были достигнуты в результате 3-5 тактов адаптации на рисунке 4.5. (Результат обучения нейронной сети в приложении 2).

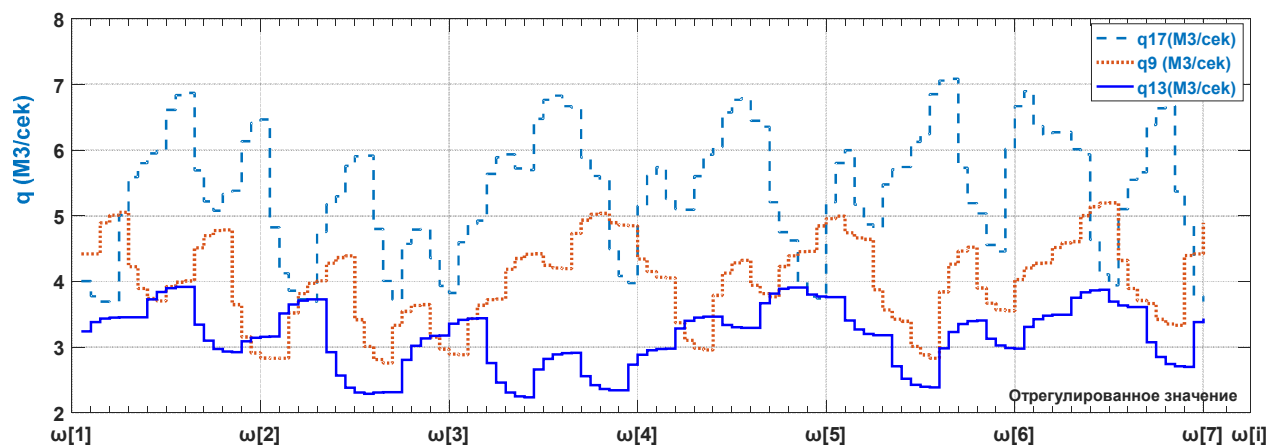


Рис 4.5. $[\omega_1 = 0; \omega_2 = 10; \omega_3 = 20; \omega_4 = 30; \omega_5 = 40; \omega_6 = 50; \omega_7 = 60]$

4.2. Использование вентиляторов местного проветривания

На сегодняшний день в шахтах Вьетнама общепринятой практикой является использование ВМП. Проблема управления ВМП в практических условиях является достаточно сложной, т.к. основной параметр регулирования $Q^*(t)$ определяется на основе сложных нелинейных зависимостей $Q^*(t) = f\{\tilde{C}(t)\}$.

Основным способом достижения взрывобезопасности в шахтах и горных выработках, опасных по газу и пыли, служит поддержание атмосферы под землей на уровне менее 1,2 % содержания метана, путем искусственного нагнетательного проветривания. По правилам, принятым Министерством угольной промышленности Вьетнама, ВМП обычно располагаются в начале выработки угольного пласта, когда длины и сечения вентиляционных ветвей малы. В этом случае нет необходимости в больших объемах воздуха. По мере отработки угольного пласта длины и сечения ветвей увеличиваются. Все это ведет к необходимости увеличения объема подачи воздуха в вентиляционную систему в целом, и в каждую отдельно взятую ее ветвь. В связи с этим в основном вентиляционном туннеле производят замену вентиляторов местного проветривания более мощными. Как правило, в шахтах, при необходимости замены вентилятора на более мощный, устанавливают вентилятор, имеющий большие, по

сравнению с требуемыми, на момент установки, параметрами. А это приводит к значительным расходам электроэнергии.

Задача, которая была поставлена в диссертационной работе, заключалась в разработке алгоритма управления вентилятором местного проветривания, который должен использоваться в системе автоматического управления (САУ) вентиляционными режимами. Общая структура САУ показана на рисунке 4.6, где БР – блок регуляторов; ПЧ – преобразователь частоты; ВС – вентиляционная сеть [80,83].

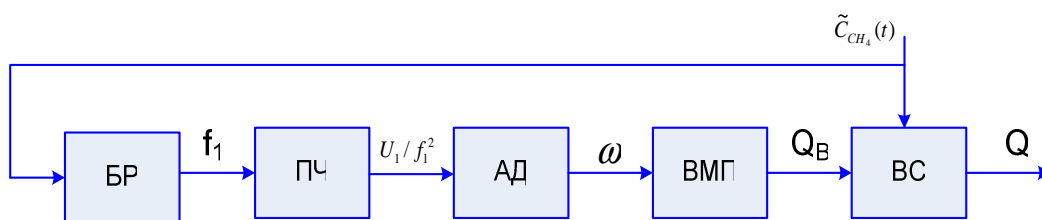


Рис 4.6. Структура САУ ВМП

Система включает в себя преобразователь частоты, питающий асинхронный электродвигатель (АД) привода ВМП, при работе которого ВМП создает воздушный поток, поступающий в вентиляционную сеть.

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).

4.2.1 Пример расчета вентилятора для проветривания выработки на шахте Мао Хе «Лава № V9A »

Для моделирования и анализа работы системы вентиляции необходимо произвести расчет параметров. 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 Мао Хе «Лава №

V9a » со следующими параметрами: длина выработки 250 м, с поперечным сечением 12,1 м². В забое одновременно работает 4 человека.

Расход воздуха по лимитирующим факторам:

- по людям:

$$Q_{п.з}^л = 6 \cdot N_{ч} = 6 \cdot 4 = 24 \text{ м}^3/\text{мин} = 0,4 \text{ м}^3/\text{с} ,$$

$N_{ч}$ - количество одновременно работающих человек в забое;

- по горючим газам:

$$Q_{п.з}^г = \frac{I_{г}}{C_{доп} - C_0} \cdot 100 = \frac{3 \cdot 100}{1 - 0} = 300 \text{ м}^3/\text{мин} = 5 \text{ м}^3/\text{с} \quad (4.3)$$

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

$I_{г}$ - абсолютная газообильность, м³/мин;

- по выхлопным газам - нет;

- по газам от взрывных работ – нет.

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

Полученное значение проверяем по допустимой скорости движения воздуха:

$$Q_{v.\min} \leq Q_{п.з.}^{\max} \leq Q_{v.\max}$$

Расход воздуха, обеспечивающий минимально-допустимую скорость движения воздуха:

$$Q_{v.\min} = S \cdot v_{\min} = 12,1 \cdot 0,25 = 3,025 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4.4)$$

где S - площадь выработки в свету, м²;

v_{\min} - минимально-допустимая скорость движения воздуха в выработке м/с.

Расход воздуха, обеспечивающий максимально-допустимую скорость движения воздуха:

$$Q_{v.\max} = S \cdot v_{\max} = 12,1 \cdot 4 = 48,4 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4.5)$$

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

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

Определяем параметры вентилятора местного проветривания для вентиляции тупикового забоя:

- расход воздуха, проходящего через вентилятор

$$Q_{ВМП} = k_{ум.пр} \cdot Q_{н.з.}^p = 1,06 \cdot 5 = 5,3 \text{ м}^3 / \text{с} \quad (4.6)$$

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

- депрессия вентилятора:

$$h_{ВМП} = h_{тр} + h_{м} + h_{дин} = 880,06 + 211,2 + 88,006 = 1179,3 \text{ Па}; \quad (4.7)$$

- депрессия трения трубопровода:

$$h_{тр} = R \cdot Q_{ВМП}^2 = 31,35 \cdot 5,3^2 = 880,06 \text{ Па}, \quad (4.8)$$

где аэродинамическое сопротивление трения:

$$R = \alpha \cdot \frac{6,5 \cdot L}{d^5} = 0,0015 \cdot \frac{6,5 \cdot 250}{0,6^5} = 31,35 \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^8, \quad (4.9)$$

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:

$$h_{дин} = \rho \cdot \frac{v_{тр}^2}{2} = 1,2 \cdot \frac{18,8^2}{2} = 212 \text{ Па}, \quad (4.10)$$

где скорость движения воздуха на выходе из трубопровода:

$$v_{тр.} = \frac{Q_{нз.}^p}{S_{тр.}} = \frac{5,3}{0,2826} = 18,8 \text{ м} / \text{с}, \quad (4.11)$$

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

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

- депрессия, затрачиваемая на преодоление местных сопротивлений:

$$h_{м} = 0,1 \cdot h_{тр} = 0,1 \cdot 880,06 = 88,006 \text{ Па}, \quad (4.12)$$

По полученным параметрам – необходимому расходу воздуха и депрессии выбираем вентилятор местного проветривания, соответствующий FBD - №08 (китайского производства).

Вентилятор FBD - №08 комплектуется асинхронным электродвигателем, параметры которого приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Параметры вентилятора местного проветривания FBD - №08

НАИМЕНОВАНИЕ ПАРАМЕТРА, ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ	ЗНАЧЕНИЕ
Номинальный диаметр, мм	630
Номинальная подача Q_n , м³/с	7
Номинальное полное давление H_n , Па	2500
Максимальный полный коэффициент полезного действия (КПД) вентилятора, %	68
Уровень звуковой мощности, дБА	118
Мощность, кВт	25
Напряжение, В	380/660
Частота вращения, об /мин	3000
Частота сети, Гц	50
Уровень взрывозащиты двигателя	PB-3B
Степень защиты двигателя	IP – 54
Сечение проветриваемых выработок, м²	10-14
Масса комплекта, кг	420

4.3. Разработка алгоритма управления скоростью привода асинхронного двигателя ВМП с нейросетевой настройкой параметров ПИ-регулятора

4.3.1. Схема управления приводом.

На рис. 4.7. представлена схема векторного управления приводом асинхронного двигателя для ВМП [104, 107]. В настоящее время косвенное векторное управления - самый популярный метод в промышленных приложениях, где требуется широкий диапазон скорости и быстрая реакция.

В системе координат d - q уравнения модели асинхронного двигателя могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned}
 U_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs} + \omega_{sr} \cdot \Psi_{qs} \\
 U_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds} + \omega_{sr} \cdot \Psi_{ds}
 \end{aligned}
 \tag{4.13}$$

Ψ_r - вектор потока ротора;

T_e - электромагнитный момент;

M_c - статический момент нагрузки;

ω_m - угловая частота вращения ротора, рад/с;

J - момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя.

Основной особенностью метода полевого управления (FOC) является координатное преобразование. Вектор тока измеряется в неподвижной координате $\alpha - \beta$. Поэтому компоненты тока $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ должны быть преобразованы во вращающуюся систему $d - q$. Аналогично, компоненты вектора напряжения опорного статора $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$, должны быть преобразованы из системы $d-q$ в $\alpha-\beta$.

Угловая скорость вектора потока ротора может быть рассчитана следующим образом:

$$\begin{aligned}\omega_{rs} &= \omega_{sl} + p_b \omega_m \\ \omega_{rs} &= \omega_{sl} = \frac{1}{I_{sd}} \frac{R_r}{L_r} I_{sq}\end{aligned}\quad (4.14)$$

В частном случае, когда составляющие нулевой последовательности фаз отсутствуют, например, если обмотки машины соединены в звезду без нулевого провода, то выполняется соотношение $U_a + U_b + U_c = 0$ и третья координата векторной переменной оказывается линейно зависимой от двух остальных координат. Порядок координатных преобразований уменьшается на единицу [104]. Из (a, b, c) в (α, β) в векторно-матричной форме:

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \cos 0 & \frac{2}{3} \cos(-\frac{2\pi}{3}) & \frac{2}{3} \cos(\frac{2\pi}{3}) \\ -\frac{2}{3} \sin 0 & -\frac{2}{3} \sin(-\frac{2\pi}{3}) & -\frac{2}{3} \sin(\frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}$$

Из (α, β) в (a, b, c) :

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 & 1 \\ \cos(-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(-\frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix}\quad (4.15)$$

Непосредственно из (a, b, c) в (d, q) .

$$\begin{aligned}
U_d &= \frac{2}{3}[(U_a \cos \theta + U_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + U_c \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})] \\
U_q &= \frac{2}{3}[(U_a \sin \theta + U_b \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + U_c \sin(\theta + \frac{2\pi}{3})]
\end{aligned}
\tag{4.16}$$

Из (d, q) в (a, b, c) :

$$\begin{aligned}
U_a &= U_d \cos \theta - U_q \sin \theta; \\
U_b &= U_d \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) - U_q \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}); \\
U_c &= U_d \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) - U_q \sin(\theta + \frac{2\pi}{3});
\end{aligned}
\tag{4.17}$$

Обозначим мгновенные значения фазовых токов в статоре соответствующие фазам а, b и с, как i_a , i_b и i_c . Эти фазы можно рассматривать как три планарные системы координат. Конечно, в планарной системе есть только две степени свободы и возможны только два независимых вектора. Любая дополнительная величина может быть выражена как линейная комбинация. Преобразование Кларка переводит трехосную систему координат в двухосную ортогональную систему. Для этого преобразования используется формула:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}
\tag{4.18}$$

где i_α и i_β - проекции пространственного вектора тока на оси двухфазной стационарной системы координат; i_a , i_b , i_c - проекции пространственного вектора тока на оси трехфазной системы координат.

Затем используется преобразование Парка для перевода стационарной системы координат (i_d, i_q) . Исходные координаты d (магнитный поток) и q (крутящий момент) и система координат совмещают ось d с положением магнитного поля. Компоненты i_d и i_q статорного тока определяются из следующих уравнений:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}
\tag{4.19}$$

где $\theta = \omega t$ - значение угла поворота вращающейся системы координат с частотой ω .

Это позволяет контроллеру формировать напряжения, которые нужно приложить к статору для задания векторов токов требуемой величины в системе координат ротора. Напряжение затем трансформируется с помощью обратных преобразований Парка и Кларка в импульс напряжения в 3-фазной системе координат статора.

4.3.2. Разработка алгоритма нейросетевой адаптации параметров PI-регулятора скорости привода асинхронного двигателя ВМП в шахте Мао Хе (Вьетнам)

PI-регуляторы давно применяются в системах управления динамическими объектами и, в частности, в системах управления асинхронным двигателем. Тем не менее, применение классических PI-регуляторов имеет свои ограничения и недостатки. В работе предлагается использовать регулятор, с нейросетевой подстройкой параметров для оперативной корректировки алгоритма управления скоростью асинхронного двигателя. Предложенная структура системы управления показана на рисунке 4.8, где нейронная сеть, типа RBF, используется для идентификации параметров: k_p , k_i [99,102,106,110].

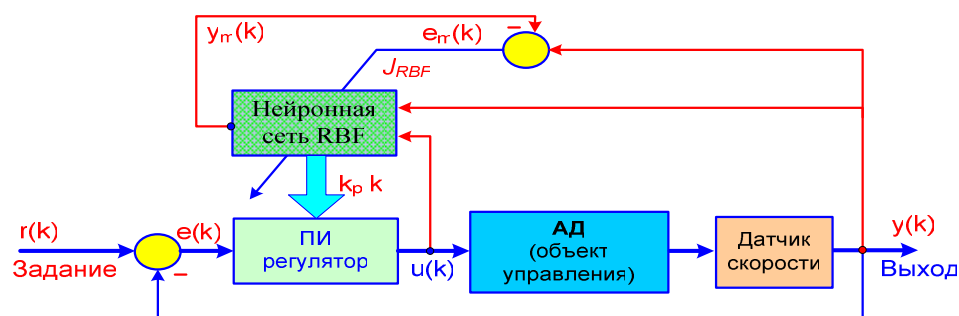


Рис 4.8. PI-регулятор на основе RBF нейронной сети.

