

СТАРООСКОЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А.А. УГАРОВА
(филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
(СТИ НИТУ «МИСИС»)

На правах рукописи

АНПИЛОВ АЛЕКСАНДР ОЛЕГОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА
ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО
КОНЦЕНТРАТА НА ОСНОВЕ
ГИБРИДНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
кандидат технических наук, доцент,
Халапян Сергей Юрьевич

Старый Оскол – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ И СПОСОБОВ ЕГО ИНТЕНСИФИКАЦИИ.....	14
1.1 ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ВАКУУМ-ФИЛЬТРОВ.....	14
1.1.1 БАРАБАННЫЙ ВАКУУМ-ФИЛЬТР.....	14
1.1.2 ЛЕНТОЧНЫЙ ВАКУУМ-ФИЛЬТР.....	15
1.1.3 ФИЛЬТР-ПРЕСС.....	15
1.1.4 ДИСКОВЫЙ ВАКУУМ-ФИЛЬТР.....	17
1.2 ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ.....	21
1.3 ПРОБЛЕМЫ В УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ.....	26
1.4 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ.....	28
1.4.1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ.....	28
1.4.2 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САУ.....	35
1.5 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ОСАДКА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДИСКОВОГО ВАКУУМ-ФИЛЬТРА.....	48
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1.....	52
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАЖДОГО ДИСКОВОГО ВАКУУМ-ФИЛЬТРА.....	55
2.1 РАЗРАБОТКА КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ.....	55
2.1.1 РАЗРАБОТКА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЛАЖНОСТИ ОСАДКА.....	55
2.1.2 РАЗРАБОТКА КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ И УРОВНЯ ПУЛЬПЫ В ВАННЕ ВАКУУМ-ФИЛЬТРА.....	57
2.1.3 РАЗРАБОТКА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЗАДВИЖКИ НА ТРУБОПРОВОДЕ ПОДАЧИ РАЗРЕЖЕНИЯ В ЗОНУ НАБОРА ОСАДКА.....	60
2.1.4 РАЗРАБОТКА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ПУЛЬПЫ В ПУЛЬПОДЕЛИТЕЛЕ.....	61

2.1.5 РАЗРАБОТКА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДИСКОВОГО ВАКУУМ-ФИЛЬТРА.....	62
2.2 РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ.....	65
2.2.1 РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ОСАДКА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВАКУУМ-ФИЛЬТРА.....	65
2.2.2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ.....	78
2.2.3 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ БАЗОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С РУЧНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ.....	84
2.2.4 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БАЗОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С РУЧНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ.....	90
2.2.5 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВЛАЖНОСТИ ОСАДКА.....	94
2.2.6 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВЛАЖНОСТИ ОСАДКА.....	98
2.2.7 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ.....	102
2.2.8 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ.....	110
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2.....	118
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С ГИБУЭР.....	120
3.1 РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ.....	120
3.2 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ГИБРИДНЫМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ БЛОКОМ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ.....	134

3.3 ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ГИБРИДНЫМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ БЛОКОМ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ.....	137
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3.....	141
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ.....	143
4.1 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ И АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АСУ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ..	143
4.2 РАСЧЁТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	151
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4.....	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	157
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	159
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	171

.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы и степень её разработанности. В горно-металлургическом производстве процесс обезвоживания железорудного концентрата выполняется в большинстве случаев на дисковых вакуум-фильтрах. Основной целью настоящего исследования является повышение производительности и энергоэффективности данных агрегатов. Максимизация производительности должна осуществляться при соблюдении ряда технологических ограничений. В частности, влажность осадка не должна превышать установленный технологией уровень.

Актуальность исследования подтверждается тем, что дисковые вакуум-фильтры широко применяются на горно-металлургических производствах в процессе обезвоживания железорудного концентрата, данный процесс характеризуется высокими затратами энергоресурсов, а также заниженной производительностью, вызванной использованием лабораторного анализа влажности осадка, а также группового управления вакуум-фильтрами.

При управлении дисковым вакуум-фильтром в настоящее время измерение влажности осадка осуществляется в большинстве случаев с помощью лабораторного анализа, проводимого с низкой частотой и существенным запаздыванием. Производительность вакуум-фильтров измеряется, но в среднем по группе фильтров. Это не позволяет определять показания производительности каждого фильтра с целью определения его индивидуальных настроек. В результате оператор не имеет возможности качественно управлять процессом обезвоживания железорудного концентрата на дисковых вакуум-фильтрах в режиме реального времени. В конечном итоге это приводит к снижению производительности дисковых вакуум-фильтров.

С целью устранения вышеперечисленных недостатков в первой главе был выполнен анализ методов интенсификации процесса обезвоживания. В результате было установлено, что наибольшую эффективность при наименьших капитальных затратах даёт способ интенсификации процесса

обезвоживания, основанный на применении систем автоматизации. Затем был проведён анализ существующих способов управления вакуум-фильтрами. Данной проблематикой занимались Г.Г. Кононенко, А.Н. Бокатий, В.В. Дядюра, М.А. Шаркевич, В.Г. Дейнега, Ю.Г. Гончаров, П.С. Энгель, А.М. Рясной, Ю.М. Кайгородцев, А.А. Миллер, В.П. Подопригора, Д.И. Малюта, Б.Е. Халецкий, Р.Х. Нураев, В.Н. Авилов, А.Я. Пацкан, А.А. Щелинский, Ю.П. Черник, А.И. Золотарёв, Б.А. Вишняк, С.М. Бурштейн, С.А. Бродская и другие. Анализ показал, что каждый из рассмотренных методов управления процессом имеет определённые недостатки и его применение в отдельности не даёт максимального эффекта. На основе проведённого анализа закономерностей процесса обезвоживания и основных способов управления данным процессом было установлено, что для повышения производительности дискового вакуум-фильтра необходимо разработать систему автоматического управления процессом обезвоживания с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра.

Разрабатываемая система управления процессом обезвоживания предусматривает измерение данных параметров на каждом фильтре отделения фильтрации. На основе проведённого анализа способов измерения влажности осадка и производительности было установлено, что использование соответствующих датчиков на каждом вакуум-фильтре технологически и экономически нецелесообразно.

Во второй главе данного исследования была разработана оригинальная система автоматического управления процессом обезвоживания, а также было предложено разработать модуль косвенного измерения (МКИ) влажности осадка и производительности фильтра на основе выявления взаимной корреляции технологических параметров.

Для выявления зависимости в выборках ретроспективных данных на первоначальном этапе использовался метод регрессионного анализа. В результате проведённых экспериментов были получены большие значения

ошибок, что не позволяет использовать рассмотренный метод анализа для разработки МКИ.

В дальнейшем для создания МКИ было предложено использовать многослойную нейронную сеть, обладающую свойством выявления скрытых зависимостей. Свойства ИНС рассмотрены в работах Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубии Юсоф, Л. Рутковского, С. Осовского и других.

Для проведения сравнительного анализа были построены модели базовой системы управления процессом обезвоживания и системы управления с автоматическим регулированием влажности осадка (АРВО) с использованием МКИ. В результате моделирования полученных систем управления процессом обезвоживания было установлено, что применение МКИ позволяет стабилизировать влажность осадка на задании и повысить производительность фильтра на 1,9 %.

Затем в контуре регулирования производительности разработанной системы управления процессом обезвоживания было предложено использовать многопараметрический шаговый экстремальный регулятор, определяющий задания пульпы питания и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка и функционирующий на основе метода покоординатного подъёма. В результате моделирования было установлено, что применение регулятора приведет к повышению производительности фильтра на 3,4 %.

Было замечено, что многопараметрический шаговый экстремальный регулятор при своей работе постоянно переключает задания плотности пульпы питания и положения задвижки. Это обстоятельство приводит к большому пробегу исполнительных механизмов (приводов и задвижек, регулирующих разрежение в зоне набора осадка и подачу воды и пульпы в ванну вакуум-фильтра), а следовательно, к их ускоренному износу.

В третьей главе настоящей диссертации для уменьшения количества переключений заданий плотности пульпы и положения задвижки с целью увеличения ресурса работы задвижек и их приводов был разработан

гибридный интеллектуальный блок управления экстремальным регулятором (ГИБУЭР) с пятью входами и двумя выходами.

В ходе исследования было установлено, что входящий в состав ГИБУЭР блок оценки целесообразности коррекции задания плотности пульпы может быть реализован с помощью искусственной нейронной сети, а блок оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки – с помощью нечёткой нейронной сети. Свойства ННС рассмотрены в работах Д. Рутковской, М. Пилиньского, Л. Рутковского и других.

Затем была построена модель системы управления с МКИ и ГИБУЭР. Моделирование показало, что применение системы управления с МКИ и ГИБУЭР позволит повысить производительность вакуум-фильтра на 3,5 %.

Было установлено, что экстремальный регулятор с ГИБУЭР в целом повторяет работу обычного регулятора, но при этом делает в среднем в 7 раз меньше переключений заданий, что снизит износ приводов и задвижек, регулирующих разрежение в зоне набора осадка и подачу воды и пульпы в ванну вакуум-фильтра.

Затем была проведена оценка устойчивости разработанной системы управления с МКИ и ГИБУЭР, в результате которой было установлено, что каждая из подсистем, входящих в состав системы, устойчива.

В четвертой главе разработаны структурно-функциональная схема и алгоритм функционирования автоматизированной системы управления процессом обезвоживания с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра с использованием МКИ и ГИБУЭР. Также был произведён расчёт экономической эффективности, который показал, что внедрение разработанной автоматизированной системы управления приведёт к росту производительности участка фильтрации и снижению удельных расходов энергоресурсов, используемых в процессе обезвоживания.

Целью диссертационной работы является повышение производительности процесса обезвоживания железорудного концентрата на

основе разработки гибридной интеллектуальной системы управления с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра.

Задачи исследования. Достижение цели диссертационного исследования связано с решением следующих задач:

- анализ принципа работы дисковых вакуум-фильтров и основных технологических параметров процесса обезвоживания железорудного концентрата;
- анализ основных способов интенсификации процесса обезвоживания и вариантов построения системы управления;
- создание методики косвенного измерения (МКИ) влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра, позволяющей на основе разработанной нейросетевой модели технологического агрегата определять данные параметры с высокой частотой;
- создание методики разработки гибридного интеллектуального блока управления экстремальным регулятором (ГИБУЭР), обеспечивающего снижение наработки исполнительных механизмов;
- разработка алгоритма функционирования гибридного интеллектуального блока управления экстремальным регулятором, определяющего моменты активации и деактивации многопараметрического экстремального регулятора;
- разработка структурно-функциональной схемы автоматизированной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра на основе МКИ и ГИБУЭР и оригинального алгоритма функционирования системы управления.

Новые научные положения, выносимые на защиту:

- предложена методика косвенного измерения (МКИ) влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра на основе

разработанной нейросетевой модели технологического агрегата, отличающаяся повышенной частотой определения данных параметров;

- предложена методика разработки системы управления на основе гибридного интеллектуального блока управления экстремальным регулятором (ГИБУЭР), отличающейся уменьшенной в среднем в 7 раз наработкой исполнительных механизмов;

- разработан алгоритм функционирования ГИБУЭР, определяющий порядок работы экстремального регулятора и отличающийся возможностью косвенного определения дрейфа экстремума производительности дискового вакуум-фильтра;

- разработана структурно-функциональная схема и алгоритм функционирования автоматизированной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата, отличающийся индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра на основе МКИ и ГИБУЭР.

Теоретическая значимость работы заключается в создании универсальных методик разработки модуля косвенного измерения влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра и построения гибридного интеллектуального блока управления экстремальным регулятором. Данные методики в совокупности с предложенной системой автоматического управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра могут быть адаптированы к широкому классу технологических агрегатов схожего принципа действия таких как: барабанный вакуум-фильтр, гипербарфильтр и т. д., применяемых в различных отраслях промышленности.

Практическая значимость работы. Применение разработанной системы автоматического управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием

технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра с использованием МКИ и ГИБУЭР позволит:

- повысить производительность дисковых вакуум-фильтров на 3,5 %;
- снизить удельные энергозатраты на обезвоживание железорудного концентрата на 3,3 %;
- улучшить качество получаемого осадка, выражающееся в снижении колебаний его влажности;
- улучшить качество управления процессом, снизив в среднем в 7 раз количество переключений заданий плотности пульпы и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка в сравнении с экстремальным регулятором без БУ, что снизит износ задвижек и их приводов;
- снизить нагрузку на оперативный персонал.

Методология и методы исследования. В ходе данного диссертационного исследования применялись классические методы теории автоматического управления, используемые для идентификации технологических объектов на основе информации об их эксплуатации. Основными методами проводимого анализа являются: метод регрессионного анализа, методы искусственных нейронных сетей и нейро-нечётких систем. Методологическую и теоретическую основу диссертационного исследования составили научные труды отечественных и зарубежных авторов в области обезвоживания пульп, искусственного интеллекта и интеллектуальных систем управления.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается соблюдением требований к проведению процедуры математического моделирования, использования в ходе экспериментов специализированного программного обеспечения Matlab, а также проведение их на основе данных, полученных с реального объекта управления на производстве.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные практические результаты, полученные при разработке системы управления процессом обезвоживания, могут быть использованы в АО «ОЭМК им. А.А. Угарова» и ООО «Гипромет», что подтверждено справками, приведенными в приложениях Д и Е соответственно.

Результаты данного исследования применяются в учебном процессе Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиала) ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» в дисциплинах «Нейронечёткие системы управления» и «Автоматизированные средства диагностики оборудования», что подтверждено актом внедрения, приведенным в приложении Ж.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 14 международных и всероссийских научно-технических конференциях: Международная научно-техническая конференция «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве» (Воронеж, 2017), Международная научно-практическая конференция «Современные сложные системы управления» (Липецк, Старый Оскол 2017, 2018), Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (Воронеж, 2017), XV Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами» (Воронеж, 2018), Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» (Старый Оскол, 2017, 2018), 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (Липецк, 2022).

Связь исследований с научными программами: отдельные результаты исследований были получены в рамках работ по договору № 275834 с АО «ОЭМК им. А.А. Угарова» на проведение НИР по теме

«Разработка и реализация технических решений по увеличению производительности вакуум-фильтров ЦОиМ».

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 23 научных работах, 2 из которых – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК, 2 – в материалах публикаций, индексируемых в Scopus, 14 – в изданиях РИНЦ и 5 – в иных изданиях.

Структура и объемы работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы из 102 наименований, 7 приложений, содержит 83 рисунка и 11 таблиц.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ И СПОСОБОВ ЕГО ИНТЕНСИФИКАЦИИ

Фильтрация - один из способов обезвоживания требуемого материала до необходимой влажности. В технологическом процессе обезвоживания железорудного концентрата в большинстве случаев применяются специальные агрегаты, которые называются фильтрами. Качество протекания процесса обезвоживания концентрата влияет на производительность передела, себестоимость и пригодность выходного продукта к дальнейшей переработке [1]. Рассмотрим основные виды фильтров, используемые для обезвоживания пульпы.

1.1 ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ВАКУУМ-ФИЛЬТРОВ

1.1.1 БАРАБАННЫЙ ВАКУУМ-ФИЛЬТР

Барабанные вакуум-фильтры применяются в основном для удаления воды из осадков, которые имеют однородный фракционный состав и низкую скорость осаждения. Основной элемент данных фильтров – цилиндрический барабан, который расположен горизонтально и частично погружен в ёмкость. В данную ёмкость подаётся пульпа для обезвоживания.

Барабан состоит из сплошного внутреннего и перфорированного наружного слоя, который обтянут фильтротканью. Внутреннее полое пространство барабана делится на секции. К каждой секции подходит коллектор для отвода фильтрата, имеющий на конце цапфу и выходящий в торец барабана. К цапфам прижимается распределительная головка.

При вращении барабана его секции последовательно погружаются в пульпу, сменяя друг друга, при этом происходит их подключение к соответствующим камерам распределительной головки. В зоне фильтрования твёрдая часть пульпы, находящейся в емкости, под действием разрежения прилипает к поверхности фильтроткани, образуя слой осадка, а фильтрат отводится через коллектор и камеру распределительной головки за пределы вакуум-фильтра. В зоне просушки осадок подвергается воздействию

атмосферного воздуха, при этом под действием разрежения он продолжает просушиваться. В зоне снятия осадка в секции барабана идет подача сжатого воздуха. Это облегчает процесс отделения осадка от фильтроткани с помощью скребкового механизма. Затем в зоне регенерации производится восстановление фильтроткани путем её обработки сжатым воздухом или паром [2].

1.1.2 ЛЕНТОЧНЫЙ ВАКУУМ-ФИЛЬТР

Для обезвоживания быстро расслаивающихся и неоднородных по фракционному составу осадков используется ленточный вакуум-фильтр. Данный вакуум-фильтр представляет собой агрегат, состоящий из фильтровального стола и бесконечной ленты.

В средней части фильтровального стола находится прорезь, имеющая прямое сообщение с коллектором для сбора фильтрата. На рабочей поверхности ленты расположены поперечные желоба для отвода фильтрата и прорези, такие же, как и в фильтровальном столе.

Фильтроткань крепится на ленте. Её края загибаются так, что она принимает желобообразную форму. Фильтрат отводится с внутренней стороны тканевого полотна и через прорези на нём уходит в сборный коллектор.

Движение потока при фильтровании направлено вниз, в ту же сторону что и сила тяжести. В результате чего сначала происходит осаждение крупнодисперсных частиц, составляющих основу осадка и затем слой мелкой фазы осадка. Существенный недостаток ленточного фильтра – его габаритные размеры [2].

1.1.3 ФИЛЬТР-ПРЕСС

Фильтр-прессы применяют для фильтрации суспензий с низким содержанием твёрдого. Различают рамные и камерные фильтр-прессы, а также автоматические камерные пресс-фильтры с похожим принципом действия. Под действием внешнего насоса фильтруемая пульпа подаётся во

внутренние полости фильтра. Жидкая фаза пульпы проходит сквозь фильтрующие перегородки и по дренажным каналам отводится в поддон или коллектор. Выгрузка образовавшегося осадка может осуществляться вручную (стряхиванием, смывом водой или съёмом лопатой) или автоматически.

Площадь поверхности фильтрования составляет от 2 до 800 м². Входное давление суспензии может составлять до 2 МПа. Рамы и плиты изготавливаются из чугуна, стали или стали с антикоррозионным покрытием.

Фильтр-прессы имеют большую поверхность фильтрования на единицу площади, значительные показатели перепада давления. При этом отсутствуют движущиеся части и имеется возможность контроля работы отдельных плит.

Рабочий процесс пресс-фильтра состоит из четырёх циклов, повторяющихся периодически: подача суспензии, процесс фильтрования, промывка и сушка осадка, раскрытие фильтра, выгрузка осадка и закрытие.

Рамный фильтр-пресс состоит из пакета прямоугольных пластин и рам. Они расположены поочередно в один ряд и подвешены к опоре. На пластинах имеется рифлёная поверхность и они обтянуты фильтротканью. Суспензия под давлением проходит по каналам в полость рамы и разделяется фильтровальной перегородкой. На поверхности ткани остаётся осадок, а фильтрат проходит через перегородку и отводится по желобам плиты в емкость для сбора фильтрата. После завершения процесса фильтрования образовавшийся на фильтроткани осадок удаляется. Для этого рамы и пластины разъединяются и осадок отделяется под тяжестью собственного веса или срезается ножом. После этого пластины закрываются и цикл фильтрования начинается заново.

Камерные фильтр-прессы используются для фильтрации и промывки осадков суспензий на различных химических производствах. Камерный фильтр-пресс состоит из набора плит, расположенных вертикально. Бывают несколько типов плит: фильтрующие; концевые; нажимные; упорные.

Плиты устанавливаются на продольных стяжках с направляющими, по которым перемещаются плиты. При закрытии пресса фильтрующая плита с прилегающими плитами образует камеру фильтрования и промывки. Пульпа подается по коллектору, который формируется при зажиме плит. Фильтрат выводится через штуцер, соединённый с коллекторами отвода. Для промывки осадка фильтр-пресс оснащается отверстиями для подачи промывочной жидкости. Промывочный фильтрат выводится справа от оси фильтра. Когда промывочная жидкость подаётся под фильтрующую ткань, она проходит двойную толщину осадка и потом сквозь ткань следующей плиты отводится по каналу в коллектор [3].

1.1.4 ДИСКОВЫЙ ВАКУУМ-ФИЛЬТР

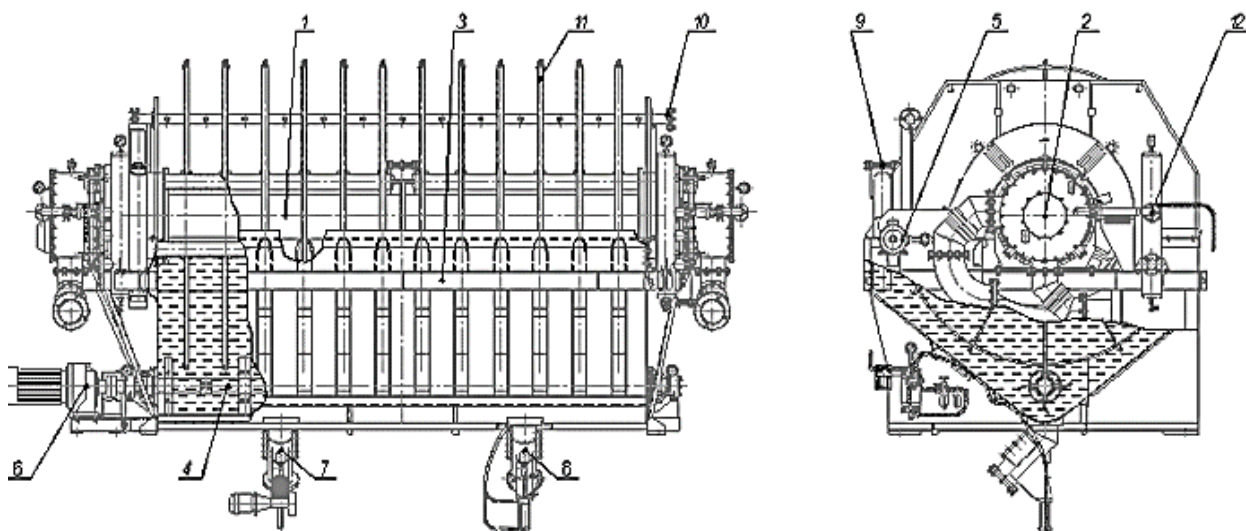
Для обезвоживания пульп, содержащих железорудный концентрат, в большинстве случаев используются дисковые вакуум-фильтры. Данный агрегат состоит из горизонтально вращающегося опорного вала с подшипниками и двадцатью всасывающими трубами, по десять труб с каждой стороны на каждую всасывающую головку, привода, в состав которого входят: электродвигатель, червячная и зубчатая передачи. На опорном валу установлены сто секторов, на которые надеты фильтровальные чехлы. К торцам вращающегося опорного вала прижаты своими рабочими поверхностями всасывающие головки. Они соединены с ресиверами и системой трубопроводов подачи разрежения и имеют кольцевой ряд камер. Данные камеры отделены друг от друга перегородками и связаны коммуникациями с ресиверами, имеющими барометрические трубы, вакуум-насосом и системой отдувки кека, в состав которой входят: ресивер сжатого воздуха, 2 клапана мгновенной отдувки [4].

В состав дискового вакуум-фильтра входит: ванна с переливом, подводящая труба для подачи пульпы питания, паровой распределитель, дефлекторы, рама с опорами для коренного подшипника, централизованная системы смазки и изолированный паровой колпак с присоединением для

вытяжной системы [4] (применение пара в процессе обезвоживания используется не на всех фильтрах).

В нижней части ванны дискового вакуум-фильтра установлена роторная мешалка. Её лопасти при вращении поддерживают твердую фазу пульпы во взвешенном состоянии. Роторная мешалка приводится во вращение электроприводом.

Подача пульпы питания в ванну фильтра осуществляется через подводящую трубу. Постоянный уровень в ванне фильтра поддерживается за счёт слива излишней пульпы через переливное отверстие. Общий вид дискового вакуум-фильтра представлен на рисунке 1. В таблице 1 представлены технические характеристики дискового вакуум-фильтра Scanmec.



- 1 – вал опорный с приводным колесом и подшипниками скольжения;
2 – головка распределительная; 3 – ванна; 4 – мешалка; 5 – привод вала;
6 – привод мешалки; 7,8 – донный клапан; 9 – воронка загрузочная;
10 – устройство для сушки осадка паром; 11 – сектор; 12 – система отдувки осадка

Рисунок 1. Общий вид дискового вакуум-фильтра

Таблица 1 – Технические характеристики дискового вакуум-фильтра Scanmec

<i>Название параметра</i>	<i>Размерность</i>	<i>Значение параметра</i>
общая площадь фильтрования	м ²	57
количество дисков	Шт	10
диаметр дисков	Мм	2090
мощность привода дисков	кВт	5,5
мощность привода мешалки	кВт	4,4
мощность привода маслостанции	кВт	0,25
частота вращения мешалки	мин ⁻¹	71
частота вращения дисков	мин ⁻¹	0,1-1,5

Работа дискового вакуум-фильтра складывается из нескольких отдельных операций, следующих одна за другой по ходу вращения дисков. В ванну фильтра при работающей мешалке и маслостанции системы смазки подаётся пульпа. Следующим этапом включается в работу вакуум-насос. При вращении опорного вала секторы дисков, установленные на нём, поочередно погружаются в пульпу. Вакуум-насосом через ресиверы, всасывающие головки и всасывающие трубы в секторах создаётся разрежение [4]. В связи с разностью давлений внутри и снаружи секторов, жидкая фаза пульпы просачивается через фильтроткань, а частицы твёрдой фазы задерживаются на ней, формируя слой осадка. Жидкость (фильтрат) из внутренних полостей секторов отводится по каналам опорного вала и всасывающих головок. При дальнейшем вращении дисков, образовавшийся на них слой осадка выносится из пульпы, и зона набора осадка сменяется зоной сушки, отличающейся более глубоким вакуумом. Под действием разрежения через слой осадка происходит просасывание атмосферного воздуха и удаляется оставшаяся влага из осадка [4]. В конце зоны сушки осадок достигает необходимой влажности. Подача вакуума прекращается и секторы переходят в зону отдувки осадка.

В зоне отдувки секторы располагаются горизонтально над краем ванны, представленной в виде карманов, огибающих секторы дисков. В

данной зоне в полость секторов десяти дисков по одному ряду подаётся сжатый воздух. Под действием давления воздуха, поданного в полость секторов, осадок отделяется от фильтроткани и падает за край ванны на конвейер под вакуум-фильтром. После окончания отдувки секторы дисков за счет вращения опорного вала снова погружаются в ванну с пульпой [4].

Разрежение в вакуум-системе фильтра создаётся с помощью вакуум-насоса. Данный агрегат состоит из следующих узлов: вала с расположенным на нём рабочим колесом с лопатками, корпуса с подшипниковыми узлами, привода вала, состоящего из электродвигателя, редуктора, тихоходной и быстроходной муфт. На Оскольском электрометаллургическом комбинате (ОЭМК) применяются следующие вакуум-насосы: Elmo-F, Nash, Edwards и Intech. Технические характеристики вакуум-насоса Nash приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики вакуум-насоса Nash

<i>Название параметра</i>	<i>Размерность</i>	<i>Значение параметра</i>
всасывающая способность	м ³ /ч	20350
давление всасывания	Мбар	100
давление сжатия	Мбар	1013
частота вращения рабочего колеса	мин ⁻¹	384
температура технической воды	°С	30
потребляемая мощность	кВт	450
потребность в технической воде	м ³ /ч	45

Принцип работы вакуум-насоса заключается в следующем: сначала осуществляют подачу воды в вакуум-насос, затем включают электродвигатель. При вращении рабочего колеса в корпусе вакуум-насоса, частично заполненном водой, образуется водяное кольцо. Оно соединяет малую зону и большую зону. За счёт изменения глубины погружения лопаток рабочего колеса в воду создаётся в малой зоне – давление, а в большой зоне - вакуум. Величина вакуума в вакуум-системе зависит от её герметичности и наличия осадка на секторах вакуум-фильтра [5].

1.2 ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

Основными технологическими параметрами, влияющие на процесс обезвоживания являются: частота вращения дисков вакуум-фильтра, величина разрежения в зоне набора осадка, величина разрежения в зоне сушки осадка, содержание твёрдого в фильтруемой пульпе (плотность пульпы), крупность концентрата, частота вращения мешалки, уровень пульпы в ванне фильтра.

Частота вращения дисков – один из основных технологических параметров процесса обезвоживания. Данный параметр оказывает влияние и на производительность вакуум-фильтра, и влажность осадка.

Повышение частоты вращения дисков при поддержании остальных технологических параметров на постоянном уровне приводит к повышению производительности вакуум-фильтра. Рост производительности связан с тем, что скорость образования осадка на диске фильтра не постоянна и снижается с увеличением его толщины. В момент, когда на фильтроткани осадок отсутствует, скорость его образования имеет максимальное значение, из-за того, что сопротивление всасываемому воздуху оказывает только фильтроткань на секторе диска. Затем скорость образования осадка на секторе уменьшается, так как образовавшийся слой осадка на диске значительно повышает сопротивление просасываемому воздуху.

При увеличении частоты вращения дисков фильтра в 2 раза толщина осадка на дисках снижается только в 1,5 раза. Это обстоятельство и даёт рост производительности вакуум-фильтров при повышении частоты вращения дисков [6].

Частота вращения дисков фильтра должна быть на таком уровне, чтобы толщина осадка на дисках была не менее 7 - 8 мм и не более 10 - 12 мм. Практика показывает, что при толщине более 12 мм осадок в связи с неравномерностью уменьшения его объема в процессе высыхания растрескивается. При наличии трещин на осадке происходит увеличение

расхода вакуумного воздуха и ухудшение сушки осадка. При повышении частоты вращения дисков толщина осадка уменьшается и растрескивание тоже. При слое осадка менее 7 мм увеличивается его проницаемость, в результате чего расход вакуумного воздуха также повышается.

Влажность осадка при увеличении частоты вращения дисков растёт. Это вызвано уменьшением времени сушки осадка. Зависимости влажности осадка (W) и удельной производительности фильтра (q) от частоты вращения дисков показаны на рисунке 2.



Рисунок 2. Зависимости удельной производительности фильтра (q) и влажности осадка (W) от частоты вращения дисков (n)

Другим важным технологическим параметром, определяющим влажность осадка и производительность фильтра, является величина разрежения в зонах набора и сушки осадка. От величины вакуума в зоне набора зависит толщина осадка на диске. Чем выше данный параметр, тем при поддержании остальных технологических параметров на постоянном уровне больше слой осадка на дисках, в следствии чего происходит повышение влажности осадка и удельной производительности вакуум-фильтра. От величины вакуума в зоне сушки зависит только влажность осадка. Чем выше величина вакуума в зоне сушки осадка, тем при поддержании остальных технологических параметров на постоянном уровне ниже влажность осадка. Поэтому разрежение в зоне сушки осадка необходимо поддерживать на максимально возможном уровне [6].

Зависимости удельной производительности вакуум-филтра и влажности осадка от разрежения в зоне набора осадка показаны на рисунке 3.

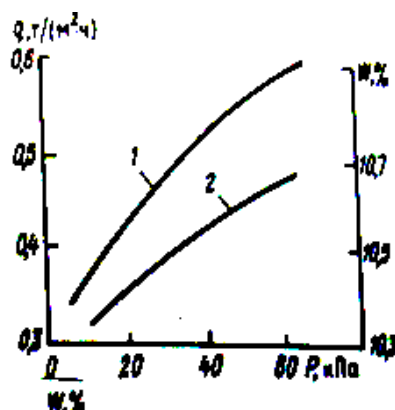


Рисунок 3. Зависимость удельной производительности вакуум-филтра (1) и влажности осадка (2) от разрежения в зоне набора осадка

Зависимость влажности осадка от разрежения в зоне сушки осадка показана на рисунке 4.

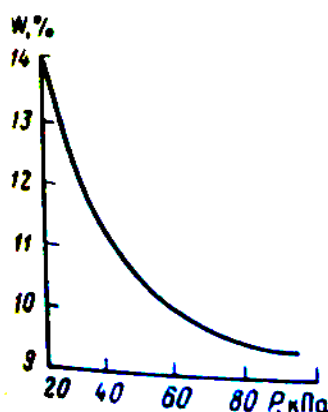


Рисунок 4. Зависимость влажности осадка от разрежения в зоне сушки осадка

Содержание твёрдого в фильтруемой пульпе (плотность пульпы) также является одним из важнейших технологических параметров процесса обезвоживания, влияющего и влажность осадка, и на удельную производительность вакуум-филтра.

С ростом содержания твёрдого в фильтруемой пульпе толщина осадка на дисках филтра возрастает. В связи с этим при поддержании остальных технологических параметров на постоянном уровне повышается производительность вакуум-филтра и влажность осадка [6]. Зависимости удельной производительности вакуум-филтра и влажности осадка от содержания твёрдого в пульпе показаны на рисунке 5.

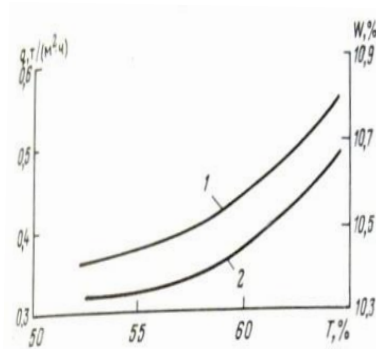


Рисунок 5. Зависимость удельной производительности вакуум-фильтра (1) и влажности осадка (2) от содержания твёрдого в пульпе

Крупность концентрата характеризуется его гранулометрическим составом. Данный технологический параметр в наибольшей степени влияет на фильтруемость концентрата. Чем более мелкую фракцию имеет концентрат после измельчения, тем выше его удельная поверхность и удельное сопротивление [6].

Наиболее сильно на процесс обезвоживания влияют частицы концентрата класса -0.02 мм. При росте в пульпе количества частиц этого класса удельная поверхность концентрата увеличивается, а фильтруемость уменьшается, то есть при снижении среднего диаметра частиц осадка его удельное сопротивление возрастает [7]. В итоге это приводит к росту влажности осадка и снижению производительности вакуум-фильтра [6]. Зависимости влажности осадка и удельной производительности дисковых вакуум-фильтров от содержания класса менее 0,02 мм показаны на рисунке 6.

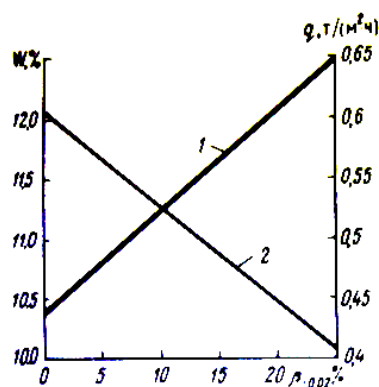


Рисунок 6. Зависимости влажности осадка (1) и удельной производительности дисковых вакуум-фильтров (2) от содержания класса менее 0,02 мм

Зависимость удельного сопротивления осадка от среднего диаметра его частиц показана на рисунке 7.

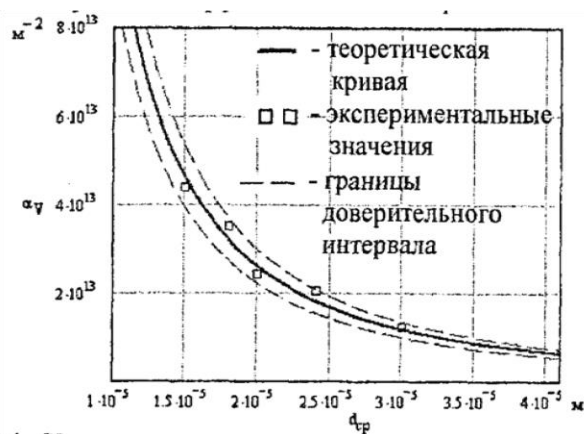


Рисунок 7. Зависимость удельного сопротивления осадка от среднего диаметра его частиц

Для стабильного функционирования вакуум-фильтра необходимо правильное перемешивание пульпы в его ванне. Отключение мешалки приводит к расслаиванию пульпы в ванне вакуум-фильтра. В этом случае содержание твёрдого в нижней части ванны значительно выше, чем в исходной пульпе питания. В связи с этим на периферии дисков фильтра формируется плохо просушиваемый толстый слой осадка, что приводит к значительному росту общей влажности осадка. Также на внутренних краях дисков образовывается минимальный слой осадка. Что вызывает потери вакуумного воздуха и трудности при разгрузке осадка. С включённой работающей роторной мешалкой пульпа практически полностью перемешивается и слой осадка по всему диску равномерен. В результате чего вся фильтрующая поверхность вакуум-фильтра используется эффективно [6].

Ещё одним важным технологическим параметром процесса обезвоживания является уровень пульпы в ванне вакуум-фильтра. Понижение уровня приводит к тому, что слой осадка на внутренних краях дисков фильтра не формируется. Это приводит к потерям вакуумного воздуха и снижению качества сушки осадка. Следовательно, одним из условий стабильной работы вакуум-фильтра является постоянное поддержание уровня пульпы в его ванне на требуемом значении [6].

1.3 ПРОБЛЕМЫ В УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

При управлении дисковыми вакуум-фильтрами контролируют следующие технологические параметры процесса обезвоживания: производительность вакуум-фильтра, влажность и гранулометрический состав осадка, величина вакуума в зоне набора и в зоне сушки осадка, частота вращения дисков, плотность пульпы, давление воздуха на отдувку и давление пара.