($r(k)$ – задание, $e(k)$ – рассогласование, $u(k)$ – сигнал управления, $y(k)$ – выход объект управления, $y_m(k)$ – выход идентификатора RBF.

НС на основе радиально-базисных функций (RBF) представляет собой трехслойную сеть прямого распространения, которая использует радиально-базисные функции в качестве функций активации. Выходной сигнал сети представляет собой линейную комбинацию взвешенных значений соответствующих нейронов промежуточного слоя. НС данного типа находят применение в задачах аппроксимации, прогнозирования временных рядов, классификации. Их преимуществом является высокая скорость обучения и способность избежать

проблемы локального минимума в области управления системой. Поэтому, мы использовали RBFNN для настройки параметров регулятора в разрабатываемом алгоритме управления.

Структура нейронной сети, которая была взята нами за основу, показана на рисунке 4.9 [98].

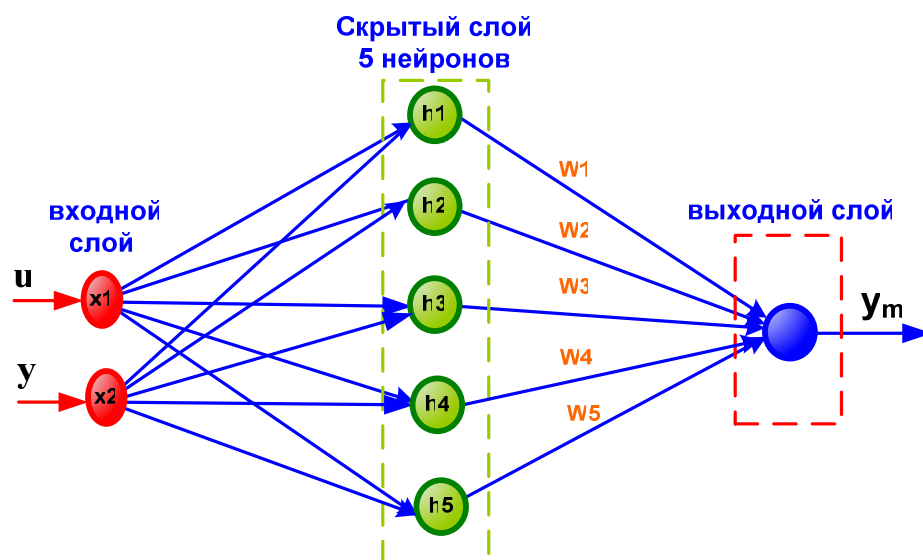


Рис 4.9. Нейронная сеть RBF

Кроме того, матрица якобиана важна для регулирования параметров PI-регулятора в этой стратегии управления.

Сеть RBF имеет три уровня: входной уровень, один скрытый слой и выходной слой. В этой сети есть два входа, и входной вектор сети RBF задается как:

$$X = [x_1, \dots, x_i]^T = [u, y]^T; \quad \{i = 1, 2\}$$

В нейронной сети RBF в качестве функции активации используется функция Гаусса. Скрытые нейроны реализуют функцию Гаусса как базисную функцию, и элементы радиального базисного вектора $H = [h_1, h_2, \dots, h_j, \dots, h_5]^T$ могут быть выражены гауссовой функцией:

$$h_j(x) = \exp \left[\frac{-\|x - c_j\|^2}{2b_j^2} \right]; \quad \{j = 1, 2, \dots, 5\} \quad (4.20)$$

где X - входной вектор нейронной сети.

Таким образом, выход сети может быть выражен следующим образом:

$$y_m(k) = \sum_{j=1}^J w_j h_j(x) \quad (4.21)$$

где w_j - веса нейронной сети RBF. Критерий оптимальности записывается как:

$$\frac{1}{2} [y(k) - y_m(k)]^2,$$

где $y(k)$ - идеальный выход.

Обучение, осуществляется методом градиентного спуска, а параметры нейронной сети RBF изменяются следующим образом:

$$\begin{aligned} w_j(k+1) &= w_j(k) + \eta [y(k) - y_m(k)] h_j + \alpha [w_j(k) + w_j(k-1)] \\ c_{ij}(k+1) &= c_{ij}(k) + \eta [y(k) - y_m(k)] h_j w_j \frac{(x_i - c_{ij})}{b_j^2} + \alpha [c_{ij}(k) + c_{ij}(k-1)] \\ b_j(k+1) &= b_j(k) + \eta [y(k) - y_m(k)] h_j w_j \frac{\|x_i - c_{ij}\|^2}{b_j^2} + \alpha [b_j(k) + b_j(k-1)] \end{aligned}$$

где $\eta \in (0,1)$ - скорость обучения, а $\alpha \in (0,1)$ - коэффициент усиления. Матрица

Якоби может быть представлена следующим образом [109,110]:

$$\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial u(k)} = \sum_{j=1}^m w_j h_j \frac{c_{1j} - x_1}{b_j^2} \quad (4.22)$$

где $x_1 = u(k)$.

Известно, что эффективность PI-регулирования напрямую связана со значениями параметров k_p и k_i . Таким образом, правильная настройка параметров PI-регулятора является важной задачей и разработанная сеть RBF способна точно настраивать k_p и k_i в разных ситуациях с использованием матрицы Якоби. Процедура выглядит следующим образом.

Определяется способ вычисления ошибки сети: $E(k) = \frac{1}{2} [r(k) - y(k)]^2$.

Затем на основе метода градиентного спуска реализуется автоподстройка k_p и k_i :

$$\Delta k_p = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_p} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial k_p} = \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} \cdot x_{c1}(k) \quad (4.23)$$

$$\Delta k_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_i} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial k_i} = \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} \cdot xc_2(k) \quad (4.24)$$

где $\frac{\partial y}{\partial u}$ - матрица якобиана, $xc_1(k), xc_2(k)$ - это входы PI-регулятора в нашем алгоритме управления. В рассматриваемом алгоритме управления системная ошибка между желаемым и фактическим выходами системы определяется так:

$$\begin{aligned} e(k) &= r(k) - y(k) \\ e_m(k) &= y(k) - y_m(k) \end{aligned} \quad (4.25)$$

Входы PI можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} xc_1(k) &= e(k) - e(k-1) \\ xc_2(k) &= e(k) \end{aligned} \quad (4.26)$$

Метод градиентного спуска позволяет корректировать параметры регулятора k_p и k_i :

$$\begin{aligned} k_p(k+1) &= k_p + \Delta k_p = k_p + \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} \cdot xc_1(k) \\ k_i(k+1) &= k_i + \Delta k_i = k_i + \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} \cdot xc_2(k) \end{aligned} \quad (4.27)$$

А алгоритм PI-регулирования выглядит следующим образом:

$$u(k) = u(k-1) + k_p\{e(k) - e(k-1)\} + k_i e(k) \quad (4.28)$$

Таким образом, процесс управления RBFNN-PI (рис.4.10) может быть суммарно описан следующим образом:

- Вводятся все имеющиеся значения на шаге k
- Вычисляется сетевой выход y_m на основе собранных данных.
- Строится матрица Якоби.
- Настраиваются параметры PI-регулятора.
- Подается управляющая команда на асинхронный двигатель.
- Устанавливается шаг $k = k + 1$.

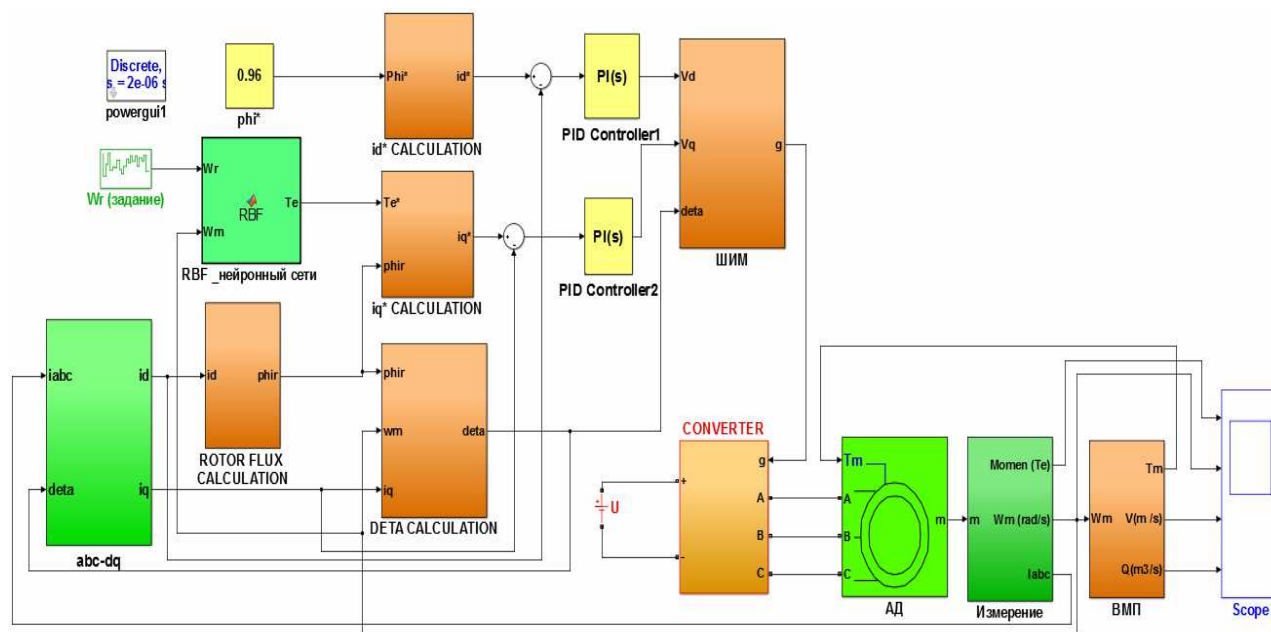


Рис 4.10. Модель Simulink для управления приводом асинхронного двигателя ВМП.

4.3.3. Результаты моделирования

Компьютерное моделирование процессов регулирования осуществлялось в среде MATLAB / Simulink. Сравнение производительности предлагаемого адаптивного PI- регулятора на нейронной сети RBF с классическим PI- регулятором показаны на рисунке 4.11.

Были выбраны стандартные параметры PI-регулятора, которые настраиваются методом проб и ошибок, $k_p = 110$, $k_i = 10$. Частота переключения инвертора выбрана равной 5 кГц, а номинальное напряжение промежуточного контура - 1000В.

Можно видеть, что на рисунке 4.11, отклик системы индукционного привода двигателя на основе предлагаемого способа нейронной сети – ПИ регулятора управления ПИ имеет меньшие перерегулирования и стационарную ошибку, чем обычный метод управления ПИ на этапе изменении задания скорости.

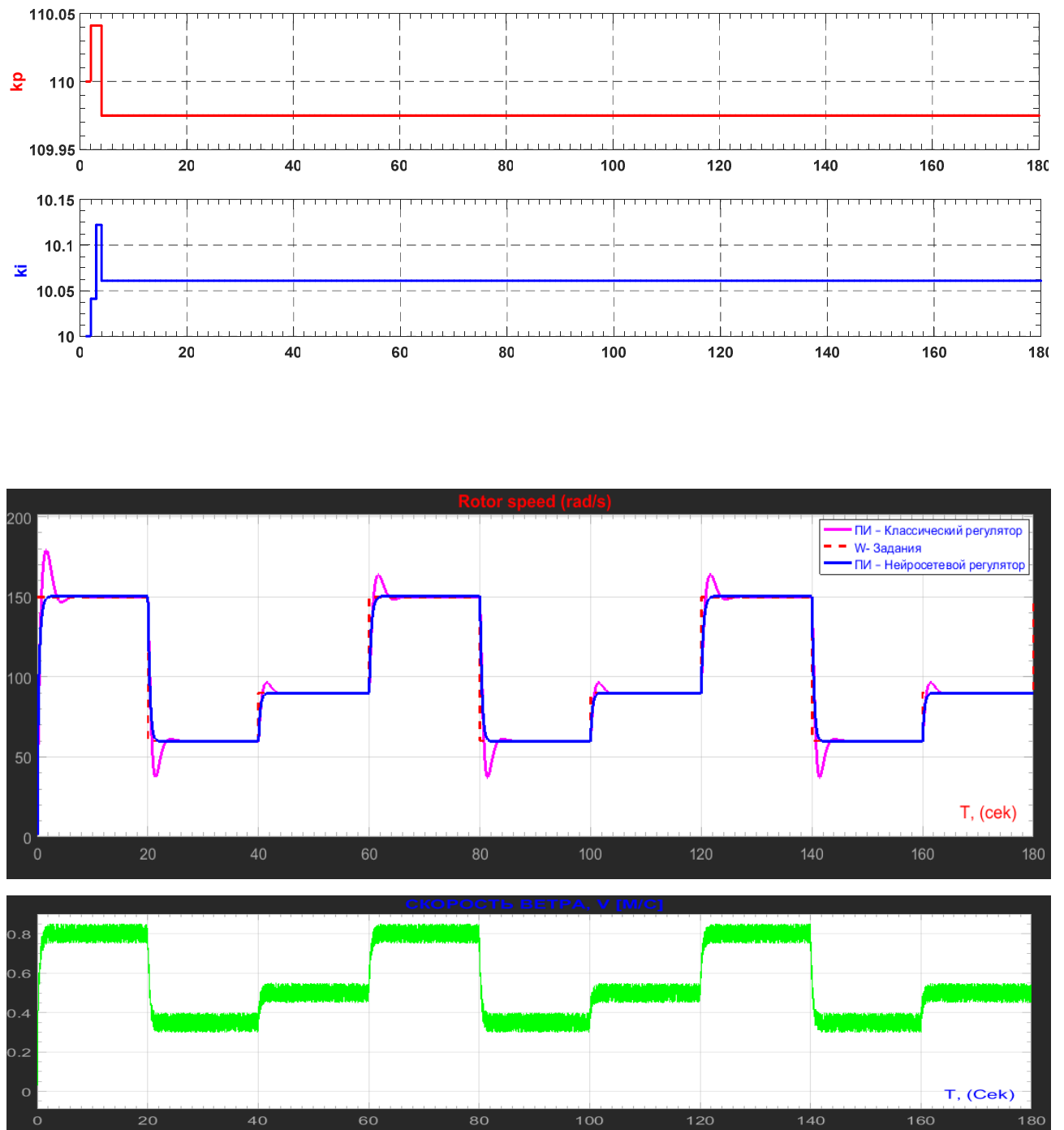


Рис.4.11а. Результаты моделирования с нейроконтроллером

Пример задания $q_{17}^* = 7 \text{ М}^3/\text{Сек}$ (Требуемое значение) на рисунке 4.11б.

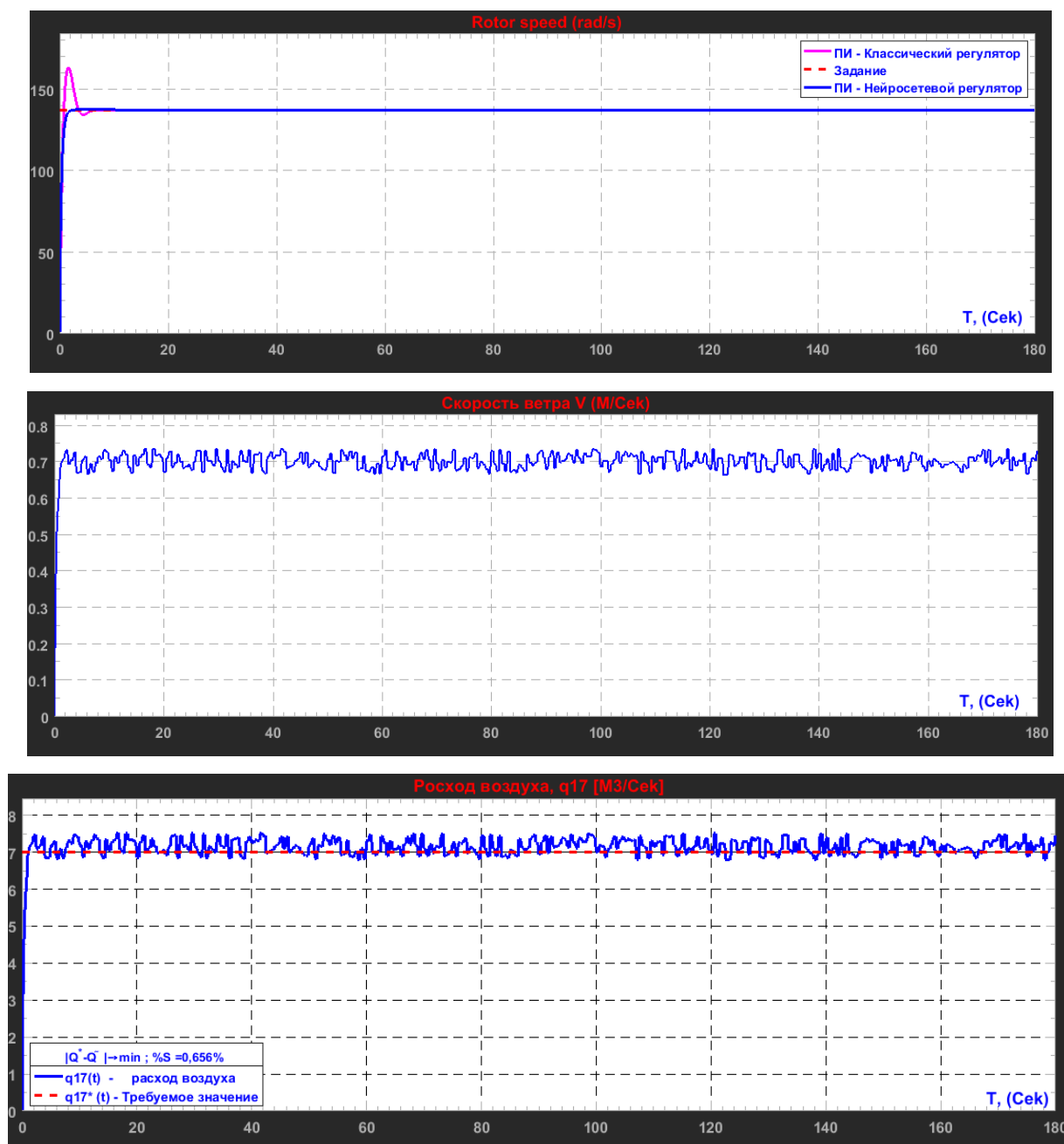


Рис.4.11б. Результаты моделирования с нейроконтроллером ($q^{17*} = 7 \text{ M}^3/\text{с}$)

В данной работе на основе модели нейроконтроллера с нейроэмулятором, включающие многослойную нейронную сеть прямого распространения было реализовано управление скоростью привода асинхронного двигателя ВМП.

Разработан алгоритм управления ВМП, обеспечивающий возможность адаптивной настройки параметров классического PI - регулятора с использованием нейронного механизма.

Нейронная сеть нейроэмулятора обучалась на основе алгоритма обратного распространения ошибки, а сам нейроконтроллер работал в режиме предсказания и уменьшения ошибки.

Применение модификации ПИ-регуляторов на основе нейронных сетей в системах управления вентиляцией шахтой позволит не только надежно решить техническую проблему создания нормальных атмосферных условий на горном предприятии, но и существенно снизить затраты на энергопотребление за счёт потребления энергии ровно такого количества, какое требуется для снижения концентрации вредных веществ в подземных горных выработках.

Таблица 4.2. Параметры вентилятора местного проветривания FBD

НАИМЕНОВАНИЕ ПАРАМЕТРА, ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ	ЗНАЧЕНИЕ
Мощность, кВт	25
Напряжение, В	380/660
Частота вращения, об /мин	3000
Частота сети, Гц	50-60
$\cos\varphi$	0,88
Кратность начального пускового вращающего момента к номинальному	1,9
Кратность минимального вращающего момента к номинальному	1,3
Кратность максимального вращающего момента к номинальному	2,5
Момент инерции (J), кг/м ²	0,085
Удельная масса, кг/кВт	9,5
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
Диаметр трубопровода ветра, м	0,6
Площадь выработки в свету, м ² ;	12,1

4.4. Разработка системы мониторинга концентрации метана и автоматического управления ВМП в шахте Мао Хе (Вьетнам).

В настоящее время всё больше сфер человеческой деятельности подвергаются автоматизации. С ростом уровня автоматизации производственной деятельности выросло и число программных продуктов, используемых для управления технологическими процессами [19]. В настоящей статье рассматривается один из возможных подходов к решению задачи оперативного перераспределения воздуха с использованием SCADA- системы WinCC 7.4. При этом рассматриваются общие принципы построения и основные функции мониторинговой системы.

На рис. 4.12 представлена общая структура локальной системы мониторинга, которая должна выполнять следующие функции:

- Обеспечение возможности непрерывной работы ВМП;
- Контроль состояния и управление вентиляторами местного проветривания;
- Контроль потока воздуха в тупиковых выработках.

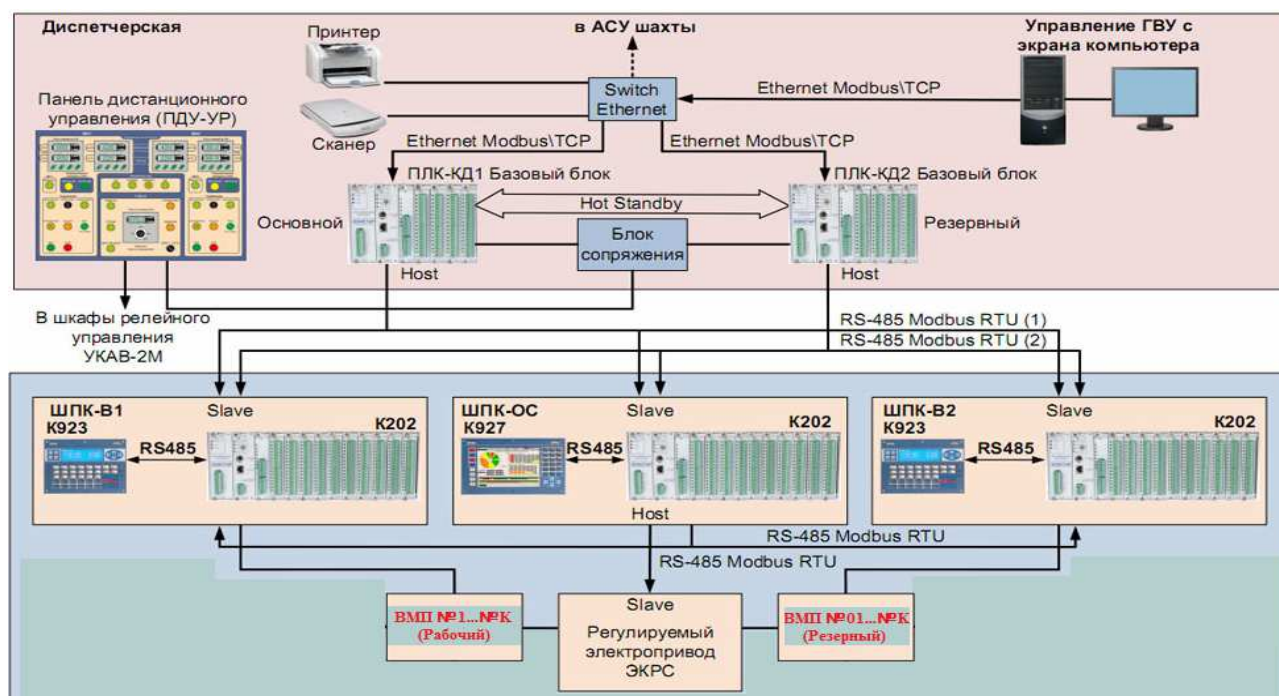


Рис. 4.12. Структура локальной САУ ВМП

- Сбор и обработка информации от датчиков и измерительных преобразователей нижнего уровня системы, а также формирование управляющих сигналов на

исполнительные механизмы преобразователей частоты с использованием программируемого логического контроллера (ПЛК).

- Непрерывный автоматический контроль скорости воздуха, поступающего к забою тупиковой выработки по вентиляционному трубопроводу;
- Регулируемая выдержка времени на включение группового аппарата, питающего электроприемники подготовительной выработки с момента выдачи датчиком скорости воздуха сигнала о нормальном проветривании выработки;
- Автоматическое отключение группового аппарата с регулируемой выдержкой времени с момента выдачи датчиком скорости воздуха сигнала о нарушении нормального проветривания выработки, либо его отказа;
- Импульсное включение рабочего или резервного вентилятора местного проветривания ВМП, обеспечивающее плавное заполнение вентиляционного трубопровода воздухом;
- Местное или дистанционное управление рабочим или резервным ВМП;
- Визуализация через SCADA-системы сигналов о режиме проветривания, включенном и выключенном состоянии ВМП и группового аппарата, наличии напряжения питания в резервной сети;
- Функция самодиагностики и самоконтроля контроллера, входных и выходных сигналов.

Аппаратура автоматизации должна обладать высокой надежностью, так как отказ в системе местного проветривания может быть причиной взрыва или пожара [19, 115];

Установка дополнительно содержит систему автоматического управления (рис.4.13), включающую датчик количества воздуха, датчик метана, преобразователь частоты и напряжения питания, установленный между выходом пускателя и входными клеммами электродвигателя вентилятора местного проветривания, причем управляющий выход датчика количества воздуха связан со входом блока обработки данных, выход которого связан с управляющим входом преобразователя частоты и напряжения питания. Применение установки

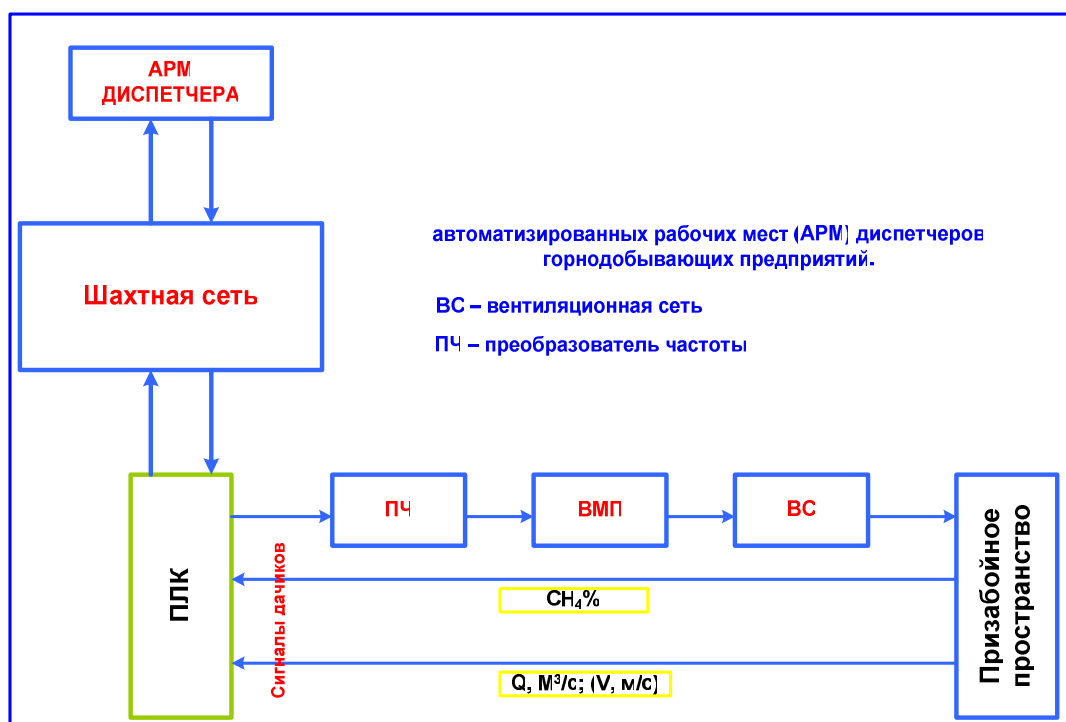


Рис. 4.13. Общая структурная схема предлагаемой системы автоматического управления ВМП

гарантирует надежность выхода вентилятора местного проветривания на расчетный режим подачи воздуха в забой проводимой выработки, минимальное участие обслуживающего персонала в регулировке режимов и контроле поступающего воздуха, снижение расхода электроэнергии электроприводом вентилятора местного проветривания. При этом применение системы не исключает возможности грубой под регулировки режимов работы вентилятора местного проветривания поворотом лопаток направляющего аппарата, входящего в конструкцию каждого регулируемого вентилятора местного проветривания [19].

Регулирование режимов работы вентилятора может быть оперативным только в случае применения средств автоматики, обеспечивающих быстрый и точный отбор данных по параметрам (количество воздуха, подаваемого трубопроводом к забою), быстрой и надежной обработки исходных данных, выработки решения по изменению параметров режимов работ вентиляторов местного проветривания и своевременной выдаче команды на исполнение. Система обеспечивает возможность автоматизированного управления шахтными вентиляторами главного проветривания при соблюдении всех нормативов безопасно-

сти, а также контроль технологических параметров работы вентиляторной установки.

Технический результат, достигаемый при решении поставленной задачи, выражается в обеспечении расчетной производительности вентилятора местного проветривания, работе вентилятора с оптимальной нагрузкой, высоким коэффициентом полезного действия и минимальным потреблением электроэнергии. Поставленная задача решается тем, что установка вентилятора местного проветривания, содержащая вентилятор местного проветривания, став трубопровода и пускатель вентилятора отличается тем, что дополнительно содержит систему автоматического управления, включающую датчик количества воздуха, преобразователь частоты и напряжения питания, установленный между выходом пускателя и входными клеммами электродвигателя вентилятора местного проветривания, причем управляющий выход датчика количества воздуха связан со входом блока обработки данных, выход которого связан с управляющим входом преобразователя частоты и напряжения питания.

▪ **Регулирования вентиляторные местного проветривания и человеко-машинные интерфейсы (SCADA) [113,115].**

На рисунке 4.14 приведена структурная схема системы автоматического управления процессом проветривания в шахте. Система двухуровневая - на верхнем уровне расположена подсистема мониторинга и диспетчерского управления, а на нижнем три подсистемы, соответствующие решаемым задачам управления: подсистема аэрогазового контроля параметров рудничной атмосферы в подготовительной выработке, подсистемы автоматического управления и мониторинга ВМП и подсистема автоматического разгазирования.

Физическую и логическую связь между промышленными контроллерами (ПЛК, ПЧ), измерительными преобразователями и исполнительными механизмами подсистем и их интеграцию в единую систему автоматического управления процессом проветривания подготовительной выработки обеспечивает локальная промышленная сеть (ЛПС) [19,115].