Влажность осадка контролируется лабораторным методом с малой периодичностью один раз в 2 - 4 часа и запаздыванием равным 3 часа. Забор концентрата для анализа осуществляется со всех работающих дисковых вакуум-фильтров, затем пробы перемешиваются [8]. В итоге полученные результаты лабораторного анализа влажности показывают среднее значение по всем фильтрам. Измерение толщины осадка на дисках фильтров не производится. Регулирование влажности осадка производится вручную изменением частоты вращения дисков одинаково на всех девяти работающих вакуум-фильтрах [9]. Также регулирование влажности осадка производится изменением задания плотности в системе регулирования плотности пульпы питания и изменением давления разрежения в зоне набора осадка. Последние два способа регулирования используются нечасто.

Зависимости основных технологических параметров процесса обезвоживания, приведённые на рисунках 2 - 6 являются усреднёнными. У каждого дискового вакуум-фильтра эти зависимости будут иметь разную форму, так как каждый вакуум-фильтр работает индивидуально. Это вызвано спецификой вакуумной системы предприятия, уровнем загрязнённости фильтроткани и износа узлов вакуум-фильтра. Ещё у вышеперечисленных зависимостей технологических параметров возникает дрейф, связанный с изменением загрязнённости фильтроткани на секторах фильтра.

Сложность в управлении дисковым вакуум-фильтром вызывает специфика вакуумной системы фильтров на различных предприятиях. Например, на одном предприятии на каждый вакуум-фильтр работает свой

вакуум-насос, а на другом предприятии группа вакуум-фильтров работает от группы вакуум-насосов.

Основная проблема качественного управления процессом обезвоживания железорудного концентрата – лабораторный анализ влажности осадка, который проводится с малой периодичностью и большим запаздыванием. Данный фактор не даёт производить оптимальное управление процессом обезвоживания в режиме реального времени. Поэтому оператор, регулируя влажность осадка задаёт частоту вращения дисков фильтра, оценивая влажность осадка визуально по его цвету или рассыпчатости. Так как визуально оператор не имеет возможности с высокой точностью определить влажность осадка, он поддерживает частоту вращения дисков фильтра с запасом с целью не превысить максимально допустимый порог влажности. В результате качество управления дисковым вакуум-фильтром снижено, наблюдаются скачки влажности осадка [10].

Процесс обезвоживания железорудного концентрата очень энергозатратный. Это вызвано необходимостью при функционировании вакуум-фильтров постоянно держать в работе большое количество мощных вакуум-насосов. В процессе обезвоживания пульпы железорудного концентрата используются такие энергоресурсы, как сжатый воздух и техническая вода, на получение которых тратится большое количество энергии. В итоге на стоимость конечного продукта во многом влияет процесс обезвоживания.

Из описанных проблем вытекает основная: из-за низкого качества управления дисковыми вакуум-фильтрами данные агрегаты работают с заниженным значением производительности и качества выходного продукта (наблюдаются колебания влажности осадка) при высоких затратах на производство и покупку энергоресурсов, необходимых в процессе обезвоживания пульпы железорудного концентрата. В итоге увеличивается цена выходного продукта процесса.

1.4 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

1.4.1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

В настоящее время известно множество способов интенсификации процесса обезвоживания материалов. В данном исследовании были рассмотрены наиболее известные.

Один из способов интенсификации процесса обезвоживания – выбор рациональной структуры узлов дискового вакуум-фильтра [11] - [14]. Например, определение оптимальных параметров сечения коллекторной трубы. С целью улучшения качества работы каждого сектора дисков вакуум-фильтра предлагается опорный вал делать с меняющимся диаметром по длине, а место соединения опорного вала с сектором выполнять по схеме, представленной на рисунке А.1 [11].

Интенсификация процесса обезвоживания возможна с помощью определения рациональной компоновки сектора диска относительно опорного вала. Поворот средней оси сектора x_1-x_1 (см. рисунок А.2) на угол γ относительно оси x_0-x_0 , проходящей через ось ячейкового вала, приведёт к одновременному выводу из суспензии всего торца сектора. В результате время сушки осадка на секторе увеличится [12].

Увеличить производительность дискового вакуум-фильтра можно с помощью увеличения площади эффективной поверхности сектора фильтра. Наиболее подходящей для секторов со сплошной фильтрующей поверхностью является поверхность по варианту *a* на рисунке А.3. Радиус r_k является постоянной величиной в пределах каждого поперечного сечения. По мере продвижения к горловине сектора r_k и b_k снижаются до нуля. Если опорная поверхность диска формируется радиальными ребрами жёсткости, профиль поверхности необходимо делать в соответствии с вариантом *б* на рисунке А.3.

Изменение поверхности фильтровальной перегородки сектора приводит к необходимости модернизации сектора. Рабочие поверхности фильтровальной перегородки необходимо делать наклоненными друг к другу под углом γ (см. рисунок А.4) [11].

Интенсифицировать процесс обезвоживания пульпы возможно с помощью применения вибраций различной частоты и интенсивности. Этот способ называется акустическим. Рабочий орган – колеблющаяся фильтровальная перегородка. Её колебания предотвращают процесс осаждения частиц пульпы. В фильтрах с пульсационным оборудованием очистка производится с помощью тех же вибраций. Для правильной регенерации ячеек фильтрующей перегородки нужно, чтобы колебания происходили с заданной частотой и амплитудой.

В вакуум-фильтре сердечник пульсатора может быть соединен непосредственно с фильтровальной мембраной или через гидродинамическую связь, следовательно, колебания от пульсатора к фильтровальной перегородке могут передаваться через пульпу и осадок.

Пульсация не даёт забиваться фильтрующей перегородке, увеличивая срок её службы, но под действием пульсационного ускорения и в зависимости от условий соударения, частоты и амплитуды колебаний, частицы концентрата могут проникать сквозь ячейки фильтроткани, имея размеры больше величины ячеек [15].

Также способом интенсификации процесса обезвоживания на дисковом вакуум-фильтре является электроосмос [16], [17]. Электроосмос – процесс направленного перемещения жидкости в пористом теле под воздействием разности потенциалов, приложенной к нему.

В результате того, что частица имеет заряд в окружающем её пространстве появляется электрическое поле. Если к электродам, между которыми находится пористое тело приложить напряжение, то противоионы диффузного слоя, слабо связанные с поверхностью твёрдой фазы, будут двигаться к соответствующему электроду при этом из-за молекулярного

трения увлекать за собой дисперсионную среду. При перемещении жидкой и твёрдой фаз происходит разрыв слоя по плоскости скольжения и в итоге часть его ионов остаётся в дисперсионной среде. В результате дисперсионная и дисперсная фазы оказываются противоположно заряженными. При отрыве части диффузного слоя на плоскости скольжения возникает дзета-потенциал, зависящий от скорости движения сред, вязкости среды, природы фаз и других факторов. Чем больше дзета-потенциал, тем больше перенос зарядов, тем выше скорость перемещения жидкости в пористом теле.

При наложении электрического поля уменьшение влажности осадка происходит из-за электроосмотического движения жидкости и повышения температуры, приводящего к понижению вязкости жидкости [16].

Ещё улучшить процесс обезвоживания можно с помощью воздействия на фильтруемую пульпу магнитных полей. Результат воздействия данных полей –структурирование частиц твёрдой фазы суспензии, увеличивающее диаметр канальцев в осадке. Именно по этим канальцам протекает жидкость при отводе фильтрата. В следствии чего увеличивается скорость обезвоживания и уменьшается влажность осадка. В этом случае модернизация фильтра заключается в установке на него магнитной системы, представленной на рисунке А.5. Она состоит из металлических пластин (1), покрытых с обеих сторон ферритобариевыми магнитами (2). Рассматриваемые пластины устанавливаются между дисками фильтра над мешалкой. Установка магнитной системы на дисковый вакуум-фильтр позволяет повысить содержание железа в концентрате [18].

Интенсифицировать процесс обезвоживания на дисковом вакуум-фильтре возможно с помощью применения микроволнового электромагнитного поля. За этого поля происходит воды, находящейся в осадке. Это снижает вязкость фильтрата и удельное сопротивление. В результате влажность осадка снижается [19].

Интенсификация процесса обезвоживания возможна также с помощью введения в пульпу или нанесения на поверхность фильтра специальных

веществ [15], [20] - [25]. Действие этих веществ основано на изменении свойств жидкой фазы пульпы (вязкость, поверхностное натяжение) или на изменении поверхностных свойств твердой фазы пульпы (смачиваемость, агрегируемость). Вспомогательные вещества должны иметь крупность меньше размеров отверстий в фильтроткани, но больше крупности частиц дисперсии. Эти вещества, находясь на фильтрующей перегородке способствуют созданию благоприятных гидродинамических условий в ходе процесса обезвоживания и уменьшению удельного сопротивления осадка [15].

Повысить производительность дискового вакуум-фильтра возможно, используя импульсную отдувку. При повышении давления отдувки производительность вакуум-фильтра увеличивается. Это вызвано более полным съёмом осадка с фильтроткани. Эффективность увеличения давления отдувки имеет место лишь до величин в 1,8 - 2 бар. Дальнейшее повышение давления практически не меняет производительность, приводит к росту влажности осадка. Это вызвано тем, что высокое давление отдувки возвращает некоторый объем фильтрата по коллектору через фильтроткань в осадок [26].

Ранее нами были рассмотрены способы интенсификации процесса обезвоживания, связанные с модернизацией дисковых вакуум-фильтров. Эти способы имеют ряд недостатков.

Недостатками интенсификации процесса обезвоживания путём подбора рациональной структуры узлов дискового вакуум-фильтра являются: 1) высокие затраты финансовых, трудовых ресурсов и времени, необходимого на приобретение, доставку, установку и наладку новых узлов дисковых вакуум-фильтров; 2) высокие затраты финансовых, трудовых ресурсов и времени, необходимого на демонтаж и утилизацию старых узлов дисковых вакуум-фильтров; 3) затраты финансовых ресурсов на закупку запасных частей для модернизированных дисковых вакуум-фильтров; 4) затраты финансовых ресурсов и времени на переобучение персонала,

занимающегося обслуживанием и управлением дисковыми вакуум-фильтрами.

Недостатками интенсификации процесса обезвоживания на вакуум-фильтрах с помощью электроосмоса, вибраций, магнитного поля и микроволнового электромагнитного поля, а также с помощью введения в пульпу или нанесения на поверхность фильтра специальных веществ являются: 1) дополнительные вредные воздействия на персонал и/или окружающую среду; 2) дополнительные финансовые затраты на питание нового оборудования; 3) дополнительные финансовые затраты на обслуживание нового оборудования; 4) дополнительные финансовые затраты на переобучение персонала, занимающегося обслуживанием и управлением дисковыми вакуум-фильтрами.

Интенсифицировать процесс обезвоживания на дисковых вакуум-фильтрах также можно путём установки на них секторов с керамическими фильтрующими элементами [27] или полной заменой современными керамическими дисковыми вакуум-фильтрами. Секторы дисков этих фильтров изготовлены из микропористого гидрофильного керамического материала, синтезированного на основе оксида алюминия [28]. Данные фильтрующие элементы могут эксплуатироваться без замены до 4 лет [29]. Обезвоживание концентратов данными фильтрующими элементами происходит за счет действия капиллярных сил при размерах пор от 2 до 5 мкм. Фильтрат, под действием сил поверхностного натяжения жидкости и краевого угла смачивания, стремится заполнить все капилляры и излиться сквозь керамическую перегородку [30]. Капилляры постоянно заполнены водой. Поэтому они не пропускают воздух и твёрдые частицы. В связи с этим для обеспечения процесса фильтрации и непрерывного удаления воды требуется незначительный расход электрической энергии на поддержание требуемого значения разрежения [31]. Обезвоженный осадок с дисков счищается скребками, поэтому стадии отдувки осадка нет [30].

При работе керамический дисковый вакуум-фильтр проходит 6 зон, следующих друг за другом по ходу вращения опорного вала. Первая — зона фильтрации. В ней фильтрующий элемент погружается в пульпу. Под воздействием разрежения и капиллярного эффекта керамической перегородки на секторе образуется слой осадка. При этом фильтрат через керамическую перегородку и вакуумную систему отводится в дренажную ёмкость [32]. В дальнейшем секторы переходят в зону промывки осадка. Здесь с помощью форсунок вода разбрызгивается на поверхность осадка. Жидкость, проходящая через слой осадка улучшает вывод из него растворимых примесей [28]. Потом секторы переходят в зону сушки осадка. В ней проводится дальнейшая сушка осадка под действием высокого разрежения [32]. В дальнейшем секторы переходят в зону разгрузки осадка, в которой с помощью скреперов осадок соскабливается с секторов фильтра. Затем секторы переходят в зону обратной промывки. В этой зоне фильтрат, извлечённый из осадка, используется для обратной промывки дисков. Затем секторы фильтра переходят в зону регенерации, в которой производится их очистка и регенерация с помощью ультразвуковых вибраторов и путем химической промывки [28]. К достоинствам керамических вакуум-фильтров относят: 1) большой срок службы фильтрующих элементов; 2) отсутствие фильтроткани; 3) снижение потребления электроэнергии; 4) повышение качества фильтрата [33]; 5) низкая влажность осадка; 6) уменьшенные производственные площади; 7) непрерывная работа и равномерная разгрузка осадка [30]. Недостатками керамических вакуум-фильтров являются: 1) высокие затраты финансовых и трудовых ресурсов на внедрение нового оборудования, приобретение, доставку, установку и наладку новых вакуум-фильтров и смежных систем; 2) высокие затраты финансовых и трудовых ресурсов на демонтаж и утилизацию старых вакуум-фильтров и смежных систем; 3) затраты финансовых ресурсов на переобучение персонала; 4) загрязнение керамических фильтрующих элементов в ходе эксплуатации, приводящее к уменьшению производительности фильтра [34]; 5) применение

химической и ультразвуковой очистки, что может вызывать дополнительные отрицательные воздействия на персонал и окружающую среду; б) снижение качества работы керамических вакуум-фильтров в связи с подмешиванием в пульпу некоторых флотационных реагентов, необходимых при обогащении руды [35].

Интенсифицировать процесс обезвоживания также можно путём установки дискового фильтра под давлением – гипербарфилтра. Данный фильтр имеет сходное устройство с дисковым вакуум-фильтром. Но при этом узлы фильтра, такие как: ванна, диски, опорный вал, распределительные головки и привод дисков установлены в резервуаре под давлением. Также в данном резервуаре установлен транспортер и устройство шлюзового типа для выгрузки обезвоженного осадка. Обезвоживание происходит под действием сжатого воздуха давлением до 0,6 МПа, подаваемым в резервуар компрессором. Отдувка осадка производится сжатым воздухом, из системы отдувки под давлением, превышающим давление в резервуаре [36].

В результате проведённых исследований было установлено, что наименьшую влажность осадка можно получить при помощи новой технологии гипербарфилтра с использованием пара (Hi-Bar). Суть данной технологии заключается в том, что обезвоживание осадка проводится под избыточным давлением с использованием чистого перегретого пара [37]. К достоинствам гипербарфилтров относят: 1) низкий расход фильтроткани; 2) высокая удельная пропускная способность; 3) компактная конструкция при одновременно высокой производительности; 4) минимальный процент остаточной влажности [38]. Недостатками гипербарфилтров являются: 1) высокие финансовые и трудовые затраты на внедрение и обслуживание нового оборудования; 2) высокие финансовые и трудовые затраты на демонтаж и утилизацию старых вакуум-фильтров и смежных систем; 3) высокие финансовые затраты на переобучение персонала.

Перечисленные недостатки существующих методов интенсификации процесса обезвоживания, не связанные с применением систем

автоматического управления, могут различаться при модернизации вакуум-фильтров на разных предприятиях. Сложность модернизации будет зависеть от географического положения предприятия, его структуры, структуры цехов, схем прокладки коммуникаций и т.д.

1.4.2 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САУ

Интенсификация процесса обезвоживания возможна с помощью применения систем автоматизации. Они позволяют минимизировать или полностью исключить некоторые из недостатков рассмотренных выше способов интенсификации процесса обезвоживания. Рассмотрим наиболее известные способы автоматического управления процессом обезвоживания.

Система автоматического управления, представленная в патенте № SU 1713617 A1 [39] (см. рисунок Б.1) работает следующим образом. По трубопроводу (1) пульпа подаётся в ванну вакуум-фильтра. Её плотность измеряется датчиком плотности (6). Обезвоженный осадок с дисков вакуум-фильтра падает на конвейер (3), на котором производится измерение его массы датчиком (9). Фильтрат отводится по трубопроводу (4) в ресивер (5). На трубопроводе (4) проводится измерение расхода фильтрата датчиком (7) и его плотности датчиком (8). Измеренное значение плотности пульпы с датчика (6) передаётся в блок (10), где вычисляется содержание твёрдого в пульпе по формуле (1):

$$T = \frac{(1 - \frac{1000}{\rho}) \cdot \delta}{\delta - 1} \cdot 100, \quad (1)$$

где ρ - плотность пульпы питания; δ - плотность твердого.

Потом с помощью значений содержания твёрдого, плотности и расхода фильтрата, массы кека и блоков (11) - (15) вычисляется текущая влажность осадка по формуле (2):

$$N = \frac{W_K - \frac{W_K + W_\Phi}{100} \cdot T}{0.01 \cdot W_K}, \quad (2)$$

где N - влажность кека; W_k - масса кека; W_ϕ - масса фильтрата; T - процентное содержание твёрдой фазы в пульпе.

Затем полученное значение влажности осадка из блока (15) и текущее задание влажности осадка из блока (16) передаются на входы регулятора (17), меняющий частоту вращения дисков вакуум-фильтра в зависимости от рассогласования между текущей влажностью осадка и заданием влажности [39]. Достоинства рассмотренной системы управления: 1) производится стабилизация влажности осадка на заданном уровне; 2) производится измерение в режиме реального времени значений плотности пульпы и фильтрата, расхода фильтрата и массы осадка; 3) осуществляется автоматический расчёт частоты вращения дисков вакуум-фильтра. Недостатки рассмотренной системы управления: 1) рассчитанное текущее значение влажности осадка может отличаться от реального, так как величина плотности твёрдого, используется в формуле (1) как константа; 2) отсутствует стабилизация толщины осадка на дисках вакуум-фильтра; 3) отсутствует регулирование разрежения в зонах набора и сушки осадка; 4) отсутствует регулирование уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра.

Система автоматического управления, представленная в патенте № 601029 [40] (см. рисунок Б.2) работает следующим образом. Плотность пульпы, поступающей в ванну вакуум-фильтра, регулируется путём изменения расхода воды в пульподелитель пропорционально отклонению текущего значения плотности от заданного. Эту функцию выполняет система автоматического регулирования плотности пульпы. Рассогласование сигналов с датчика плотности пульпы (1) и задатчика плотности пульпы (2) поступает на вход регулятора (3). Он рассчитывает управление, которое через усилитель (4) поступает на ИМ (5), управляющий положением клапана подачи воды в пульподелитель (6).

Уровень пульпы в ванне вакуум-фильтра поддерживается на задании изменением частоты вращения дисков вакуум-фильтра пропорционально отклонению текущего значения уровня пульпы от задания. Эту функцию

выполняет САР уровня пульпы. Рассогласование сигналов с датчика уровня пульпы (7) и задатчика уровня пульпы (8) поступает на вход регулятора (9). Он рассчитывает управление, которое передаётся на регулятор напряжения (10), управляющий частотой вращения электродвигателя (11) привода дисков вакуум-фильтра. С регулятора (10) сигнал передаётся также в САР толщины слоя осадка и в САР расхода пара.

В САР толщины слоя осадка сигнал с регулятора (10) вместе с сигналами датчика величины вакуума (12) и задатчика величины вакуума (13) передаются на вход регулятора (14), который рассчитывает управление. Пройдя через усилитель (15), оно передаётся в ИМ (16). Он меняет положение клапана (17), изменяя величину вакуума, пропорционально изменению частоты вращения дисков, поддерживая толщину осадка на заданном уровне.

В САР расхода пара сигнал с регулятора (10) совместно с сигналами датчика расхода пара (18) и задатчика расхода пара (19) передаются на регулятор (20), который рассчитывает управление. Пройдя через усилитель (21), оно передаётся в ИМ (22), который управляет клапаном (23), меняя расход пара пропорционально изменению частоты вращения дисков, поддерживая влажность осадка на задании [40]. Достоинства рассмотренной системы управления: 1) производится регулирование влажности осадка; 2) производится регулирование толщины осадка на дисках вакуум-фильтра; 3) производится регулирование величины разрежения в зоне набора осадка; 4) производится регулирование уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра; 5) производится регулирование уровня плотности пульпы; 6) производится измерение текущих значений плотности пульпы, уровня пульпы, величины разрежения, расхода пара. Недостатки рассмотренной системы управления: 1) необходимость закупки и установки нового оборудования, необходимого для подачи воды в пульподелитель; 2) отсутствие оперативного измерения влажности осадка; 3) отсутствие оперативного изменения задания влажности

- осадка; 4) отсутствие оперативного измерения толщины осадка;
5) отсутствие оперативного изменения задания толщины осадка.

Система автоматического управления, представленная в патенте № 349864 [41] (см. рисунок Б.3) работает следующим образом. Диски вакуум-фильтра вращаются с помощью ИМ (14). Частота его вращения n измеряется датчиком (6). Когда сектор погружён в пульпу, в нём создаётся разрежение P_a , в результате чего производится обезвоживание осадка, который удаляется с сектора с помощью подачи внутрь сектора давления отдува P_o .

Зависимости влажности и расхода осадка от указанных технологических параметров вакуум-фильтра носят статистический характер и могут быть представлены в виде уравнений регрессий (3) и (4).

$$G = a_1 \cdot \rho + a_2 \cdot t + a_3 \cdot P_v + a_4 \cdot P_o + a_5 \cdot n, \quad (3)$$

$$m = b_1 \cdot \rho + b_2 \cdot t + b_3 \cdot P_v + b_4 \cdot P_o + b_5 \cdot n, \quad (4)$$

где G - расход кека; m - влажность кека; t - температура пульпы, ρ - плотность пульпы; n - частота вращения дисков; a_i, b_i - технологические коэффициенты; i - число учитываемых технологических параметров дискового вакуум-фильтра.

Сигналы от датчиков температуры пульпы (2), плотности пульпы (3), вакуума (4), давления отдува (5), частоты вращения дисков (6) поступают на блок согласующих преобразователей (7). Его выходные сигналы, пропорциональные ρ , t , P_v , P_o и n передаются в блок умножения (8). Сигналы a_i, b_i передаются в блок (8) из блока коэффициентов (17). Из блока (8) сигналы, пропорциональные слагаемым в правых частях уравнений (3) и (4), передаются в блок суммирования (9). Он вычисляет текущие значения влажности и расхода осадка. Сигнал из блока (9) равный $(a_1\rho + a_2t + a_3P_v + a_4P_o)$ и сигнал задатчика (11) поступают в блок вычитания (10). Из него сигнал равный $(G_{зад} - (a_1\rho + a_2t + a_3P_v + a_4P_o))$ поступает на блок деления (12), на второй вход которого из блока (8) передаются сигнал a_5 . Блок (12) вычисляет необходимое значение частоты вращения дисков по формуле (5):

$$n_{\text{зад}} = \frac{G_{\text{зад}} - (a_1 \cdot p + a_2 \cdot t + a_3 \cdot P_v + a_4 \cdot P_o)}{a_5}. \quad (5)$$

Выходной сигнал блока (12) передаётся в схему управления (13). Она, используя ИМ (14), поддерживает частоту вращения дисков на задании, вычисляя рассогласование между текущим значением частоты вращения дисков и заданием. Таким образом, расход осадка поддерживается на задании [41]. Достоинства рассмотренной системы управления: 1) производится измерение плотности и температуры пульпы, вакуума, давления отдувки, скорости вращения дисков, влажности и расхода осадка; 2) производится стабилизация расхода осадка; 3) имеется возможность оперативно менять задание расхода осадка. Недостатки рассмотренной системы управления: 1) влажность и расход осадка определяются косвенно, что снижает точность регулирования; 2) отсутствует регулирование величины разрежения в зонах набора и сушки осадка; 3) отсутствует регулирование уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра; 4) отсутствует регулирование плотности пульпы; 5) отсутствует регулирование влажности осадка.

Система автоматического управления, представленная в патенте № 381369 [42] (см. рисунок Б.4) работает следующим образом. Сигналы с датчиков расхода пульпы (1) и фильтрата (4) через усилители (3) и (5) подаются в устройство вычитания (6). Вычисленное рассогласование между расходами пульпы и фильтрата подаётся на блок (7), который вычисляет производительность вакуум-фильтра по влажному осадку и передаёт полученное значение на регулятор (8). Он формирует управление для ИМ регулирующего органа (9). Это изменяет величину разрежения, поддерживая заданную толщину осадка. Уровень пульпы в ванне вакуум-фильтра регулированием расхода пульпы в ванну [42]. Достоинства рассмотренной системы управления: 1) производится измерение текущих значений расходов пульпы и фильтрата; 2) автоматический контроль и регулирование толщины осадка; 3) регулирование величины разрежения; 4) регулирование уровня

пульпы в ванне вакуум-фильтра. Недостатки рассмотренной системы управления: 1) толщина осадка измеряется косвенно, что приводит к снижению точности регулирования; 2) отсутствует регулирование плотности пульпы; 3) отсутствует регулирование влажности осадка.

Система автоматического управления, представленная в патенте № 691156 [43] (см. рисунок Б.5) работает следующим образом. Пульпа по трубопроводу (1) поступает в пульподелитель (2), а затем по трубопроводу (3) в ванну вакуум-фильтра (4). Стабилизация уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра производится регулятором (5). Зона набора осадка (6) подключена к трубопроводу вакуумной системы (8) с установленным на нём регулирующим органом (7). В зону сушки осадка (9) разрежение постоянной величины поступает по трубопроводу (10). Частота вращения электро-двигателя привода (11) вакуум-фильтра изменяется преобразователем (12) пропорционально расходу пульпы из пульподелителя (2) в ванну вакуум-фильтра (4) [43].

Сигналы с датчиков толщины (14) и влажности осадка (16) передаются на сумматоры (15) и (17) соответственно. Сумматор (15) рассчитывает рассогласование между заданием толщины осадка и текущей толщиной осадка. Сумматор (17) рассчитывает рассогласование между заданием влажности осадка и текущей влажностью. Полученные сигналы с сумматоров подаются через коммутационный блок (18) на преобразователь (12) и блок управления ИМ (19).

Регулирование частоты вращения дисков вакуум-фильтра производится исходя из расхода пульпы, определяемой датчиком расхода (13). При повышении влажности осадка выше задания и понижении толщины осадка ниже задания сигнал датчика толщины (14) через блок (18) передаётся на преобразователь (12), который снижает частоту вращения дисков. При повышении влажности и толщины осадка выше заданий, сигнал датчика влажности (16) поступает на блок (19) управления ИМ (20), который меняет положение регулирующего органа (7), снижая величину разрежения в зоне

набора осадка (6) [43]. Достоинства рассмотренной системы управления: 1) производится измерение расхода пульпы, влажности и толщины осадка; 2) производится автоматический контроль и регулирование влажности осадка; 3) производится автоматический контроль и регулирование толщины осадка; 4) производится регулирование величины вакуума; 5) производится регулирование уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра. Недостатки рассмотренной системы управления: 1) не производится регулирование плотности пульпы; 2) сложность установки датчиков влажности и толщины осадка.

Система автоматического управления, представленная в патенте № SU 1725971 A1 [44] (см. рисунок Б.6) работает следующим образом. Пульпа подаётся на вакуум-фильтр (1). Полученный в процессе обезвоживания осадок, разгружается на конвейер (2). Сигналы от датчиков влажности (3) и производительности (4) подаются на блок перемножения (6). Сигнал из блока (6), описывающий влажность осадка передаётся на регулятор (7), управляющий электроприводом (8), Который меняет частоту вращения фильтрующих элементов, поддерживая влажность осадка на задании. Сигнал от датчика плотности (5), тоже подаётся на регулятор (7), корректируя управление на электропривод (8). Сигнал от датчика (5), подаваемый на регулятор (7) — упреждающий, так как он передаёт опережающую информацию об изменении плотности пульпы [44]. Достоинства рассмотренной системы управления: 1) производится измерение плотности пульпы, влажности осадка и производительности вакуум-фильтра; 2) автоматическое регулирование влажности осадка; 3) возможность автоматического измерения частоты вращения дисков вакуум-фильтра; 4) возможность изменения задания влажности. Недостатки рассмотренной системы управления: 1) отсутствует регулирование плотности пульпы; 2) сложность установки датчика влажности; 3) отсутствует автоматический контроль и регулирование толщины осадка; 4) отсутствует регулирование

величины разрежения; 5) отсутствует регулирование уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра.

Система автоматического управления, представленная в патенте № SU 1194463 А [45] (см. рисунок Б.7) работает следующим образом. Сигналы с датчиков концентрации суспензии (1), перепада давления на вакуум-фильтре (3) и расхода фильтрата (4) передаются на вычислительные блоки (5) и (6). В блоке (5) производится расчёт общего гидравлического сопротивления фильтрованию R по формуле (6):

$$R = K \cdot \frac{P_{\phi}}{Q}, \quad (6)$$

где P_{ϕ} - перепада давления на вакуум-фильтре, Q - расхода фильтрата (4).

Сигнал датчика (1) передаётся в блок (6), для вычисления градиента изменения концентрации суспензии C .

$$\text{grad } C >< 0, \quad (7)$$

Сигнал из блока (5) передаётся в блок (6), где осуществляется сравнение общего сопротивления фильтрованию и рассчитывается градиент его изменения [45].

$$\text{grad } R >< 0, \quad (8)$$

Сигналы из блоков (5) и (6) поступают в управляющий блок (7). Он реализует управление частотой вращения дисков (2) и перепадом давлений в зоне набора осадка в соответствии с соотношениями (9) - (12) :

$$\left. \begin{array}{l} \text{grad } C \geq 0 \\ \text{grad } R < 0 \end{array} \right\} \Delta V \sim \frac{1}{R}, \Delta P_{\phi} \sim \frac{1}{R}, \quad (9)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{grad } C > 0 \\ \text{grad } R > 0 \end{array} \right\} \Delta V \sim -R, \Delta P_{\phi} \sim -R, \quad (10)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{grad } C < 0 \\ \text{grad } R < 0 \end{array} \right\} \Delta V \sim -R, \Delta P_{\phi} \sim \frac{1}{R}, \quad (11)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{grad } C \leq 0 \\ \text{grad } R > 0 \end{array} \right\} \Delta V \sim -\frac{1}{R}, \Delta P_{\phi} \sim R. \quad (12)$$

Сигналы из блока (7) подаются в регулятор (8) привода (9) и регулятор (10) привода (11) регулируемой заслонки (12), в результате производится соответственно регулирование частоты вращения дисков и

разности давлений в зоне набора осадка [45]. Достоинства рассмотренной системы управления: 1) измерение концентрации суспензии, перепада давления на вакуум-филт্রে, расхода фильтрата; 2) регулирование величины вакуума в зоне набора осадка; 3) регулирование частоты вращения дисков вакуум-филт্রে. Недостатки рассмотренной системы управления: 1) отсутствие измерения и регулирования влажности осадка; 2) отсутствие возможности изменения задания влажности осадка; 3) отсутствие регулирования плотности пульпы питания; 4) косвенное измерение общего гидравлического сопротивления фильтрованию.

В описанных способах управления процессом обезвоживания рассматривается управление одним вакуум-филт্রে. Далее рассмотрим патенты № SU 1200942 А [46] и № 519208 [47], в которых производится управление сразу группой вакуум-филт্রে.

Система автоматического управления группой параллельно работающих вакуум-филт্রে (см. рисунок Б.8) патента № SU 1200942 А [46] работает следующим образом. Сигнал повышения уровня с датчика (1) поступает в регулятор (2) затем на сумматоры (3) каждого вакуум-филт্রে (4). Скорректированные задания из блоков (3) подаются на регуляторы (5). Управления с регуляторов (5) передаются на ИМ (6), установленные на трубопроводах подачи пульпы.

Сигналы от расходомеров (7) поступают в блок (8) и блоки (9). Рассогласование производительности каждого вакуум-филт্রে и средней производительности всех вакуум-филт্রে из блока (8) подаются в блоки (9). Сигнал из блоков (9) передаётся на сумматоры (3) и (10). С этих блоков скорректированный сигнал передаётся на регуляторы (5) и (11). При этом достигается минимизация рассогласования производительности.

Если рост уровня пульпы в ваннах филт্রে недостаточно для коррекции уровня в донорной емкости (1), то сигнал с датчика (2) передаётся в регулятор (12), а затем на сумматоры (10) и регуляторы (11), регулирующие открытие клапанов (13) на трубопроводах для вакуума в зоне набора осадка.

При снижении уровня в ёмкости (1) ниже требуемого значения сигнал с датчика (2) подаётся в регулятор (12), а затем на сумматоры (10) и регуляторы (11), для регулирования величины вакуума в зоне набора осадка, а затем через регулятор (2) сигнал передаётся на сумматоры (3) и регуляторы (5). Таким образом, соблюдается требуемая последовательность изменения вакуума зоны набора осадка и уровня в ванне вакуум-фильтра [46]. Достоинства рассмотренной системы управления: 1) измерение расхода фильтрата на каждом вакуум-фильтре; 2) стабилизация уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра; 3) регулирование подачи пульпы. Недостатки рассмотренной системы управления: 1) отсутствует регулирование плотности пульпы; 2) отсутствует регулирование влажности осадка; 3) отсутствует возможность изменения задания влажности осадка; 4) отсутствует регулирование частоты вращения дисков.

Система автоматического управления группой параллельно работающих вакуум-фильтров (см. рисунок Б.9) патента № 519208 [47] работает следующим образом. Вакуум-фильтры (14) и (15) условно работают в режиме регулирования расхода пульпы по минимальному расходу перелива, а вакуум-фильтр (16) работает в режиме регулирования расхода пульпы по уровню пульпы в донорной ёмкости. Сигналы с датчиков расхода кека (20), (21) и (22) через корректирующие блоки (35), (36) и (37) передаются в блок-дискриминатор (38), который фиксирует номер вакуум-фильтра с минимальной производительностью по кеку и подаёт управление на привод (39) коммутатора (40), в результате чего его двойные скользящие контакты перемещаются синхронно с одинарным. С помощью одинарного контакта коммутатора к датчику уровня в донорной ёмкости (44) и блоку управления (45) подключается клапан регулирования расхода пульпы (10) по уровню пульпы в донорной ёмкости. При этом контуры регулирования расходов пульпы вакуум-фильтров (14) и (15) по минимальному расходу перелива с помощью двойных скользящих контактов остаются в рабочем состоянии. С целью регулирования частоты вращения фильтрующей

поверхности всех вакуум-фильтров одновременно сигнал с датчика суммарного расхода пульпы перелива со всех фильтров (13) передаётся в блок управления (46). Сигнал из него пройдя через блок (47) передаётся на электроприводы (26), (27) и (28) [47]. Достоинства рассмотренной системы управления: 1) управление группой вакуум-фильтров; 2) измерение значения расхода перелива, расхода кека на каждом вакуум-фильтре и суммарного расхода перелива; 3) минимизация расхода пульпы перелива; 4) регулирование частоты вращения фильтрующей поверхности вакуум-фильтра. Недостатки рассмотренной системы управления: 1) отсутствует регулирование влажности осадка; 2) отсутствует возможность изменения задания влажности осадка; 3) отсутствует измерение толщины осадка; 4) отсутствует регулирование толщины осадка.

В работе [1] для управления процессом обезвоживания была разработана система автоматического управления фильтр-прессом. В данную систему был включён предиктивный регулятор, включающий блок прогнозирования, рассчитывающий на основе модели объекта управления выходные параметры, и блок оптимизации, выбирающий наилучшие режимные настройки фильтра в соответствии с критерием оптимальности, что позволяет повысить качество управления [1]. Структурная схема системы управления представлена в приложении Б (см. рисунок Б.10).

Также в работе [1] была установлена зависимость между воздушной проницаемостью твёрдой фазы пульпы и удельным сопротивлением осадка.

Достоинствами данной работы являются:

- возможность косвенного измерения удельного сопротивления осадка на основе данных о воздушной проницаемости твёрдой фазы пульпы.
- Использование в системе управления предиктивного регулятора позволяет ей заблаговременно реагировать на изменение возмущений.

К недостаткам данной работы можно отнести: отсутствие возможности автоматического косвенного измерения удельного сопротивления и

сложность при разработке прогнозирующей модели процесса обезвоживания, учитывающей все его нелинейности и нестационарности.

В исследовании [48] были описаны способы автоматического и автоматизированного управления отдельными участками и цехом в целом; с учётом связи последнего с отделением термической сушки осадков и утилизации побочного продукта, а также методика определения эффективности систем управления по экономическому критерию качества, включая автоматическую стабилизацию нескольких взаимосвязанных величин и учитывающую характер возмущений при оценке качества стабилизации [48].

Достоинством рассмотренного способа управления процессом обезвоживания является снижение расхода реагентов и энергии, что в конечном итоге приведёт к снижению себестоимости единицы обрабатываемых потоков. Основным недостатком рассмотренной системы является отсутствие критерия качества работы системы то такому технологическому параметру как влажность выходного продукта.