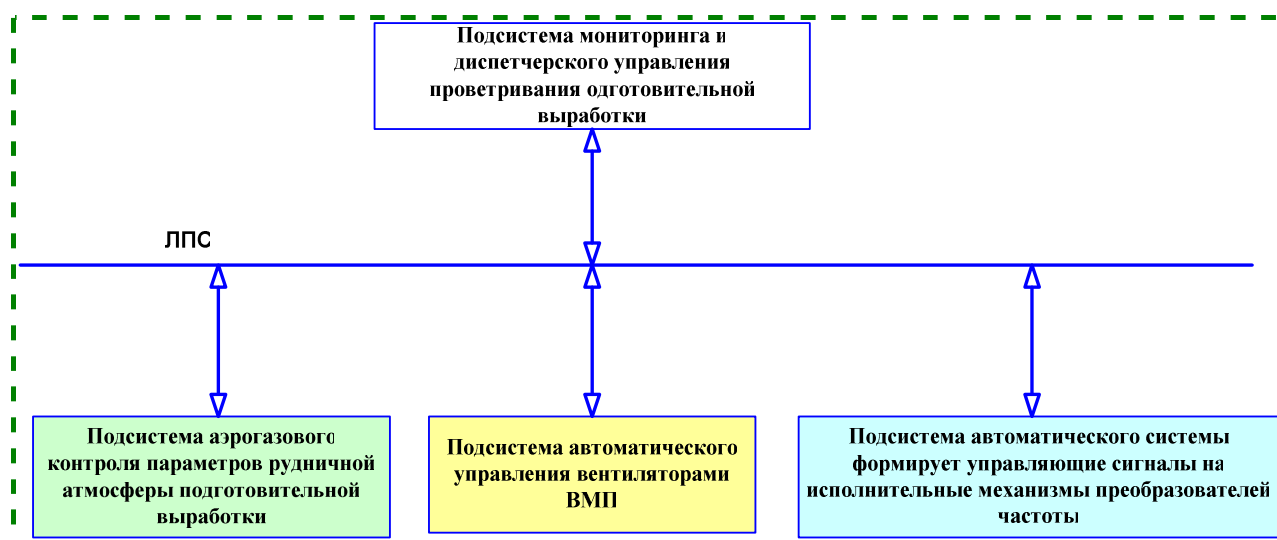


Рис.4.14. Структурная система управления вентиляторами местного проветривания угольной шахты

Подсистема мониторинга и диспетчерского управления это программно-аппаратный комплекс диспетчера шахты для сбора, хранения и отображения информации в реальном времени о протекании и управлении процессом проветривания [19,115].

Установка вентилятора местного проветривания в системе проветривания проводимой выработки работает следующим образом. Производят установку базовых настроек по необходимой производительности вентилятора (Q_p) и допустимым ограничениям этой производительности ($Q_{min}(t)$ и $Q_{max}(t)$).

Периодичность поверочного цикла при нормальном поступлении воздуха в при забойное пространство определяется вышеупомянутым интервалом считывания данных. Применение установки гарантирует надежность выхода вентилятора местного проветривания на расчетный режим подачи воздуха в забой проводимой выработки, минимальное участие обслуживающего персонала в регулировке режимов и контроле поступающего воздуха, снижение расхода электроэнергии электроприводом вентилятора местного проветривания. При этом применение системы не исключает возможности грубой подрегулировки режимов работы вентилятора местного проветривания поворотом лопаток направляющего аппарата, входящего в конструкцию каждого регулируемого вентилятора местного проветривания.

Установка вентилятора местного проветривания, содержащая вентилятор местного проветривания, став трубопровода и пускатель вентилятора, отличающаяся тем, что дополнительно содержит систему автоматического управления, включающую датчик количества воздуха, преобразователь частоты и напряжения питания, установленный между выходом пускателя и входными клеммами электродвигателя вентилятора местного проветривания, причем управляющий выход датчика количества воздуха связан со входом блока обработки данных, выход которого связан с управляющим входом преобразователя частоты и напряжения питания.

- Требования к системе мониторинга и диспетчерского управления следующие:
 - обеспечить обмен данными и обработку информации в реальном времени со всеми подсистемами системы автоматического управления процессом проветривания;
 - обеспечить информацией диспетчера шахты о состоянии вентиляторов ВМП (включены - выключены, наличие напряжения питания) подача вентилятора (скорость воздуха в подающем воздухопроводе); снятии блокировки на включении группового аппарата системы электроснабжения подготовительной выработки;
 - обработка и отображение информации в табличном и графическом виде на мнемонике, мониторе или панелях визуализации;
 - ведение базы данных с технологической информацией, ее архивирование и резервирование;
 - управление рабочим и резервным вентиляторами ВМП (включить – выключить, изменять режим работы).

Подсистема аэрогазового контроля параметров рудничной атмосферы в вентиляторе местного проветривания предназначена для непрерывного местного и централизованного контроля величин скорости воздуха и метана в горной выработке, выдачи сигнала на автоматическое отключение электрической энергии контролируемого объекта при достижении предельно допустимой кон-

центрации метана. Требования к подсистеме аэрогазового контроля параметров рудничной атмосферы подготовительной выработки формируются в соответствии с требованиями правил безопасности в угольных шахтах и инструкции по контролю состава рудничного воздуха, определению газообильности и установлению категорий шахт по метану. Требования следующие:

Обеспечение контроля содержания метана стационарной аппаратурой в следующих местах:

- у ВМП с электрическими двигателями при разработке пластов, опасных по внезапным выбросам, а также при установке вентиляторов в выработках с исходящей струей воздуха из очистных [19,80,81];

Подсистема автоматического управления вентиляторами ВМП предназначена для управления вентиляторами местного проветривания ВМП и отключения электроснабжения электропотребителей, как возможного источника инициирования взрыва метановоздушной среды, при отклонении от заданного режима проветривания подготовительной выработки. Требования к подсистеме автоматического управления вентиляторами ВМП:

1. Обеспечить включение рабочего или резервного ВМП при плавном заполнение вентиляционного трубопровода воздухом;
2. Обеспечить автоматическое включение резервного ВМП при отключении рабочего ВМП, тем самым обеспечить непрерывность подачи воздуха в тупиковую выработку;
3. Обеспечить выдержку времени на подачу напряжения к электроприемникам тупикового забоя после включения вентилятора ВМП с момента выдачи датчиком скорости воздуха сигнала о нормальном проветривании выработки;
4. Отключение электроэнергии от электроприемников тупиковой выработке при нарушении процесса проветривания или отключении вентилятора ВМП;
5. Обеспечить управление вентилятором ВМП с диспетчерского пункта шахты;
6. Обеспечить местную световую сигнализацию и информацией диспетчера шахты о работе вентиляторы ВМП, о снижении скорости воздуха, подаваемого

к забою, до величины, меньшей заданной установки, наличии напряжения в резервной сети, снятии блокировки на включении группового аппарата;

7. Автоматическое регулирование режима работы вентилятора ВМП.

- Выбор ПЛК S7 – 300 (Siemens) на рис 4.15 [114].

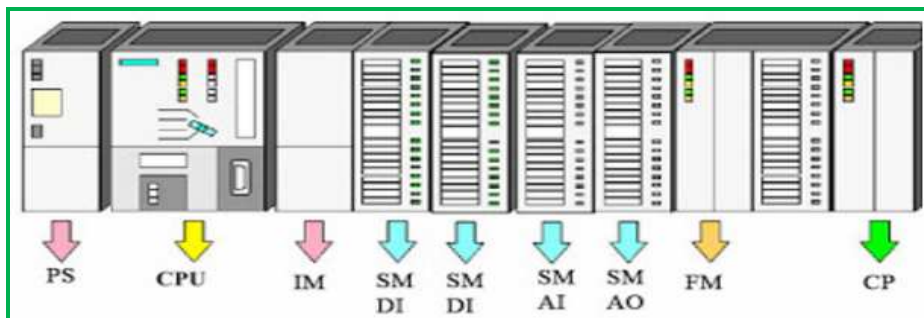


Рис 4.15. Внешний вид программируемый контроллер SIMATIC S7-300

- Программа управления на ПЛК S7-300. (Приложение 4)

а).Настройка оборудования в SIMATIC STEP 7"

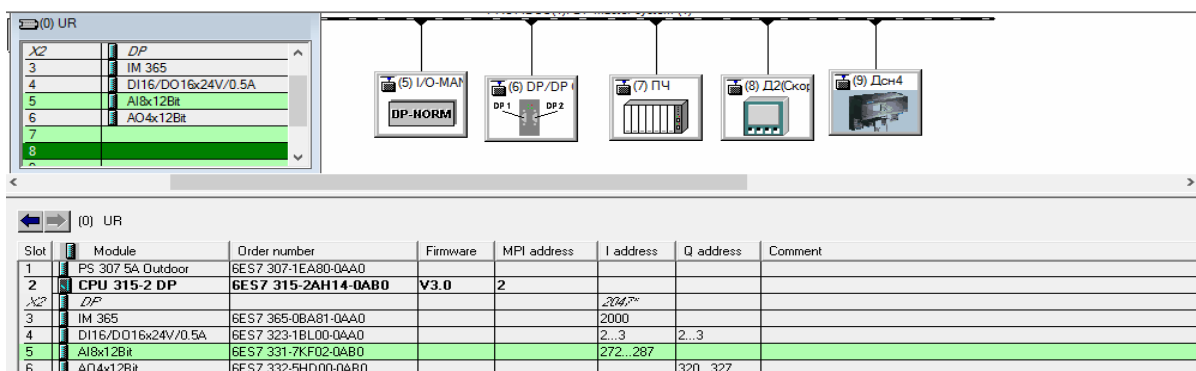


Рис. 4.16. Окна станции, открытого утилитой конфигурирования оборудования Hardware Configuration

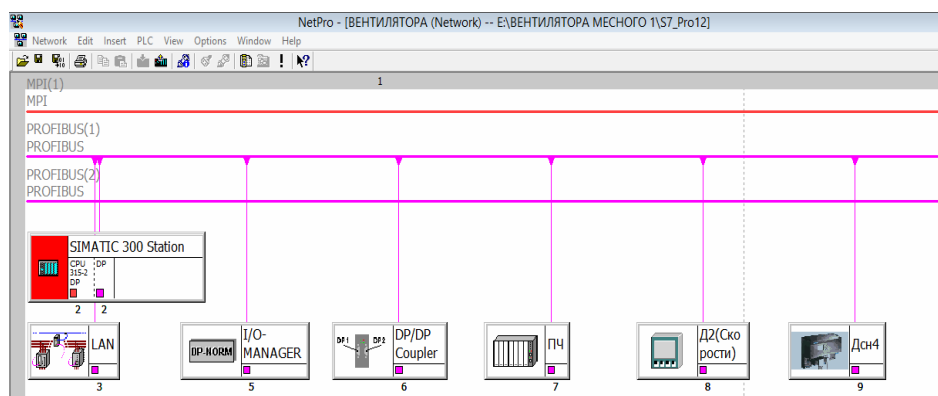


Рис. 4.17. Окна утилиты конфигурирования сети Network Configuration

б). Программа пользователя создается в каталоге (в объекте) S7 Program. Вы можете назначать этот объект в объекте CPU в структурной иерархии проекта, или вне зависимости от CPU. В свою очередь объект S7 Program включает в себя объект Symbols (Символы) и каталоги Source Files (Исходные файлы) и Blocks (Блоки) (см. рис. 4.18).

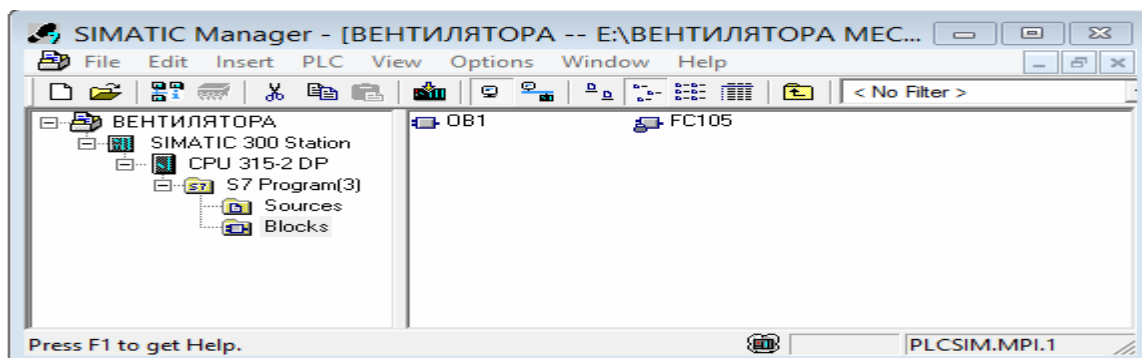


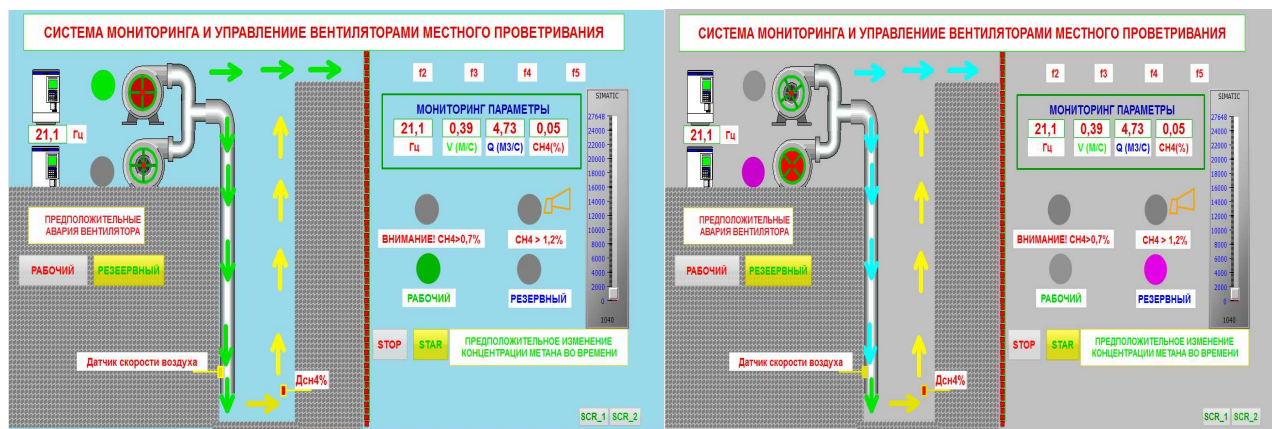
Рис. 4.18. Объекты, участвующие при генерации программы.

- Выбор адреса Входы/ Выходы для ПЛК в таблицу 4.3

Таблица 4.3

Symbol /	Address	Data type	Comment
1 STAR	I 0.0	BOOL	Вход сигнал Запуск вентилятора
2 STOP	I 0.1	BOOL	Вход сигнал Остановка вентилятора
3 Бит память авария В1	M 0.2	BOOL	Бит память рабочие авария вентилятора
4 Бит память остановка	M 0.1	BOOL	
5 Бит память запуск	M 0.0	BOOL	
6 Бит память авария В2	M 0.3	BOOL	Бит память резервные авария вентилятора
7 Сигнал остановка системы	Q 1.4	BOOL	Выходной сигнал, когда высокие концентрации %CH4
8 Сигнал %CH4 >1,2	Q 0.6	BOOL	Выход сигнал
9 Сигнал %CH4 > 0,7	Q 0.5	BOOL	Выход сигнал
10 Сигнал CH4 <= 0,7	Q 0.4	BOOL	Выход сигнал
11 F2	Q 1.0	BOOL	Выход сигнал Работает двигатель с частотой (f2)
12 F3	Q 1.1	BOOL	Выход сигнал Работает двигатель с частотой (f3)
13 F4	Q 1.2	BOOL	Выход сигнал Работает двигатель с частотой (f4)
14 F5	Q 1.3	BOOL	Выход сигнал Работает двигатель с частотой (f5)
15 РАБОЧИЙ ВЕНТИЛЯТОР	Q 0.0	BOOL	Выход сигнал
16 РЕЗЕРВНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР	Q 0.1	BOOL	Выход сигнал
17 UNSCALE	FC 106	FC 106	Unscaling Values

г). Результат работы системы мониторинга концентрации метана с использованием ПЛК S7-300 и WinCC V7.4.



а)

б)

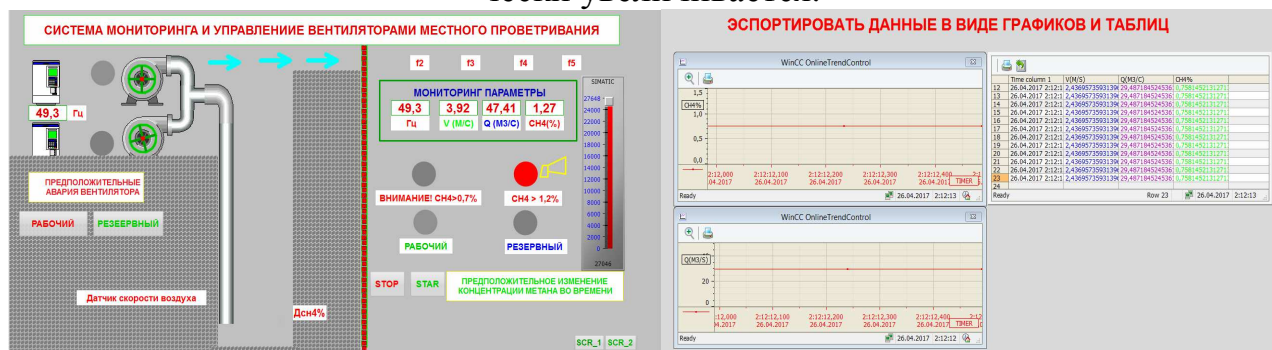
а). Рабочий вентилятор; б). Когда рабочая авария вентилятора, резервный вентилятор автоматически работают.



в)

г)

в, г). Когда концентрация метана увеличивается, скорость двигателя автоматически увеличивается.



д)

е)

д). Концентрация метана больше, чем 1,2 - автоматически отключается напряжение. Включается индикатор и сигнал звуковой; е). Экспорт данных, с показаниями в реальном времени.

Рис 4.19. . Работа системы управления и мониторинга автоматизированного частотно-регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания в шахте Мао Хе (Вьетнам) в соответствии с концентрацией метана.

4.5. Выводы

1. Представлена схема функционирования аналитической платформы в рамках системы мониторинга и управления вентиляцией.

2. Разработан нейросетевой алгоритм, позволяющий уточнять возможности перераспределения воздушных потоков между выработками при работе ВМП.

3. Показано, каким образом, рассматривая различные типы ВМП, а также проведя расчет требуемых для проветривания выработок с заданными газодинамическими свойствами параметров ВМП, следует выбирать конкретный вариант вентиляционной установки.

4. Результаты моделирования показали, что разработанный алгоритм, основанный на использовании PI – регулятора с НС настройкой параметров (передаточных коэффициентов), позволяет обеспечить более эффективный процесс регулирования скорости привода по сравнению с классическим. А это, в свою очередь, позволяет быстрее достигнуть требуемого воздухораспределения с учетом прогнозных значений концентрации метана.

5. Система непрерывного мониторинга концентрации метана в вентиляционной системе шахты ведется в единой инструментальной среде WiCC V7.4. Программное обеспечение представляет собой клиент-серверное приложение с выводом информации в браузер. Диспетчерский персонал может входить под своими аккаунтами в систему, просматривать графики, осуществлять экспорт данных для анализа, просматривать мнемосхему с показаниями в реальном времени.

Заключение

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной задачи повышения безопасности ведения горных работ в метанообильных шахтах Вьетнама за счет эффективного использования систем управления вентилляций на основе методов и моделей прогнозной аналитики.

Основные результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Разработаны механизмы построения информационной базы и структура аналитической платформы в системе мониторинга аэрогазодинамических процессов в метанообильных шахтах Вьетнама.

2. С использованием данных мониторинга шахты Мао Хе проведена классификация и выделен ряд горно-технологических и гео-физических факторов, вызывающих характерные колебания концентрации метана в вентиляционной сети шахты. Разработан алгоритм построения оптимальной для каждого класса факторов нейросетевой модели (классическая парадигма: feed forward – back propagation), обеспечивающий приемлемую точность распознавания газодинамических ситуаций при наличии ограничений на размер и количество обучающих наборов.

3. Показано, что применение нейронных сетей для текущего прогнозирования концентрации метана обеспечивает необходимую точность, предъявляемую к прогнозу концентрации метана на добычных участках шахты. Апробация разработанных НС-моделей прогноза показала возможность на их основе осуществлять текущий прогноз в реальном времени для оперативного управления газовой обстановкой в условиях неравномерности метановыделения на больших глубинах разработки и при высокой нагрузке на очистной забой.

4. Разработанный алгоритм распознавания газодинамических ситуаций на базе нейронных сетей позволяет решать проблему обнаружения аномального развития ситуаций на ранней стадии, то есть на основе коротких (по времени) реализаций индикаторных переменных. С другой стороны, алгоритм весьма

адаптивен к изменению геотехнологических характеристик. Данный подход может быть рекомендован для использования при аппаратной реализации систем локальной газовой защиты и участкового управления газодинамикой.

5. Разработан алгоритм управления вентилятором местного проветривания обеспечивающий возможность адаптивной настройки параметров классического ПИ регулятора с использованием нейронного механизма, повышающий эффективность управления по сравнению с классическим способом.

6. Разработанные алгоритмы и программные модули переданы на шахту Мао Хе для апробации в рабочем режиме. Исследования необходимо развивать в области программного обеспечения системы непрерывного мониторинга концентрации метана на добычных участках шахт Вьетнама.

Список литературы

- [1]. Абрамов Ф.А., Тянь Р.Б. Методы и алгоритмы централизованного контроля и управления проветриванием шахт. – Киев: Наукова думка, 1973.-184с.
- [2]. Абрамов Ф.А., Тянь Р.Б., Потемкин В.Я. Расчет вентиляционных сетей шахт и рудников. – М.: Недра, 1978.-232с.
- [3]. Акутин К.Г., Филиппович Е.И., Шойхет Л.А. Управление воздухораспределением в шахтной вентиляционной сети. - М.: Недра, 1977.-126с.
- [4]. Аюров В.Д., Разработка комплексного метода и алгоритма оперативного регулирования газодинамическими процессами при автоматизированном управлении вентиляцией шахт. – Дис. ...канд. тех наук. – М., 1978-146с.
- [5]. Бобиков А.И., к.т.н., доцент., Нейросетевое управление угловым положением двигателя постоянного тока. ISSN 1995-4565. - Вестник РГРТУ. 2016. № 57. С.139.
- [6]. Бойко В.А., Кременчуцкий Н.Ф. Основы теории расчета вентиляции шахт. – М.: Недра, 1978.-280с
- [7]. Бахвалов Л.А., Темкин И.О. Статистическое моделирование аэрогазодинамических процессов при эксплуатации системы автоматического управления проветриванием метанообильной шахты. - Известия вузов. Горный журнал, №10, 1989, с.42-47.
- [8]. Бойко В.А., Лысенко В.Н. Определение передаточных функций систем проветривания добычных участков шахт по данным активного эксперимента. – Уголь Украины. – 1969. - №7. - с.37-39.
- [9]. Бойка В.А., Стасевич Р.К., Литвиненко А.А., Иконников Ю.Р. Многофакторный эксперимент для поредения исходной информации при диспетчерском управлении в вентиляционных сетях шахт.- Киев: Техника. - 1978. - вып. 49. - с.56-62.
- [10]. В.И. Голинько., Я.Я.Лебедев.,О.А. Муха. Вентиляция шахт и рудников. Учебное пособие. - Днепропетровск НГУ. – 2012. – с.272.
- [11]. Волков А.А. Постановка задач оптимального управлений проветриванием шахт. – Киев. – 1965. - с.9-15.

- [12]. Волков А.А., Евдокимов А.Г., Шеховцов Б.Г. Задача синтеза оптимальной по энергозатратам системы регулирующих органов в шахтной вентиляционной сети. – Известия вузов. Горный журнал, 1971, №4, с.143-155.
- [13]. Вольский В.К. Исследование и совершенствование вентиляций шахт Карагандинского бассейна. Автореферат дис. ...канд. Техн. Наук. Караганда. – 1973. – 19 с.
- [14]. Вольский В.К., Калиев С.Г., Машранов Ш.Ж. Изменение аэродинамического сопротивления выработок, находящихся в зоне влияния горных работ. – Труды ВостНИИ по безопасности работ в горной промышленности, 1973. - №19. - с.49-52.
- [15]. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1966. – 664 с.
- [16]. Денисенко В. П., Верба Р. В., Абакумова Е. В. Проблемы текущего прогнозирования метановыделения в горных выработках угольных шахт. Наукові праці УкрНДМІ НАН України, 2011. -№ 8. - с.138-148.
- [17]. До Чи Тхань. Управление скоростью асинхронного двигателя привод для вентилятора местного в шахте с использованием искусственной нейронной сети. Международная научно-практическая конференция «50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли», Москва, (13-16) ноябрь 2017. - с. 254 -258.
- [18]. До Чи Тхань. Сравнение моделей нейронной сети для прогнозирования концентрации метана в шахте «Вьетнама». Международная научно-практическая конференция «50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли», Москва, (13-16) ноябрь 2017. - с. 258 -262.
- [19]. До Чи Тхань (аспирант, НИТУ «МИСиС»), Фам Хыу Чиень (магистр, Куангиньский промышленный университет, Вьетнам). Разработка системы управления и мониторинга автоматизированного частотно-регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания в шахте Мао Хе (Вьетнам) в соответствии с концентрацией метана. «Шаг в будущее: Искусственный

интеллект и цифровая экономика - I-я Международная научно-практическая конференция » 4-5 декабря 2017. Москва. - С.86-103

[20]. Евдокимов А.Г., Деордица Ю.С. О сокращении времени и повышении точности проведения депрессионных съемок. - сб.: Приборы и системы автоматизации, 1972. - вып. 21.

[21]. Жайсанбаев Н.А. Исследование измерения аэродинамического сопротивления горных выработок по времени. Автореферат диссертации. Караганда, 1971. - 22с.

[22]. Иконников Ю.Р. Определение аэродинамических параметров газовых шахт методом активного многофакторного эксперимента. – В кн. : Разработка месторождений полезных ископаемых.- Выпуск 56, Киев. Техника. – 1980. - с.42-44.

[23]. Исследовать математическую модель вентиляционной сети и газодинамические процессы на участках при автоматизированном управлении проветриванием. (отчет)/ Днепропетровский горный институт - № 75048128, инв. № В914259.

[24]. Правила безопасности в угольных шахтах. – Донецк. – 2016. – 216 с.

[25]. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / [И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер, А.Ю. Крайнов, Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов, В.Н. Костеренко]. – М. : Томский государственный университет, 2011. – 155 – 163 с.

[26]. Кариман С.А., Байцев А.В., Шрамко В.М. Моделирование и оптимизация производственных процессов при добыче угля. – М.: Наука, 1975.-135с.

[27]. Касимов О.И., Капиев Г.Э. Оценка параметров переходных газодинамических процессов на выемочных участках. – В кн.: Борьба с газом на угольных шахтах, - Киев Техника. – 1965. – с.2-13.

[28]. Клебанов Ф.С. Аэродинамическое управление газовым режимом в шахтных вентиляционных сетях. – М.: Недра. – 1974. -280 с.

[29]. Клебанов Ф.С., Горобец В.Ф. Оценка взаимного влияния вентиляторов главного проветривания, работающих на общую вентиляционную сеть.: В сб.

внезапные выбросы угля и газа, рудничная аэрология. –ИГД им. А.А. Скочинского. – 1988. - с.167-173.

[30]. Као Куок Вьет. Обоснование ресурсосберегающей технологии отработки крутонаклонных и крутых мощных угольных пластов в условиях месторождения Мао Хе Вьетнама: дис. ... канд. техн. наук, СПб. - 2015. – 20 с.

[31]. Као Куок Вьет, Зубов В.П. Перспективы совершенствования технологий подземной разработки угольных пластов на шахтах Вьетнама // Записки Горного института. Том 207. С-Пб. 2014. - С. 46-49.

[32]. Кириченко А.А. Нейропакеты – современный интеллектуальный инструмент исследователя, ISBN 978-5-9904911-1-3- 2013.

[33]. Калачев Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика) 2013 г.

[34]. К.т.н., доц. Глущенко А.И., аспирант Фомин А.В., аспирант Петров В.А. Разработка методологии построения нейросетевого настройщика параметров линейных регуляторов для нелинейных объектов управления с различной динамикой. Старый Оскол, 2017.

[35]. Новикова В.А., Андреева Е.Ю., Туйкина Д.К. Искусственный интеллект и экспертные системы. КГУ, кафедра Прикладной математики, гр 947. 2013.- 51с.

[36]. Нгуен Минь Фьен. Исследование закономерности распределения метаносности угольных пластов Куангниньского района и предложение решений предупреждений опасности взрыва метана : Дис. ... магистр. техн. наук: 06.53.05/ Нгуен Минь Фьен. -Ханой., 2009. - С.50.

[37]. Нгуен Тат Тханг. Гидрогеохимические процессы и эволюция минерального и газового состава подземных вод угольного месторождения Маохе (северо-восток Вьетнама) : дис. ... канд. техн. наук: 25.00.07 / Нгуен Тат Тханг. - СПб., 2016. – С.10.

[38]. Нгуен Тьен Бао. Геологические условия метаморфизма углей и газоносности угольных бассейнов и месторождений Вьетнама : Дис. ...докт. техн. наук: 04.00.16/ Нгуен Тьен Бао. - Москва. - 1991. - 13 с.