В исследовании [49] были проведены постановка и решение задач оптимального управления процессами фильтрования и сушки концентрата в условиях сильвинитовых обогатительных фабрик (СОФ) с учётом взаимосвязи между ними, учитывающие распределение потоков питания между параллельно работающими аппаратами сушильно-фильтровального комплекса (СФК) по их характеристикам в соответствии с производительностью предшествующих переделов и требуемым качеством. Также был разработан общий (комплексный) алгоритм управления СФК, включающий алгоритмы оптимального управления процессами фильтрования и сушки, а также согласования нагрузок и ввода водорастворимых антислёживающих добавок в высушенный концентрат [49]. Затем была предложена система автоматизированного управления СФК с использованием вышеназванных алгоритмов.

К достоинствам рассмотренного способа управления процессом обезвоживания можно отнести: определение по математическим моделям фильтров текущих влажности и производительности для каждого из них. В случае если данные модели сильно отличаются от показаний датчиков, производится корректировка моделей.

Основным недостатком рассмотренной системы является тот факт, что у системы управления целевая функция: среднее значение влажности по всем фильтрам должно стремиться к нулю. Данное обстоятельство не даёт применить рассматриваемый метод в нашем исследовании так как его целью является повышение производительности фильтров при условии поддержания влажности осадка на требуемом уровне.

В работе [50] был разработан алгоритм оптимального управления фильтрами периодического и непрерывного действия. Предложены способы управления длительностью операции фильтрования, числом циклов работы фильтрующей перегородки и движущей силой процесса фильтрования [50].

Основным достоинством алгоритма оптимального управления фильтрами, рассмотренного в работе [50], является использование экстремального регулирования производительности фильтра. Недостатком алгоритма является отсутствие регулирования влажности выходного продукта.

В исследовании [51] была предложена методика синтеза гиперустойчивых многомерных дискретных адаптивных систем управления с эталонной моделью. Достоинством данных систем управления является применения их для широкого класса технологических процессов. Недостатком является использование эталонной модели, создание которой сопряжено со значительными трудностями.

В результате анализа существующих методов автоматического управления процессом обезвоживания было установлено, что каждый из рассмотренных методов [39] - [51] имеет преимущества и недостатки. В результате чего их применение по отдельности не приведёт к максимальному

эффекту. Поэтому в рамках данного исследования предпринимается попытка исследовать возможность и целесообразность сочетания рассмотренных методов с целью повышения производительности дискового вакуум-фильтра.

1.5 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ОСАДКА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДИСКОВОГО ВАКУУМ-ФИЛЬТРА

Для качественного управления дисковым вакуум-фильтром необходимо в режиме реального времени измерять влажность осадка и производительность дискового вакуум-фильтра. Выделяют 2 основных метода определения влажности: 1) прямой метод, который основан на удалении из образца влаги и измерении его массы до и после удаления влаги (лабораторный анализ влажности); 2) косвенный метод, который основан на измерении физических, электрических, химических и механических свойств образца [52].

Сначала в данном исследовании были рассмотрены способы измерения влажности осадка [53] - [57]. Устройство измерения влажности в патенте № 811084 [53] (см. рисунок В.1) работает следующим образом. Источник излучения (3), призма (4), модулятор (7), а также направляющие зеркала (9) и (10) формируют два освещенных поля. Отраженные потоки двух данных полей передаются на общий фотоприемник (11). Между освещенными полями (15) находится нагреватель (12), высушивающий поверхностный слой материала. Сигнал из фотоприёмника (11), прошедший через усилитель (16) разделяется коммутатором (17), синхронизируемым от привода модулятора (8). Сигнал измерительного канала при этом перед поступлением на устройство (18) задерживается на время прохождения измеряемого материала между освещенными полями. Для этого используется блок (20) с регулируемым временем задержки, зависящее от уровня сигнала датчика перемещения (21). Полученным сигналом с блока (18) через усилитель мощности (19) управляется привод (15) компенсатора (13).

Затем производится сравнение сигналов опорного и измерительного каналов, которые были получены при отражении от одного и того же места на исследуемом материале. Сигнал опорного канала соответствует сигналу от сухого материала, сигнал измерительного канала — сигналу от влажного материала. Изменение содержания влаги в материале вызывает изменение интенсивности в измерительном потоке (5). В результате чего на выходе сравнивающего устройства (18) появляется соответствующий сигнал, который приводит в движение компенсатор (13). Его перемещение отмечается по шкале (14). По величине смещения определяют содержание влаги в материале [53].

В патенте № 811084 [53] определение влажности материала производится в зависимости от изменения его отражающей способности, в патенте № 617710 [54] — от приращения комплексной проводимости материала, в патенте № 1712831 [55] — от слипаемости частиц материала, а в патенте № 1002933 [56] — от ёмкости материала.

Основное достоинство систем измерения влажности материала [53] - [56] — измерение влажности материала производится с большой частотой, что даст повышение качества управления процессом обезвоживания. Недостатками рассмотренных систем являются: 1) наличие подвижных частей, использование которых в запылённой среде будет приводить к отказам; 2) сложность или невозможность подключения к современным системам автоматизации; 3) низкая точность измерения влажности материалов.

Достоинствами системы измерения влажности материалов, представленная в патенте № US5380440 А [57] (см. рисунок В.2), основанной на видеофиксации серости материала являются: лёгкое внедрение данной системы в современные системы автоматического управления, отсутствие лабораторного анализа влажности и увеличение частоты измерений влажности в единицу времени. Основным недостатком рассмотренной системы определения влажности материалов является использование

видеокамеры, использование которой в запылённой среде цеха может приводить к погрешностям в измерении или её полному отказу.

В ходе анализа литературных источников были рассмотрены также и другие способы косвенного измерения влажности материалов. В патенте № 1713617 А1 [39] влажность материала определяется на основе значений плотности пульпы, расхода фильтрата, плотности фильтрата и массы осадка, в патенте № 349864 [41] — основе исходя значений плотности пульпы, температуры пульпы, величины вакуума, величины давления отдува и частоты вращения дисков. Достоинствами способов измерения влажности [39] и [41] являются: отсутствие лабораторного анализа и повышение частоты измерений влажности в единицу времени, что даст возможность более оперативно управлять дисковым вакуум-фильтром и повысить его производительность. Недостаток данных способов — низкая точность, вызванная погрешностью приборов, показания которых используются для расчёта влажности материала, помехами измерения и неточностью математической модели, по которой производится расчёт.

Также в ходе данного исследования был проведён анализ существующих датчиков влажности. Их можно разделить на следующие группы: 1) инфракрасные: Spectra-Quad [58], KETT JE-400 [59]; 2) радиоволновые: Fizepr-SW100.10 [60]; 3) микроволновые: Микрорадар 113А [61], Moistscan MA-500 [62], M-Sens 2 [63], Basic [64], Franz Ludwig [65].

Достоинства рассмотренных датчиков влажности [58] - [65]: 1) отсутствие лабораторного анализа влажности материала; 2) измерение влажности материала производится с большой периодичностью; 3) лёгкая интеграция рассмотренных датчиков влажности в современные системы управления. Недостатки рассмотренных датчиков влажности: 1) в некоторых случаях сложность установки рассмотренных датчиков; 2) высокие экономические затраты при установке датчиков влажности на каждый

дисковый вакуум-фильтр; 3) невозможность использования некоторых из рассмотренных датчиков для измерения влажности магнитных материалов.

Для качественного управления дисковым вакуум-фильтром также необходимо в режиме реального времени измерять производительность фильтра. Поэтому далее был проведён анализ существующих способов измерения производительности дискового вакуум-фильтра.

В ходе анализа литературы, были выявлены следующие способы измерения производительности вакуум-фильтра. В патенте № 349864 [41] производительность вакуум-фильтра определяется косвенно, основываясь на значениях плотности пульпы, температуры пульпы, величины вакуума, величины давления отдувки и частоты вращения дисков, в патенте № 381369 [42] производительность вакуум-фильтра также определяется косвенно, исходя из значения разности расходов пульпы и фильтрата, а в патенте № SU 1725971 A1 [44] производительность вакуум-фильтра определяется датчиком производительности.

Для измерения производительности дисковых вакуум-фильтров также возможно использование конвейерных весов, например, tenzo-pribor ВНК-1000-1 [66], Сибтезоприбор ВК-М-1-1000-1 [67].

Основным достоинством рассмотренных методов измерения производительности является то, что измерение производительности производится с большой периодичностью. Основным недостатком рассмотренных методов измерения являются высокие экономические затраты при применении их на каждом дисковом вакуум-фильтре.

Определить производительность фильтров можно также через измерение толщины осадка с помощью оптических датчиков расстояния. В ходе данного исследования были рассмотрены следующие датчики: Leuze Electronic ODSL 8 [68], Balluff BOD 26K [69], IFM Electronic OID250 [70]; Baumer OADM 12I6430/S35A [71]. Достоинствами рассмотренных датчиков толщины осадка являются: 1) измерение толщины осадка производится автоматически; 2) измерение толщины осадка производится с высокой

частотой; 3) лёгкая интеграция данных датчиков в современные системы управления. Недостатками рассмотренных датчиков являются: 1) сложность установки на дисковом вакуум-филт্রে; 2) сложность измерения толщины осадка, связанная с неравномерным набором осадка на секторы дисков; 3) возможность отказа датчиков в связи с работой в запылённой среде.

Рассмотренные методы измерения влажности осадка и производительности вакуум-филтра имеют один основной недостаток: установка их на каждый дисковый вакуум-филтр, что необходимо для разрабатываемой системы управления процессом обезвоживания, технологически и экономически нецелесообразна. Поэтому для устранения этого фактора в данном исследовании предлагается разработать методику косвенного измерения влажности осадка и производительности дискового вакуум-филтра на основе выявления скрытых зависимостей технологических параметров процесса обезвоживания железорудного концентрата.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

В первой главе проведён анализ: основных видов вакуум-филтров, их принципов работы, основных технологических параметров процесса обезвоживания, проблем в управлении данным процессом. В результате было определено две основные проблемы в управлении вакуум-филтрами, приводящие к снижению их производительности и качества осадка, определяемое точностью поддержания его влажности: 1) применение лабораторного анализа влажности осадка, проводимого с малой периодичностью и большим запаздыванием, 2) усреднённое управление группой вакуум-филтров.

Был проведён анализ методов интенсификации процесса обезвоживания. Рассмотрены следующие методы: выбор рациональной структуры узлов дискового вакуум-филтра, установка импульсной отдувки, установка пульсационного оборудования, применение электроосмоса,

магнитных полей, химических добавок, керамических вакуум-фильтров, гипербарфильтров, систем автоматического управления.

В результате было установлено, что наибольшую эффективность при наименьших капитальных затратах даёт способ интенсификации процесса обезвоживания, основанный на применении систем автоматизации.

Проведённый анализ наиболее известных способов автоматического управления процессом обезвоживания показал, что каждый из рассмотренных методов управления процессом имеет определённые недостатки и его применение в отдельности не даёт максимального эффекта. Поэтому в ходе данного исследования проанализирована возможность и целесообразность сочетания рассмотренных методов управления процессом обезвоживания с целью повышения производительности дискового вакуум-фильтра при условии поддержания влажности выходного продукта на требуемом уровне.

На основе проведённого анализа закономерностей процесса обезвоживания и основных способов управления данным процессом было установлено, что для повышения производительности дискового вакуум-фильтра необходимо разработать систему автоматического управления процессом обезвоживания с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра, что позволит учесть индивидуальные характеристики на каждом из фильтров, в частности загрязнённость фильтроткани.

Важнейшими технологическими параметрами процесса обезвоживания являются влажность осадка и производительность дискового вакуум-фильтра. Разрабатываемая система управления процессом обезвоживания с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра предусматривает измерение данных параметров на каждом фильтре отделения фильтрации. На основе проведённого анализа способов измерения влажности осадка и производительности было получено, что установка данных датчиков на каждый вакуум-фильтр технологически и

экономически нецелесообразна. Поэтому в исследовании предложена разработка методики косвенного измерения влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра на основе выявления скрытых зависимостей технологических параметров процесса обезвоживания железорудного концентрата.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАЖДОГО ДИСКОВОГО ВАКУУМ-ФИЛЬТРА

2.1 РАЗРАБОТКА КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Основной целью разработки системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата является повышение производительности дискового вакуум-фильтра при условии поддержания влажности выходного продукта процесса (кека) на требуемом технологией уровне.

Разработанная система управления процессом обезвоживания повысит производительность отделения фильтрации, улучшит качество выходного продукта процесса (влажность продукта будет поддерживаться на требуемом уровне) и сократит удельные энергозатраты на обезвоживание. Также она снизит нагрузку на персонал, обслуживающий дисковые вакуум-фильтры.

2.1.1 РАЗРАБОТКА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЛАЖНОСТИ ОСАДКА

Частота вращения дисков фильтра является одним из основных технологических параметров регулирования процесса обезвоживания. От его величины зависит как производительность фильтра, так и влажность осадка [6]. Для дискового вакуум-фильтра скорость перемещения фильтрующей поверхности определяется частотой вращения опорного вала с дисками. При постоянной величине вакуума как в зоне набора осадка, так и в зоне сушки, плотности пульпы питания, давлении воздуха на отдувку и т.д. производительность вакуум-фильтра будет увеличиваться при увеличении частоты вращения дисков [72].

При росте частоты вращения дисков влажность осадка повышается при следующем условии: удельная производительность дискового вакуум-фильтра не поддерживается на постоянном уровне, то есть не регулируется толщина осадка на дисках. Данный технологический параметр может изменяться путём изменения величины вакуума в зоне набора осадка или

плотности пульпы питания. Повышение влажности осадка при росте частоты вращения дисков объясняется снижением времени сушки осадка на дисках вакуум-фильтра.

В тех случаях, когда при определённой частоте вращения дисков толщина осадка будет значительной и, следовательно, велика будет его влажность, добиваются уменьшения толщины осадка до требуемого значения снижением или вакуума в зоне набора, или содержания твердого в фильтруемой пульпе [6].

На основе проведённого анализа источников [39], [43] и [44] был разработан контур регулирования влажности осадка. Он работает постоянно, меняя частоту вращения дисков в зависимости от рассогласования между заданием влажности осадка и текущей влажностью осадка с целью поддержания её на требуемом уровне и улучшения качества конечного продукта процесса обезвоживания. Функциональная схема контура регулирования влажности осадка представлена на рисунке 8.

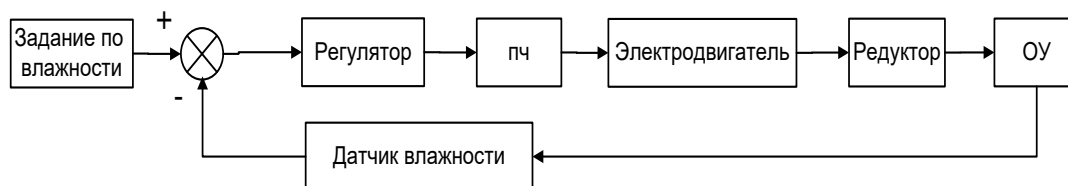


Рисунок 8. Функциональная схема контура регулирования влажности осадка

Разработанный контур состоит из задатчика влажности осадка, который необходим для ввода задания, блока сравнения, требуемого для расчёта рассогласования между заданием и текущим значением влажности осадка, регулятора, преобразователя частоты, электродвигателя, редуктора, объекта управления (дискового вакуум-фильтра) и датчика влажности.

Для индивидуального управления процессом обезвоживания железорудного концентрата разработанный контур регулирования влажности осадка будет установлен на каждый вакуум-фильтр в отделении фильтрации. Это даст возможность более точно управлять каждым вакуум-фильтром в отдельности с целью стабилизации влажности осадка на заданном уровне.

Для повышения производительности дискового вакуум-фильтра необходимо чтобы частота вращения дисков поддерживалась на высоком уровне. Для этого задание по влажности осадка необходимо установить как можно ближе (на сколько позволяет точность датчиков) к предельно допустимому значению влажности (9,8 %).

2.1.2 РАЗРАБОТКА КОНТУРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ И УРОВНЯ ПУЛЬПЫ В ВАННЕ ВАКУУМ-ФИЛЬТРА

Содержание твёрдого в пульпе питания вакуум-фильтра (плотность пульпы) является одним из основных технологических параметров процесса обезвоживания железорудного концентрата. При росте содержания твёрдого в пульпе питания производительность дискового вакуум-фильтра также повышается. Это вызвано ростом толщины осадка на дисках вакуум-фильтра, что в итоге приводит к увеличению влажности осадка.

Понижение содержания твёрдого в определенных пределах позволяет несколько снизить влажность осадка. Однако если установить содержание твёрдого ниже 50 %, то становится неоправданно низкой удельная производительность фильтров [6].

Если пульпа разбавлена (имеет низкую плотность), то это приводит к частичному расслоению материала в объёме ванны вакуум-фильтра. Чем больше плотность пульпы, тем больше её вязкость и тем меньше происходит её расслоение. Образующийся осадок на дисках вакуум-фильтра в этом случае более воздухопроницаем, что в конечном итоге приводит к снижению влажности осадка.

При фильтрации пульпы с высокой плотностью набор осадка необходимо производить при пониженном значении вакуума в зоне набора осадка. В этом случае осадок на дисках фильтра менее плотный, а воздухопроницаемость его выше, что приводит к понижению влажности осадка [72].

Также важным параметром при обезвоживании руд является уровень пульпы в ванне вакуум-фильтра. Если превысить данный уровень будет образовываться перелив пульпы через край ванны, что повлечёт за собой необходимость перекачки избыточной пульпы и дополнительные энергетические затраты на процесс обезвоживания. При снижении уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра ниже нормы внутренняя часть секторов не будет погружаться в пульпу. В результате этого в данной части сектора не будет образовываться слой осадка, что в итоге приведёт к возникновению потери вакуумного воздуха, а также падению производительности дискового вакуум-фильтра и росту влажности осадка.

На основе специализированной литературы [6], [40] и [72] были разработаны контуры регулирования плотности и уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра. Контур регулирования плотности пульпы в ванне поддерживает значение плотности на заданном уровне изменением доли воды в смеси «вода-пульпа» между расходами пульпы и воды, подаваемых в ванну вакуум-фильтра. Доля воды в смеси определяются на основе задания плотности пульпы и текущего значения плотности пульпы, подаваемой из пульподелителя по формуле:

$$k_c = \frac{\rho_{исх} - \rho_{зад}}{\rho_{исх} - 1}. \quad (13)$$

Основной целью поддержания плотности пульпы питания в ванне на требуемом уровне является стабилизация работы дискового вакуум-фильтра, т.е. снижение количества возмущений, действующих на разрабатываемую систему управления процессом обезвоживания железорудного концентрата.

Контур регулирования уровня пульпы поддерживает его текущее значение на задании изменением положения задвижек на подающих трубопроводах воды и пульпы питания фильтра в зависимости от рассогласования между заданием уровня пульпы и текущим значением уровня пульпы в ванне.

Для более точного и индивидуального управления процессом обезвоживания железорудного концентрата разработанные контуры регулирования плотности и уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра будут установлены на каждый дисковый вакуум-фильтр в отделении фильтрации предприятия. Это даст возможность индивидуально управлять каждым вакуум-фильтром в отдельности с целью поддержания основных технологических параметров фильтра в заданном диапазоне. Функциональная схема контуров регулирования плотности и уровня пульпы в ванне дискового вакуум-фильтра представлена на рисунке 9.

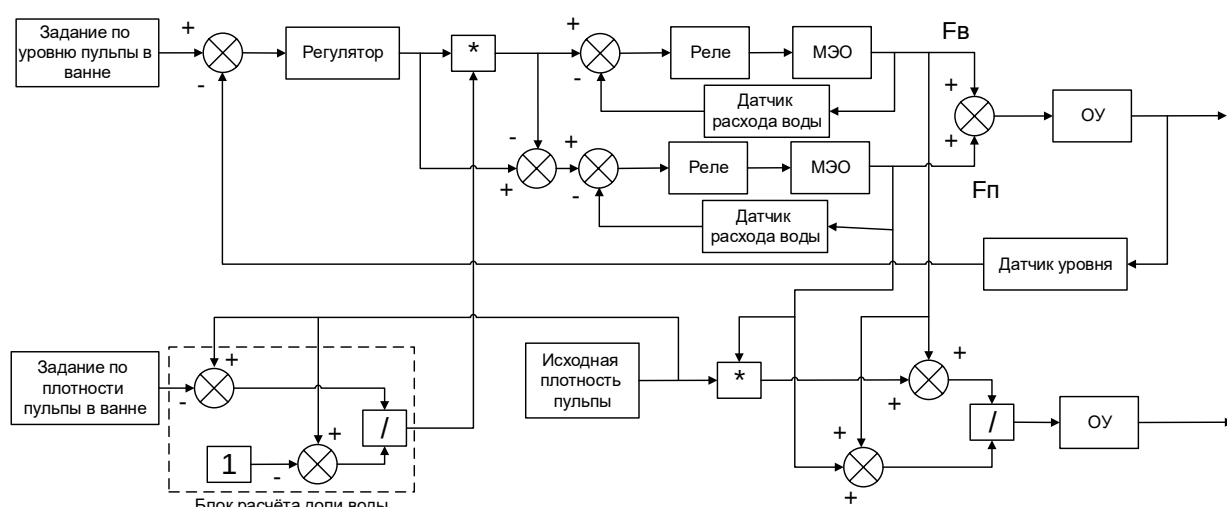


Рисунок 9. Функциональная схема контуров регулирования плотности и уровня пульпы в ванне дискового вакуум-фильтра

Разработанный разомкнутый контур регулирования плотности пульпы в ванне дискового вакуум-фильтра состоит из задатчика, требуемого для ввода задания плотности пульпы, объекта управления (ванны вакуум-фильтра), датчика плотности перед резервуаром пульпы (измеряет плотность пульпы, подаваемой на все вакуум-фильтры через пульподелитель), блока расчета доли воды в смеси «вода-пульпа».

С рассмотренным контуром связан контур регулирования уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра, состоящий из: задатчика уровня пульпы, блока сравнения, необходимого для расчёта рассогласования между заданием уровня пульпы и текущим его значением, регулятора, блока перемножения, блока вычитания, объекта управления (ванна дискового

вакуум-фильтра), датчика уровня, а также внутренних контуров регулирования расхода воды и пульпы соответственно. Они состоят из: блока сравнения, требуемого для расчёта рассогласования между заданием и текущим значением расхода воды и пульпы соответственно, трёхпозиционного реле, МЭО с задвижками и обратной связи с датчиками расхода.

2.1.3 РАЗРАБОТКА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЗАДВИЖКИ НА ТРУБОПРОВОДЕ ПОДАЧИ РАЗРЕЖЕНИЯ В ЗОНУ НАБОРА ОСАДКА

Другим важным технологическим параметром процесса обезвоживания является величина вакуума в зоне набора. Он определяет толщину осадка на дисках вакуум-фильтра. С ростом величины вакуума в зоне набора, при прочих равных условиях, возрастает слой осадка на дисках фильтра. Это приводит к росту производительности дискового вакуум-фильтра и влажности осадка [6].

На основе работ [6], [40] и [72] был сформирован контур регулирования положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка. Данный контур работает постоянно, изменяя положение задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка в зависимости от рассогласования между заданием положения задвижки и текущим его значением. Основная цель внедрения данного контура регулирования – стабилизация положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка на требуемом уровне с целью уменьшения количества возмущений на всю систему управления процессом обезвоживания.

Для улучшения качества управления процессом обезвоживания железорудного концентрата разработанный контур регулирования положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка будет установлен на каждый дисковый вакуум-фильтр. Это даст возможность индивидуально управлять каждым вакуум-фильтром в отдельности с целью поддержания основных технологических параметров

фильтра на требуемом уровне. Функциональная схема контура регулирования положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка представлена на рисунке 10.

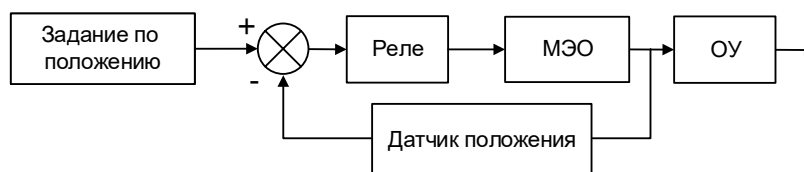


Рисунок 10. Функциональная схема контура регулирования положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка

Разработанный контур состоит из задатчика положения задвижки, требуемого для ввода задания положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка, блока сравнения, необходимого для вычисления рассогласования между заданием положения задвижки и текущим его значением, регулятора в виде трёхпозиционного реле, МЭО с задвижкой, обратной связи с датчиком положения и объекта управления (дискового вакуум-фильтра).

2.1.4 РАЗРАБОТКА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ПУЛЬПЫ В ПУЛЬПОДЕЛИТЕЛЕ

Для нормального функционирования дисковых вакуум-фильтров всего отделения фильтрации необходимо поддерживать постоянный уровень пульпы в пульподелителе.

Для поддержания уровня пульпы в пульподелителе на основе работ [43], [46] и [47] был сформирован контур регулирования уровня пульпы изменением частоты вращения насоса, установленного на трубопроводе, подающем пульпу к пульподелителю. Данный контур изменяет частоту вращения насоса на трубопроводе в зависимости от текущего рассогласования между заданием уровня пульпы и текущим значением уровня пульпы с целью поддержания его значения на необходимом уровне. Построенный контур регулирования в разработанной АСУ будет только один. Функциональная схема контура регулирования уровня пульпы в пульподелителе представлена на рисунке 11.

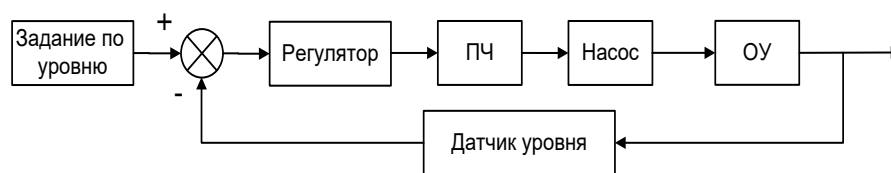


Рисунок 11. Функциональная схема контура регулирования уровня пульпы в пульподелителе

Разработанный контур состоит из задатчика, требуемого для ввода задания уровня, блока сравнения, необходимого для расчета рассогласования между заданием уровня пульпы и текущим его значением, регулятора, преобразователя частоты, насоса, объекта управления (пульподелителя) и датчика уровня.

2.1.5 РАЗРАБОТКА КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДИСКОВОГО ВАКУУМ-ФИЛЬТРА

В результате анализа литературы было установлено, что основными технологическими параметрами процесса обезвоживания, от которых зависит производительность вакуум-фильтра и влажность осадка являются: частота вращения дисков, плотность пульпы питания, величина разрежения в зоне набора осадка (в данной работе этот параметр представлен в виде положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка).

Частота вращения дисков в разрабатываемой системе управления процессом уже используется в качестве основного параметра для регулирования влажности. Поэтому в разрабатываемой системе управления предлагается проводить регулирование производительности с помощью таких параметров как: плотность пульпы питания в ванне фильтра и положение задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка.

От плотности пульпы питания фильтра во многом зависит как и производительность дискового вакуум-фильтра, так и влажность осадка. Увеличение плотности пульпы питания увеличивает толщину осадка на дисках фильтра, что при постоянных значениях других технологических

параметрах приводит к росту производительности вакуум-фильтра и влажности осадка.

Другим важным технологическим параметром процесса обезвоживания является величина вакуума в зоне набора. Он определяет толщину осадка на дисках вакуум-фильтра. С ростом величины вакуума в зоне набора, при прочих равных условиях, увеличивается слой осадка на дисках фильтра. Это приводит к росту производительности дискового вакуум-фильтра и влажности осадка [6]. Зависимость производительности от плотности пульпы и величины разрежения имеет экстремальный характер.

На основе литературы [6], [40] и [72] был разработан контур регулирования производительности дискового вакуум-фильтра изменением заданий плотности пульпы питания и задания положения задвижки.

При работе дискового вакуум-фильтра в пульпе его питания, в связи с изменением химического состава концентрата меняется крупность его частиц, их форма и плотность [74], [76]. Это влияет на процесс набора и сушки осадка. Также с течением времени меняются технические характеристики самого дискового вакуум-фильтра: это износ или загрязнение фильтроткани, забивка вакуум-системы и износ агрегатов фильтра. Все вышеперечисленные факторы придают процессу обезвоживания железорудного концентрата на дисковых вакуум-фильтрах нестационарность и являются для разрабатываемой системы управления возмущениями [75].

В контуре регулирования производительности дискового вакуум-фильтра использован экстремальный регулятор, который производит максимизацию производительности фильтра за счёт её экстремального регулирования путём определения оптимальных заданий для контуров регулирования плотности пульпы в ванне фильтра и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка в условиях колебаний суммарного удельного сопротивления осадка и фильтроткани, вызванных изменением её загрязнённости и параметров концентрата в пульпе питания

фильтра [75].

С целью повышения качества управления процессом обезвоживания железорудного концентрата разработанный контур регулирования производительности дискового вакуум-фильтра будет установлен на каждый вакуум-фильтр в отделении фильтрации. В результате это даст возможность более точно и индивидуально управлять каждым вакуум-фильтром в отдельности с целью максимизации производительности.

Разработанный контур состоит из экстремального регулятора, внутренних контуров регулирования плотности и уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка, объекта управления (дискового вакуум-фильтра), датчика производительности фильтра. Полученная функциональная схема контура регулирования производительности представлена на рисунке 12.

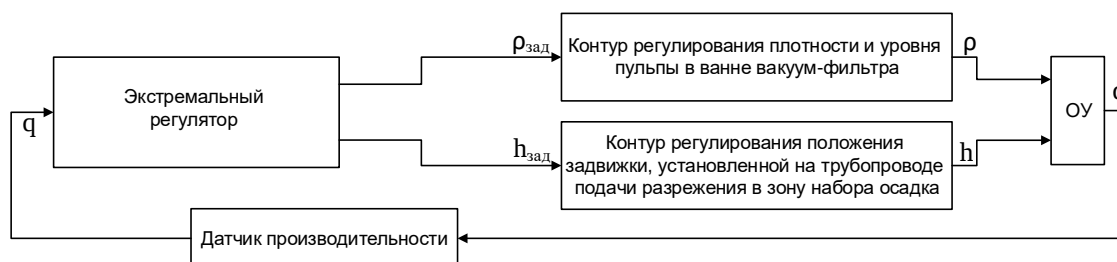


Рисунок 12. Функциональная схема контура регулирования производительности дискового вакуум-фильтра

Итоговый вид разработанной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого вакуум-фильтра представлен на рисунке 13.

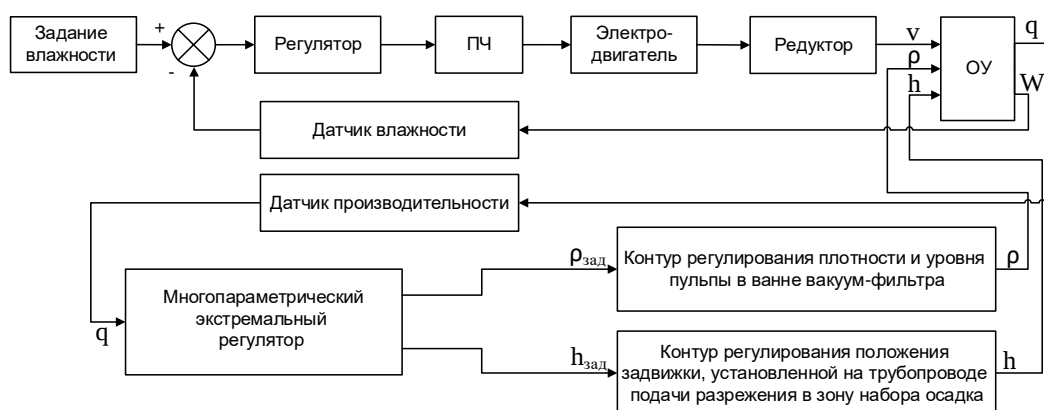


Рисунок 13. Функциональная схема разработанной системы управления

2.2 РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

2.2.1 РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ КОСВЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ОСАДКА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВАКУУМ-ФИЛЬТРА

Для функционирования разработанной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата необходима установка датчиков влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра на каждый вакуум-фильтр, что является экономически и технологически нецелесообразным, так как покупка данных датчиков сопряжена с высокими затратами и установка их на каждый вакуум-фильтр является очень трудоёмким процессом, связанным с изменением технологии производства. В качестве альтернативы этим датчикам в данной работе предлагается разработать методику косвенного измерения влажности осадка и производительности вакуум-фильтра путём выявления скрытых зависимостей технологических параметров процесса обезвоживания на основе исследования их взаимной корреляции [76].

В ходе анализа литературы было выявлено, что при постоянных значениях таких технологических параметров как: плотность пульпы, частота вращения дисков вакуум-фильтра и величина разрежения в зоне набора и в зоне сушки осадка колебания влажности осадка и производительности вакуум-фильтра определяются в первую очередь колебаниями гранулометрического состава концентрата в пульпе питания [77]. Крупность концентрата в значительной степени его определяет фильтруемость [6]. Чем тоньше измельчён концентрат, тем выше его удельная поверхность и удельное сопротивление осадка, в результате чего повышается влажность осадка, а производительность дискового вакуум-фильтра снижается.

Следовательно, величина удельного сопротивления осадка, которая может быть оценена по изменению разрежения и вибрации в вакуумной

системе фильтра, зависит от гранулометрического состава концентрата и может являться косвенным показателем влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра [77].

Для проверки выдвинутой гипотезы была построена натурная модель дискового вакуум-фильтра, показанная на рисунке 14. На основе полученных данных проведённых экспериментов на модели дискового вакуум-фильтра было установлено, что при увеличении толщины осадка на секторе диска разрежение в вакуум-системе фильтра возрастает (см. рисунок 15). Это говорит о том, что выдвинутая гипотеза подтверждается, разрежение в вакуум-системе фильтра может являться косвенным показателем толщины осадка на диске, а следовательно, и производительности вакуум-фильтра.

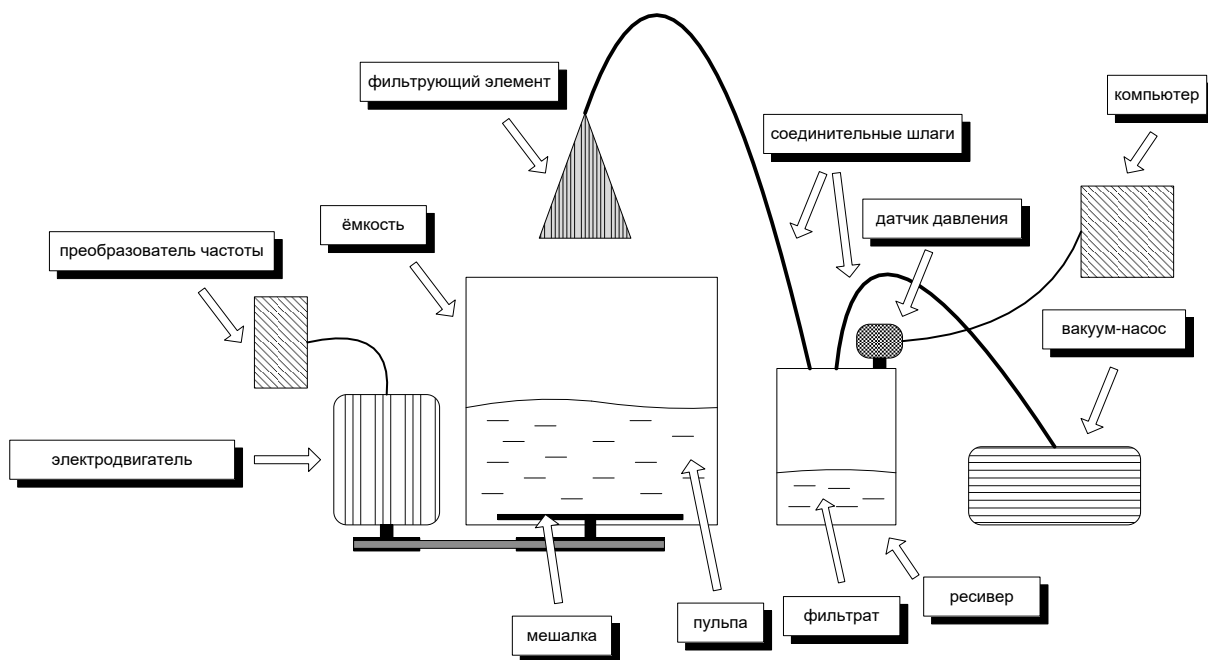


Рисунок 14. Натурная модель дискового вакуум-фильтра

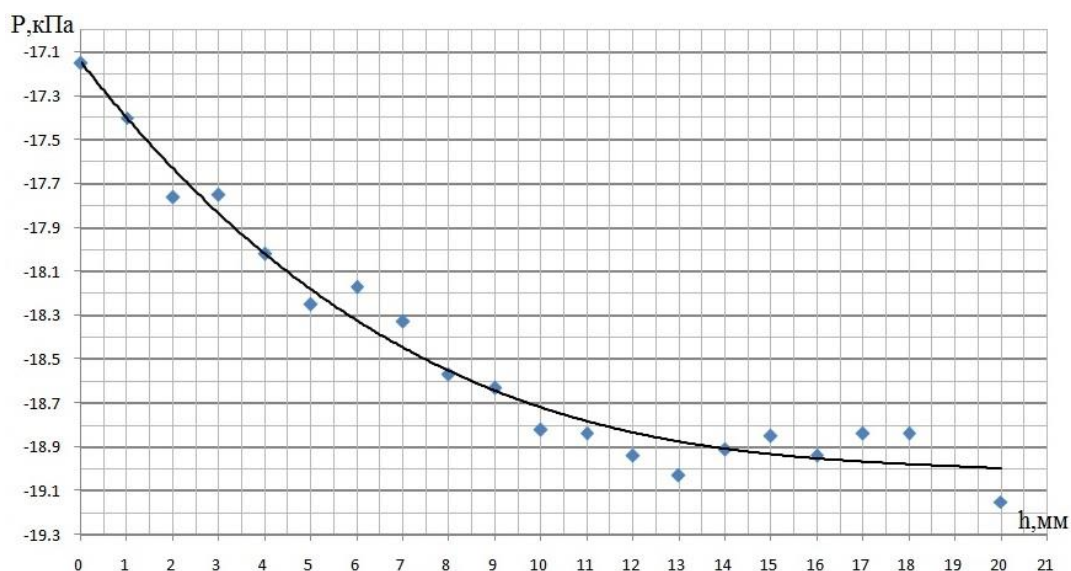


Рисунок 15. Зависимость разрежения в вакуум-системе фильтра от толщины осадка на секторе

Затем для проверки выдвинутой выше гипотезы была разработана и реализована на реальном объекте управления система сбора данных технологических характеристик дискового вакуум-фильтра. Функциональная схема данной системы представлена на рисунке 16.