- [39]. Нгуен Хиу Хоа. Исследование определения сопротивление выработки на типичных шахтах Куангиньского района : Дис. ... магистр. техн. наук: 06.53.05/ Нгуен Хиу Хоа. - Ханой., 2007. - 44 с.
- [40]. Отчёт о состоянии работ вентиляции угольных подземных шахт корпорации VINACOMIN 2014г. Куангинь, 2014. – 14 с.
- [41]. Отчёт о состоянии работ вентиляции угольных подземных шахт корпорации VINACOMIN 2015г. Куангинь, 2015. – 12 с.
- [42]. Пучков Л.А. О структуре горных наук. – М.: МГГУ. – 1995. – 29 с.
- [43]. Пучков Л.А. Оперативное управление вентиляцией газовых шахт.: В кн.: Научные основы создания высокопроизводительных комплексно-механизированных рудников.- М.: 1979. – с.66-94
- [44]. Пучков Л.А., Аюров В.Д. Синергетическая концепция управления горно-технологическими процессами в угольных шахтах. –М.: МГИ. -1991. - 47с.
- [45]. Пучков Л.А. Аэродинамические основы оперативного управления вентиляцией высокопроизводительных газовых шахт. – Дис. ...докт. Техн. Наук. М., 1974. – 386 с.
- [46]. Пучков Л.А. Оперативное управление вентиляцией газовые шахт. – В кн.: Научные основы создания высокопроизводительных комплексно-механизированных рудников. – М., 1979. - с.66-74.
- [47]. Р.Б. Тянь, В.А. Бойко, Г.А. Швец, Ф.А. Абрамов. Расчет распределения и регулирования расхода воздуха шахтных вентиляционных сетях с помощью электронно-вычислительных машин . – М.: ЦНИЭИуголь, 1968. - 53с.
- [48]. Рязанцев Г.К. Устойчивость и управляемость шахтных вентиляционных систем. – Алма-Ата: Наука, 1978. – 266 с.
- [49]. Решение 1059/QĐ-VСТ/Министерство Промышленности и Торговли Вьетнама. 2010.
- [50]. Решение 1144/QĐ-VСТ/Министерство Промышленности и Торговли Вьетнама. 2011.
- [51]. Решение 1541/QĐ-VСТ / Министерство Промышленности и Торговли Вьетнама. 2014.

- [52]. Решение 1697/QĐ-VСТ / Министерство Промышленности и Торговли Вьетнама. 2013.
- [53]. С.З. Шкундин, В.В. Стучилин. Концепции построения информационно измерительных систем обеспечения безопасности в угольных шахтах РФ. ГИАБ. - № 9. – 2014. - с.173-184.
- [54]. Степанов М.Ф., Степанов А.М. Комплексный подход к автоматизации проектирования и аппаратной реализации интеллектуальных систем управления средствами многофункциональной системы ГАММА-3 // Шестая Всероссийская мультikonференция по проблемам управления / Материалы мультikonференции: в 4 т. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2013.Т. 1. - с. 116-120.
- [55]. Темкин И.О. Идентификация шахтной вентиляционной сети в задаче оперативного управления воздухораспределением. В сб.: Совершенствование технологии и техники подземной разработки рудных месторождений, МГИ, 1983. – с. 89-92.
- [56]. Темкин И.О. Разработка статистических моделей и алгоритмов системы автоматического управления проветриванием угольной шахты. - Дис. ..., канд. тех. наук.- М.1986. – 164 с.
- [57]. Темкин И.О. Прогнозирование газодинамики добычных участков угольных шахт на базе статистического моделирования. – В сб.: Создание технологии и техники добычи угля без постоянного присутствия людей в забоях шахт. – МГИ, 1984. – с.80-84.
- [58]. Темкин И.О., До Чи Тхань. Формирование базы знаний интеллектуальной системы управления аэрогазодинамическими процессами в угольных шахтах. ГИАБ.- № 3. – 2016. - с.84.
- [59]. Темкин И.О., Бондаренко И.С. Оценка рисков строительства коммуникационных тоннелей на основе экспертного анализа проектных решений. Журнал «Тяжелое машиностроение», Выпуск 8-9, 2013. - 6 с.

- [60]. Темкин И.О. Принципы построение интеллектуальных систем управления горно-технологическими процессами. Горный информационный бюллетень, МГГУ, 1996. - №4. – с. 40-48.
- [61]. Темкин И.О. Разработка теории и методов построения интеллектуальных нейросетевых систем управления аэрогазодинамическими процессами в шахтах.- диссертация, докт. техн. Наук. – М.: 1996. - с. 61-69.
- [62]. Темкин И.О. Учебное пособие по дисциплине «Экспертные системы в управлении», М.: МГГУ. - 1994.
- [63]58. Темкин И.О., Бондаренко И.С., Баранникова И.В. Оценка интегральных параметров проекта на основе нейросетевых моделей прогноза стоимости и сроков реализации проекта // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. - ОВ №6. - С. 95-101.
- [64]. Темкин И.О. Интеллектуальные системы управления горнотранспортными комплексами: современное состояние, задачи и механизмы решения //“Неделя Горняка” (Москва, 27-31 января 2014 г.)
- [65]. Темкин И.О., Д.А. Клебанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Труды международного симпозиума “Неделя Горняка” (Москва, 27-31 января 2014 г.)
- [66]. Темкин И. О., До Чи Тхань, Агабубаев А. Повышение безопасности ведения горных работ в метанообильных шахтах Вьетнама с использованием моделей прогнозной аналитики. ГИАБ. - № 8. – 2017. - с.142-152.
- [67]. Темкин И.О., До Чи Тхань, Агабубаев А. О некоторых алгоритмах функционирования аналитической платформы в системе управления вентиляцией метанообильной шахты. ГИАБ. - № 5. -2018. - с.
- [68]. Темкин И. О., асп. До Чи Тхань, Агабубаев А. Использование искусственных нейронных сетей для прогнозирования концентрации метана в шахтах Вьетнама. Труды международного симпозиума “Неделя Горняка” (Москва, 27-31 января 2017 г.)
- [69]. Темкин И.О.(проф., д.т.н., НИТУ «МИСиС»), До Чи Тхань (аспирант, НИТУ «МИСиС»), Агабубаев А. (магистр, НИТУ «МИСиС»). Нейросетевые моде-

ли управления процессами в вентиляционных системах шахт. «Шаг в будущее: Искусственный интеллект и цифровая экономика - I-я Международная научно-практическая конференция » 4-5 декабря 2017. Москва. - С.253-259.

[70]. Тянь Р.Б., Потемкин В.Я. Управление проветриванием шахт. – Киев: Наукова думка, 1977. – 203 с.

[71]. Ушаков В.К. Моделирование случайных потоков дискретной динамики шахтных вентиляционных систем с целью улучшения условий труда // Горный информационно- аналитический бюллетень. – 2014. – № 9. – С. 206–210.

[72]. Ушаков В.К. Проблема надежности и эффективности шахтных вентиляционных систем// Горный информационно- аналитический бюллетень. – 2015. – №3. – С. 240–248.

[73]. Фельдман Л.П. Исследования динамики и синтез систем автоматического управления проветриванием угольных шахт. – Дис. ...канд. техн. наук. – Донецк, 1974. -395с.

[74]. Фельдман Л.П., Касимов О.И., Слепцов А.И. Основные закономерности и математическая модель газодинамических процессов на выемочных участках шахт. – В кн.: Разработка месторождений полезных ископаемых. – Киев: Техника, 1973. - вып. 34. - с.35-41.

[75]. Цой С.В. Автоматическое управление вентиляционными системами шахт. Алма-Ата: Наука, Казах. ССР, 1975. – 336 с.

[76]. Цой С.В., Рогов Е.И. Основы теории вентиляционных сетей. Алма-Ата: Наука, Казах. ССР, 1965. – 283 с.

[77]. Цой С.В., Рязанцев Г.К. Принцип минимума и оптимальная политика управления вентиляционными и гидравлическими системами. Алма-Ата: Наука, Казах. ССР, 1968. – 258 с.

[78]. Шонин, О.Б. Повышение энергетической эффективности главных вентиляторных установок шахт на основе многоцелевой системы управления частотно-регулируемым приводом / О.Б. Шонин, В.С. Пронько // Научнотехнические ведомости СПбГПУ. – 2014. – №2(195). – С. 49 – 57.

- [79]. Л.А. Пучков, И.О. Темкин. Проблемы искусственного интеллекта в управлении горным производством. Препринт ИПКОН АНССР, 1990, 24 с.
- [80]. Маслов Иван Петрович. Система управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом вентилятора местного проветривания угольных шахт. Дис. ..., канд. тех. наук.- Кемерово – 2014. -160 с.
- [81]. 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.
- [82]. Маслов И.П. Исследование многокритериальной системы автоматического управления шахтным вентилятором местного проветривания / И.П. Маслов, И.Ю. Семькина, А.В. Киселев, А.Э. Евстратов // Горный информационно- аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – ОВ № 9. – С 31.
- [83]. 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.
- [84]. Николаев А.Б., Остроух А.В. Интеллектуальные системы. Учебное пособие. Москва - 2012г. с. 272.
- [85]. Ю.Н. Хижняков. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нечетконейронного управления в системах реального времени. Утверждено Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия. Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета 2013. с.160.
- [86]. Ю.В.Горлов. Анализ действующих в угольных шахтах систем локализации взрывов и оценка эффективности их применения, М – 2014. – 91 с.
- [87]. Amrane A., Louri M., Larabi, A. and Hamzaoui A. (2013). A Fuzzy Model Reference Adaptive System Control for Induction Motor Drives. Proceedings of the 3rd International Conf. on Sys. and Control, Algiers, Algeria.

- [88]. Cai, D., Baafi, E. & Porter, I.. Modelling a longwall production system using flexsim 3D simulation software. In R. Singhal, E. Topal, K. Fytas, M. Yellishetty & A. Mehrotra (Eds.), Mine planning and equipment selection (pp. 107-114). Irvine, California, USA ,2012.
- [89]. Temkin I.O., Klebanov D.A. Intellektualnie systemi upravlenija gorno-transportnymi kompleksami: sovremennoe sostojanie, zadachi i mehanizmi reshenija. Gorny informacionno-analiticheskij bjulleten, 2014, Megdunarodnaja nauchno-practicheskaja konferencija «Nedelja gornyaka», Specialnii vipusk.
- [90]. Temkin I.O., .Leontyeva A.V., Konov I.S. Forecasting of university development on the basis of multi-agent modelling of rating dynamics. Proceedings of BRICS Global University Summit, session “Information Technologies for Modelling Socio-Economic and Industrial Systems”, Moscow, MISIS, 2016.
- [91]. Puchkov L.A., Temkin I.O. Mining Ventilation: Expert System Based operative control. Proceedings of 23 APCOM Symposium, TUCSON, USA, 1992, pp. 927-939
- [92]. Temkin I.O.,Puchkov L.A., Mesencev V.K. The neural network models of gas-dynamic events in the coal mine ecological monitoring system, Proceedings of 1st Regional Symposium, Slovenia, 1994.
- [93]. Taifa Zhang*, Yajiang Zhang and Lihua Mu. Forecasting Rock Burst in Coal Mines Based on Neural Network. The Open Fuels & Energy Science Journal, 2015, 8, 224-228.
- [94]. Lev Yu. Levin Mikhail A. Semin Yuri A. Klyukin. Estimation of wall roughness functions acceptability in CFD simulation of mine ventilation networks. Proceedings of XLII International Summer School–Conference APM 2014. 25-32.
- [95]. Sahu, M., Khatua, K.K., Mahapatra, S.S., A Neural network Approach for Prediction of Discharge in Straight Compound Open Channel Flow, Journal of Flow Measurement and Instrumentation, Vol.22, pp.438-446, 2011.
- [96]. Snejana Yordanova, Tasho Tashev. Fuzzy Internal Model Control of Nonlinear Plants with Time Delay based on Parallel Distributed Compensation. Issue 2, Volume 11, February 2012, pp. 56-65.

- [97]. Heikki N. Koivo. NEURAL NETWORKS: Basics using MATLAB Neural Network Toolbox. 2012. -158pp.
- [98] Zhang M.G. and Li W.H. (2006). Single Neuron PID Model Reference Adaptive Control Based on RBF Neural Network. Proceedings of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Dailan, 3021-3025.
- [99] Zhang Y., Song J., Song S. and Yan M. (2010). Adaptive PID Speed Controller Based on RBF for Permanent Magnet Synchronous Motor System. International Conference on Intelligent Computation Tech. and Automation, 425-428.
- [100] Wei Z., Zong G. and Wu H. (2013). Force Control of Electrical Load System Based on Single Neuron PID Adaptive and Repetitive Control. Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (IC-CSEE), pp-1205-1210.
- [101]. Kusuma Gottapu, U.Santosh Kiran, U.Srikanth Raju³ P.Nagasai, S.Prasad, P.Tejeswara Rao. Design And Analysis Of Artificial Neural Network Based Controller For Speed Control Of Induction Motor Using D T C. ISSN : 2248-9622, Vol. 4, Issue 4(Version 1), April 2014, pp.259-264. C.259.
- [102]. B.Sowjanya¹, M.Vijaya Kumar², M.Anka Rao. Speed Estimation of Sensorless Vector Controlled Induction Motor Drive using ANN. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. Vol. 4, Issue 7, July 2015.
- [103]. M.K. Masood*, Wooi Ping Hew and Nasrudin Abd. Rahim. Review of AN-FIS-based control of induction motors. 2012 - IOS Press and the authors. All rights reserved.
- [104]. M. Rizwan Khan, Arif Iqbal. Sensorless Control of a Vector Controlled ThreePhase Induction Motor Drive using Artificial Neural Network. All content following this page was uploaded by Arif Iqbal on 11 December 2015.

- [105]. Kriauciunas J., Rinkeviciene R. and Baskys A. (2014). Self-Tuning Speed Control of the Induction Motor Drive. Vol.20, No.6, pp.24-28.
- [106]. Zhang Y., Song J., Song S. and Yan M. (2010). Adaptive PID Speed Controller Based on RBF for Permanent Magnet Synchronous Motor System. International Conference on Intelligent Computation Tech. and Automation, 425-428.
- [107]. Wei Z., Zong G. and Wu H. (2013). Force Control of Electrical Load System Based on Single Neuron PID Adaptive and Repetitive Control. Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE), pp-1205-1210.
- [108]. Kim Y.S., Chung I-Y. and Moon S.I. (2015). Tuning of the PI controller Parameters of a PMSG Wind Turbine to Improve Control Performance under Various Wind Speeds. Energies, 8, 1406-1425.
- [109]. Ohm D.Y. (2013). Dynamic Model of Induction Motor for Vector Control, Drivotech, Inc, Blacksburg, Virginia.
- [110]. Liu, J. (2013). Radial Basis Function (RBF) Neural Network Control for Mechanical Systems. Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [111]. <http://www.aiportal.ru/articles/neural-networks/back-propagation.html>
- [112]. www.mathworks.com
- [113]. http://ohrana-bgd.ru/gornd/gornd2_101.html
- [114]. www.siemens.ru/automation.
- [115]. [http://www.electrocentr.com.ua/files/documentation/SE/TechLibrary/Solution Guide/8-HMI.pdf](http://www.electrocentr.com.ua/files/documentation/SE/TechLibrary/Solution%20Guide/8-HMI.pdf)