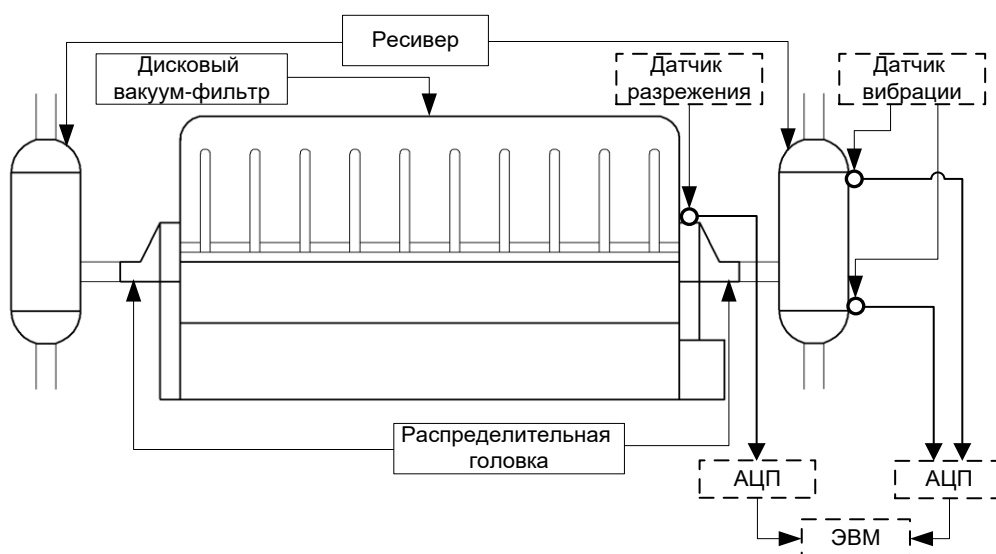


Рисунок 16. Функциональная схема системы сбора данных технологических характеристик дискового вакуум-фильтра

В систему сбора данных технологических характеристик дискового вакуум-фильтра входят: быстродействующий датчик разрежения DPA01M-P (измерения производятся 500 раз/с), устанавливаемый на распределительной головке вакуум-фильтра, АЦП NI USB-6008, с помощью которого сигнал с датчика разрежения преобразуется в цифровую форму и вводится в ПК, на

котором установлено следующее ПО: LabVIEW и MatLAB, необходимое для ввода, визуализации, архивирования, преобразования и анализа поступающей информации о ходе процесса обезвоживания железорудного концентрата [78].

Также в систему сбора данных технологических характеристик дискового вакуум-фильтра входят датчики вибрации AP 2037 (измерения производятся 10000 раз/с), подключаемые к компьютеру через собственный АЦП NI 9234 с шасси cDAQ-9171. Система предусматривает установку датчиков вибрации вверху на ресивере и в середине его цилиндрической части. Показания данных датчиков должны различаться, в связи с тем, что в верхней части ресивера проходит воздушный поток, а в середине – водо-воздушный.

В ходе серии экспериментов на реальном объекте фиксировались следующие технологические параметры процесса обезвоживания:

- 1) частота вращения дисков (показания прибора, установленного по месту);
- 2) масса осадка с одной стороны сектора диска (показания электронных весов);
- 3) толщина осадка (результаты измерения линейкой);
- 4) влажность осадка (результаты лабораторного анализа);
- 5) гранулометрический состав осадка (результаты лабораторного анализа);
- 6) плотность пульпы (показания плотномера);
- 7) давление разрежения в вакуум-системе фильтра (показания датчика разрежения);
- 8) вибрация в двух точках ресивера (показания датчиков вибрации);
- 9) время (показания часов) [78].

В ходе экспериментов на реальном объекте управления было выявлено, что слой осадка на секторе диска фильтра имеет непостоянную толщину. Данный фактор затрудняет его измерение и снижает информативность этого параметра. Поэтому для оценки производительности вакуум-фильтра было

принято решение использовать такой параметр как масса осадка на секторе диска.

Для выявления зависимости в полученных выборках ретроспективных данных на первоначальном этапе использовался метод регрессионного анализа. Выборка экспериментальных данных была проверена на наличие аномальных значений и отфильтрована. Проведённый анализ показал, что выходные параметры имеют нормальное распределение и их дисперсии воспроизводимости однородны, следовательно, использование регрессионного анализа обосновано [79].

Были проведены две серии экспериментов, которые заключались в изменении степени уравнения полиномиальной регрессии и подборе значений его коэффициентов с целью снижения средней ошибки. Входами являются: частота вращения дисков, величина разрежения и амплитуды вибрации в двух точках ресивера. Выходами – влажность осадка и производительность дискового вакуум-фильтра соответственно. В исследовании были опробованы несколько видов регрессий: степенные, показательные, дробно-рациональные и полиномиальные [80]. Наилучшие результаты показала регрессия, в которой использовался полином Колмогорова-Габора (уравнение 14):

$$Y(x_1, x_2, x_3, x_4) = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i x_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i}^4 a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i}^4 \sum_{k=j}^4 a_{ijk} x_i x_j x_k + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i}^4 \sum_{k=j}^4 \sum_{l=k}^4 a_{ijkl} x_i x_j x_k x_l \quad (14)$$

В результате этих экспериментов были получены графики средней ошибки, представленные на рисунках 17 и 18.

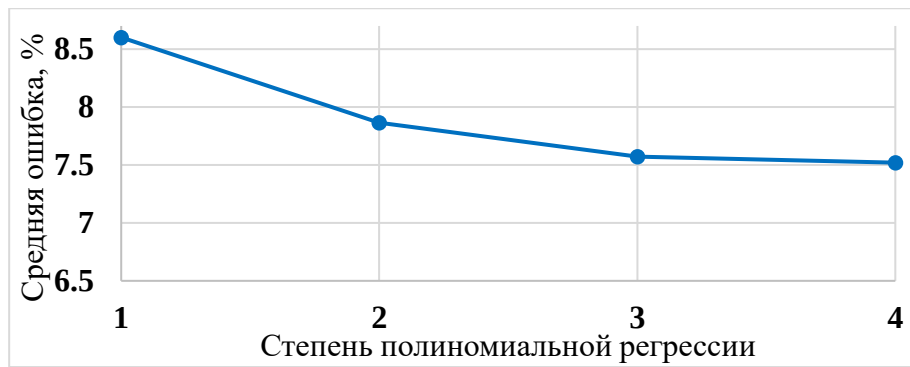


Рисунок 17. График изменения средней ошибки регрессии по производительности

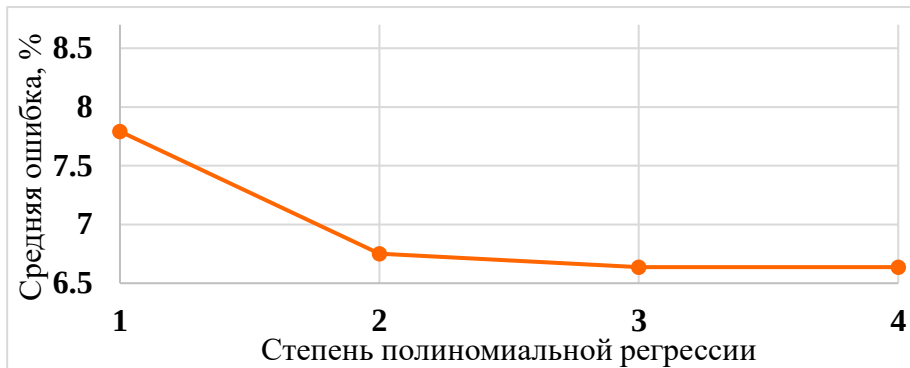


Рисунок 18. График изменения средней ошибки регрессии по влажности

По графикам на рисунках 17 и 18 видно, что минимальная средняя ошибка для производительности фильтра составила 7,52 %, а для влажности осадка 6,64 %, что не позволяет применить рассмотренный метод анализа для разработки модуля косвенного измерения (МКИ).

В дальнейшем для создания МКИ было предложено использовать многослойную нейронную сеть, обладающую свойством выявления скрытых зависимостей [81] - [86], так как она является универсальным аппроксиматором. Графическое представление нейрона приведено на рисунке 19.

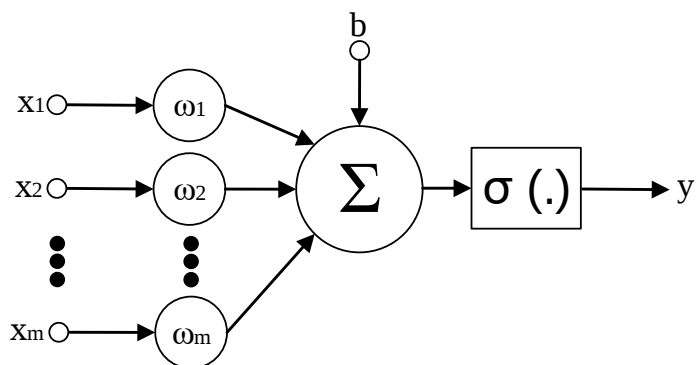


Рисунок 19. Графическое представление нейрона

Математическая модель нейрона имеет следующий вид:

$$\begin{cases} s = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot x_i + b; \\ y = \sigma(s). \end{cases} \quad (15)$$

где x_i - i -й входной сигнал, ω_i - i -й весовой коэффициент, b - смещение, s - взвешенная сумма, σ - функция активации, y – выходной сигнал нейрона

По теореме Фунахаши [87]: пусть $\sigma(\cdot)$ – ограниченная и монотонно возрастающая непрерывная функция. Пусть также Ω_x – компактное множество из $\mathbb{R}^n$ и $g(x)$ – действительная непрерывная функция на Ω_x . Тогда для любого произвольного $\mu > 0$ существует целое число N_2 и действительные V, W такие, что:

$$\max_{x \in \Omega_x} |g(x) - g_{nn}(x)| < \mu \quad (16)$$

$$g_{nn}(x) = W^T \sigma(V^T \bar{x}) \quad (17)$$

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{N1}]^T \quad (18)$$

$$\bar{x} = [b^1 \ x^T]^T \quad (19)$$

$$\sigma(V^T \bar{x}) = [b^2 \ \sigma_1 \sigma_2 \ \dots \ \sigma_{N2}]^T \quad (20)$$

$$V = \begin{bmatrix} \theta_1^V & \dots & \theta_{N2}^V \\ v_{1,1} & \dots & v_{1,N2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{N1,1} & \dots & v_{N1, N2} \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} \theta_1^W \\ w_1 \\ \vdots \\ w_{N2} \end{bmatrix} \quad (21)$$

При этом нейронная сеть должна иметь структуру, представленную на рисунке 20.

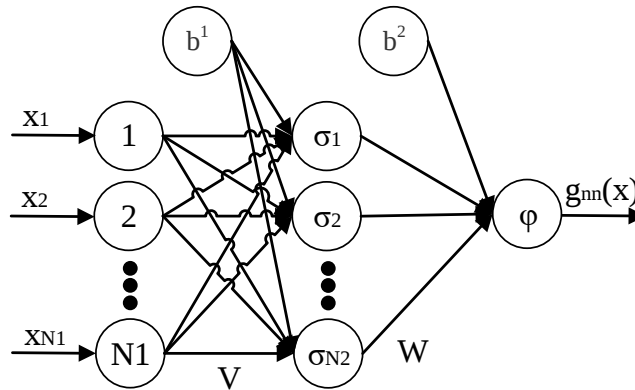


Рисунок 20. Структура нейронной сети

Где ϕ – линейная функция.

В данном исследовании для создания МКИ было решено использовать многослойную искусственную нейронную сеть прямого распространения. Данная сеть состоит из трёх слоёв, имеет четыре входа (частота вращения дисков, величина разрежения и амплитуды вибрации в двух точках ресивера) и два выхода (влажность осадка и производительность вакуум-фильтра). Нейроны выходного слоя имеют линейную функцию активации.

Математическая модель трёхслойной нейронной сети имеет следующий вид:

$$y = \varphi \left(\sum_{i=0}^N \Omega_i \sigma_i \left(\sum_{j=0}^n \omega_{ij} x_j + b_j \right) + B_i \right) \quad (22)$$

В ходе подбора оптимальной структуры нейронной сети, смысл которого заключался в определении числа нейронов и функции активации в скрытом слое, были проведены две серии экспериментов.

Первая серия экспериментов: в нейронах скрытого слоя используется функция активации «гиперболический тангенс» (23) при этом варьируются число нейронов в скрытом слое от 9 до 12, а также число эпох обучения от 50 до 200 с шагом 25. Число нейронов в скрытом слое начинается от 9, исходя из теоремы Хехт-Нильсена [88], так как число входов 4, то минимальное количество нейронов в скрытом слое больше или равно $2 \cdot 4 + 1$ или 9.

$$\sigma(s) = \frac{e^{\alpha \cdot s} - e^{-\alpha \cdot s}}{e^{\alpha \cdot s} + e^{-\alpha \cdot s}} \quad (23)$$

Нейронная сеть была обучена на обучающей выборке, состоящей из 1000 точек методом обратного распространения ошибки. При этом для более качественной работы нейронной сети значения входных и выходных параметров были нормированы в диапазоне от 0 до 1. В результате тестирования обученной нейронной сети на обучающей выборке были получены данные о средней ошибке обучения для каждого эксперимента с определёнными числом нейронов в скрытом слое и числом эпох обучения. Полученные данные о работе нейронной сети на обучающей выборке представлены в таблице 3 и на рисунке 21.

Таблица 3 – Данные о средней ошибке обучения НС при использовании в скрытом слое функции активации «гиперболический тангенс»

Количество нейронов в скрытом слое	Количество эпох обучения							
		50	75	100	125	150	175	200
	9	10,44	4,321	2,43	2,079	1,924	1,925	1,91
	10	3,352	2,585	2,004	1,455	1,27	1,193	1,087
	11	8,55	3,391	2,945	2,396	2,136	2,035	1,945
	12	2,419	2,336	2,17	2,16	2,13	2,087	1,903

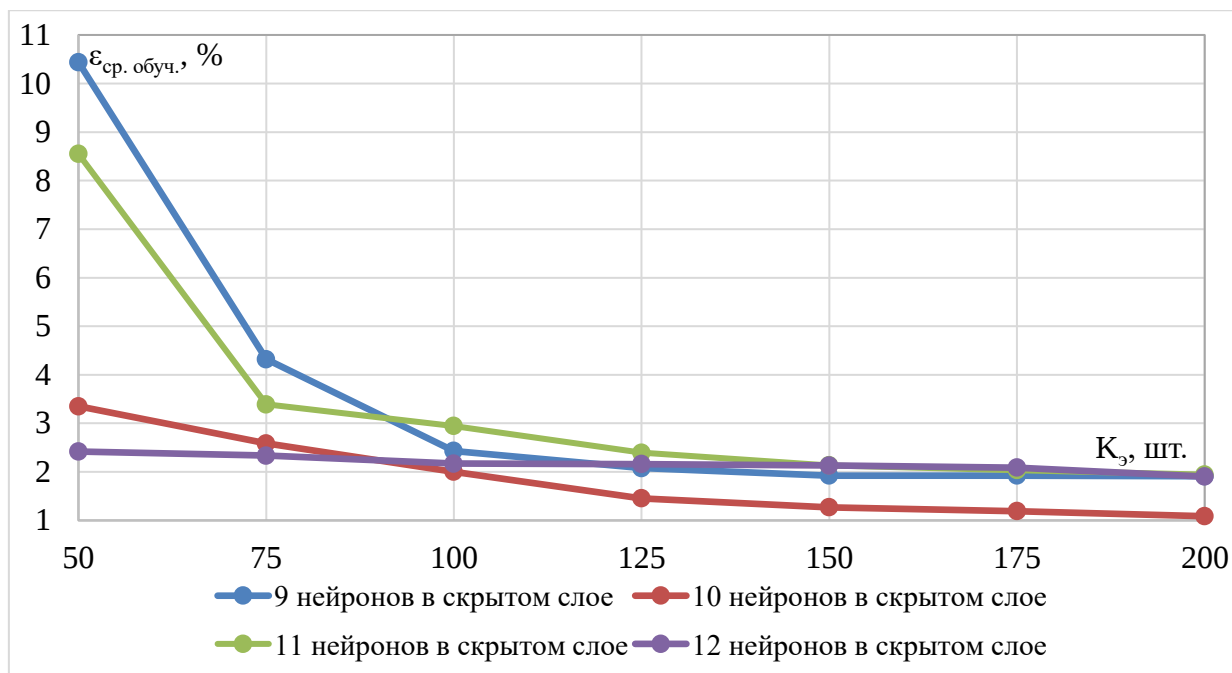


Рисунок 21. Графики средней ошибки обучения НС ($\varepsilon_{\text{ср. обуч.}}$) при использовании в скрытом слое функции активации «гиперболический тангенс»; ($K_{\text{э}}$ – количество эпох обучения)

Затем работа обученной нейронной сети была проверена на тестовой выборке, состоящей из 92 точек, не входящих в обучающую. В результате были получены данные о средней ошибке обобщения для каждого эксперимента с определёнными числом нейронов в скрытом слое и числом эпох обучения. Полученные данные о работе нейронной сети на тестовой выборке представлены в таблице 4 и на рисунке 22.

Таблица 4 – Данные о средней ошибке обобщения НС при использовании в скрытом слое функции активации «гиперболический тангенс»

	Количество эпох обучения							
Количество нейронов в скрытом слое		50	75	100	125	150	175	200
	9	10,9	4,839	3,497	3,482	3,135	3,404	3,315
	10	3,996	3,878	3,408	3,182	2,739	2,772	2,643
	11	8,61	4,313	4,294	3,794	3,798	3,628	3,591
	12	3,951	3,79	3,443	3,468	3,506	3,422	3,104

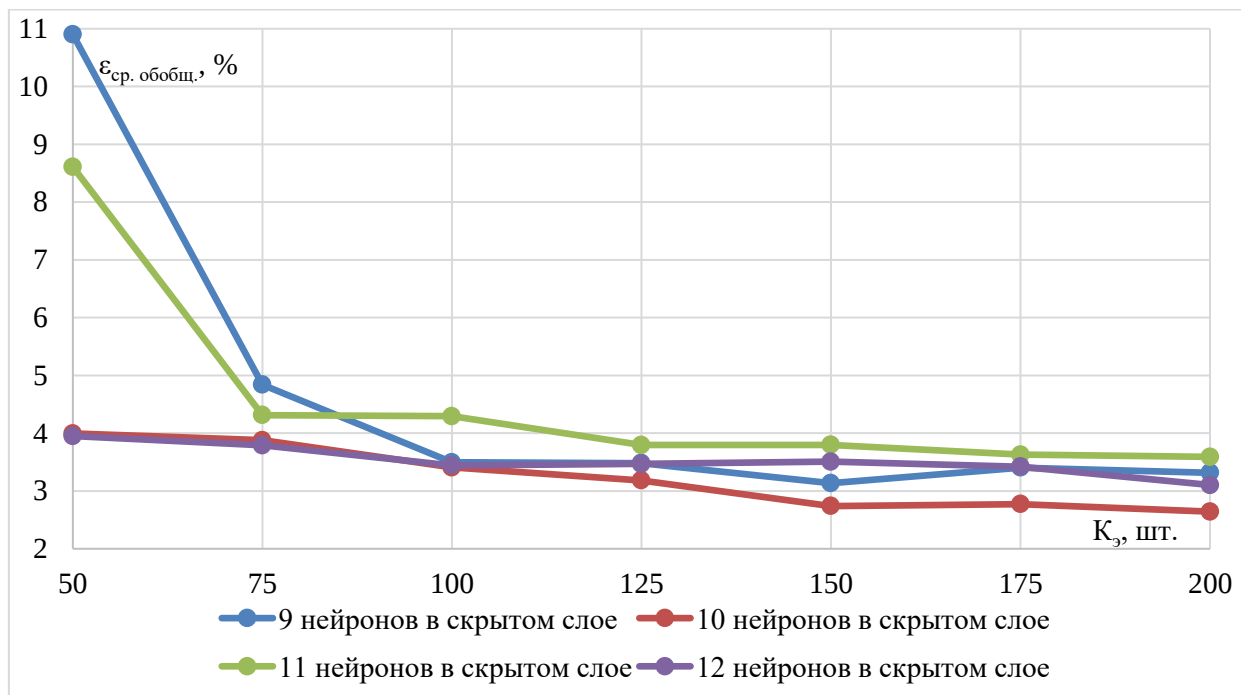


Рисунок 22. Графики средней ошибки обобщения НС ($\epsilon_{\text{ср. обобщ.}}$) при использовании в скрытом слое функции активации «гиперболический тангенс»; ($K_{\text{э}}$ – количество эпох обучения)

По графикам средней ошибки обобщения, представленным на рисунке 22, видно, что в первой серии экспериментов наиболее качественно обучилась нейронная сеть с 10 нейронами в скрытом слое за 200 эпох обучения. При этом средняя ошибка обобщения минимальна и составляет: 2,643.

Затем была проведена вторая серия экспериментов: в нейронах скрытого слоя использовалась сигмоидальная функция активации (24) при этом варьировалось число нейронов в скрытом слое от 9 до 12, а также число эпох обучения от 50 до 200 с шагом 25.

$$\sigma(s) = \frac{1}{1+e^{-\alpha s}} \quad (24)$$

Данная нейронная сеть была также обучена методом обратного распространения ошибки на 1000 обучающих примерах, входы и выходы которых были нормированы в диапазоне от 0 до 1. В результате тестирования обученной нейронной сети на обучающей выборке были получены данные о средней ошибке обучения для каждого эксперимента с определёнными числом нейронов в скрытом слое и числом эпох обучения. Полученные данные о работе нейронной сети на обучающей выборке представлены в таблице 5 и на рисунке 23.

Таблица 5 – Данные о средней ошибке обучения НС при использовании в скрытом слое сигмоидальной функции активации

	Количество эпох обучения							
Количество нейронов в скрытом слое		50	75	100	125	150	175	200
	9	5,487	2,606	2,762	2,234	1,999	2,065	1,928
	10	2,619	2,336	2,488	2,241	1,956	2,056	1,893
	11	9,39	3,806	2,576	2,507	2,12	2,12	2,261
	12	6,35	3,135	3,116	3,127	1,956	2,528	2,284

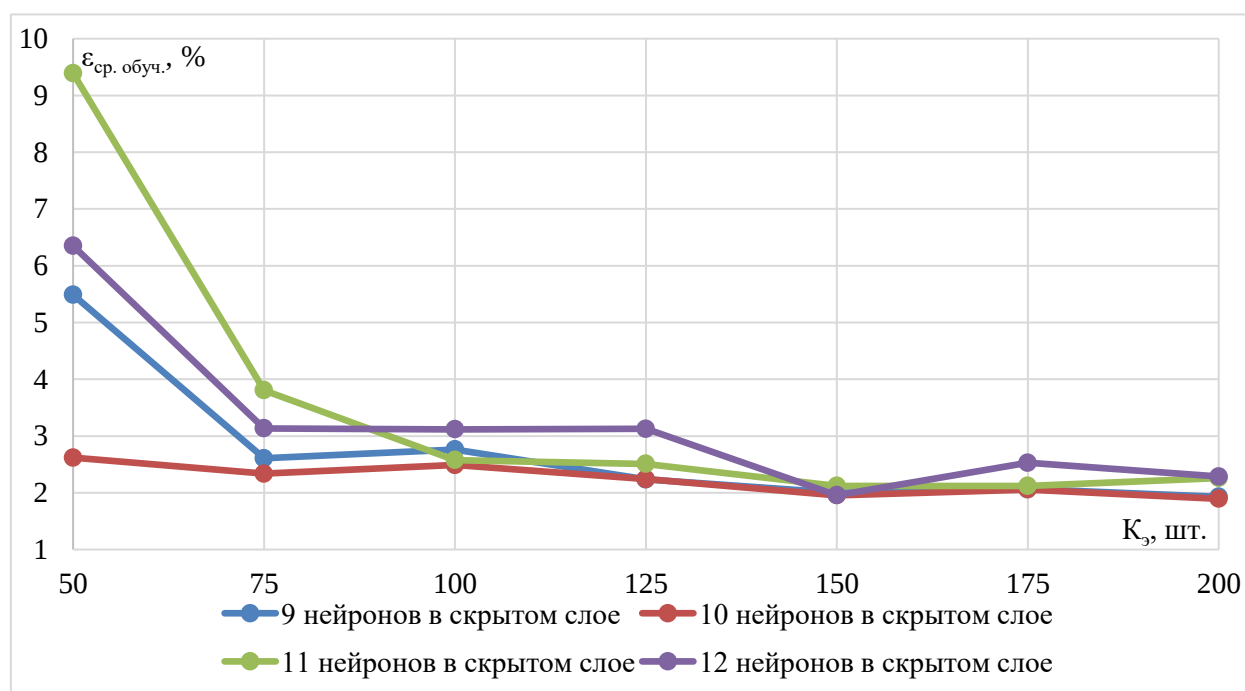


Рисунок 23. Графики средней ошибки обучения НС ($\epsilon_{\text{ср. обуч.}}$) при использовании в скрытом слое сигмоидальной функции активации; ($K_{\text{э}}$ – количество эпох обучения)

Затем функционирование обученной нейронной сети было проверено на тестовой выборке, состоящей из 92 точек, не входящих в обучающую

выборку. В результате были получены данные о средней ошибке обобщения для каждого эксперимента с определёнными числом нейронов в скрытом слое и числом эпох обучения. Полученные данные о работе нейронной сети на тестовой выборке представлены в таблице 6 и на рисунке 24.

Таблица 6 – Данные о средней ошибке обобщения НС при использовании в скрытом слое сигмоидальной функции активации

Количество нейронов в скрытом слое	Количество эпох обучения							
		50	75	100	125	150	175	200
9		6,015	3,522	3,665	3,665	3,327	3,377	3,157
10		3,841	3,15	3,359	3,004	3,05	2,829	2,708
11		9,6	4,643	3,844	3,858	3,718	3,718	3,61
12		7,76	4,3	4,1	3,954	3,698	3,591	3,496

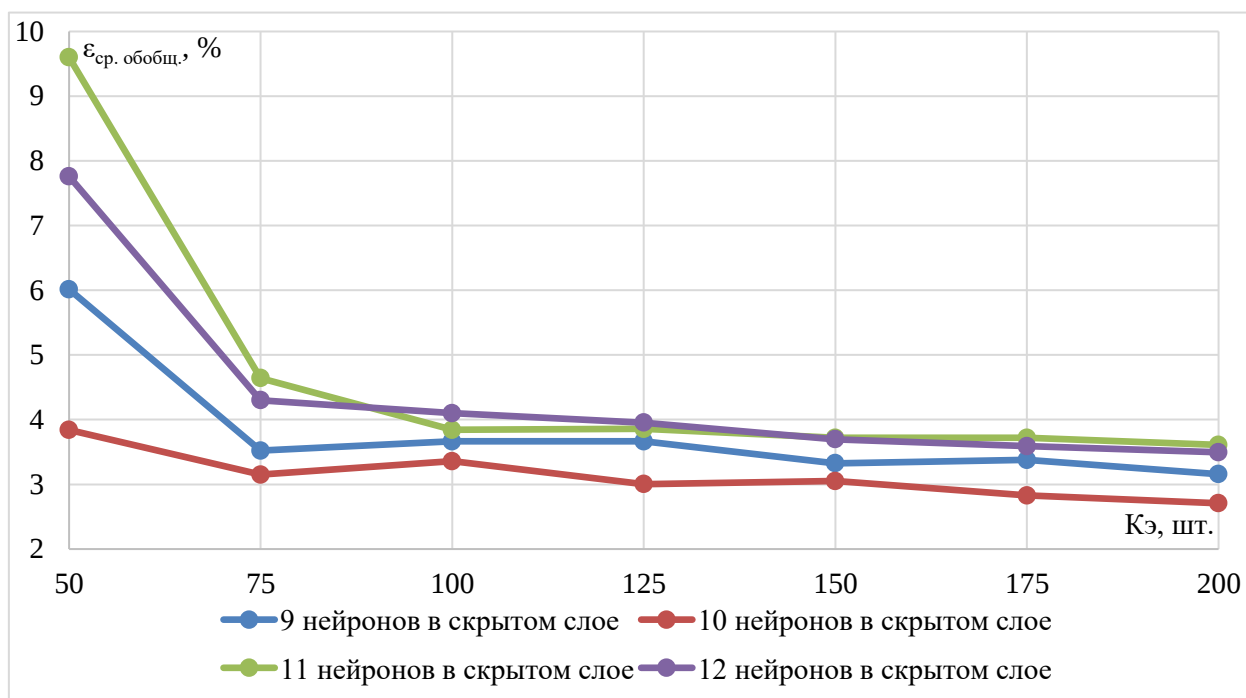


Рисунок 24. Графики средней ошибки обобщения НС ($\epsilon_{\text{ср. обобщ.}}$) при использовании в скрытом слое сигмоидальной функции активации; ($K_{\text{э}}$ – количество эпох обучения)

По графикам средней ошибки обобщения, представленным на рисунке 24, видно, что во второй серии экспериментов наиболее качественно обучилась нейронная сеть с 10 нейронами в скрытом слое за 200 эпох обучения. При этом средняя ошибка обобщения минимальна и составляет: 2,708.

В ходе двух серий экспериментов было установлено, наиболее качественно обучилась нейронная сеть с десятью нейронами и с функцией активации «гиперболический тангенс» (средняя ошибка обобщения 2,643) в скрытом слое при 200 эпохах обучения при этом минимальная средняя ошибка для производительности фильтра составила 4,22 %, а для влажности осадка 1,06 %.

В результате проведённой оптимизации была получена следующая структура многослойной нейронной сети, реализующая МКИ. Входами НС являются: частота вращения дисков, величина давления разрежения в вакуум-системе фильтра и амплитуды вибрации в двух точках ресивера. Выходами – влажность осадка и производительность дискового вакуум-фильтра. В выходном слое функция активации – линейная, в скрытом – «гиперболический тангенс». При этом входные параметры нейронной сети необходимо нормировать в диапазоне от 0 до 1, а выходные параметры в диапазонах от 0 до 12,1 для влажности и от 0 до 60,233 для производительности.

Итоговая структура нейронной сети, реализующей МКИ представлена на рисунке 25.

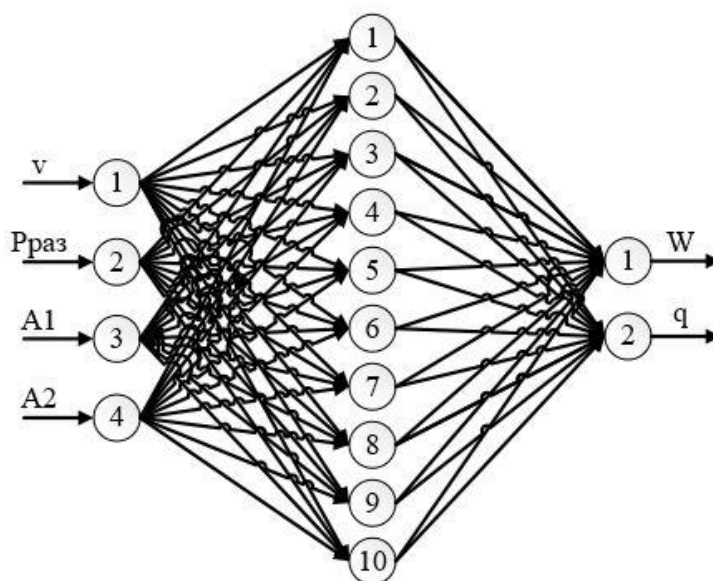


Рисунок 25. Нейронная сеть, реализующая модуль косвенного измерения влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра

2.2.2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Для построения модели разработанной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра необходима модель объекта управления.

При анализе литературных источников точных зависимостей между частотой вращения дисков, плотностью пульпы питания, положением задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка, величиной разрежения и вибрации в вакуум-системе фильтра не было обнаружено. Поэтому в данном исследовании было принято решение для создания модели дискового вакуум-фильтра использовать аппарат искусственных нейронных сетей, обладающих способностью к выявлению зависимостей.

В ходе выбора структуры нейронной сети, смысл которого заключался в определении числа нейронов и функции активации в скрытом слое, были проведены две серии экспериментов.

Первая серия экспериментов: в нейронах скрытого слоя используется функция активации «гиперболический тангенс» при этом варьируются число нейронов в скрытом слое от 7 до 10, а также количество эпох обучения от 50 до 200 с шагом 25. Число нейронов в скрытом слое начинается от 7, исходя из теоремы Хехт-Нильсена [88], так как число входов 3, то минимальное количество нейронов в скрытом слое больше или равно $2 \cdot 3 + 1$ или 7.

Нейронная сеть была обучена на обучающей выборке, состоящей из 1000 точек методом обратного распространения ошибки. В результате тестирования обученной нейронной сети на обучающей выборке были получены данные о средней ошибке обучения для каждого эксперимента с определёнными числом нейронов в скрытом слое и числом эпох обучения. Полученные данные о работе нейронной сети на обучающей выборке представлены в таблице 7 и на рисунке 26.

Таблица 7 – Данные о средней ошибке обучения НС при использовании в скрытом слое функции активации «гиперболический тангенс»

	Количество эпох обучения							
		50	75	100	125	150	175	200
Количество нейронов в скрытом слое	7	0,623	0,582	0,537	0,491	0,476	0,473	0,468
	8	0,663	0,549	0,523	0,517	0,516	0,515	0,514
	9	0,770	0,743	0,746	0,746	0,719	0,533	0,536
	10	0,745	0,745	0,751	0,761	0,759	0,740	0,730

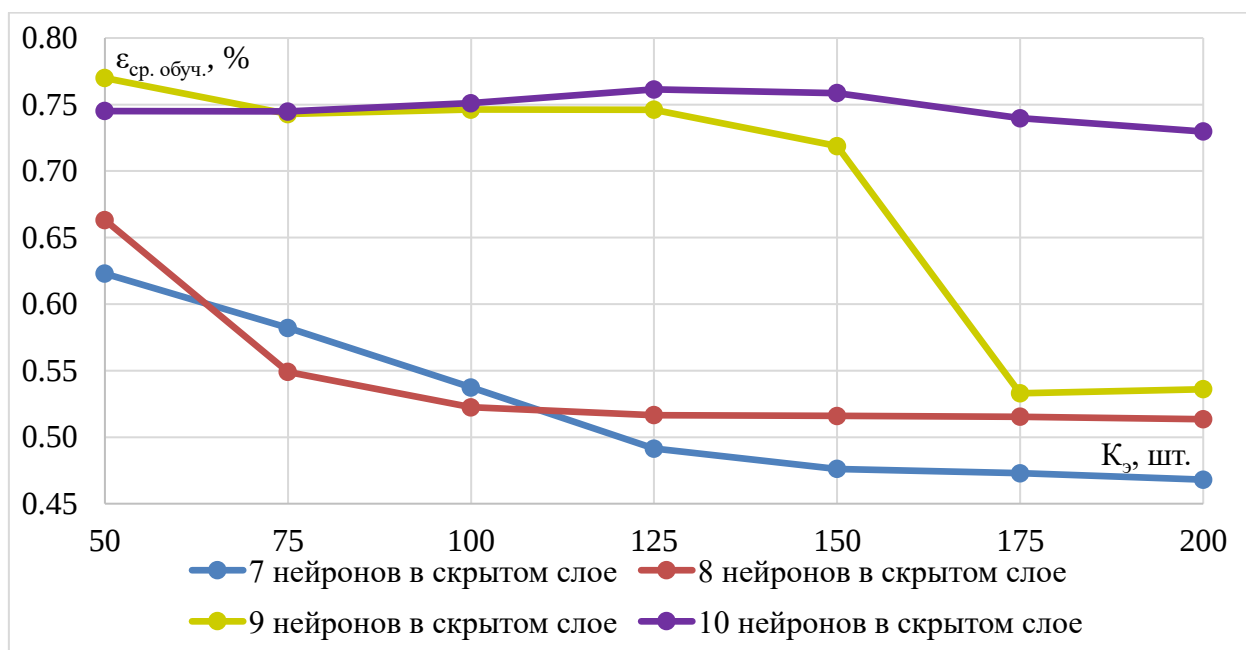


Рисунок 26. Графики средней ошибки обучения НС ($\epsilon_{\text{ср. обуч.}}$) при использовании в скрытом слое функции активации «гиперболический тангенс»; ($K_{\text{э}}$ – количество эпох обучения)

Затем работа обученной нейронной сети была проверена на тестовой выборке, состоящей из 92 точек, не входящих в обучающую. В результате были получены данные о средней ошибке обобщения для каждого эксперимента с определёнными числом нейронов в скрытом слое и числом эпох обучения. Полученные данные о работе нейронной сети на тестовой выборке представлены в таблице 8 и на рисунке 27.