Приложение 1

Код для обучения нейронных сетей

```
% Solve an Autoregression Problem with External Input with a NARX Neural Network
% Script generated by NTSTOOL
% Created Sat May 13 17:32:30 MSD 2017
%
% This script assumes these variables are defined:
%
%   Input - input time series.
%   Target - feedback time series.
clc
format long
inputSeries = tonndata(Input,false,false);
targetSeries = tonndata(Target,false,false);

% Create a Nonlinear Autoregressive Network with External Input
inputDelays = 1:2;
feedbackDelays = 1:2;
hiddenLayerSize2 = 10;
net = narxnet(inputDelays,feedbackDelays,hiddenLayerSize);

% Prepare the Data for Training and Simulation
% The function PREPARETS prepares timeseries data for a particular network,
% shifting time by the minimum amount to fill input states and layer states.
% Using PREPARETS allows you to keep your original time series data unchanged, while
% easily customizing it for networks with differing numbers of delays, with
% open loop or closed loop feedback modes.
[inputs,inputStates,layerStates,targets] = preparets(net,inputSeries,{},targetSeries);

% Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;
net.trainParam.epochs = 12000
% Train the Network
[net,tr] = train(net,inputs,targets,inputStates,layerStates);
% Test the Network
outputs = net(inputs,inputStates,layerStates);
errors = gsubtract(targets,outputs);
performance = perform(net,targets,outputs)
% View the Network
view(net)
% Plots
% Uncomment these lines to enable various plots.
%figure, plotperform(tr)
%figure, plottrainstate(tr)
%figure, plotregression(targets,outputs)
%figure, plotresponse(targets,outputs)
%figure, ploterrcorr(errors)
%figure, plotinerrcorr(inputs,errors)

% Closed Loop Network
% Use this network to do multi-step prediction.
% The function CLOSELOOP replaces the feedback input with a direct
% connection from the outout layer.
netc = closeloop(net);
netc.name = [net.name ' - Closed Loop'];
view(netc)
[xc,xic,aic,tc] = preparets(netc,inputSeries,{},targetSeries);
yc = netc(xc,xic,aic);
closedLoopPerformance = perform(netc,tc,yc)
% Early Prediction Network
% For some applications it helps to get the prediction a timestep early.
% The original network returns predicted y(t+1) at the same time it is given y(t+1).
% For some applications such as decision making, it would help to have predicted
% y(t+1) once y(t) is available, but before the actual y(t+1) occurs.
% The network can be made to return its output a timestep early by removing one delay
% so that its minimal tap delay is now 0 instead of 1. The new network returns the
% same outputs as the original network, but outputs are shifted left one timestep.
nets = removedelay(net);
nets.name = [netc.name ' - Predict One Step Ahead'];
view(nets)
[xs,xis,ais,ts] = preparets(nets,inputSeries,{},targetSeries);
ys = nets(xs,xis,ais);
earlyPredictPerformance = perform(nets,ts,ys)
```

Приложение 2. Результаты экспериментального исследования

T. min	q ₁₇ (М ² /°C)	q ₉ (М ² /°C)	q ₁₃ (М ² /°C)	q17-1	q9-1	q13-1	q17+1	q9+1	q13+1	Выходные			Ошибки		
										q17	q9	q13	Δq17	Δq9	Δq13
1	2.976	4.379	2.303	3.678	4.411	2.958	4.005	4.418	3.24	3,51112234692526	4,03977461470672	3,59380085961774	0,493877653074743	0,378225385293278	-0,353800859617742
2	3.678	4.411	2.958	4.005	4.418	3.24	3.773	4.418	3.379	4,0740830235071	4,37510385498604	3,54010109369037	-0,30108302350711	0,0428961450139651	-0,161101093690373
3	4.005	4.418	3.24	3.773	4.418	3.379	3.691	4.891	4.342	4,73490706613990	4,54802749835258	3,66015027018317	-0,0439070661399066	0,34297250164725	-0,228150270183172
4	3.773	4.418	3.379	3.691	4.891	4.342	3.685	5.008	3.447	4,14164188117810	4,96055150433735	3,56761305354650	-0,456641881178098	0,0474484956626524	-0,120613053546498
5	3.691	4.891	3.432	3.685	5.008	4.447	5.008	5.052	3.453	4,33731194865190	4,96908774785420	3,56031586940720	0,670688051348102	0,0829122524519799	-0,107315869407196
6	3.685	5.008	3.447	5.008	5.052	3.453	5.588	4.224	3.454	5,50298329327455	4,46900334548586	3,20101164733551	0,0850167067254466	-0,245003345485857	0,252988352664488
7	5.008	5.052	3.453	5.588	4.224	3.454	5.801	3.891	3.454	5,65136786221790	3,81326940419670	3,45564954119985	0,149632137782104	0,0777305958033026	-0,00164954119985428
8	5.588	4.224	3.454	5.801	3.891	3.454	5.949	3.738	3.726	6,14113000754439	3,69787000499202	3,39119326112596	-0,192130007544386	0,0401299950079852	0,334806738874037
9	5.801	3.891	3.454	5.949	3.738	3.726	5.988	3.703	3.839	6,02508942171788	3,61266222688749	3,67732342951528	-0,0370894217178748	0,0903377731125130	0,161676570484725
10	5.949	3.738	3.726	5.988	3.703	3.839	6.615	3.922	3.898	6,09907082632138	3,73022542157186	3,75113499588856	0,515129173678620	0,19177487428183	0,146865004111441
11	5.988	3.703	3.839	6.615	3.922	3.898	6.836	3.987	3.915	6,83672241061285	3,94574204319371	3,76769372599277	-0,00072241061285094	0,0412579568062950	0,147306274007228
12	6.615	3.922	3.898	6.836	3.987	3.915	6.871	4.006	3.917	6,65695862574922	4,11177452255836	3,85907002397793	0,214041374250785	-0,105774522558359	0,0579299760220740
13	6.836	3.987	3.915	6.871	4.006	3.917	5.69	4.51	3.341	6,14758021463076	4,21549179180297	3,89547795332800	-0,781580214630764	0,294508208197035	-0,554477953327996
14	6.871	4.006	3.917	5.69	4.51	3.341	5.219	4.697	3.096	5,07373565198711	4,79269016450783	3,11886079462233	0,145264348012893	-0,095690164507833	-0,0228607946223280
15	5.69	4.51	3.341	5.219	4.697	3.096	5.078	4.775	2.972	5,12690509242239	4,75545371255024	2,98771227543088	-0,0489050924223919	0,0195462874497583	-0,0157122754308827
16	5.219	4.697	3.096	5.078	4.775	2.972	5.331	4.785	2.93	5,32184109970589	4,67936373265762	2,90615368025139	0,00915890029411237	0,105636267342383	0,0238463197486096
17	5.078	4.775	2.972	5.331	4.785	2.93	5.382	3.646	2.92	5,76583034572716	4,49916992894073	2,83447859485839	-0,383830345727157	-0,85316928940732	0,0855214051416091
18	5.331	4.785	2.93	5.382	3.646	2.92	6.137	3.154	3.088	6,12612673456371	3,2887055950798	2,88005203008559	0,0108732654362909	-0,134870559507984	0,207947969914411
19	5.382	3.646	2.92	6.137	3.154	3.088	6.412	2.91	3.398	6,01283423396492	3,10290131104728	3,15944501651076	0,399165766035079	-0,192903111047283	-0,020450165107581
20	6.137	3.154	3.088	6.412	2.91	3.139	6.466	2.832	3.158	6,09090607670043	3,05815538852585	2,6268572898508	0,375903923295573	-0,226155388525854	-0,10648572898508
21	6.412	2.91	3.139	6.466	2.832	3.158	4.823	2.83	3.161	6,02017514827340	3,09219490130406	3,30312930480997	-1,19717514827340	-0,262194901304063	-0,142129304809966
22	6.466	2.832	3.158	4.823	2.83	3.161	4.124	2.829	3.514	4,34783592649229	3,47327586473822	3,29817406768085	-0,223835926492285	-0,644275864738218	0,215825932319153
23	4.823	2.83	3.161	4.124	2.829	3.514	3.859	3.519	3.648	4,34363606010191	2,98548372504883	3,67145851314231	-0,484636060101905	0,533516274951102	-0,0243585131423066
24	4.124	2.829	3.514	3.859	3.519	3.648	3.729	3.815	3.708	4,05507630843020	4,00107619154867	3,66747607193822	-0,326076308430203	-0,186076191548673	0,0405239280617842
25	3.859	3.519	3.648	3.729	3.815	3.708	3.694	3.97	3.726	4,15990021099394	4,11239704213734	3,74977970102131	-0,46590021099394	-0,142397042137363	-0,023797010213088
26	3.729	3.815	3.708	3.694	3.97	3.726	4.753	4.009	3.728	4,40679139959711	4,16562030641836	3,73139787800623	0,346208060402889	-0,156620306418562	-0,00339787800622915
27	3.694	3.97	3.726	4.753	4.009	3.728	5.173	4.278	2.924	5,34643286919772	4,13916862908747	4,49839440468252	-0,17342869197725	0,138835170491532	-0,574304404682519
28	4.753	4.009	3.728	5.173	4.278	2.924	5.296	4.362	2.566	5,46327589119902	3,9631999607708	2,60808599879607	-0,167275891199023	0,39688003929219	-0,0420859987960691
29	5.173	4.278	2.924	5.296	4.362	2.566	5.761	4.389	2.378	5,92134469227136	4,06941989135295	2,43521282895349	-0,160344692271358	0,319580108647046	-0,0572128289534906
30	5.296	4.362	2.566	5.761	4.389	2.378	5.908	3.416	2.308	6,21990979356879	4,03096320927645	2,28857621065064	-0,311930793568791	-0,614963209276456	0,0194237893493485
31	5.761	4.389	2.378	5.908	3.416	2.308	5.916	3.008	2.286	5,5006664003688	3,08913379045959	4,415033359963125	-0,08113379045991	-0,08113379045991	-0,130309796410901
32	5.908	3.416	2.308	5.916	3.008	2.286	4.799	2.81	2.308	5,3583673260037	2,88019686859878	2,39935788498547	-0,5593536732600368	-0,070968685987754	-0,0913578849854706
33	5.916	3.008	2.286	4.799	2.81	2.308	4.007	2.755	2.312	3,74899458648137	2,85147788145209	2,55472420380837	0,258005413518633	-0,096477881452093	-0,242724203808374
34	4.799	2.81	2.308	4.007	2.755	2.312	3.719	3.332	3.313	3,87158807391397	2,89327923287471	2,96232704335950	-0,152588073913965	0,438720767125289	-0,649327043359499
35	4.007	2.755	2.312	3.719	3.332	3.313	4.573	3.544	2.806	3,98404612875299	3,24796057385259	3,04602609633898	0,588953871247015	0,296039426147407	-0,240026096338984
36	3.719	3.332	3.313	4.573	3.544	2.806	4.789	3.633	3.019	3,99184958081458	3,19820630711017	2,90340197539823	0,797150419185422	-0,434793962889831	-0,115980246013991
37	3.573	3.544	2.806	4.789	3.633	3.019	4.801	3.645	3.131	5,08375870110506	3,50978447448162	3,00320049930585	-0,282758701105055	0,13521552518830	-0,12779506094149
38	4.789	3.633	3.019	4.801	3.645	3.131	4.355	3.15	3.168	5,14480566420896	3,54237940744002	3,08495463817969	-0,789805664208958	-0,392379407440024	0,0830453618203091
39	4.801	3.645	3.131	4.355	3.15	3.168	3.932	2.968	3.177	4,67622658831573	3,10841863451028	3,30101963016605	-0,744226588315726	-0,140418634510282	-0,124019630166052
40	4.355	3.15	3.168	3.932	2.968	3.177	3.822	2.892	3.356	4,27675283555825	3,1916535656372	3,52417321965922	-0,454752835558247	-0,29965356565370	-0,168173219659217
41	3.932	2.968	3.177	3.822	2.892	3.356	4.597	2.883	3.413	4,00694963554367	3,22155020991402	3,76551410199585	0,590050364456334	-0,338559209914029	-0,352514101995848
42	3.822	2.892	3.356	4.597	2.883	3.413	4.876	3.433	3.434	4,59830406701723	3,7187361407042	4,40994142146794	0,277695932982771	0,0611253859295774	0,0420585785320284
43	5.297	2.883	3.413	4.876	3.433	3.434	4.926	3.636	3.438	5,31704820048923	3,78820542331389	2,27076190159973	-0,391048200489275	-0,12625042331389	0,167238098400711
44	4.876	3.433	3.434	4.926	3.636	3									

93	6.854	2.829	2.387	7.06	3.841	2.981	7.085	4.263	3.229	6,39088674543491	4,30783218876351	3,27542091527386	0,694113254565092	-0,044832188763508	-0,0464209152738597
94	7.06	3.841	2.981	7.085	4.263	3.229	5.73	4.464	3.351	6,20852925978682	4,54391319453627	3,42558883024605	-0,478529259786823	-0,079913194536265	-0,0745888302460482
95	7.085	4.263	3.229	5.73	4.464	3.351	5.192	4.52	3.393	5,37789650365132	4,61012798732362	3,42754232001415	-0,185896503651324	-0,0901279873236205	-0,0345423200141468
96	5.73	4.464	3.351	5.192	4.52	3.393	5.036	3.899	3.403	4,89528129413850	4,65217995218936	3,41055168654687	0,140718705861499	-0,753179952189355	-0,00755168654687255
97	5.192	4.52	3.393	5.036	3.899	3.403	4.557	3.667	3.124	5,14261530093973	3,66120107208735	3,38098648718798	-0,585615300939725	0,0057989279126453	-0,256986487187978
98	5.036	3.899	3.403	4.557	3.667	3.124	4.455	3.568	3.026	5,02555182697297	3,65889031248003	3,06894468473484	-0,570551826972968	-0,0908903124800311	-0,0429446847348411
99	4.557	3.667	3.124	4.455	3.568	3.026	6.019	3.553	2.987	4,97856867133830	3,51459911445473	3,04746922863508	1,04043132866170	0,0384008855452702	-0,0604692286350845
100	4.455	3.568	3.026	6.019	3.553	2.987	6.67	4.03	2.976	6,05471352733383	3,91205939478353	3,01658239468649	0,615286472666175	0,117940605216466	-0,0405823946864934
101	6.019	3.553	2.987	6.67	4.03	2.976	6.899	4.203	3.306	6,44986995072297	4,11685656501182	2,99032747196103	0,449130049277032	0,0861434349881769	0,315672528038967
102	6.67	4.03	2.976	6.899	4.203	3.306	6.364	4.275	3.426	6,34155483222082	4,30900919315438	3,49201856351153	0,0224451677791802	-0,0340091931543785	-0,0660185635115305
103	6.899	4.203	3.306	6.364	4.275	3.426	6.233	4.282	3.476	5,75563522946231	4,50933592345379	3,56041967206812	0,477364770537695	-0,227335923453786	-0,0844196720681207
104	6.364	4.275	3.426	6.233	4.282	3.476	6.271	4.517	3.49	5,98491601083024	4,36342358634847	3,51015440843204	0,286083989169764	0,153576413651529	-0,0201544084320431
105	6.233	4.282	3.476	6.271	4.517	3.49	6.277	4.587	3.491	6,01708802304523	4,53896772499373	3,43340005421100	0,259911976954769	0,0480322750062658	0,0575999457890002
106	6.271	4.517	3.49	6.277	4.587	3.491	6.012	4.607	3.749	5,90300062680979	4,56827591535322	3,44780785031652	0,108999373190210	0,0387240846467831	0,301192149683478
107	6.277	4.587	3.491	6.012	4.607	3.749	5.936	5.002	3.834	5,35317321522071	4,67988158732134	3,84112944723399	0,582826784779293	0,3221184127678663	-0,00712944723399245
108	6.012	4.607	3.749	5.936	5.002	3.834	4.633	5.139	3.865	4,78083722388697	5,08123627135077	3,81912153610799	-0,147837223886973	0,0577637286492330	0,0458784638920133
109	5.936	5.002	3.834	4.633	5.139	3.865	4.107	5.194	3.873	3,86665846210545	5,11144625071297	3,88441429111409	0,240341537894552	0,0825537492870323	-0,0114242911140940
110	4.633	5.139	3.865	4.107	5.194	3.873	3.942	5.196	3.691	4,12015771265268	5,18017033355432	3,69157699554389	-0,178157712652684	0,0158296664456792	-0,000576995543885239
111	4.107	5.194	3.873	3.942	5.196	3.691	5.1	4.319	3.632	4,50698567821199	5,05497703771157	3,46256367591701	0,593014321788010	-0,735977037711574	0,169436324082994
112	3.942	5.196	3.691	5.1	4.319	3.632	5.548	3.891	3.611	5,66649217990555	3,86731596100446	3,46391944729519	-0,118492179905553	0,0236840389955413	0,147080552704814
113	5.1	4.319	3.632	5.548	3.891	3.611	5.663	3.71	3.607	5,70402409456296	3,69340730348971	3,55064317472157	-0,0410240945629630	0,0165926965102874	0,0563568252784301
114	5.548	3.891	3.611	5.663	3.71	3.607	6.384	3.662	3.071	5,96993835301157	3,61984247229660	3,51095570007087	0,414061646988429	0,0421575277033965	-0,439955700070866
115	5.663	3.71	3.607	6.384	3.662	3.071	6.636	3.422	2.85	6,77052827976969	3,65462867410148	2,81918017260621	-0,134528279769689	-0,232628674101479	0,0308198273937914
116	6.384	3.662	3.071	6.636	3.422	2.85	6.673	3.351	2.742	6,68841547127846	3,49326708207301	2,86939119719291	-0,0154154712784553	-0,142267082073011	-0,127391197192911
117	6.636	3.422	2.85	6.673	3.351	2.742	5.37	3.33	2.706	6,48803627895090	3,56505707090675	2,85613699934167	-1,11803627895090	-0,235057070906745	-0,150136999341675
118	6.673	3.351	2.742	5.37	3.33	2.706	4.846	4.396	2.699	4,82709016444923	3,88616156048005	2,90404297931810	0,0189098355507706	0,509838439519947	-0,205042979318102
119	5.37	3.33	2.706	4.846	4.396	2.699	3.773	4.418	3.379	5,23951549193949	4,66821374818199	2,85917372545206	-1,46651549193949	-0,250213748181992	0,519826274547941
120	4.846	4.396	2.699	2.976	4.379	2.303	3.691	4.891	3.432	3,71135555610766	4,96796417643240	3,37633660112422	-0,0203555561076620	-0,076964176432401	0,0556633988757782