Таблица 8 – Данные о средней ошибке обобщения НС при использовании в скрытом слое функции активации «гиперболический тангенс»

	Количество эпох обучения							
		50	75	100	125	150	175	200
Количество нейронов в скрытом слое	7	1,209	1,196	1,164	1,152	1,138	1,138	1,138
	8	1,260	1,155	1,152	1,142	1,142	1,142	1,143
	9	1,373	1,358	1,352	1,352	1,307	1,280	1,247
	10	1,349	1,352	1,355	1,360	1,362	1,358	1,355

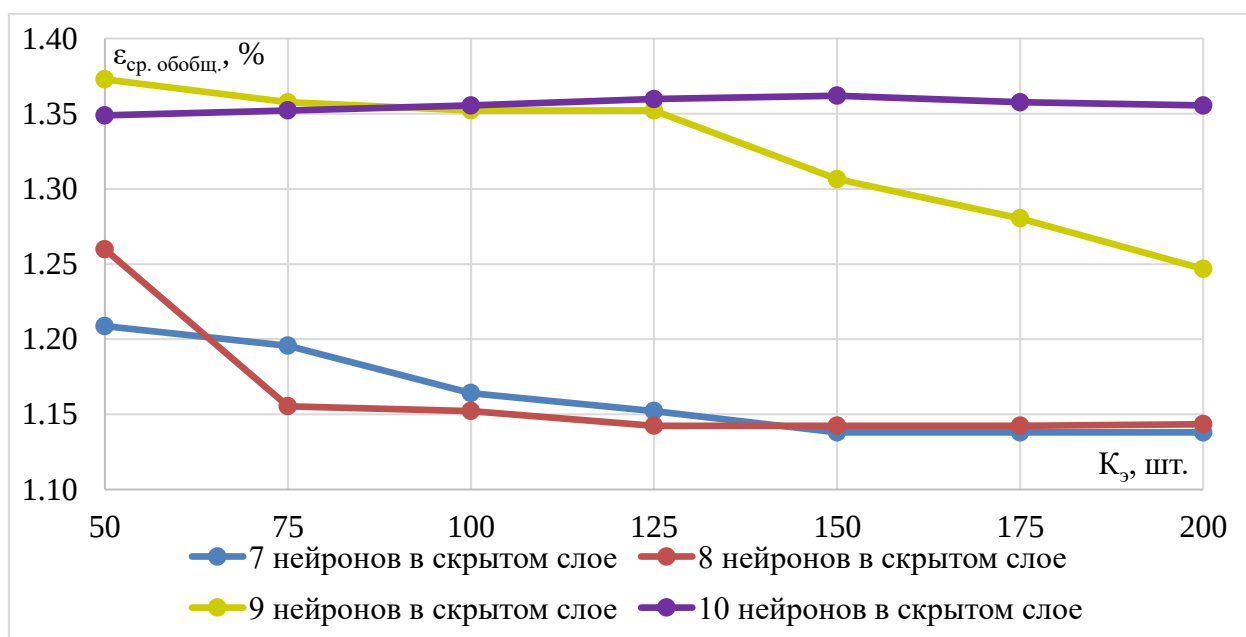


Рисунок 27. Графики средней ошибки обобщения НС ($\epsilon_{\text{ср. обобщ.}}$) при использовании в скрытом слое функции активации «гиперболический тангенс»; ($K_{\text{э}}$ – количество эпох обучения)

По графикам средней ошибки обобщения, представленным на рисунке 27, видно, что в первой серии экспериментов наиболее качественно обучилась нейронная сеть с 7 нейронами в скрытом слое за 200 эпох обучения. При этом средняя ошибка обобщения минимальна и составляет: 1,138.

Затем была проведена вторая серия экспериментов: в нейронах скрытого слоя использовалась сигмоидальная функция активации при этом варьировалось число нейронов в скрытом слое от 7 до 10, а также число эпох обучения от 50 до 200 с шагом 25.

Данная нейронная сеть была также обучена методом обратного распространения ошибки на 1000 обучающих примерах. В результате тестирования обученной нейронной сети на обучающей выборке были получены данные о средней ошибке обучения для каждого эксперимента с определёнными числом нейронов в скрытом слое и числом эпох обучения. Полученные данные о работе нейронной сети на обучающей выборке представлены в таблице 9 и на рисунке 28.

Таблица 9 – Данные о средней ошибке обучения НС при использовании в скрытом слое сигмоидальной функции

		Количество эпох обучения						
Количество нейронов в скрытом слое		50	75	100	125	150	175	200
	7	0,706	0,534	0,533	0,531	0,531	0,531	0,531
	8	0,825	0,779	0,560	0,544	0,537	0,533	0,533
	9	0,576	0,542	0,509	0,454	0,442	0,436	0,432
	10	0,790	0,636	0,551	0,506	0,459	0,450	0,447

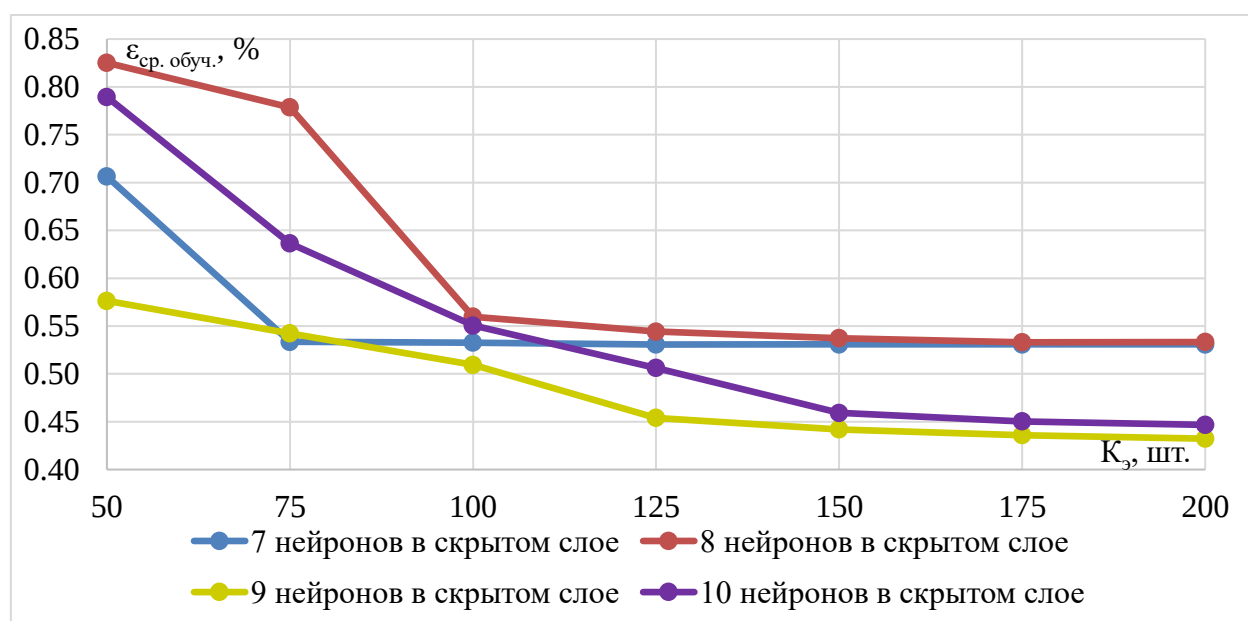


Рисунок 28. Средняя ошибка обучения НС ($\epsilon_{\text{ср. обуч.}}$) при использовании в скрытом слое сигмоидальной функции; ($K_{\text{э}}$ – количество эпох обучения)

Затем функционирование обученной нейронной сети было проверено на тестовой выборке, состоящей из 92 точек, не входящих в обучающую выборку. В результате были получены данные о средней ошибке обобщения для каждого эксперимента с определёнными числом нейронов в скрытом

слое и числом эпох обучения. Полученные данные о работе нейронной сети на тестовой выборке представлены в таблице 10 и на рисунке 29.

Таблица 10 – Данные о средней ошибке обобщения НС при использовании в скрытом слое сигмоидальной функции активации

	Количество эпох обучения							
		50	75	100	125	150	175	200
Количество нейронов в скрытом слое	7	1,311	1,162	1,173	1,165	1,164	1,164	1,164
	8	1,385	1,368	1,192	1,160	1,175	1,176	1,177
	9	1,178	1,180	1,170	1,136	1,130	1,132	1,130
	10	1,251	1,238	1,137	1,116	1,098	1,091	1,091

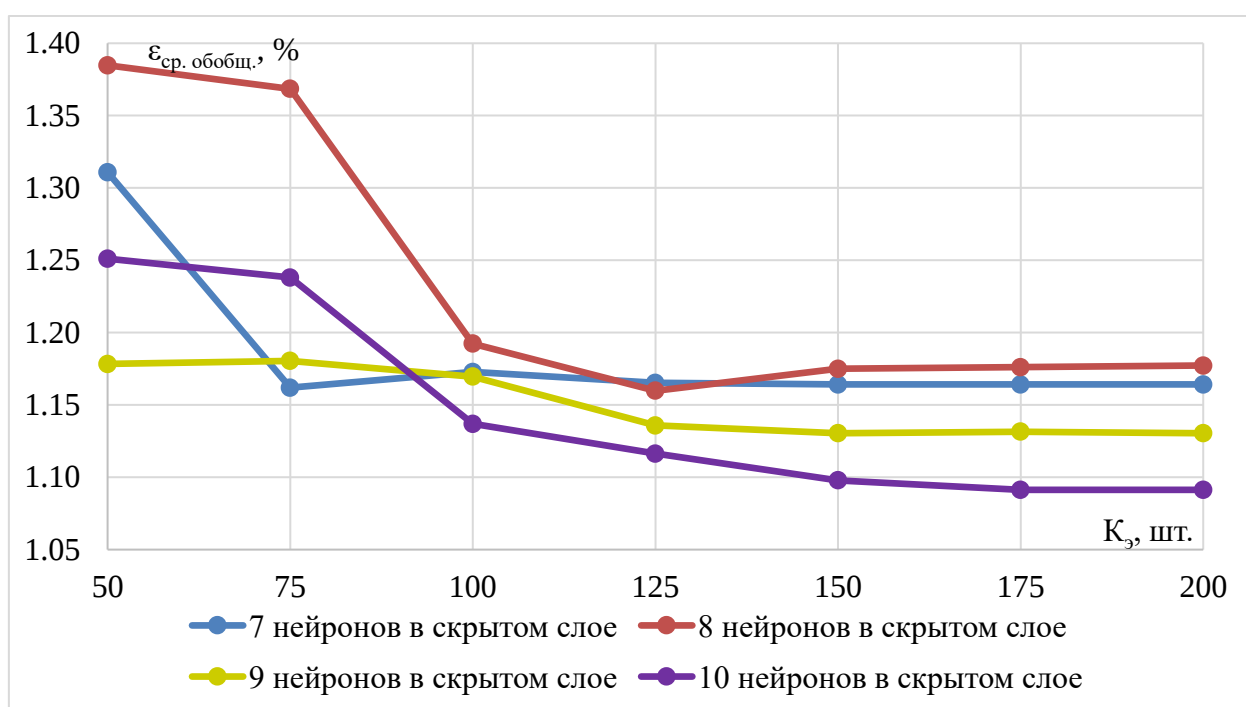


Рисунок 29. Средняя ошибка обобщения НС ($\epsilon_{\text{ср. обобщ.}}$) при использовании в скрытом слое сигмоидальной функции активации; ($K_{\text{э}}$ – количество эпох обучения)

По графикам средней ошибки обобщения, представленным на рисунке 29, видно, что во второй серии экспериментов наиболее качественно обучилась нейронная сеть с 10 нейронами в скрытом слое за 200 эпох обучения. При этом средняя ошибка обобщения минимальна и составляет: 1,091.

В ходе двух серий экспериментов было установлено, наиболее качественно обучилась нейронная сеть с 10 нейронами с сигмоидальной

функцией активации (средняя ошибка обобщения 1,091) в скрытом слое при 200 эпохах обучения.

В результате проведённой оптимизации была получена следующая структура многослойной нейронной сети, реализующая модель дискового вакуум-фильтра. Входами НС являются: частота вращения дисков, плотность пульпы питания, положения задвижки, установленной на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка. Выходами – давление разрежения и две амплитуды вибрации в ресивере вакуум-системы фильтра. В выходном слое функция активации – линейная, в скрытом – сигмоидальная.

Итоговая структура нейронной сети, реализующей модель дискового вакуум-фильтра представлена на рисунке 30.

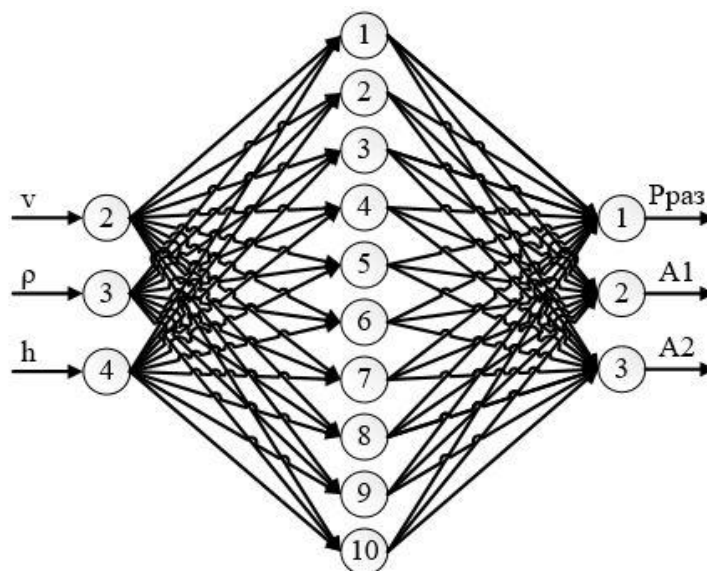


Рисунок 30. Нейронная сеть, реализующая модель дискового вакуум-фильтра

Полученная в данном исследовании нейросетевая модель дискового вакуум-фильтра не имеет динамики, имеющейся у реального объекта управления. Для придания нейронной сети необходимых свойств на каждый из её входов были установлены апериодические звенья первого порядка с динамически меняющимися постоянными времени в зависимости от частоты вращения дисков фильтра.

У апериодических звеньев, установленных на входах нейронной сети, на которые передаются значения частоты вращения дисков и положения задвижки и плотности пульпы постоянная времени равна времени одного

полного оборота дисков фильтра делённому на 3. Среднее значение постоянной времени – 0,333 мин. Полученная модель дискового вакуум-фильтра представлена на рисунке 31.

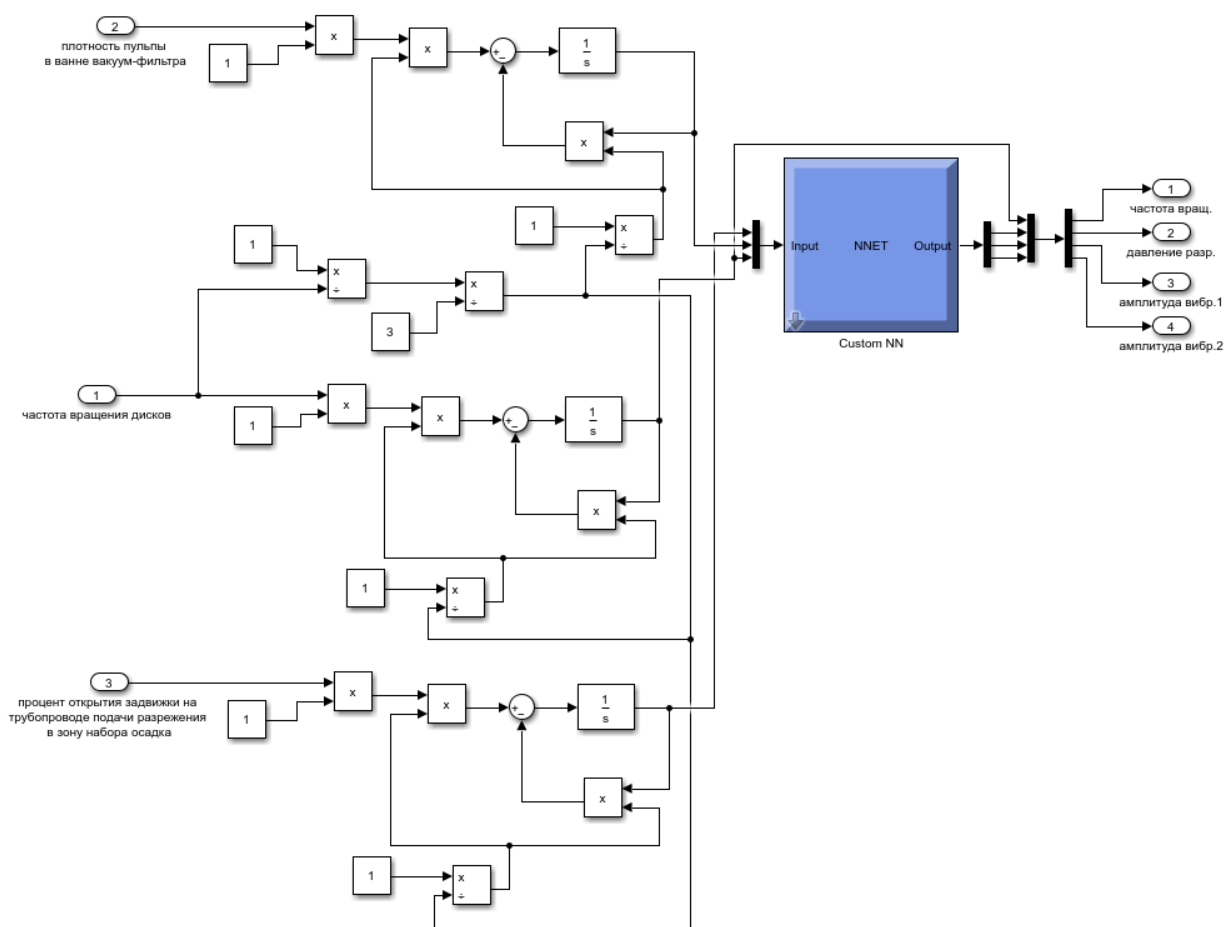


Рисунок 31. Структурная схема модели дискового вакуум-фильтра

Полученная нейросетевая модель в дальнейшем будет использоваться при настройке разработанной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра, а именно для настройки регуляторов, входящих в состав контуров регулирования рассматриваемой системы управления.

2.2.3 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ БАЗОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С РУЧНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Для проведения сравнительного анализа функционирования базовой системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата

и разработанной системы управления необходимы модели данных систем. Сначала разработаем математическую модель системы ручного управления процессом обезвоживания железорудного концентрата.

При разработке модели системы ручного управления необходимо учесть, что при работе дисковых вакуум-фильтров влажность осадка и его гранулометрический состав измеряются один раз в 4 часа, время проведения лабораторного анализа составляет 3 часа. На основе полученных данных лабораторного анализа влажности и гранулометрического состава осадка частота вращения дисков и положение задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка регулируются вручную, плотность пульпы питания вакуум-фильтров поддерживается на заданном уровне с помощью систем автоматики. Задание плотности пульпы питания устанавливается вручную. Уровень пульпы питания в пульподелителе и ванне вакуум-фильтров поддерживается за счёт перелива. В результате возникают дополнительные энергетические затраты на перекачку перелива в ёмкость для сбора пульпы. Производительность фильтров не регулируется. Основная цель управления процессом обезвоживания железорудного концентрата – избежать превышения технологического предела влажности, равного 9,8 %, которое может отрицательно повлиять на последующее окомкование.

Отличительной особенностью системы ручного управления процессом обезвоживания является то, что плотность пульпы питания фильтров поддерживается на требуемом уровне в двух резервуарах пульпы. А затем пульпа с одинаковой плотностью подаётся в пульподелитель и ванны вакуум-фильтров. Таким образом выполняется групповое (неиндивидуальное) управление вакуум-фильтрами.

В ходе данной работы для базовой системы ручного управления была разработана модель контуров регулирования уровня и плотности пульпы в резервуаре пульпы. Для обоих контуров был выбран ПИ-регулятор, так как он даёт неплохое качество регулирования и при этом не сложен в настройке. В ходе настройки регуляторов были получены следующие параметры

регуляторов: $K_i = -0,003$ и $K_p = 30$ – для регулятора уровня пульпы, $K_i = -0.005$ и $K_p = -0,1$ – для регулятора плотности пульпы. Ограничения управлений регуляторов было задано с помощью блоков Saturation. Возмущение в контуре регулирования уровня пульпы имитирует изменение расхода из резервуара пульпы, то есть запуск или останов дисковых вакуум-фильтров. Погрешность измерения в контурах регулирования описывается с помощью блока Uniform Random Number. Полученная модель контуров регулирования уровня и плотности пульпы в резервуаре пульпы представлена на рисунке 32.

В модели базовой системы управления процессом обезвоживания действия оператора, связанные с управлением дисковым вакуум-фильтром, а именно действия по регулированию заданий частоты вращения дисков, плотности пульпы и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка описаны в блоке Signal Builder.

Для определения результатов управления процессом обезвоживания, таких как суммарная производительность, текущая средняя производительность и общая средняя производительность разработана схема, представленная на рисунке 33.

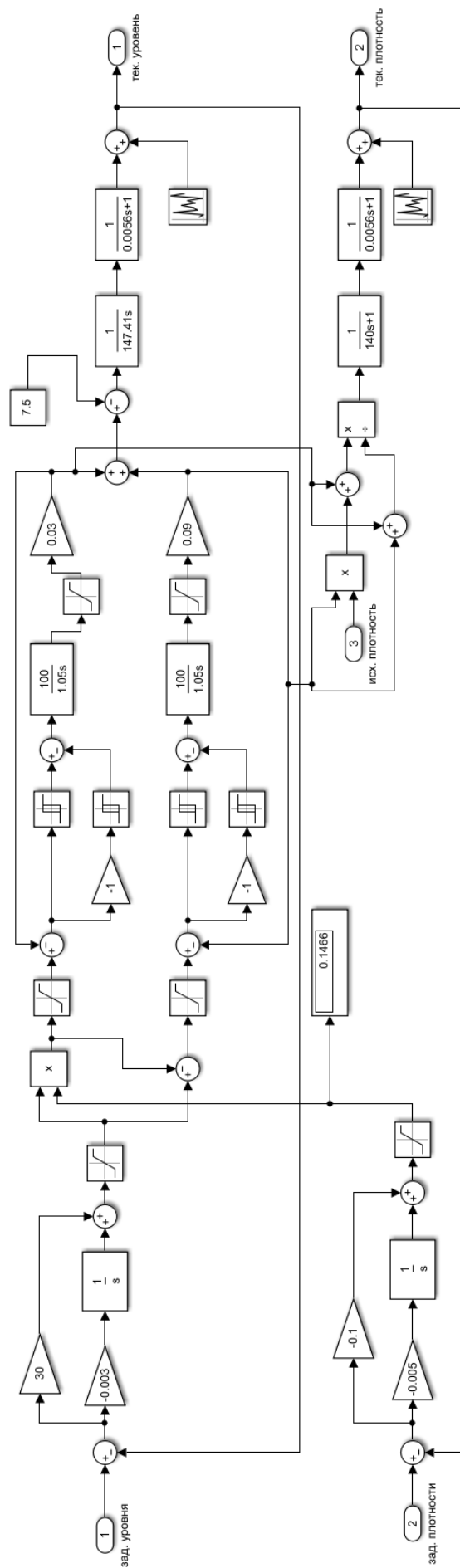


Рисунок 32. Модель контуров регулирования уровня и плотности пулпы в резервуаре пулпы

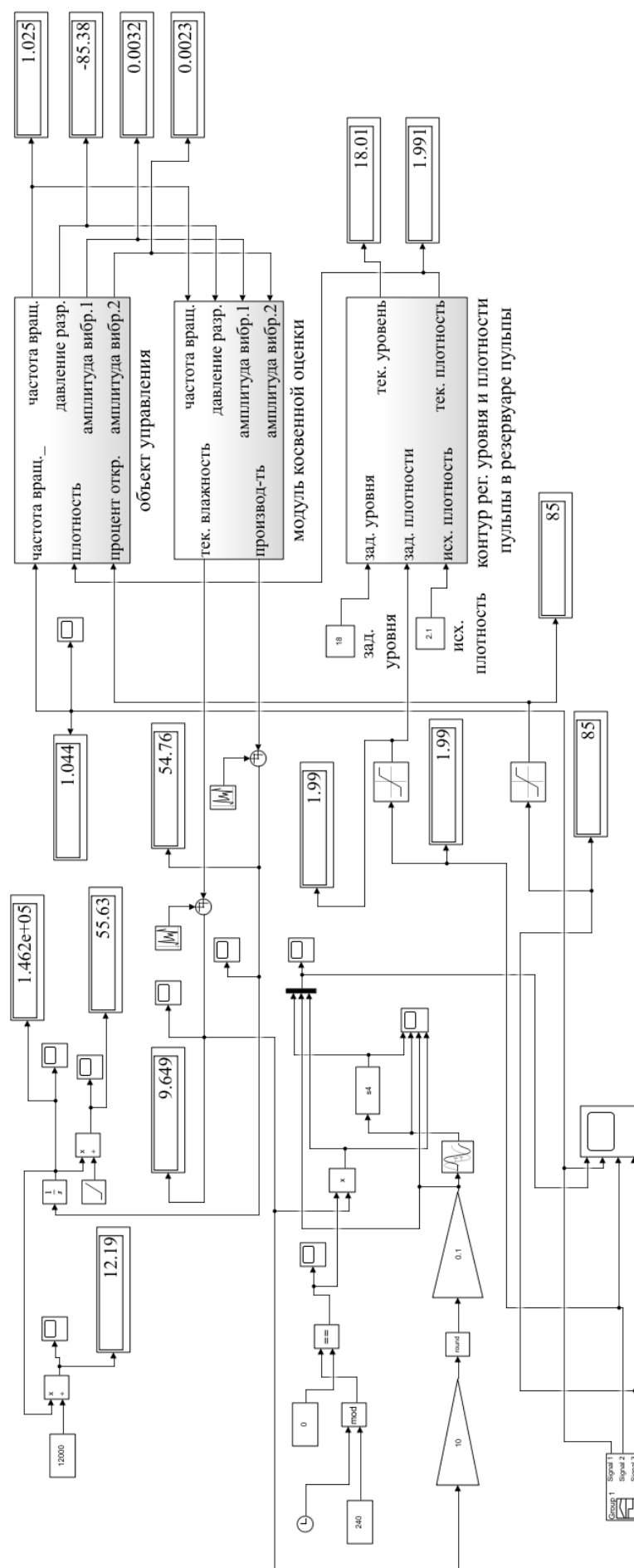


Рисунок 35. Модель базовой системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата

2.2.4 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БАЗОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С РУЧНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Перед моделированием работы всей базовой системы управления было проведено тестирование контуров регулирования уровня и плотности в резервуаре пульпы и анализ их влияния друг на друга.

В первом опыте было изменено задание плотности пульпы в резервуаре пульпы с $1,94 \text{ т/м}^3$ на $1,95 \text{ т/м}^3$ на 20 минуте и с $1,95 \text{ т/м}^3$ на $1,94 \text{ т/м}^3$ на 700 минуте. Полученные результаты в ходе данного опыта представлены на рисунке 36.

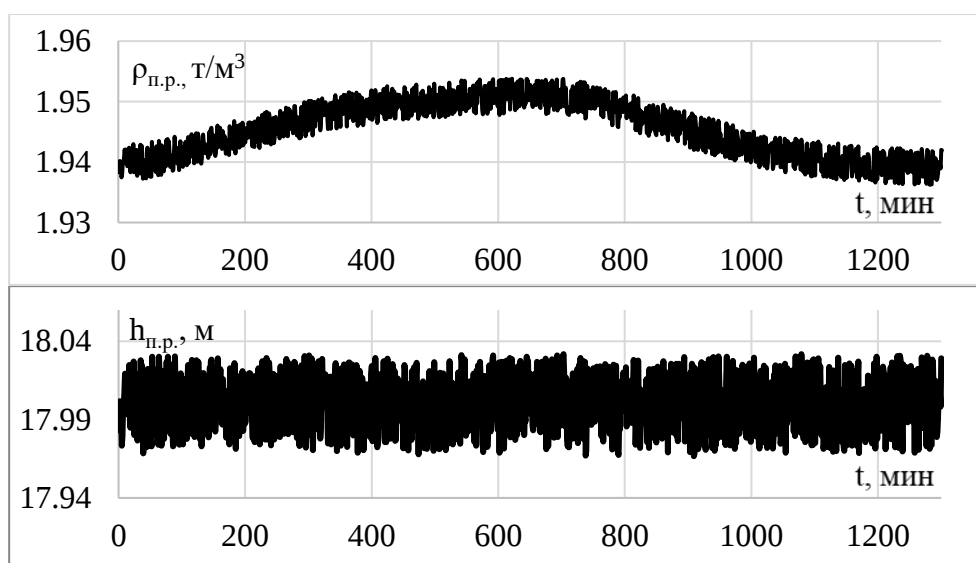


Рисунок 36. Графики текущих плотности ($\rho_{п.р.}$) и уровня ($h_{п.р.}$) пульпы в резервуаре при смене задания плотности пульпы; (t – время)

По графику, представленному на рисунке 36, видно, что контур регулирования плотности пульпы в резервуаре пульпы выходит на новое задание в момент времени 20 и 700 минут за 380 мин без перерегулирования. Колебательность и статическая ошибка при этом отсутствуют. По графику изменения уровня пульпы в резервуаре пульпы на рисунке 36 видно, что контур регулирования уровня пульпы в моменты смены задания плотности пульпы стабильно поддерживает уровень на требуемом значении.

Во втором опыте было изменено возмущение, действующее на контур регулирования уровня в резервуаре пульпы. В момент времени 20 минут расход пульпы из резервуара пульпы вырос на $0,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ с $7,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ до

8 м³/мин, а затем в момент времени 100 минут упал на 0,5 м³/мин. Результаты второго опыта представлены на рисунке 37.

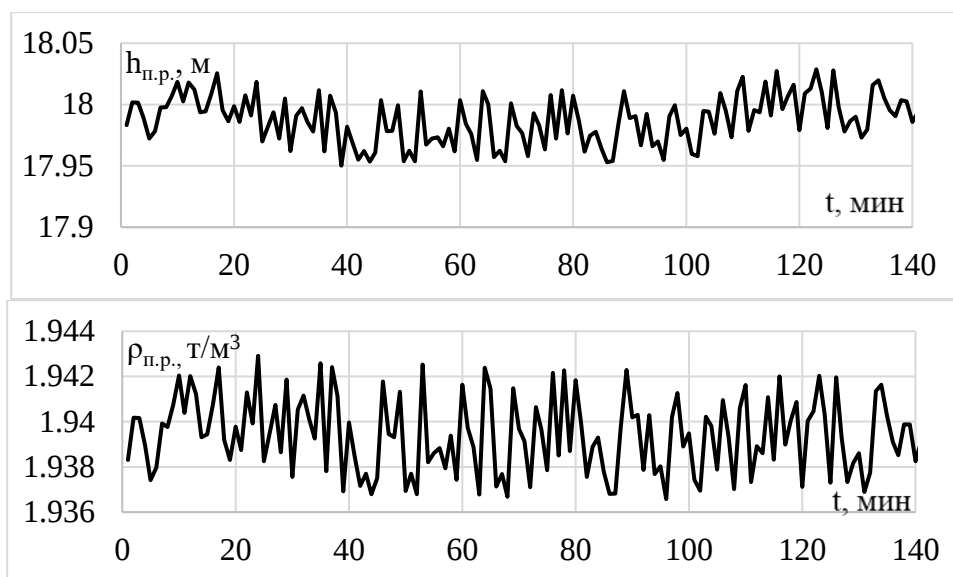


Рисунок 37. Графики текущих плотности ($\rho_{п.р.}$) и уровня ($h_{п.р.}$) пульпы в резервуаре при изменении возмущения на контур регулирования уровня; (t – время)

По графику изменения уровня пульпы в резервуаре пульпы на рисунке 37 видно, что в моменты времени 20 и 100 минут при смене возмущения контур регулирования уровня пульпы в резервуаре пульпы удерживает систему на задании. При этом в период с 20 по 100 минуту наблюдается небольшая просадка уровня пульпы до 2 см. По графику изменения плотности пульпы в резервуаре пульпы, представленному на рисунке 37, видно, что при изменении возмущения, действующего на контур регулирования уровня пульпы в резервуаре пульпы контур регулирования плотности пульпы поддерживает её на требуемом значении.

По результатам проведённых двух опытов видно, что структура и коэффициенты регуляторов, входящих в состав контуров регулирования уровня и плотности пульпы в резервуаре пульпы, выбраны верно.

После тестирования контуров регулирования, входящих в состав базовой системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата, было проведено моделирование работы всей базовой системы управления.

Изменения основных регулируемых технологических параметров процесса обезвоживания железорудного концентрата, таких как частота вращения дисков, плотность пульпы питания и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения, описываются графиками, представленными на рисунке 38. Характер изменения данных параметров описывает опыт оператора и его способ управления вакуум-фильтром.

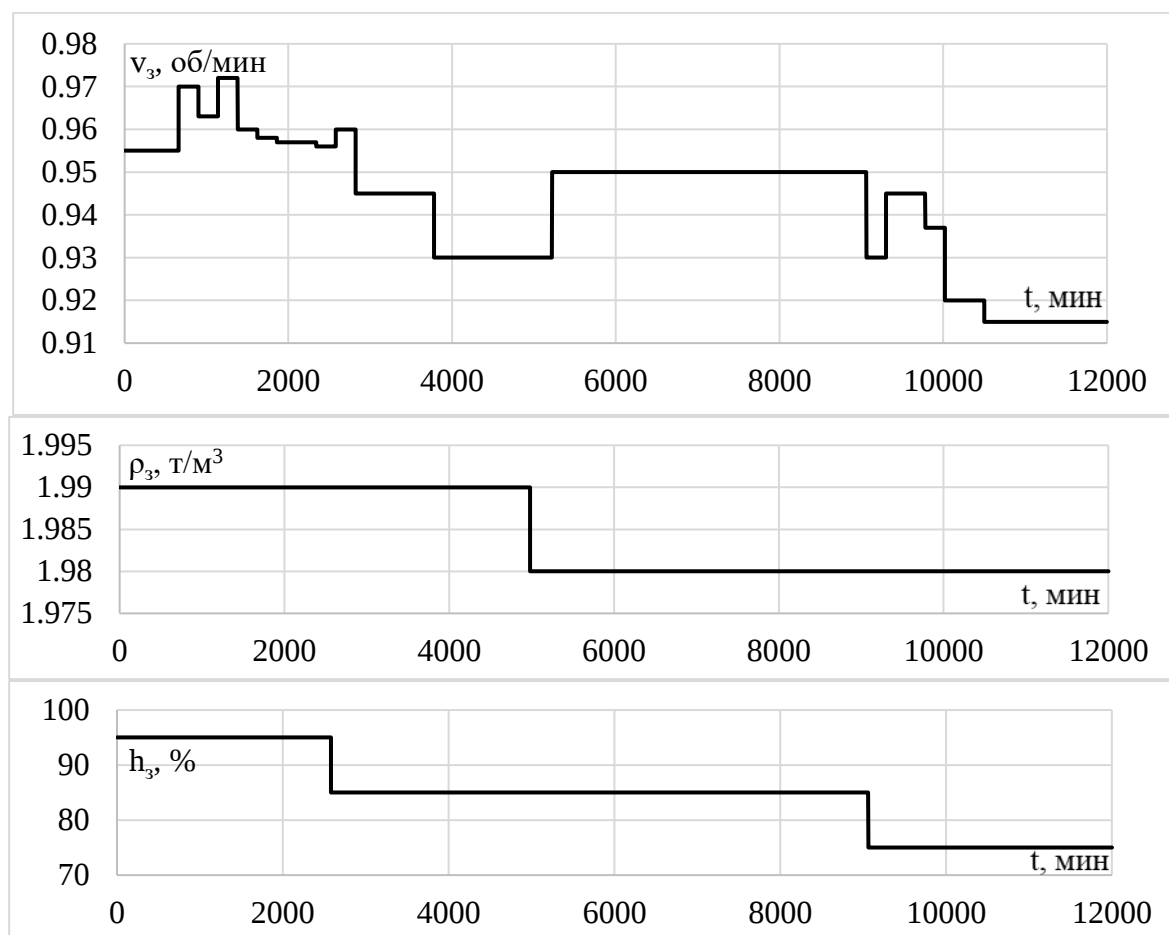


Рисунок 38. Графики заданий частоты вращения дисков (v_3), плотности пульпы (ρ_3) и положения задвижки (h_3); (t – время)

Моделирование разработанной системы управления процессом обезвоживания проводилось в течение 12000 минут. Задание для контура регулирования уровня пульпы в резервуаре пульпы было установлено равным 18 м. При моделировании гранулометрический состав концентрата менялся синусоидально, а загрязнённость фильтроткани – линейно.

Как видно по графику задания частоты вращения дисков на рисунке 38, данный технологический параметр меняется ступенчато 1 раз в 240 минут.

При этом среднее значение частоты вращения дисков составляет 0,943 об/мин. Ступенчатость графика частоты вращения дисков вызвана использованием лабораторного анализа влажности и гранулометрического состава концентрата, проводимого с низкой частотой и большим запаздыванием.

В результате моделирования работы базовой системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата были получены следующие графики, представленные на рисунках 39 и 40.

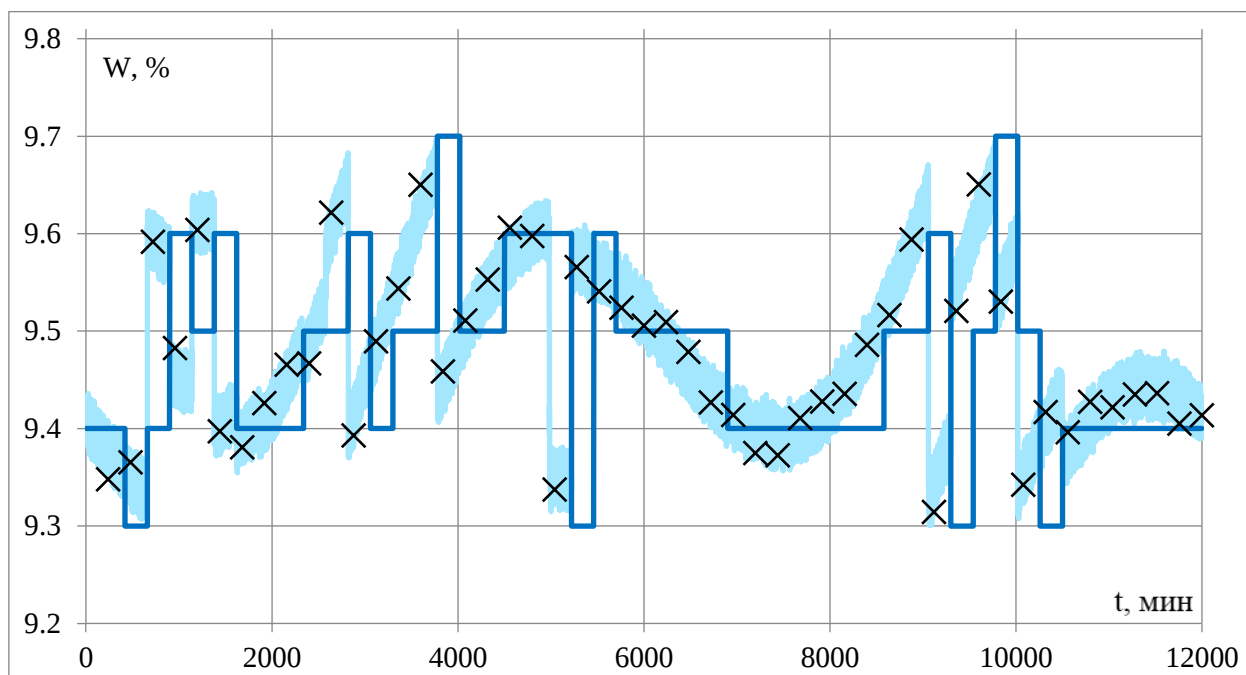


Рисунок 39. Графики изменения влажности осадка (W); (t – время)

На рисунке 39 представлены следующие графики: голубой график – текущее значение влажности осадка, синий график – измеренное с помощью лабораторного анализа значение влажности осадка и полученное оператором с запаздыванием. Звёздочками отмечены моменты времени, в которые производился забор проб для анализа влажности.

По графику изменения измеренного значения влажности осадка видно, что данный технологический параметр при использовании базовой системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата в среднем поддерживается на уровне 9,5 %. При этом возможны отклонения значений влажности осадка от среднего значения до 0,2 %. Данный фактор является

последствием лабораторного анализа влажности, проводимого с малой периодичностью один раз в 4 часа и большим запаздыванием равным 3 часа. В связи с этим оператор поддерживает частоту вращения дисков вакуум-фильтра с запасом, ниже чем это было бы возможно, чтобы не превысить допустимый порог влажности осадка, установленный технологией, равный 9,8 %. В результате это приводит к снижению производительности дискового вакуум-фильтра.

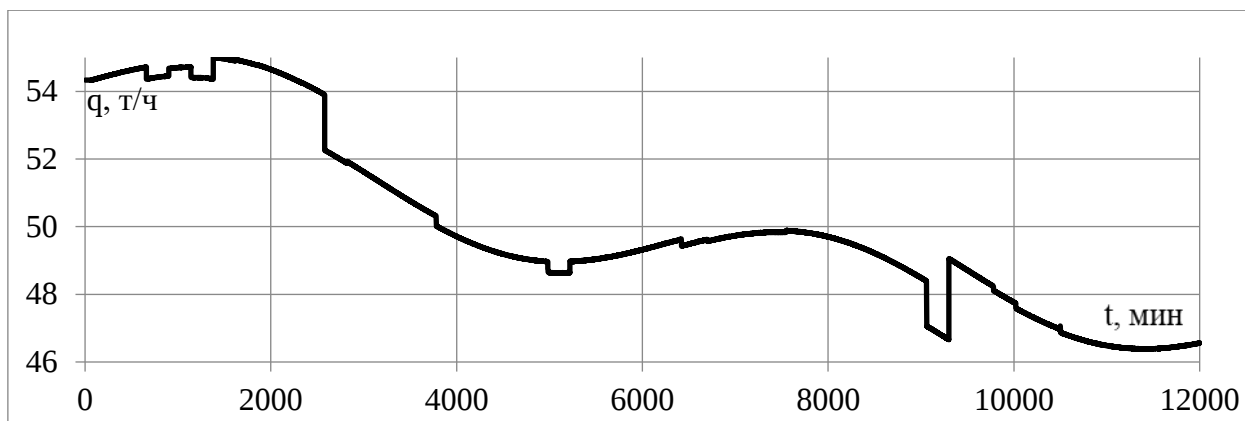


Рисунок 40. График изменения производительности дискового вакуум-фильтра (q); (t – время)

По графику изменения производительности дискового вакуум-фильтра, представленному на рисунке 40, видно, что данный параметр имеет ступенчатость, вызванную ступенчатым изменением частоты вращения дисков, плотности пульпы и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка, которое в свою очередь вызвано использованием лабораторного анализа влажности и гранулометрического состава осадка. В среднем производительность дискового вакуум-фильтра составляет 50,56 т/ч.

2.2.5 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВЛАЖНОСТИ ОСАДКА

Для выяснения как повлияет на протекание процесса обезвоживания железорудного концентрата внедрение разработанного модуля косвенного измерения в базовую систему управления процессом обезвоживания с ручным регулированием необходимо провести сравнительный анализ

функционирования моделей базовой системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с ручным регулированием и системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с автоматическим регулированием влажности осадка (АРВО). Модель первой системы управления уже разработана, поэтому разработаем математическую модель системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с АРВО.

В данной системе управления влажность осадка регулирует соответствующий контур, изменяя частоту вращения дисков фильтра. В данном контуре регулирования возмущением являются загрязнённость фильтроткани и гранулометрический состав концентрата в пульпе питания. В контуре было предложено использовать ПИ-закон регулирования. В ходе настройки регулятора были получены следующие параметры регулятора: $K_i = 120$ и $K_p = 180$. Полученная модель контура регулирования влажности осадка представлена на рисунке 41.

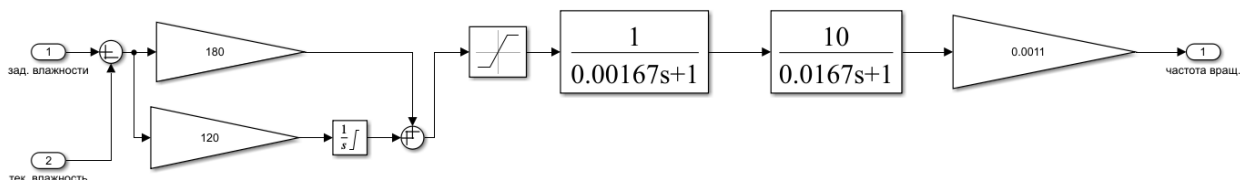


Рисунок 41. Модель контура регулирования влажности осадка

Для данного контура регулирования задание установим задание равное 9,7 % при предельно допустимом значении в 9,8 %. Разработанный контур регулирования влажности осадка позволит поддерживать данный технологический параметр на заданном уровне за счёт использования разработанного модуля косвенного измерения влажности осадка и производительности вакуум-фильтра, который производит измерения 1 раз в минуту. Данное обстоятельство позволяет уменьшить запас по влажности и поддерживать влажность на уровне близком к максимальному. Это должно привести к повышению частоты вращения дисков, а, следовательно, и производительности вакуум-фильтра.

При разработке модели системы управления с АРВО необходимо учесть, что при работе дисковых вакуум-фильтров гранулометрический состав осадка измеряется один раз в 4 часа, время проведения лабораторного анализа составляет 3 часа. На основе полученных данных в результате лабораторного анализа плотность пульпы и положение задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка регулируются вручную. Плотность пульпы питания вакуум-фильтров поддерживается на заданном уровне с помощью систем автоматики. Принцип работы контуров регулирования уровня и плотности пульпы в резервуаре пульпы такой же, как и у базовой системы управления с ручным регулированием. Уровень пульпы питания в пульподелителе и ванне вакуум-фильтров поддерживается за счёт перелива. Производительность дисковых вакуум-фильтров не регулируется. Модель контуров регулирования уровня и плотности пульпы в резервуаре пульпы представлена на рисунке 32.

В модели системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с АРВО действия оператора, связанные с регулированием плотности пульпы и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка описаны в блоке Signal Builder.

Для определения параметров о качестве управления процессом обезвоживания железорудного концентрата таких как: суммарная производительность, текущая средняя производительность и общая средняя производительность разработана схема, представленная на рисунке 33.

Полученная модель системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с АРВО представлена на рисунке 42.

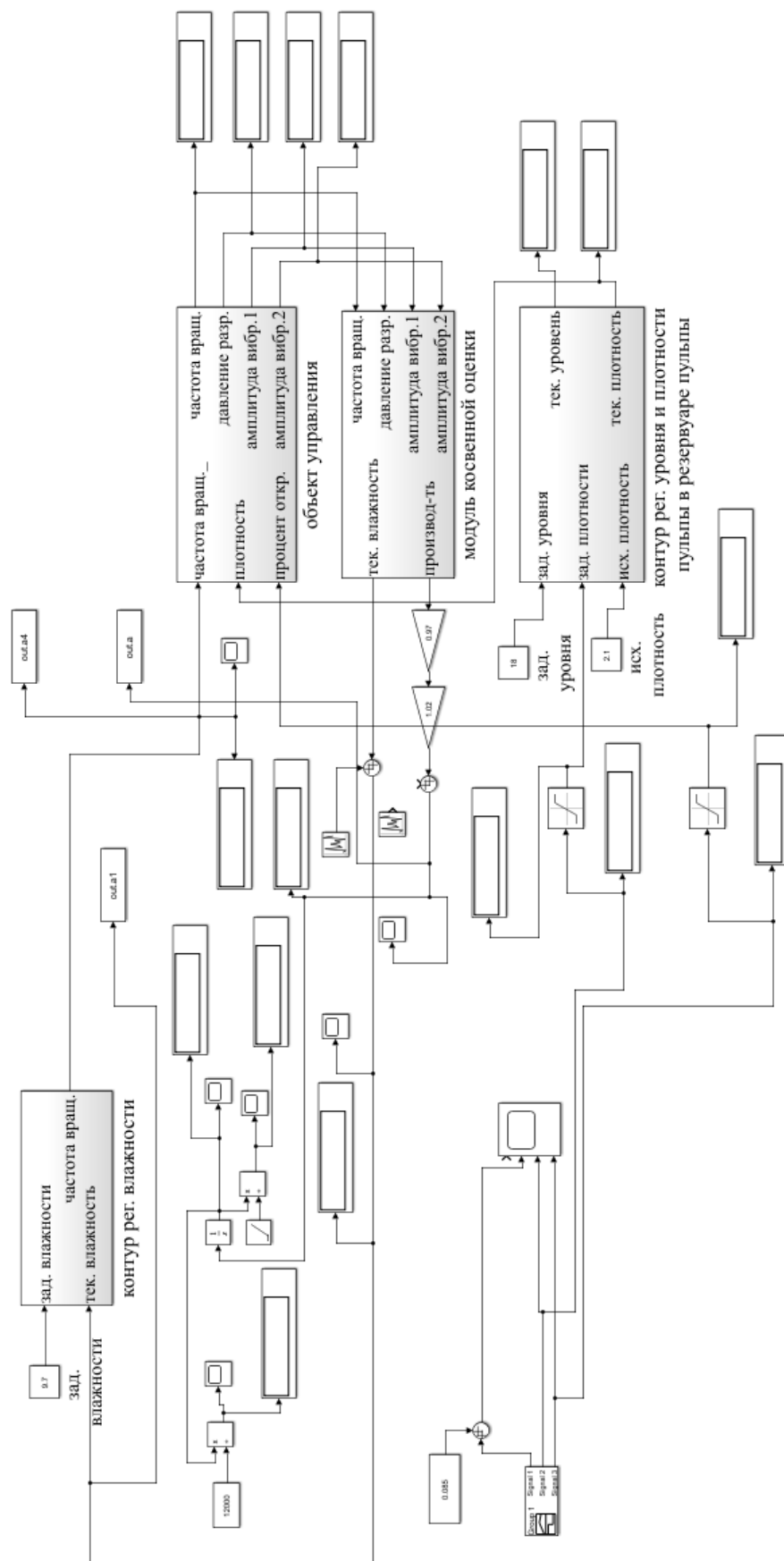


Рисунок 42. Модель системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с АРВО

2.2.6 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ВЛАЖНОСТИ ОСАДКА

Перед моделированием работы системы управления с автоматическим регулированием влажности было проведено тестирование контура регулирования данного параметра. Тестирование контура регулирования уровня и плотности в резервуаре пульпы проводилось в данном исследовании ранее.

С целью тестирования разработанного контура регулирования влажности осадка были проведены эксперименты с изменением возмущений и задания. Возмущениями для данного контура являются изменения заданий плотности пульпы и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зоне набора осадка. Сначала задание плотности пульпы ρ_z в момент времени 20 минут было изменено с 1,93 т/м³ до 1,94 т/м³ потом в момент времени 500 минут — с 1,94 т/м³ до 1,93 т/м³. Затем в момент времени 1000 минут задание положения задвижки h_z было изменено с 75 % до 90 % с последующем снижением до 75 % в момент времени 1050 минут.

После этого было изменено задание для контура регулирования влажности осадка в момент времени 1100 минут с 9,7 % до 9,6 %. Полученные в ходе эксперимента графики влажности осадка W , заданий плотности пульпы ρ_z и положения задвижки h_z , представлены на рисунке 43.

По графику влажности осадка, представленному на рисунке 43, видно, что при изменении возмущений, а именно, заданий плотности пульпы в резервуаре пульпы и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения (период времени с 20 минут до 1100 минут) влажность осадка поддерживается на задании.

При смене величины задания контур регулирования влажности осадка выходит на новое задание в момент времени 1100 минут за 0,1 минуты без перерегулирования, колебательности и статической ошибки.

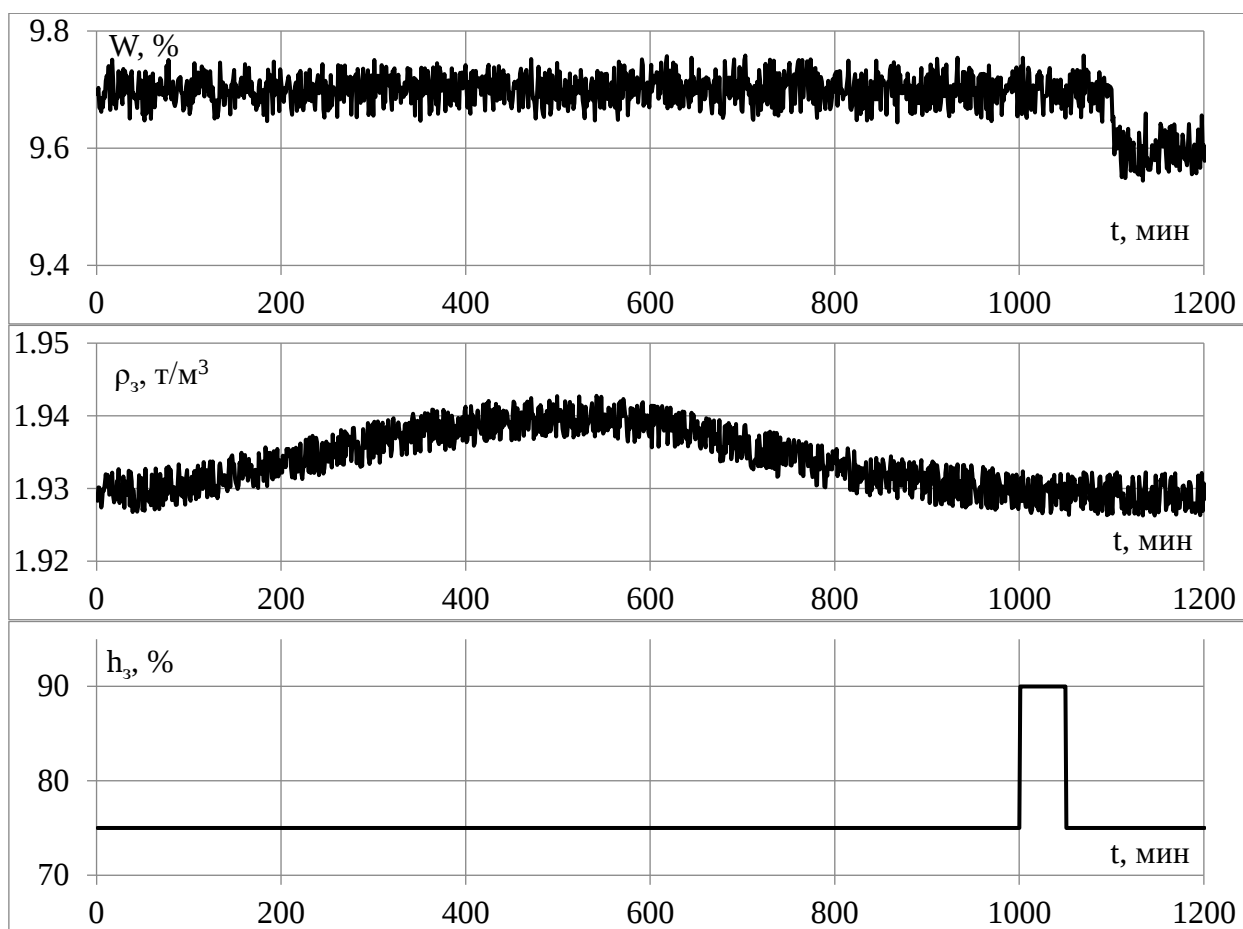


Рисунок 43. Графики влажности осадка (W), заданий плотности пульпы (ρ_3) и положения задвижки (h_3) при использовании СУ с АРВО; (t – время)

По результатам проведённых опытов, можно сделать вывод, что структура и коэффициенты регулятора, входящих в состав контура регулирования влажности осадка, выбраны верно.

После тестирования контура регулирования влажности осадка, было проведено моделирование всей системы управления с АРВО.

Изменения основных регулируемых технологических параметров процесса обезвоживания железорудного концентрата, изменяемых вручную, плотность пульпы питания и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения описываются графиками, представленными на рисунке 44.

Моделирование системы управления с АРВО проводилось в течение 12000 минут. Задание для контура регулирования уровня пульпы в резервуаре пульпы было установлено равным 18 м. При моделировании гранулометрический состав концентрата менялся синусоидально, а загрязнённость – линейно.

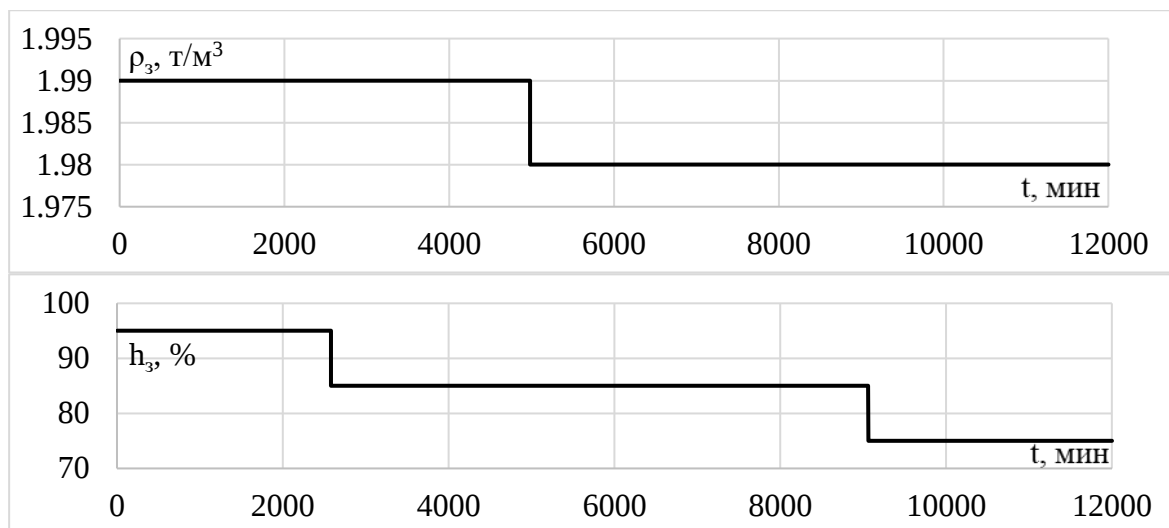


Рисунок 44. Графики плотности пульпы (ρ_3) и положения задвижки (h_3); (t – время)

В результате моделирования работы системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с АРВО были получены следующие графики, представленные на рисунках 45 – 47.

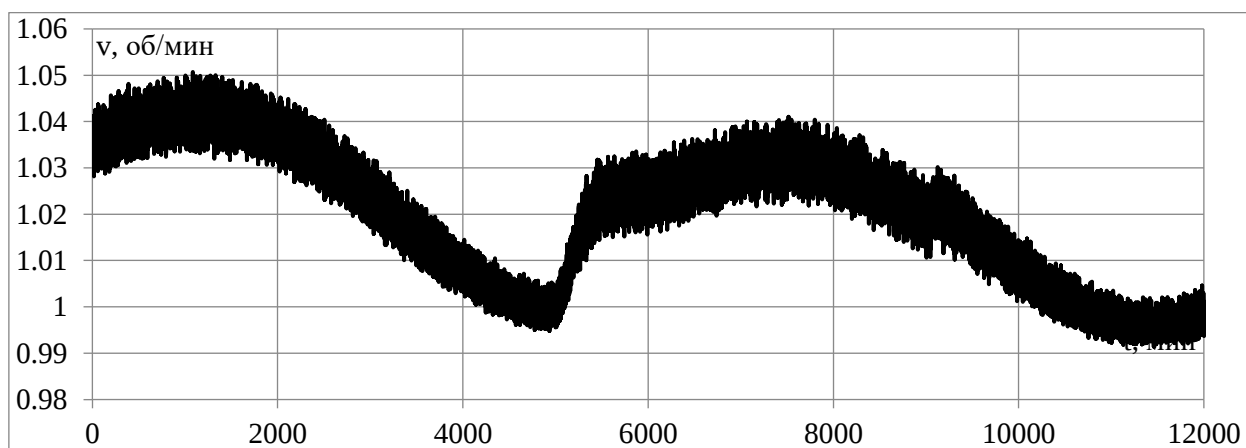


Рисунок 45. График частоты вращения дисков (ν) при использовании СУ с АРВО;
(t – время)

По графику изменения частоты вращения дисков фильтра при использовании разработанной системы управления с АРВО, представленному на рисунке 45, было установлено, что данная величина имеет среднее значение равное 1,02 об/мин, что на 8,17 % больше среднего значения частоты вращения дисков фильтра при использовании базовой системы управления.

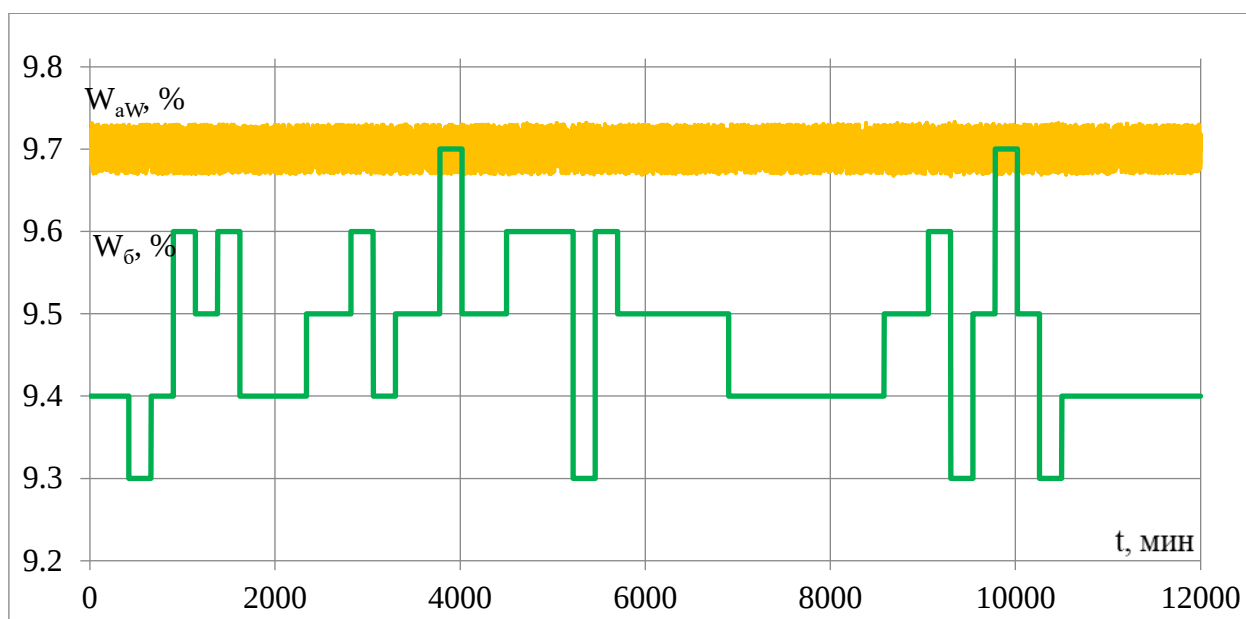


Рисунок 46. График изменения влажности осадка при использовании базовой СУ (W_6) и СУ с АРВО (W_{aw}); (t – время)

На рисунке 46 представлены следующие графики: зелёный — график изменения влажности осадка при использовании базовой системы управления, оранжевый — график изменения влажности осадка при использовании системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с АРВО. По оранжевому графику видно, что при использовании системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с АРВО данный параметр в среднем поддерживается на заданном уровне. При этом наблюдаются отклонения величины влажности от задания до 0,03 %. Данные отклонения минимальны и практически не влияют на качество управления дисковым вакуум-фильтром. По зелёному графику видно, что влажность осадка при использовании базовой системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата в среднем поддерживается на уровне 9,5 % с отклонениями от среднего значения до 0,2 %. Данный фактор является следствием применения лабораторного анализа влажности, проводимого с малой периодичностью и большим запаздыванием.

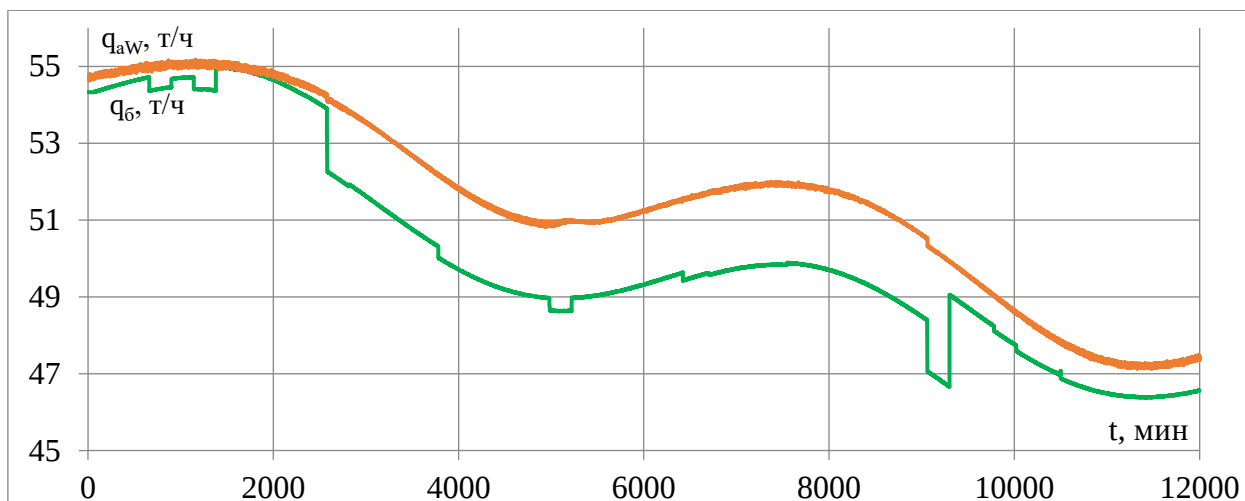


Рисунок 47. График производительности дискового вакуум-фильтра при использовании базовой СУ (q_b) и СУ с АРВО (q_{aw}); (t – время)

На рисунке 47 приведены следующие графики: зелёный — график изменения производительности вакуум-фильтра при использовании базовой системы управления, оранжевый — график изменения производительности вакуум-фильтра при использовании системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с АРВО.

По графику изменения производительности вакуум-фильтра при использовании системы управления с АРВО было установлено, что данная величина имеет среднее значение равное 51,54 т/ч, что на 1,9 % больше среднего значения производительности фильтра при использовании базовой системы управления. Отсюда можно сделать вывод, что увеличение задания влажности осадка дало ожидаемый эффект, производительность дискового вакуум-фильтра увеличилась.

2.2.7 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

Для проведения сравнительного анализа функционирования базовой системы управления с ручным управлением, системы управления с АРВО и разработанной системы управления также построим математическую модель разработанной системы управления процессом обезвоживания с

индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-филтра.

При построении модели разработанной системы управления необходимо учесть, что при работе дисковых вакуум-фильтров влажность осадка измеряется 1 раз в минуту. Частота вращения дисков филтра, положение задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка, плотность и уровень пульпы в ванне вакуум-филтра, а также уровень пульпы в пульподелителе регулируются автоматически.

Производительность вакуум-филтра поддерживается на максимальном уровне изменением заданий плотности пульпы в ванне филтра и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка.

Отличительная особенность разработанной системы управления процессом обезвоживания является то, что плотность пульпы в ванне вакуум-филтра и положение задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зоне набора осадка поддерживается на требуемом уровне индивидуально для каждого дискового вакуум-филтра, что в итоге приводит к повышению качества управления процессом, а впоследствии к росту производительности филтров и снижению колебаний влажности осадка.

В ходе данного исследования для модели разработанной системы управления процессом обезвоживания были получены модели контуров регулирования уровня и плотности пульпы в ванне вакуум-филтра, регулирования уровня в пульподелителе, регулирования положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения и регулирования влажности осадка.

Для всех контуров был выбран ПИ-регулятор, так как он даёт высокое качество регулирования и при этом не сложен в настройке как ПИД-регулятор. Ограничения управлений регуляторов в рассматриваемых контурах регулирования было задано с помощью блоков Saturation. Возмущением для объекта управления является изменение суммарного

удельного сопротивления осадка и фильтроткани. Изменение удельного сопротивления осадка вызвано изменением гранулометрического состава концентрата, а изменение удельного сопротивления фильтроткани — её загрязнённостью. Погрешность измерения в контурах регулирования описывается с помощью блока Uniform Random Number.

Контур регулирования уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра регулирует его, влияя на расход пульпы и воды в ванну фильтра изменением положения задвижек. Контур регулирования плотности пульпы в ванне вакуум-фильтра регулирует данный параметр изменением соотношения «вода-пульпа». В контуре регулирования уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра возмущение имитирует изменение расхода пульпы из ванны. Данное изменение расхода может быть вызвано изменением гранулометрического состава концентрата в пульпе питания фильтра. В ходе настройки регуляторов были получены следующие параметры: $K_i = 25$ и $K_p = 45$ — для регулятора уровня пульпы. Полученная модель контуров регулирования уровня и плотности пульпы в ванне вакуум-фильтра представлена на рисунке 48.

Контур регулирования положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка вычисляет управляющее воздействие для МЭО задвижки с помощью трёхпозиционного реле. Полученная модель контура регулирования положения задвижки представлена на рисунке 49.

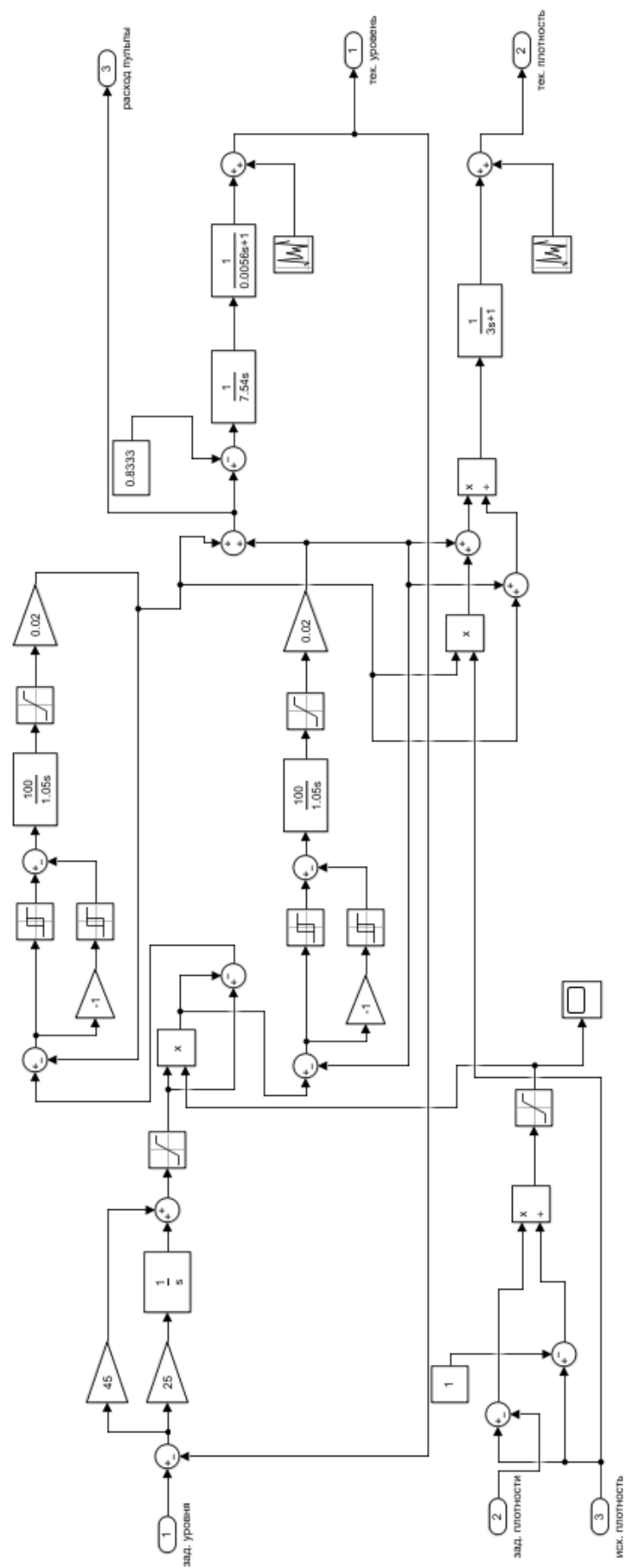


Рисунок 48. Модель контуров регулирования плотности и уровня пульпы в ванне дискового вакуум-фильтра

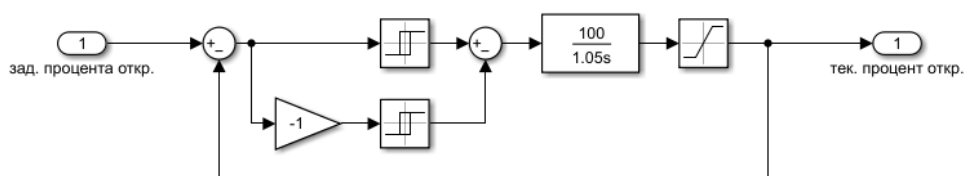


Рисунок 49. Модель контура регулирования положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка

Контур регулирования уровня пульпы в пульподелителе регулирует уровень, влияя на расход пульпы изменением частоты вращения вала электропривода насоса. В контуре регулирования уровня пульпы в пульподелителе возмущение имитирует изменение расхода пульпы из пульподелителя. Данное изменение расхода может быть вызвано запуском или остановом вакуум-фильтров. В ходе настройки регуляторов были получены следующие параметры регулятора: $K_i = 25$ и $K_p = 80$. Полученная модель контура регулирования уровня пульпы в пульподелителе представлена на рисунке 50.