Приложение 3

```

%Matlab code of RBFNN-PI control%%% DOCHITHANH%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%2017//
%PID control based on RBF neural network
clear all;
close all;
xite=0.28;
alfa=0.04;
IN=3;H=6;Out=2; %NN Structure
%wi= random [-0.5,0.5];
wi=[-0.4394 -0.2696 -0.3756 -0.4023; -0.4603 -0.2013 -0.3024 -0.2596;
-0.4749 0.4543 -0.3820 -0.2437;-0.3625 -0.4724 -0.3463 -0.2859;
0.1425 0.4279 -0.2406 -0.4660];
wi_1=wi;wi_2=wi;wi_3=wi;
wo=[0.3576 0.2616 0.2820 -0.1416 -0.1325;-0.1146 0.2949 0.1352 0.2205 0.4508;
0.3201 0.4566 0.3672 0.4962 0.3632];
%wo= random[-0.5,0.5];
wo_1=wo;wo_2=wo;wo_3=wo;
x=[0,0,0];
du_1=0;
u_1=0;u_2=0;u_3=0;u_4=0;u_5=0;
y_1=0;y_2=0;y_3=0;
Oh=zeros(H,1); %Output from NN hidden layer
I=Oh; %Input to NN hidden layer
error_2=0;
error_1=0;
ts=0.002;
for k=1:1:5000
time(k)=k*ts;
rin(k)=1.0;
%nonlinear model
a(k)=1.4*(1-0.8*exp(-0.1*k));
yout(k)=a(k)*y_1/(1+y_1^2)+u_1;
error(k)=rin(k)-yout(k);
xi=[rin(k),yout(k),error(k),1];
x(1)=error(k)-error_1;
x(2)=error(k);
x(3)=error(k)-2*error_1+error_2;
epid=[x(1);x(2);x(3)];
I=xi*wi';
for j=1:1:H
Oh(j)=(exp(I(j))-exp(-I(j)))/(exp(I(j))+exp(-I(j))); %hidden Layer
end
K=wo*Oh; %Output Layer
for l=1:1:Out
K(l)=exp(K(l))/(exp(K(l))+exp(-K(l))); %Getting kp,ki
end
kp(k)=K(1);ki(k)=K(2);
Kpid=[kp(k),ki(k)];
du(k)=Kpid*epid;
u(k)=u_1+du(k);
dyu(k)=sign((yout(k)-y_1)/(du(k)-du_1+0.0001));
%Output layer
for j=1:1:Out
dK(j)=2/(exp(K(j))+exp(-K(j)))^2;
end
for l=1:1:Out
delta3(l)=error(k)*dyu(k)*epid(l)*dK(l);
end
for l=1:1:Out
for i=1:1:H
d_wo=xite*delta3(l)*Oh(i)+alfa*(wo_1-wo_2);
end
end
end

```

```

wo=wo_1+d_wo+alfa*(wo_1-wo_2);
%Hidden layer
for i=1:1:H
d0(i)=4/(exp(I(i))+exp(-I(i)))^2;
end
segma=delta3*wo;
for i=1:1:H
delta2(i)=d0(i)*segma(i);
end
d_wi=xite*delta2'*xi;
wi=wi_1+d_wi+alfa*(wi_1-wi_2);
%Parameters Update
du_1=du(k);
u_5=u_4;u_4=u_3;u_3=u_2;u_2=u_1;u_1=u(k);
y_2=y_1;y_1=yout(k);
wo_3=wo_2;
wo_2=wo_1;
wo_1=wo;
wi_3=wi_2;
wi_2=wi_1;
wi_1=wi;
error_2=error_1;
error_1=error(k);
end
ec = gradient(error);
figure(1);
plot(time,error,'r');
xlabel('time(s)');ylabel('error');
figure(2);
plot(time,u,'r');
xlabel('time(s)');ylabel('PI output');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%END_DOCHITHANH%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
xite=0.25;
alfa=0.5;
belte=0.01;
x=[0,0,0]';
ci=30*ones(3,6);
bi=40*ones(6,1);
w=10*ones(6,1);
h=[0,0,0,0,0,0,0]';
ci_1=ci;ci_3=ci_1;ci_2=ci_1;
bi_1=bi;bi_2=bi_1;bi_3=bi_2;
w_1=w;w_2=w_1;w_3=w_1;
u_1=0;y_1=0;
xc=[0,0,0]';
error_1=0;error_2=0;error=0;
%kp=rand(1);
%ki=rand(1);
kp0= 110;
ki0=10;
kp_1=kp0;
ki_1=ki0;
xitekp=0.20;
xiteki=0.20;
ts=0.05;
for k=1:1:5000
    time(k)=k*ts;
S=2
if S==1
rin(k)=0.5;
elseif S==02
rin(k)=1.0*sign(sin(2*pi*k*ts));
end
yout(k)= (y_1+0.11*u_1)/(1+y_1^2);

```

```

for j=1:1:6
h(j)=exp(-norm(x-ci(:,j))^2/(2*bi(j)*bi(j)));
end
ymout(k)=w'*h;
d_w=0*w;
for j=1:1:6
d_w(j)=xite*(yout(k)-ymout(k))*h(j);
end
w=w_1+d_w+alfa*(w_1-w_2)+belte*(w_2-w_3);
d_bi=0*bi;
for j=1:1:6
d_bi(j)=xite*(yout(k)-ymout(k))*w(j)*h(j)*(bi(j)^-3)*norm(x-ci(:,j))^2;
end
bi=bi_1+d_bi+alfa*(bi_1-bi_2)+belte*(bi_2-bi_3);
for j=1:1:6
for i=1:1:3
d_ci(i,j)=xite*(yout(k)-ymout(k))*w(j)*h(j)*(x(i)-ci(i,j))*(bi(j)^-2);
end
end
ci=ci_1+d_ci+alfa*(ci_1-ci_2)+belte*(ci_2-ci_3);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Jacobian%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
yu=0;
for j=1:1:6
yu=yu+w(j)*h(j)*(-x(1)+ci(1,j))/bi(j)^2;
end
dyout(k)=yu;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Start of Control system%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
error(k)=rin(k)-yout(k);
kp(k)=kp_1+xitekp*error(k)*dyout(k)*xc(1);
ki(k)=ki_1+xiteki*error(k)*dyout(k)*xc(3);
if kp(k)<0
kp(k)=0;
end
if ki(k)<0
ki(k)=0;
end
du(k)=kp(k)*xc(1)+ki(k)*xc(3);
u(k)=u_1+du(k);
%Return of parameters
x(1)=du(k);
x(2)=yout(k);
x(3)=y_1;
u_1=u(k);
y_1=yout(k);
ci_3=ci_2;
ci_2=ci_1;
ci_1=ci;
bi_3=bi_2;
bi_2=bi_1;
bi_1=bi;
w_3=w_2;
w_2=w_1;
w_1=w;
xc(1)=error(k)-error_1; %Calculating P
xc(2)=error(k)-2*error_1+error_2;
xc(3)=error(k); %Calculating I
error_2=error_1;
error_1=error(k);
kp_1=kp(k);
ki_1=ki(k);
end
figure(1);
plot(time,u);
xlabel('time(s)');ylabel('PI output');

```

[illegible]

Приложение 4

Программа управления на ПЛК S7-300

SIMATIC ВЕНТИЛЯТОРА\SIMATIC 08/02/2017 03:54:38 300 Station\CPU 315-2 DP\...\OB1
=====

Name: DO CHI THANH:

Author: Version: 0.1

Block version: 2

Time stamp Code:

Interface:

04/26/2017 01:59:38 AM

Lengths (block/logic/data): 00634 00488 00030

Block: OB1 "Main Program Sweep (Cycle)"

УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЯТОРОМ МЕСТНЫМ ПРОВЕТРИВАНИЕМ ПО КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНУ В ШАХТЕ
МАОХЕ (ВЬЕТНАМ) ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ -
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Network: 1 Запуск системы и остановка системы

AN "Бит память остановка" M0.1

A(

O "STAR" I0.0 -- Вход сигнал Запуск вентилятора

O "Бит память запуск" M0.0

)

= "Бит память запуск" M0.0

Network: 2 Бит остановка системы

A "STOP" I0.1 -- Вход сигнал Остановка вентилятора

= "Бит память остановка" M0.1

Network: 3 Вентилятор работает с первой частотой 20(Гц)

A "Бит память запуск" M0.0

= L 20.0

A L 20.0

AN "Бит память авария B1" M0.2 -- Бит память рабочие авария вентилятора

AN "РЕЗЕРВНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.1 -- Выход сигнал

= "РАБОЧИЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.0 -- Выход сигнал

A L 20.0

AN "Бит память авария B2" M0.3 -- Бит память резервные авария вентилятора

AN "РАБОЧИЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.0 -- Выход сигнал

= "РЕЗЕРВНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.1 -- Выход сигнал

Network: 4 Фактическая концентрация метана записывается в MD50

A M 2.0

= L 20.0

BLD 103

A(

O "РАБОЧИЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.0 -- Выход сигнал

O "РЕЗЕРВНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.1 -- Выход сигнал

)

JNB _001

CALL FC 105

IN :=PIW272

HI_LIM :=1.300000e+000

LO_LIM :=0.000000e+000

BIPOLAR:=L20.0

RET_VAL:=MW10

OUT :=MD50

_001: NOP 0

Network: 5 Фактическое значение частоты записывается в MD30

A M 2.1

= L 20.0

BLD 103

A(

O "РАБОЧИЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.0 -- Выход сигнал

O "РЕЗЕРВНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.1 -- Выход сигнал

)

JNB _002

```

CALL FC 105
IN :=PIW272
HI_LIM :=5.000000e+001
LO_LIM :=2.000000e+001
BIPOLAR:=L20.0
RET_VAL:=MW15
OUT :=MD30
_002: NOP 0
Network: 6 Выходная скорость ветра записывается в MD35
A M 2.1
= L 20.0
BLD 103
A(
O "РАБОЧИЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.0 -- Выход сигнал
O "РЕЗЕРВНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.1 -- Выход сигнал
)
JNB _003
CALL FC 105
IN :=PIW272
HI_LIM :=4.000000e+000
LO_LIM :=2.500000e-001
BIPOLAR:=L20.0
RET_VAL:=MW20
OUT :=MD35
_003: NOP 0
Network: 7 Расчетный расход воздуха на выходе
A(
O "РАБОЧИЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.0 -- Выход сигнал
O "РЕЗЕРВНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.1 -- Выход сигнал
)
JNB _004
L 1.210000e+001
L MD 35
*R
T MD 40
_004: NOP 0
Network: 8 Выход сигнал Работает двигатель с частотой (f2)
A(
O "РАБОЧИЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.0 -- Выход сигнал
O "РЕЗЕРВНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.1 -- Выход сигнал
)
A(
L MD 50
L 0.000000e+000
==R
)
A(
L MD 20
L 2.000000e-001
<=R
)
= "F2" Q1.0 -- Выход сигнал Работает двигатель с частотой (f2)

Network: 9 Выход сигнал Работает двигатель с частотой (f3)
A(
O "РАБОЧИЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.0 -- Выход сигнал
O "РЕЗЕРВНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.1 -- Выход сигнал
)
A(
L MD 50
L 2.000000e-001
>R
)

```

```

A(
L MD 50
L 5.000000e-001
<=R
)
= "F3" Q1.1 -- Выход сигнал Работает двигатель с частотой (f3)
Network: 10 Выход сигнал Работает двигатель с частотой (f4)
A(
O "РАБОЧИЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.0 -- Выход сигнал
O "РЕЗЕРВНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.1 -- Выход сигнал
)
A(
L MD 50
L 5.000000e-001
>R
)
A(
L MD 50
L 7.300000e-001
<=R
)
= "F4" Q1.2 -- Выход сигнал Работает двигатель с частотой (f4)
Network: 11 Выход сигнал Работает двигатель с частотой (f5)
A(
O "РАБОЧИЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.0 -- Выход сигнал
O "РЕЗЕРВНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.1 -- Выход сигнал
)
A(
L MD 50
L 7.300000e-001
>R
)
A(
L MD 50
L 1.250000e+000
<=R
)
= "F5" Q1.3 -- Выход сигнал Работает двигатель с частотой (f5)
Network: 12 Останов системы
A(
O "РАБОЧИЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.0 -- Выход сигнал
O "РЕЗЕРВНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР" Q0.1 -- Выход сигнал
)
A(
L MD 50
L 1.250000e+000
>R
)
R "Бит память запуск" M0.0
S "Сигнал остановка системы" Q1.4 -- Выходной сигнал, когда высокие концентрации
%CH4

```

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АГЗ - автоматическая газовая защита
АД – асинхронный электродвигатель.
АРПСС – авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего.
БР – блок регуляторов.
ВГП – Вентилятора Главного Проветривания
ВМП – вентилятор местного проветривания.
ВС – вентиляционная сеть.
ВДС – воздушно-депресссионной съемке
ПЛК – программируемый логический контроллер.
ПЧ – преобразователь частоты.
САУ – система автоматического управления.
ИСУ АГПШ - интеллектуальной системы управления аэрогазодинамическими процессами в шахтах.
ИИ – искусственного интеллекта.
ИНС – искусственной нейронной сети
НС – нейронной сети
ШИМ – широтно-импульсная модуляция.
РРВ – регуляторов расходом воздуха.