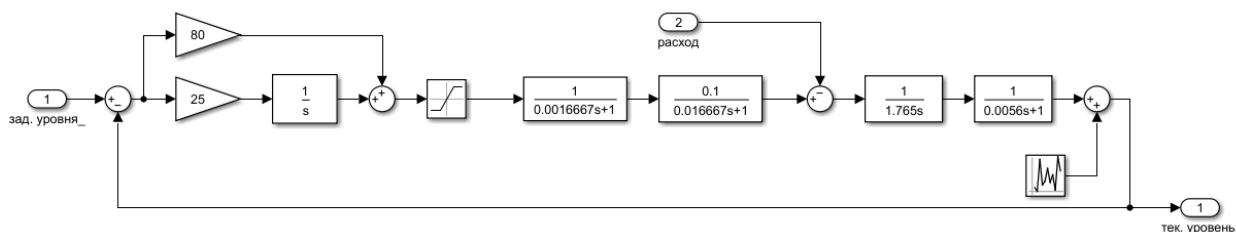


Рисунок 50. Модель контура регулирования уровня пульпы в пульподелителе

Контур регулирования влажности осадка регулирует данный параметр, изменяя частоту вращения дисков фильтра. В данном контуре регулирования возмущением являются смена заданий в контурах регулирования плотности пульпы и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка, а также загрязнённость фильтроткани и гранулометрический состав концентрата в пульпе питания. Изменение заданий для данных контуров вызвано работой многопараметрического экстремального регулятора, входящего в состав контура регулирования производительности вакуум-фильтра. В ходе настройки регулятора были получены следующие параметры: $K_i = 120$ и $K_p = 180$. Полученная модель контура регулирования влажности осадка представлена на рисунке 41.

Для данного контура регулирования задание установим задание равно 9,7 % (предельно допустимое значение равно 9,8 %). Разработанная система управления процессом обезвоживания позволит поддерживать влажность осадка на требуемом уровне за счёт применения разработанного МКИ. Данное обстоятельство позволит, уменьшив запас по влажности, повысить частоту вращения дисков, а, следовательно, и производительность вакуум-фильтра.

В контуре регулирования производительности вакуум-фильтра будет использоваться многопараметрический шаговый экстремальный регулятор, функционирующий на основе метода покоординатного подъёма и производящий поиск экстремума (максимума) производительности вакуум-фильтра, меняя задания для контуров регулирования плотности пульпы в ванне фильтра и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка.

Метод покоординатного подъёма заключается в поочередном изменении управляемых каналов (плотности пульпы и положения задвижки) с целью определения частных экстремумов основного параметра (производительности).

Принцип действия многопараметрического шагового экстремального регулятора следующий: по результатам каждого шага – изменения задания плотности пульпы или положения задвижки – выполняется сравнение текущего значения производительности и его значения на предыдущем шаге работы системы; в случае если производительность увеличилась, следующий шаг системой производится в том же направлении, в противном случае производится изменение направления шага на противоположный.

Алгоритм работы многопараметрического экстремального регулятора представлен на рисунке 51. Программа, реализующая работу многопараметрического экстремального регулятора представлена в приложении Г.

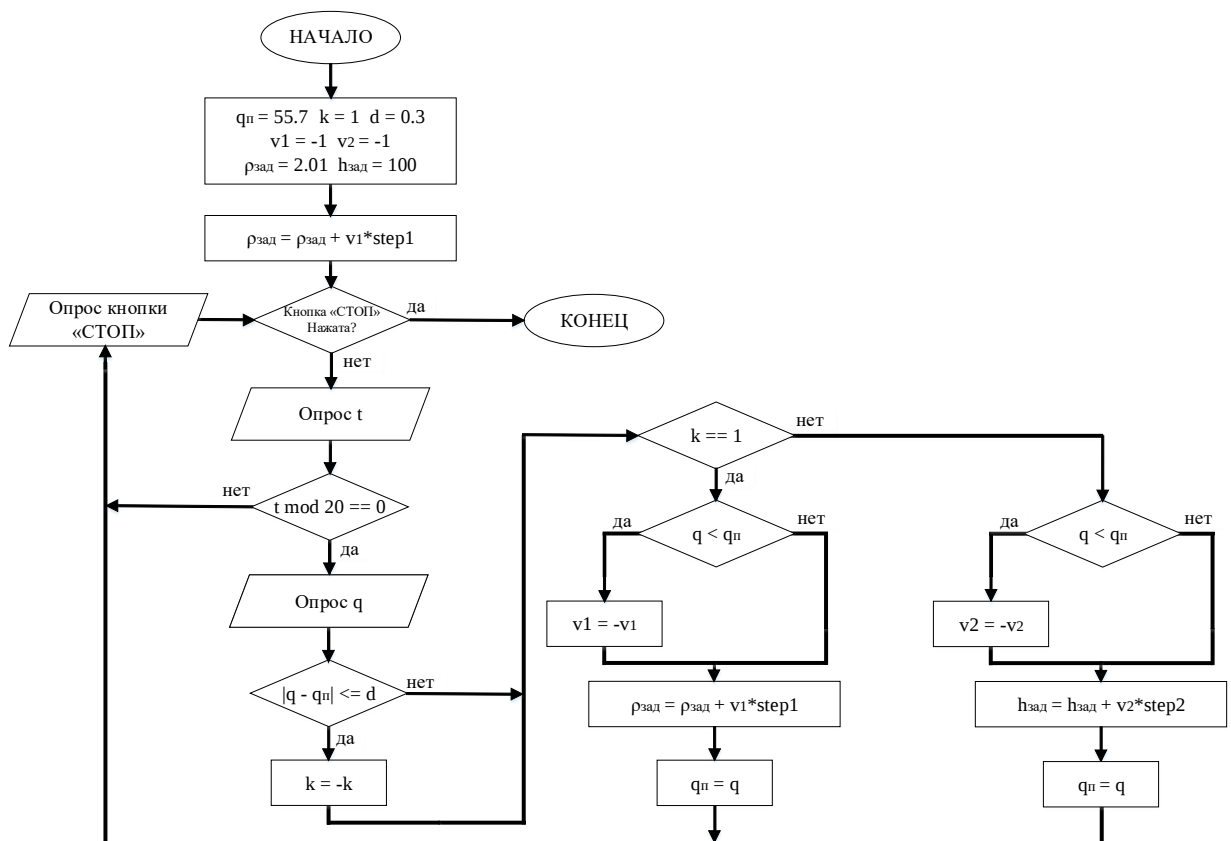


Рисунок 51. Алгоритм работы многопараметрического экстремального регулятора

Для определения параметров о качестве управления процессом обезвоживания таких как: суммарная производительность, текущая средняя производительность и общая средняя производительность разработана схема, представленная на рисунке 33. Полученная модель разработанной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с использованием многопараметрического экстремального регулятора представлена на рисунке 52.

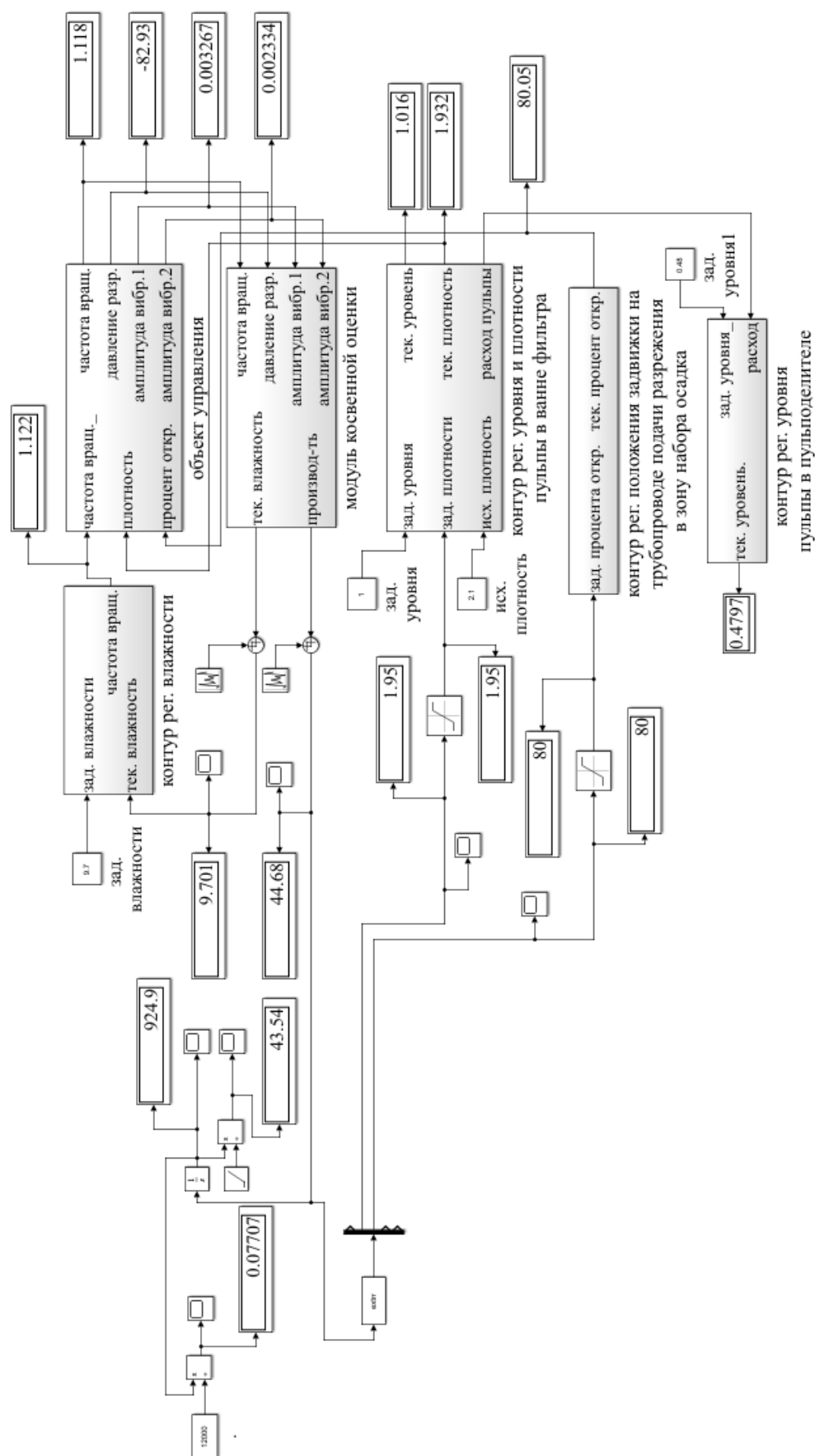


Рисунок 52. Модель разработанной системы управления процессом обезвоживания
железрудного концентрата с использованием многопараметрического экстремального регулятора

2.2.8 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

Перед моделированием работы всей разработанной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата было проведено тестирование контуров регулирования уровня и плотности в ванне вакуум-фильтра, уровня пульпы в пульподелителе, положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка, влажности осадка и анализ их влияния друг на друга.

При тестировании контуров регулирования уровня и плотности пульпы в ванне вакуум-фильтра в первом опыте было изменено задание плотности пульпы с $1,93 \text{ т/м}^3$ на $1,94 \text{ т/м}^3$ на 20 минуте и с $1,94 \text{ т/м}^3$ на $1,93 \text{ т/м}^3$ на 60 минуте. Графики плотности $\rho_{п.в.}$ и уровня $h_{п.в.}$ пульпы в ванне фильтра, полученные в ходе данного опыта представлены на рисунке 53.

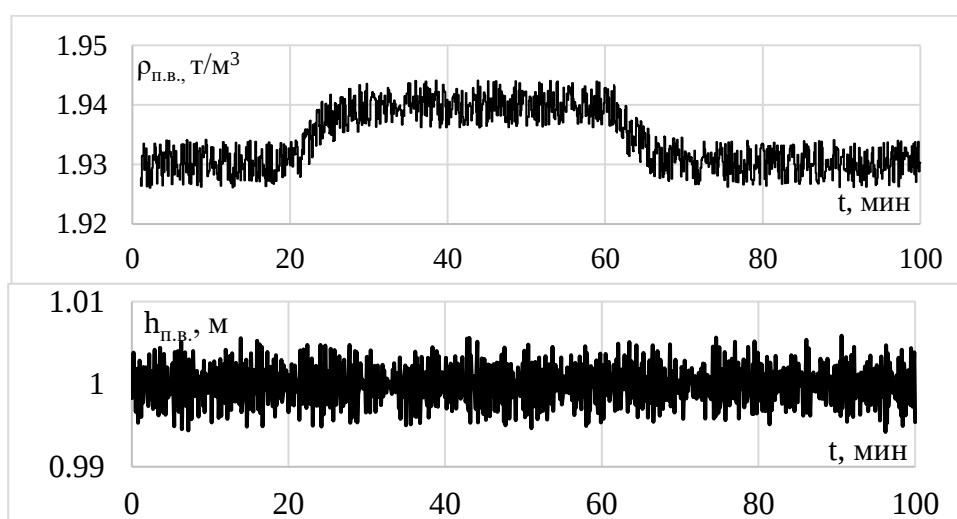


Рисунок 53. Графики текущих плотности ($\rho_{п.р.}$) и уровня ($h_{п.р.}$) пульпы в ванне вакуум-фильтра при изменении задания плотности пульпы; (t – время)

По графику, представленному на рисунке 53, видно, контур регулирования плотности пульпы в ванне фильтра выходит на новое задание в момент времени 20 и 60 минут за 8 минут без перерегулирования. Колебательность и статическая ошибка при этом отсутствуют. По графику изменения уровня пульпы в ванне фильтра видно, что контур регулирования уровня пульпы в моменты смены задания плотности пульпы стабильно поддерживает уровень на задании.

При тестировании контуров регулирования уровня и плотности пульпы в ванне вакуум-фильтра во втором опыте было изменено возмущение, действующее на контур регулирования уровня в ванне фильтра в момент времени 20 минут расход пульпы из ванны вырос на $0,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ с $0,8333 \text{ м}^3/\text{мин}$ до $0,917 \text{ м}^3/\text{мин}$, а затем в момент времени 60 минут упал на $0,5 \text{ м}^3/\text{мин}$. Графики плотности $\rho_{п.в.}$ и уровня $h_{п.в.}$ пульпы в ванне фильтра, полученные в ходе второго опыта представлены на рисунке 54.

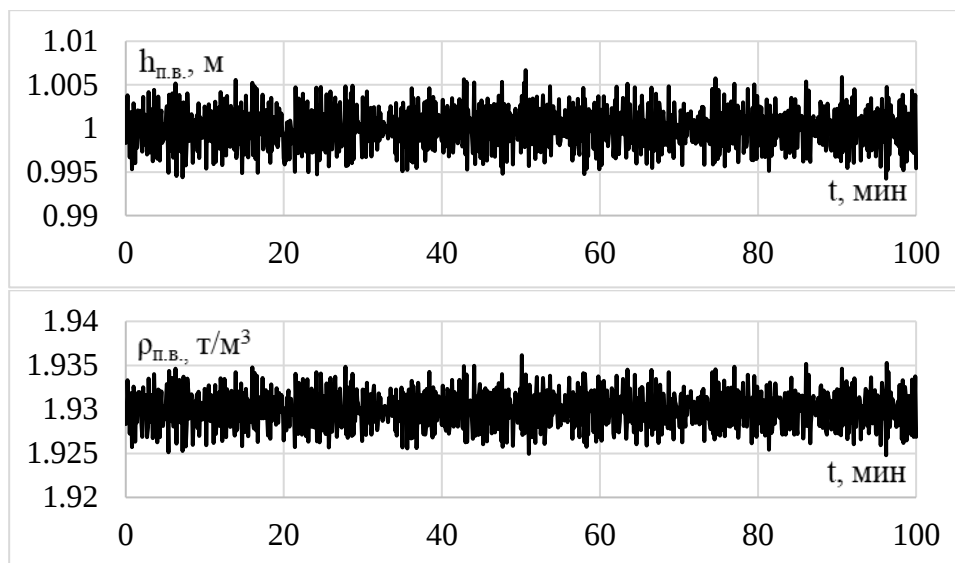


Рисунок 54. Графики текущих плотности ($\rho_{п.р.}$) и уровня ($h_{п.р.}$) пульпы при изменении возмущения на контур регулирования уровня; (t – время)

По графику изменения уровня пульпы в ванне фильтра на рисунке 54 видно, что в моменты времени 20 и 60 минут в момент смены возмущения контур регулирования уровня пульпы в резервуаре пульпы удерживает систему на задании. По графику изменения плотности пульпы в ванне фильтра видно, что при изменении возмущения, действующего на контур регулирования уровня пульпы в ванне фильтра контур регулирования плотности пульпы поддерживает её на требуемом уровне.

При тестировании контура регулирования уровня пульпы в пульподелителе было изменено возмущение, действующее на контур. В момент времени 30 минут расход пульпы из ванны вырос на $0,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ с $7,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ до $8 \text{ м}^3/\text{мин}$, а затем в момент времени 60 минут упал на $0,5 \text{ м}^3/\text{мин}$.

График уровня $h_{п.п.}$ пульпы в пульподелителе, полученный в ходе эксперимента представлен на рисунке 55.

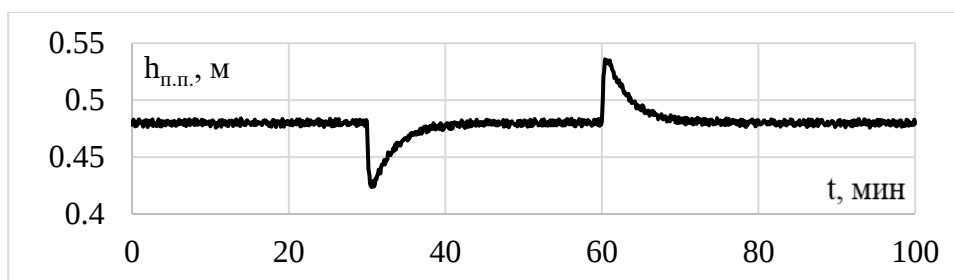


Рисунок 55. График уровня пульпы ($h_{п.п.}$) в пульподелителе при изменении возмущения на контур

По графику, представленному на рисунке 55, видно, контур регулирования уровня пульпы в пульподелителе в момент изменения возмущения уровень отклоняется от задания на 5 см и возвращается на требуемое значение за 9 минут. Колебательность и статическая ошибка при этом отсутствуют.

Для тестирования контура регулирования положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка было изменено задание в момент времени 10 минут с 75 % до 90 %, а затем в момент времени 20 минут с 90 % до 80 %. График положения задвижки h , полученный в ходе эксперимента представлен на рисунке 56.

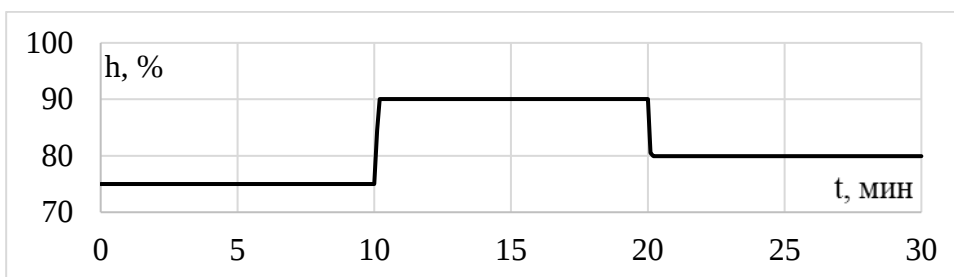


Рисунок 56. График положения задвижки (h) при изменении задания

По графику, представленному на рисунке 44, видно, контур регулирования положения задвижки выходит на новое задание в момент времени 10 минут за 0,16 минуты, в момент времени 20 минут за 0,1 минуты без перерегулирования. Колебательность и статическая ошибка при этом отсутствуют.

С целью тестирования разработанного контура регулирования влажности осадка были проведены эксперименты с изменением возмущений и задания. Возмущениями для данного контура являются изменения заданий плотности пульпы и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зоне набора осадка. Сначала задание плотности пульпы ρ_3 в момент времени 20 минут было изменено с 1,93 т/м³ до 1,94 т/м³ потом в момент времени 40 минут — с 1,94 т/м³ до 1,93 т/м³. Затем в момент времени 60 минут задание положения задвижки h_3 было изменено с 75 % до 90 % с последующем снижении до 70 % в момент времени 80 минут.

После этого было изменено задание для контура регулирования влажности осадка в момент времени 100 минут с 9,7 % до 9,6 %. Полученные в ходе эксперимента графики влажности осадка W , заданий плотности пульпы ρ_3 и положения задвижки h_3 , представлены на рисунке 57.

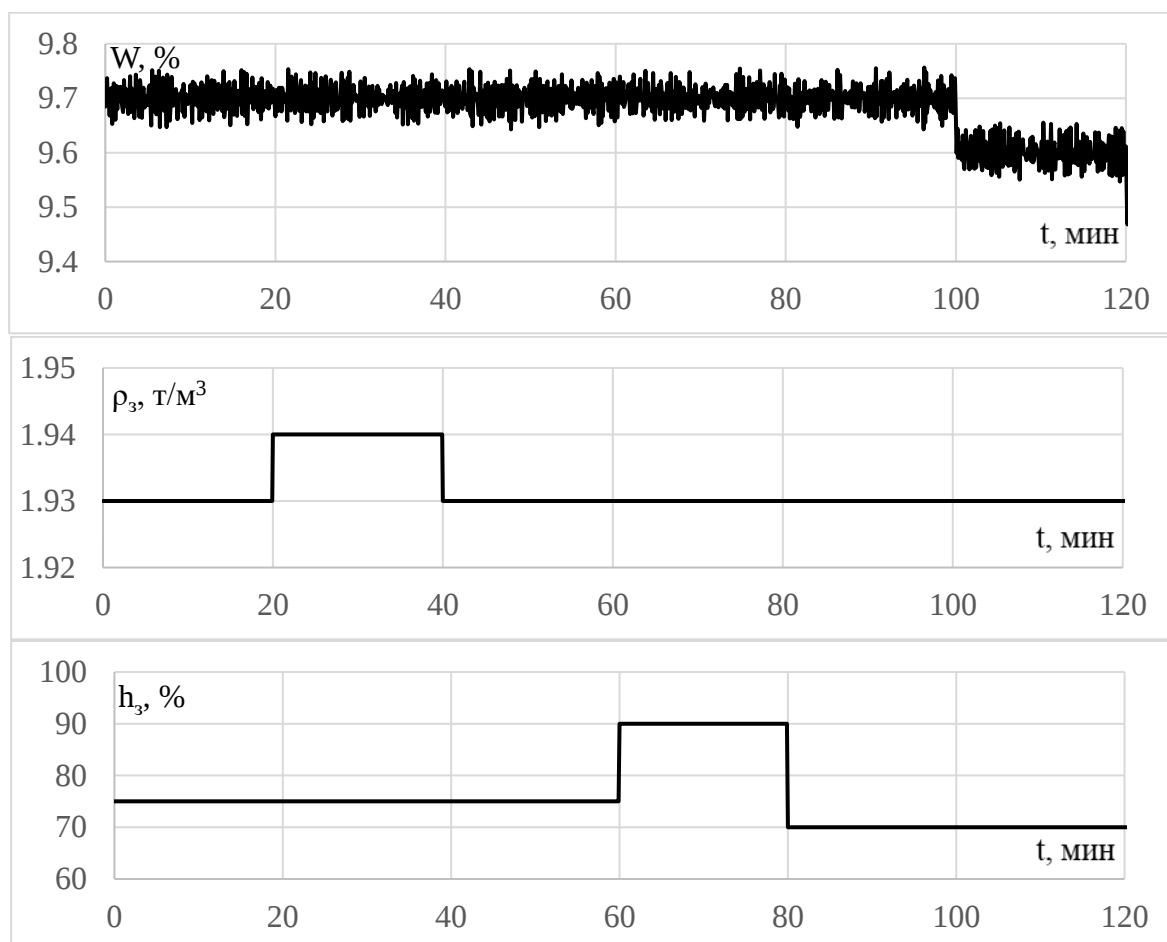


Рисунок 57. Графики влажности осадка (W), заданий плотности пульпы (ρ_3) и положения задвижки (h_3); (t – время)

По графику влажности осадка, представленному на рисунке 57, видно, что при изменении возмущений, а именно, заданий плотности пульпы в ванне фильтра и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения (период времени с 20 минут до 80 минут) влажность осадка поддерживается на задании.

При смене величины задания контур регулирования влажности осадка выходит на новое задание в момент времени 100 минут за 0,1 минуты без перерегулирования. Колебательность и статическая ошибка при этом отсутствуют.

По результатам проведённой серии опытов, можно сделать вывод, что структура и коэффициенты регуляторов, входящих в состав контуров регулирования уровня пульпы в ванне фильтра, уровня в пульподелителе, положения задвижки и влажности осадка, выбраны верно.

После тестирования контуров регулирования, входящих в состав базовую систему управления процессом обезвоживания железорудного концентрата, было проведено моделирование всей разработанной системы управления.

Моделирование разработанной системы управления процессом обезвоживания проводилось в течение 12000 минут. Задание для контура регулирования уровня пульпы в пульподелителе было установлено равным 0,48 м, в контуре регулирования уровня в ванне фильтра — 1 м, в контуре регулирования влажности осадка — 9,7 %. При моделировании гранулометрический состав концентрата менялся синусоидально, а загрязнённость — линейно (возмущения на объект управления).

В результате моделирования разработанной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата были получены следующие графики, представленные на рисунках 58-61.

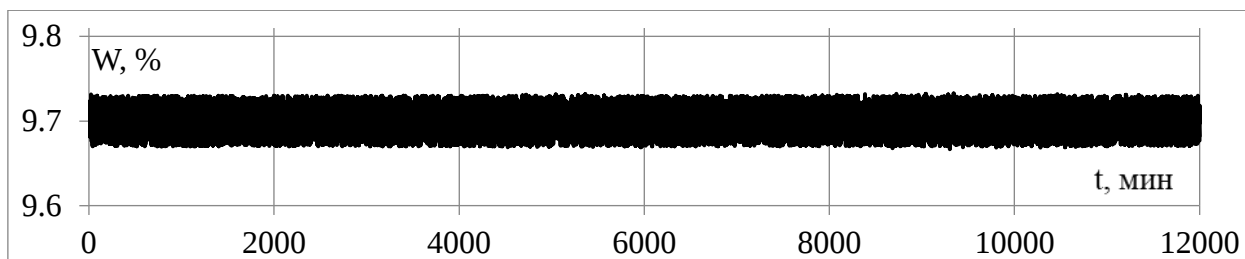


Рисунок 58. График изменения влажности осадка при использовании разработанной СУ с ЭР (W); (t – время)

По графику на рисунке 58 видно, что при использовании разработанной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата влажность в среднем поддерживается на заданном уровне. При этом наблюдаются отклонения величины влажности от задания до 0,03 %.

При моделировании было установлено, что при использовании разработанной системы управления частота вращения дисков фильтра имеет среднее значение равное 1,012 об/мин, что на 7,32 % больше среднего значения частоты вращения дисков фильтра при использовании базовой системы управления.

Отсюда можно сделать вывод, что увеличение задания влажности осадка привело к увеличению среднего значения частоты вращения дисков, что должно дать увеличение производительности дискового вакуум-фильтра. График данного параметра представлен на рисунке 59.

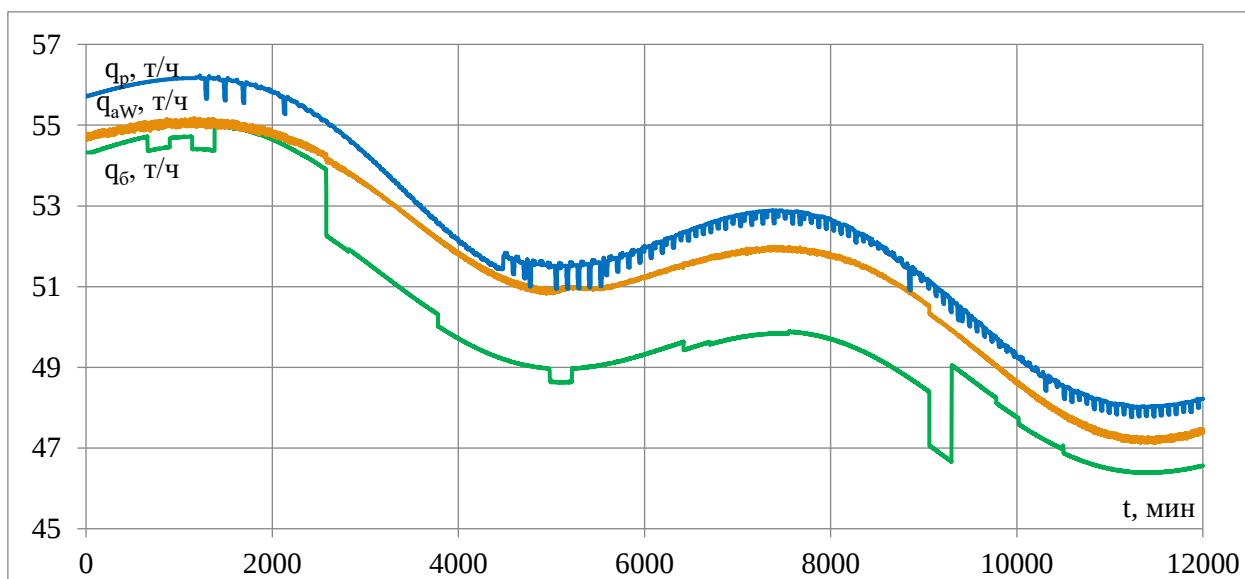


Рисунок 59. График производительностей вакуум-фильтра при использовании базовой СУ ($q_б$), СУ с АРВО (q_{aw}) и СУ с ЭР (q_p); (t – время)

На рисунке 59 приведены следующие графики: зелёный — график изменения производительности вакуум-фильтра при использовании базовой системы управления, оранжевый — график изменения производительности вакуум-фильтра при использовании системы управления с АРВО, синий — график изменения производительности вакуум-фильтра при использовании разработанной системы управления с многопараметрическим шаговым экстремальным регулятором.

По графику изменения производительности вакуум-фильтра при использовании разработанной системы управления с многопараметрическим экстремальным регулятором было установлено, что данная величина имеет среднее значение равное 52,29 т/ч, что на 1,5 % больше среднего значения производительности фильтра при использовании системы управления с АРВО и на 3,4 % больше среднего значения производительности фильтра при использовании базовой системы управления. Отсюда можно сделать вывод, что внедрение индивидуального регулирования технологических параметров дискового вакуум-фильтра таких как: плотность пульпы и положение задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка дало ожидаемый эффект, производительность дискового вакуум-фильтра увеличилась.

Работа экстремального регулятора, заключающаяся в подборе оптимальных значений заданий плотности пульпы и положения задвижки, представлена на рисунках 60 и 61.

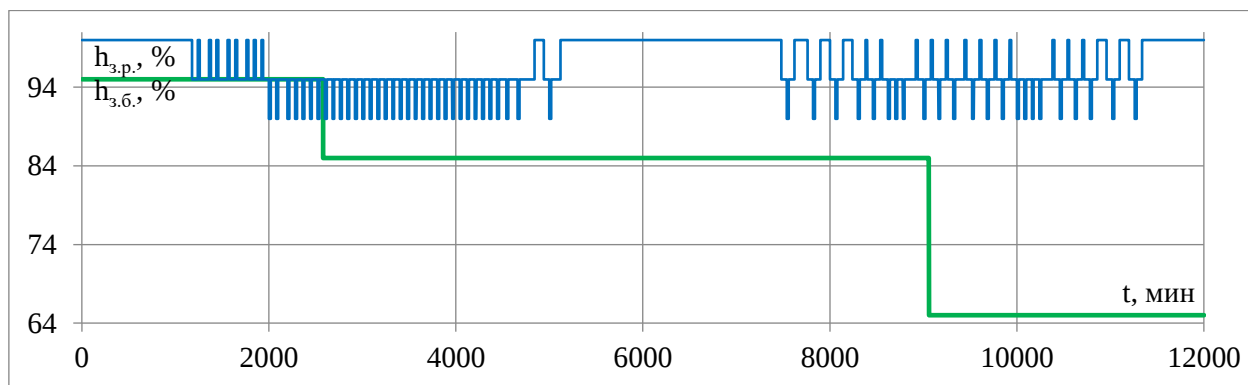


Рисунок 60. Графики заданий положения задвижки при использовании базовой СУ ($h_{3.б}$) и СУ с ЭР ($h_{3.р}$); (t – время)

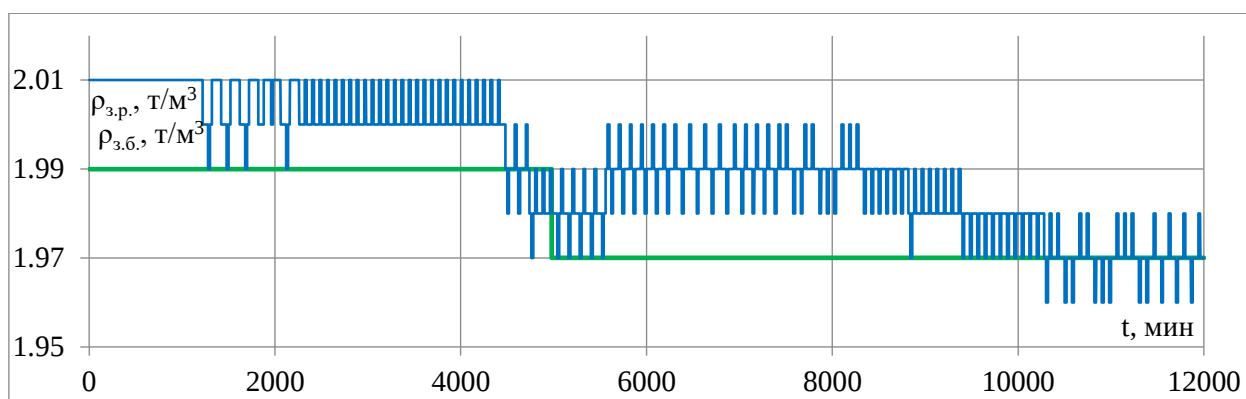


Рисунок 61. Графики заданий плотности пульпы при использовании базовой СУ ($\rho_{з.б.}$) и СУ с ЭР ($\rho_{з.р.}$); (t – время)

По графикам на рисунках 60 и 61 можно сделать вывод, что многопараметрический экстремальный регулятор работает качественно, определяя экстремум производительности вакуум-фильтра при изменении крупности концентрата в пульпе питания и загрязнённости фильтроткани. Характер данных возмущений хорошо заметен графиках на рисунке 59. Здесь синусоидально меняется крупность концентрата в пульпе питания и линейно загрязнённость фильтроткани.

По графику задания положения задвижки, представленному на рисунке 60, видно, что данное задание уменьшается со снижением гранулометрического состава концентрата в пульпе питания (от 2000 до 5000 минут и от 7500 до 11500 минут) и возрастает с увеличением гранулометрического состава концентрата (от 0 до 2000 минут и от 5000 до 7500 минут).

По графику задания плотности пульпы, представленному на рисунке 61, видно, что данное задание уменьшается в течение всего эксперимента при увеличении загрязнённости фильтроткани.

Также по графикам задания плотности пульпы питания и положения задвижки видно, что многопараметрический экстремальный регулятор при своей работе постоянно переключает данные задания. Это обстоятельство приводит к большому пробегу исполнительных механизмов (приводов и задвижек, регулирующих разрежение в зоне набора осадка и подачу воды и пульпы в ванну вакуум-фильтра), а следовательно, к их ускоренному износу.

Также постоянные переключения заданий плотности пульпы и положения задвижки приводят к нарушениям работы контура регулирования влажности осадка. В результате наблюдаются колебания влажности осадка, частоты вращения дисков и, как следствие, производительности вакуум-фильтра. Чтобы устранить данный фактор в исследовании предлагается разработать блок управления экстремальным регулятором, который отключал бы его на определённые промежутки времени.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

В ходе проведённого исследования во второй главе была разработана система автоматического управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра, в состав которой входят следующие контуры регулирования: влажности осадка, плотности и уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра, положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка, уровня пульпы в пульподелителе, производительности дискового вакуум-фильтра

Также была произведена разработка модуля косвенного измерения влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра. Было установлено, что в качестве модуля косвенного измерения влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра на основе выявления зависимостей технологических параметров процесса обезвоживания железорудного концентрата целесообразно использовать многослойную нейронную сеть, обладающую свойством выявления скрытых зависимостей.

Затем была произведена разработка модели объекта управления. В результате проведённого исследования было установлено, что в качестве модели дискового вакуум-фильтра также может быть использована многослойная нейронная сеть.

В дальнейшем были построены модели базовой системы управления процессом обезвоживания, системы управления с АРВО и разработанной

системы управления процессом обезвоживания с многопараметрическим шаговым экстремальным регулятором и проведено моделирование их работы.

В результате моделирования было установлено, что при использовании разработанной системы управления процессом обезвоживания повышается качество осадка, выражающееся в отсутствии скачков влажности, а также увеличивается на 3,4 % производительность вакуум-фильтра по сравнению с базовой системой управления и на 1,5 % по сравнению системой управления с АРВО.

При моделировании также было установлено, что многопараметрический экстремальный регулятор работает качественно, определяя экстремум производительности вакуум-фильтра при изменении крупности концентрата в пульпе питания и загрязнённости фильтроткани. При этом он постоянно переключает данные задания. Это обстоятельство приводит к ускоренному износу приводов и задвижек, регулирующих разрежение в зоне набора осадка и подачу воды и пульпы в ванну вакуум-фильтра. Также постоянные переключения заданий плотности пульпы и положения задвижки приводят к нарушениям работы контура регулирования влажности осадка. В результате наблюдаются колебания частоты вращения дисков и, как следствие, производительности вакуум-фильтра.

Для преодоления данного фактора предлагается разработать блок управления экстремальным регулятором, который отключал бы его на определённые промежутки времени.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ С ГИБУЭР

3.1 РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

Для уменьшения количества переключений заданий плотности пульпы и положения задвижки, находящейся на трубопроводе подачи разреза в зону набора осадка с целью увеличения ресурса работы задвижек и их приводов в данном исследовании был разработан гибридный интеллектуальный блок управления экстремальным регулятором (ГИБУЭР), который будет отключать его на определённые периоды времени. Данный блок управления содержит в себе знания оператора, управляющего вакуум-фильтром.

Разработанный ГИБУЭР определяет момент, когда экстремальный регулятор найдёт экстремум производительности, и отключает регулятор. Затем на основе поступающих на его входы данных определяет момент включения экстремального регулятора, активный параметр (плотность или положение задвижки) и направление его шага (увеличение или уменьшение).

Разработанный гибридный интеллектуальный блок управления экстремальным регулятором имеет 5 входов.

По истории изменения производительности дискового вакуум-фильтра q блок управления экстремальным регулятором получает информацию о смещении её максимума.

Частота вращения дисков вакуум-фильтра v даёт блоку управления экстремальным регулятором информацию о текущем суммарном удельном сопротивлении осадка и фильтроткани, связанном с изменением с течением времени крупности концентрата в пульпе питания фильтра и загрязнением фильтроткани на его дисках.

На рисунке 62 представлена зависимость частоты вращения дисков от суммарного удельного сопротивления осадка и фильтроткани. При условии

поддержания влажности осадка на постоянном уровне и отсутствия изменений других технологических параметров вакуум-фильтра, таких как плотность пульпы и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения, увеличение загрязненности фильтроткани (её удельного сопротивления) приводит к снижению частоты вращения дисков фильтра (интервал от 0 до 12000 мин). Рост удельного сопротивления осадка, в условиях поддержания влажности осадка, плотности пульпы и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения на постоянном уровне приводит к снижению частоты вращения дисков фильтра (интервалы от 1600 до 5000 мин и от 7800 до 11500 мин) и наоборот снижение удельного сопротивления осадка при тех же условиях даёт рост частоты вращения дисков (интервалы от 0 до 1600 мин, от 5000 до 7800 мин и от 11500 до 12000 мин).

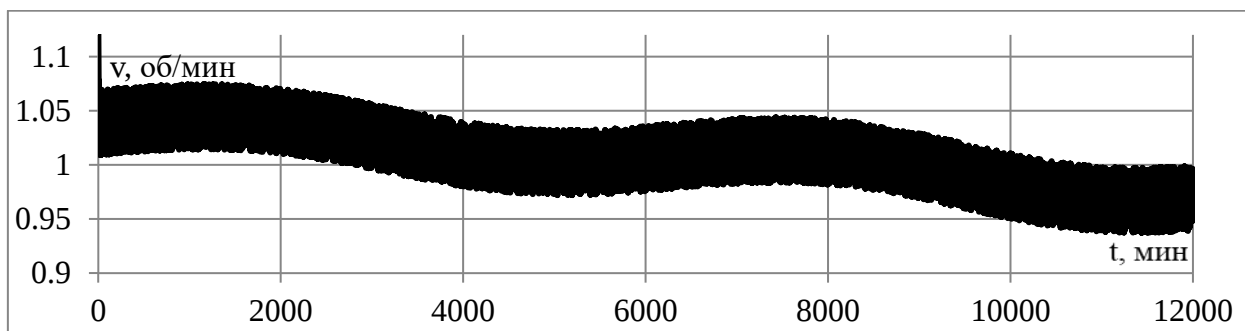


Рисунок 62. График частоты вращения дисков (v); (t – время)

Также входными параметрами ГИБУЭР являются: задание плотности пульпы в ванне вакуум-фильтра ($\rho_{зад}$) и задание положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка ($h_{зад}$) соответственно, а также активный параметр (k) экстремального регулятора. Эти параметры позволяют определить момент достижения экстремума производительности и деактивировать регулятор (зафиксировав его выходные параметры).

Выходами разрабатываемого интеллектуального блока управления являются: 1) k^* определяет активный параметр в момент активации регулятора; 2) u^* используется для передачи экстремальному регулятору

информации о направлении шага его активного параметра либо о деактивации регулятора;

В состав разрабатываемого интеллектуального блока управления экстремальным регулятором входят: блок расчёта разности текущей производительности фильтра и производительности фильтра на предыдущем шаге работы регулятора, блок активации и деактивации экстремального регулятора и блоки оценки целесообразности коррекции $\rho_{зад}$ и $h_{зад}$. Структурная схема разработанного интеллектуального блока управления экстремальным регулятором представлена на рисунке 63.

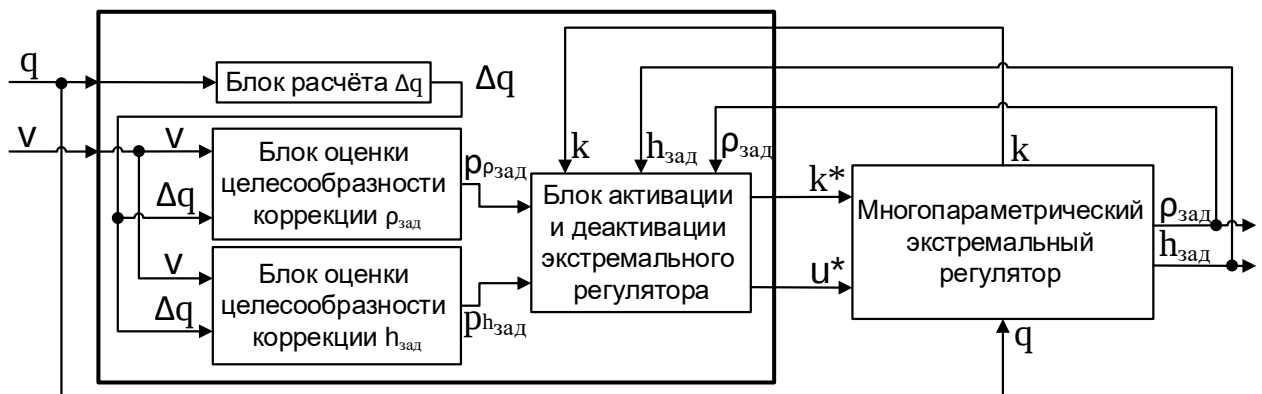


Рисунок 63. Структурная схема ГИБУЭР

Алгоритм функционирования интеллектуального блока управления вызывается циклически 1 раз в 20 минут ($\Delta t = 20$) и предусматривает следующие действия:

1. Если в текущий момент времени экстремальный регулятор включен, осуществляется переход к п. 6.

2. На основе сигнала производительности вакуум-фильтра блок расчёта Δq определяет изменение производительности фильтра в результате последнего шага работы регулятора.

3. Значения Δq и v подаются на блоки оценки целесообразности коррекции заданий плотности пульпы и положения задвижки, которые вычисляют оценку смещения экстремума по плотности пульпы ($\rho_{зад}$) и по положению задвижки ($\rho_{hзад}$) соответственно.

4. На основе значений $p_{\rho_{зад}}$ и $p_{h_{зад}}$ блок активации и деактивации экстремального регулятора принимает решение об активации экстремального регулятора и определяет, какой из управляемых параметров (k^*) будет активным, а также направление шага активного параметра ($u^* = 1$ или -1).

5. Алгоритм завершается.

6. Если блок активации и деактивации экстремального регулятора на основе значений $\rho_{зад}$, $h_{зад}$ и k определил факт достижения экстремума производительности, экстремальный регулятор деактивируется, путем установки параметра u^* в значение 0.

Блок-схема алгоритма функционирования гибридного интеллектуального блока управления экстремальным регулятором приведена на рисунке 64.

Для разработки блоков оценки целесообразности коррекции заданий плотности пульпы ($\rho_{зад}$) и положения задвижки ($h_{зад}$) был проведён анализ работы многопараметрического экстремального регулятора, а также принципы управления дисковым вакуум-фильтром оператором. В результате было получено 2 выборки: обучающая и тестовая, 400 и 40 точек соответственно. При этом тестовая выборка состоит из точек, не входящих в обучающую.

С целью описать зависимости в выборках ретроспективных данных сначала использовался метод регрессионного анализа. Выборка экспериментальных данных была проверена на наличие аномальных значений и отфильтрована. Проведённый анализ показал, что выходные параметры имеют нормальное распределение и их дисперсии воспроизводимости однородны, следовательно, использование регрессионного анализа обосновано [79].

Были проведены 2 серии опытов для каждого блока оценки, которые заключались в изменении степени уравнения полиномиальной регрессии и подбора значений его коэффициентов с целью снижения средней ошибки. В

исследовании были опробованы несколько видов регрессий: степенные, показательные, дробно-рациональные и полиномиальные [80]. Наилучшие результаты показала регрессия, в которой использовался полином Колмогорова-Габора (уравнение 25):

$$Y(x_1, x_2) = a_0 + \sum_{i=1}^2 a_i x_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i}^2 a_{ij} x_i x_j \quad (25)$$

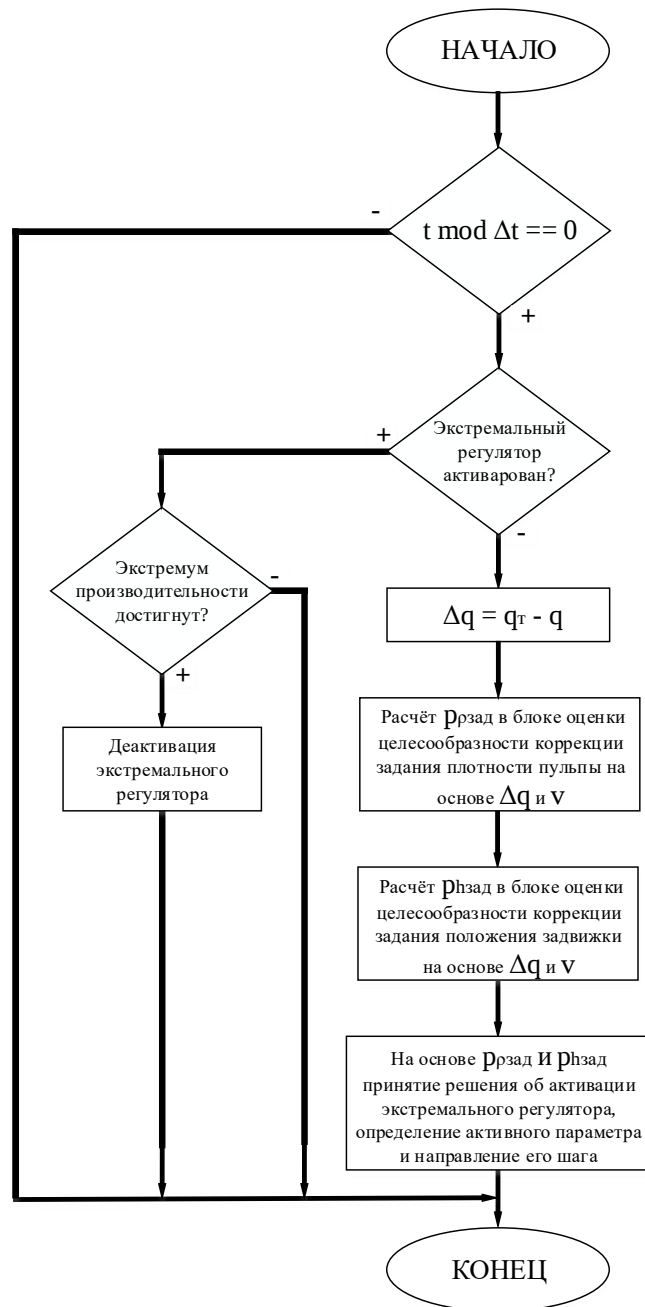


Рисунок 64. Блок-схема алгоритма функционирования ГИБУЭР

Результаты двух серий экспериментов, представлены на рисунках 65 и 66.

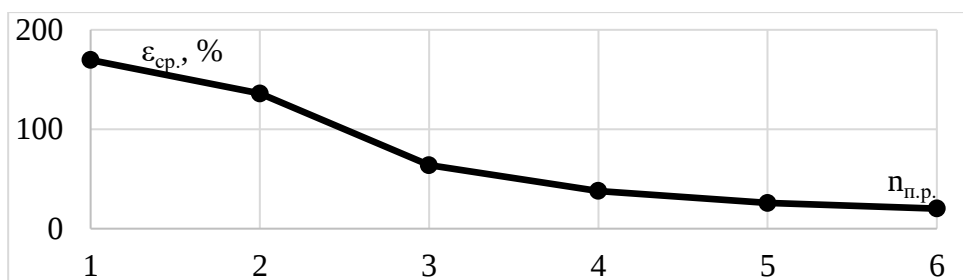


Рисунок 65. График средней ошибки ($\epsilon_{ср.}$) при изменении степени полиномиальной регрессии ($n_{п.р.}$) для блока оценки целесообразности коррекции задания плотности пульпы

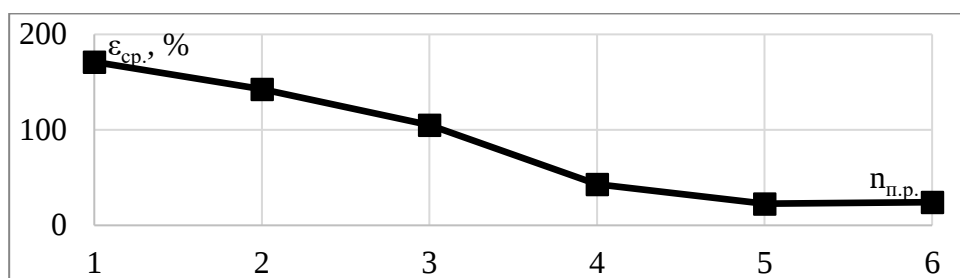


Рисунок 66. График средней ошибки ($\epsilon_{ср.}$) при изменении степени полиномиальной регрессии ($n_{п.р.}$) для блока оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки

В результате этих экспериментов минимальное значение средней ошибки для блока оценки целесообразности коррекции задания плотности пульпы составило 22,14 %, а для блока оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки — 22,69 %. В обоих случаях средняя ошибка имеет недопустимо большое значение, следовательно, использование метода регрессионного анализа для разработки блоков оценки нецелесообразно.

В ходе дальнейших экспериментов была предпринята попытка описать зависимость, имеющуюся в ретроспективных данных, с помощью нейронных сетей [81] - [86], [92]. Данные сети способны к обучению и выявлению скрытых зависимостей в данных.

Для создания блока оценки целесообразности коррекции задания плотности пульпы была использована искусственная нейронная сеть с тремя слоями: входным, скрытым и выходным. В выходном слое функция активации линейная.

Для определения оптимальной структуры нейронной сети были проведены серии экспериментов. В них проводилось обучение нейронных сетей на обучающей выборке, состоящей из 400 точек, а затем проводилась проверка работы сети на тестовой выборке, состоящей из 40 точек, не входящих в обучающую выборку. При обучении сети варьировались количество нейронов в скрытом слое от 5 (исходя из теоремы Хехт-Нильсена [88]) до 8 и количество эпох обучения от 50 до 300. При это в нейронах скрытого слоя сети использовались следующие функции активации: сигмоидальная и гиперболический тангенс. В результате проверки полученных нейронных сетей на тестовой выборке были получены следующие результаты, представленные на рисунке 67.

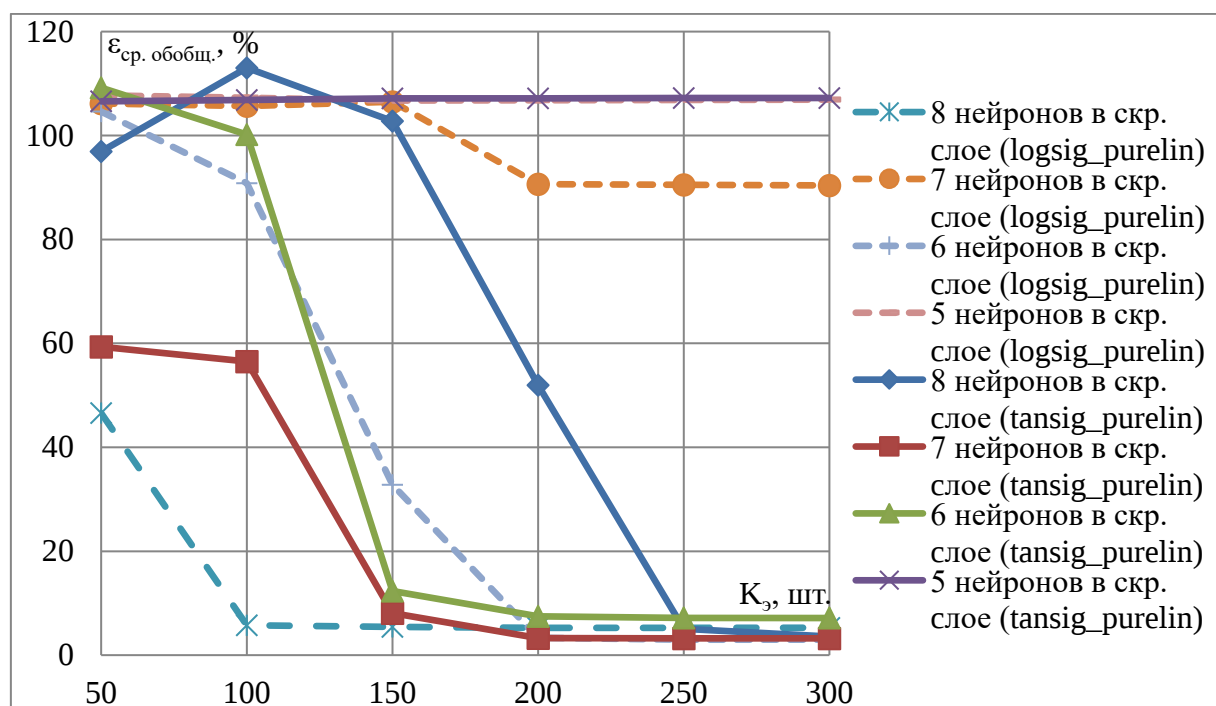


Рисунок 67. Графики средней ошибки обобщения НС ($\varepsilon_{\text{ср. обобщ.}}$) при использовании в скрытом слое сигмоидальной функции активации и функции активации «гиперболический тангенс»; ($K_{\text{э}}$ – количество эпох обучения)

По данным на рисунке 67 видно, что наиболее качественно (с минимальной ошибкой) работает нейронная сеть с 6 нейронами в скрытом слое и сигмоидальной функцией активации при её обучении в течение 300 эпох обучения. При проверке работы данной нейронной сети на тестовой выборке была получена средняя ошибка обобщения равная 2,98 %.

В результате проведённой серии экспериментов было установлено, что в разработанном интеллектуальном блоке управления экстремальным регулятором в качестве блока оценки целесообразности коррекции задания плотности пульпы возможно использовать нейронную сеть, состоящую из 3 слоёв. Во входном — 2 нейрона, в выходном — 1 с линейной функцией активации и в скрытом — 6 нейронов с сигмоидальной функцией активации.

Для создания блока оценки целесообразности коррекции положения задвижки также была использована искусственная нейронная сеть с тремя слоями: входным, скрытым и выходным. В выходном слое функция активации линейная.

Для оптимизации структуры нейронной сети были проведены серии экспериментов. В них проводилось обучение нейронных сетей на обучающей выборке, состоящей из 400 точек. При обучении сети варьировались количество нейронов в скрытом слое от 5 до 8 (исходя из теоремы Хехт-Нильсена [88]) и количество эпох обучения от 50 до 300. При этом в нейронах скрытого слоя сети использовались следующие функции активации: сигмоидальная и гиперболический тангенс. После обучения проводилась проверка работы сети на тестовой выборке, состоящей из 40 точек, не входящих в обучающую выборку. В результате тестирования нейронных сетей были получены результаты, представленные на рисунке 68.

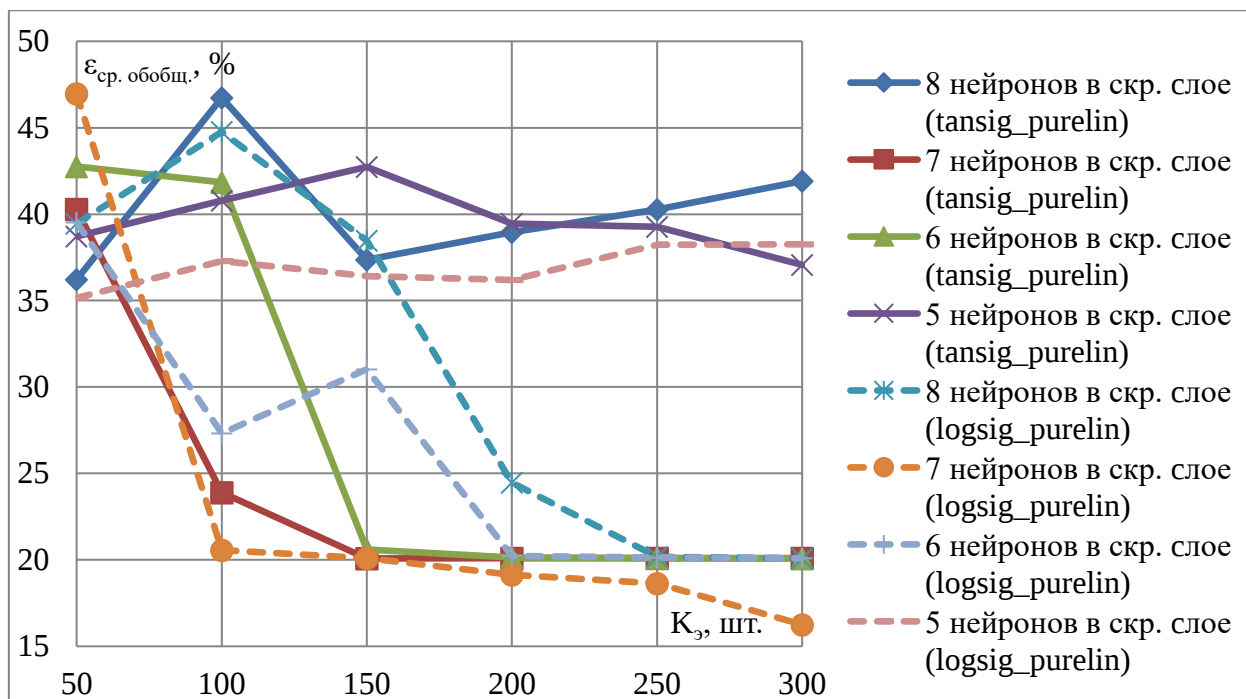


Рисунок 68. Графики средней ошибки обобщения НС ($\varepsilon_{\text{ср. обобщ.}}$) при использовании в скрытом слое сигмоидальной функции активации и функции активации «гиперболический тангенс»; ($K_{\text{э}}$ – количество эпох обучения)

По графикам на данном рисунке видно, наиболее качественно (с минимальной ошибкой) работает нейронная сеть с 7 нейронами в скрытом слое и сигмоидальной функцией активации при её обучении в течение 300 эпох обучения. При работе данной нейронной сети на тестовой выборке была получена средняя ошибка обобщения равная 16,26 %. Данное значение слишком велико по сравнению с ошибкой 2,98 % нейронной сети, реализующей первый блок оценки коррекции задания. При использовании одновременно данные нейронные сети в блок активации и деактивации будут поступать оценки с разной точностью, что в конечном итоге снизит его качество работы. Поэтому использовать полученную нейронную сеть в качестве блока оценки целесообразности коррекции положения задвижки в разрабатываемом интеллектуальном блоке управления регулятором не представляется возможным.

Так как в исходных данных, используемых для разработки гибридного интеллектуального блока управления экстремальным регулятором, содержатся знания оператора, управляющего дисковым вакуум-фильтром,

следовательно, при создании блока оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки может быть использован математический аппарат, который умеет описывать логику мышления человека, но при этом имеющий способность к обучению. В качестве такого аппарата было принято решение использовать нечёткие нейронные сети [92]-[98].

Для создания блока оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки была использована нечёткая нейронная сеть, состоящая из четырёх слоёв. В данной сети используется модель вывода Сугено-Такаги, которая использует следующий вид правил: R_i : IF x_1 this A_{i1} , ... AND x_n this A_{in} , THEN $y=f(X)$, $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$; $f(x_i) = k_i x_i + b_i$ или $f(x_i) = b_i = \text{const}$.

Для определения оптимальной структуры нечёткой нейронной сети была проведена серия экспериментов. В них выполнялось обучение нечётких нейронных сетей на обучающей выборке, состоящей из 400 точек, а затем проводилась проверка работы сетей на тестовой выборке, состоящей из 40 точек, не входящих в обучающую выборку. При обучении сети варьировались количество термов входных переменных, тип функций принадлежности в слое фазификации и слое заключений нечётких правил. В слое фазификации использовались следующие функции принадлежности: треугольная, трапецевидная, гауссова, двухсторонняя гауссова, пи-образная. В слое заключений нечётких правил использовались следующие функции принадлежности: линейная и константа.

В результате работы полученных нечётких нейронных сетей на тестовой выборке были получены следующие результаты, представленные на рисунке 69.

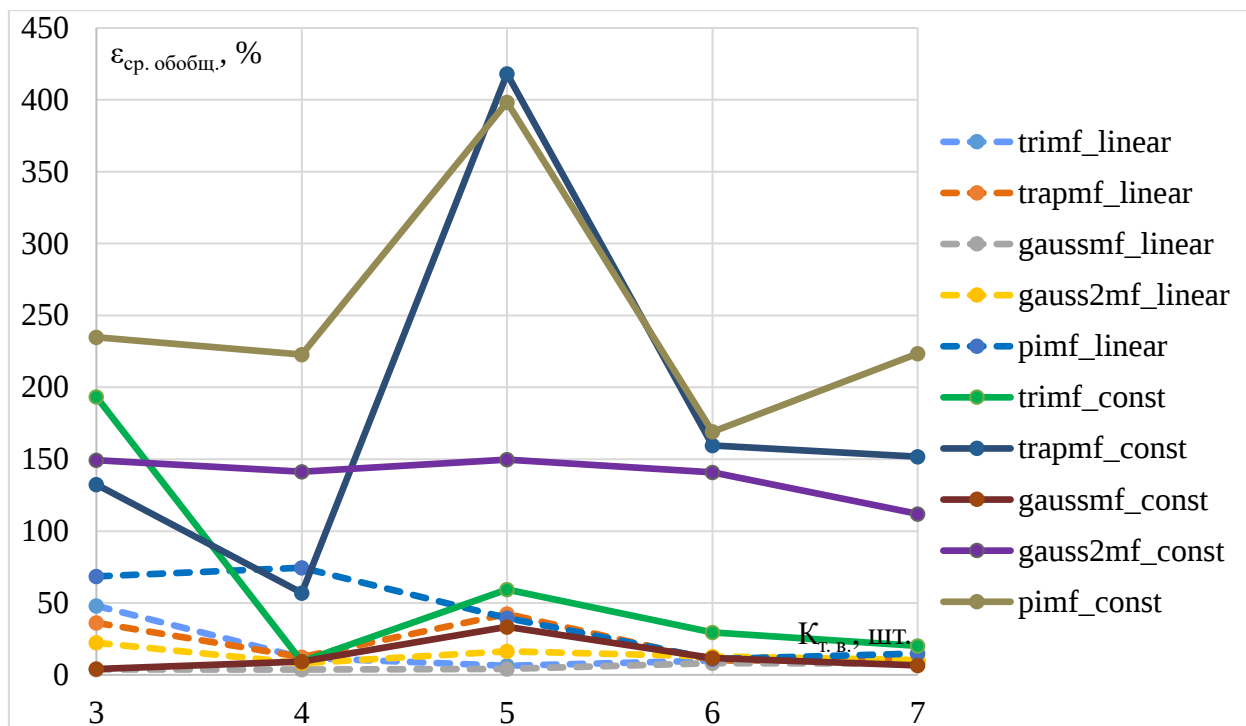


Рисунок 69. Графики средней ошибки обобщения ННС ($\epsilon_{\text{ср. обобщ.}}$), реализующей блок оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки; ($K_{\text{т.в.}}$ – количество термов входных переменных)

По данным на рисунке 69 видно, наиболее хорошо (с минимальной средней ошибкой) работает нечёткая нейронная сеть с 3 термами входных переменных, гауссовой функцией принадлежности в слое фазификации и линейной функцией принадлежности в слое заключений нечётких правил. При работе данной нечёткой нейронной сети на тестовой выборке была получена средняя ошибка обобщения равная 3,76 %. Ошибка имеет малую величину (того же порядка, что и ошибка 2,98 % нейронной сети, реализующей блок оценки целесообразности коррекции плотности пульпы), следовательно, полученную нечёткую нейронную сеть можно использовать в качестве блока оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки. Полученная структура нечёткой нейронной сети представлена на рисунке 70.

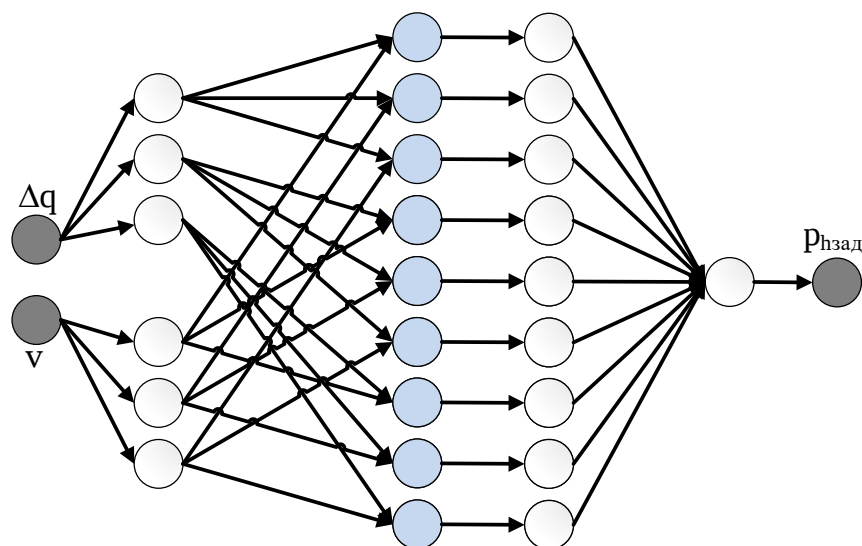


Рисунок 70. Структура нечёткой нейронной сети, реализующей блок оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки

По рисунку 70 видно, что полученная нечёткая нейронная сеть, реализующая блок оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки, имеет следующую структуру: 3 терма входных переменных и, следовательно, 6 узлов в слое фазификации, по 9 узлов в слоях правил и заключений нечётких правил и 1 узел в слое агрегирования результата.

Входами нечёткой нейронной сети являются: значение разности текущей производительности вакуум-фильтра и его производительности на предыдущем этапе работы регулятора и значение частоты вращения дисков. Выходом — оценка целесообразности коррекции задания положения задвижки.

Далее была предпринята попытка применить нечёткую нейронную сеть и для построения блока оценки целесообразности коррекции задания плотности пульпы.

Для определения оптимальной структуры нечёткой нейронной сети была проведена серия экспериментов. В них проводилось обучение данных сетей на обучающей выборке, состоящей из 400 точек, а затем проводилась проверка их работы на тестовой выборке, состоящей из 40 точек, не входящих в обучающую выборку. При обучении сетей варьировались количество термов входных переменных, тип функций принадлежности в

слое фазификации и слое заключений нечётких правил. В слое фазификации использовались следующие функции принадлежности: треугольная, трапецевидная, гауссова, двухсторонняя гауссова, пи-образная. В слое заключений нечётких правил — линейная и константа.

В результате работы полученных нечётких нейронных сетей на тестовой выборке были получены следующие результаты, представленные на рисунке 71.

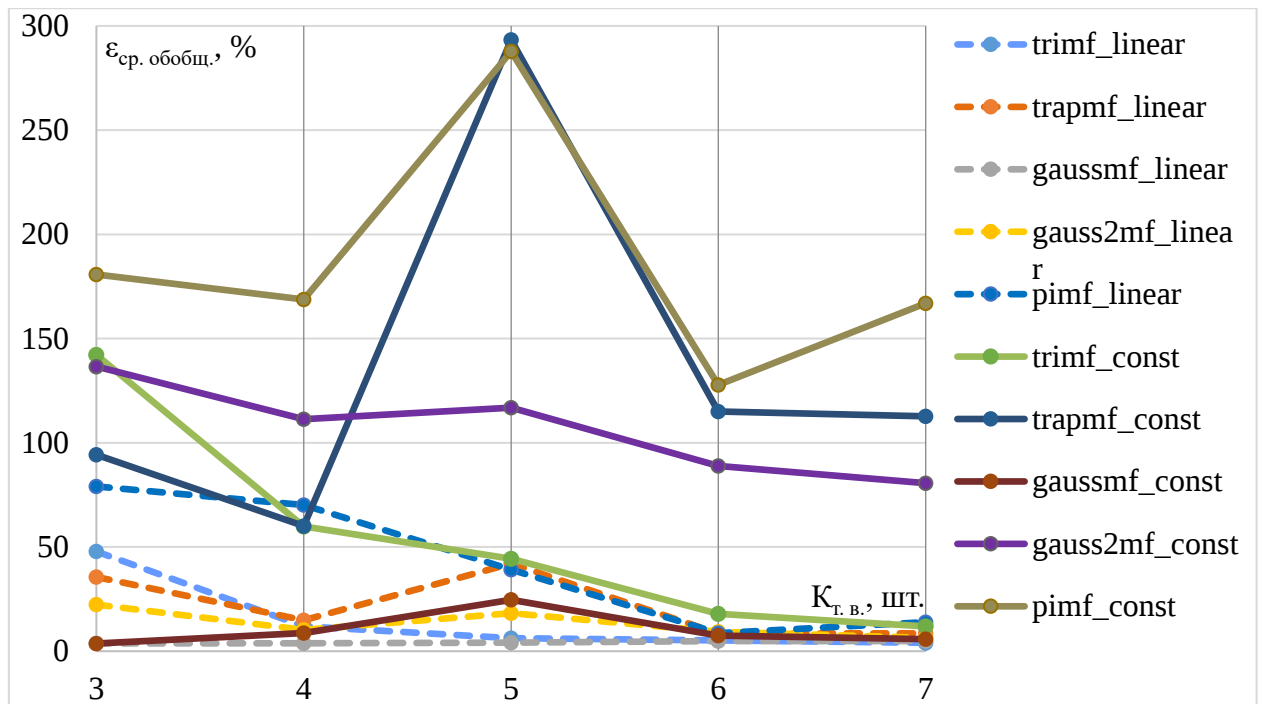


Рисунок 71. Графики средней ошибки обобщения ННС ($\epsilon_{\text{ср. обобщ.}}$), реализующей блок оценки целесообразности коррекции задания плотности пульпы; ($K_{\text{т.в.}}$ – количество термов входных переменных)

По данным на рисунке 71 видно, наиболее хорошо (с минимальной средней ошибкой) работает нечёткая нейронная сеть с 3 термами входных переменных, гауссовой функцией принадлежности в слое фазификации и линейной функцией принадлежности в слое заключений нечётких правил. При работе данной нечёткой нейронной сети на тестовой выборке была получена средняя ошибка обобщения равная 3,68 %.

Средняя ошибка обобщения при обучении нечёткой нейронной сети имеет малую величину, но большую чем средняя ошибка обобщения при обучении нейронной сети, которая равна 2,98 %. Следовательно, для

реализации блока оценки целесообразности коррекции задания плотности пульпы, входящего в состав разрабатываемого интеллектуального блока управления экстремальным регулятором, необходимо использовать нейронную сеть, состоящую из 3 слоёв, полученную ранее в данном исследовании. Во входном — 2 нейрона, в выходном — 1 с линейной функцией активации и в скрытом — 6 нейронов с сигмоидальной функцией активации.

Входами нейронной сети являются: значение разности текущей производительности вакуум-фильтра и его производительности на предыдущем этапе работы регулятора и значение частоты вращения дисков. Выходом — оценка целесообразности коррекции задания плотности пульпы. Полученная структура нейронной сети представлена на рисунке 72.

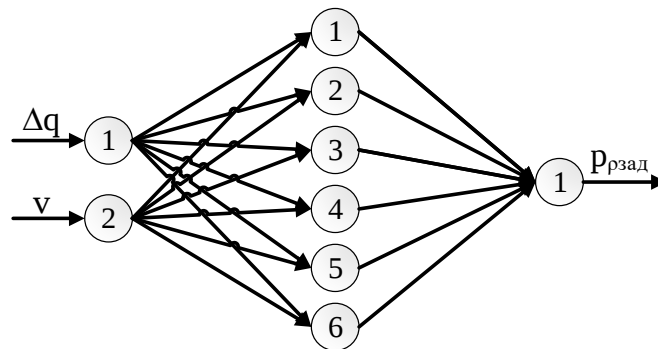


Рисунок 72. Структура нейронной сети, реализующей блок оценки целесообразности коррекции задания плотности пульпы

В результате проведённых экспериментов было установлено, что в разработанном гибридном интеллектуальном блоке управления экстремальным регулятором в качестве блока оценки целесообразности коррекции задания плотности пульпы необходимо использовать нейронную сеть, состоящую из 3 слоёв. Во входном — 2 нейрона, в выходном — 1 с линейной функцией активации и в скрытом — 6 нейронов с сигмоидальной функцией активации. А в качестве блока оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки необходимо использовать нечёткую нейронную сеть, имеющую следующую структуру: 3 терма входных переменных и, следовательно, 6 узлов в слое фазификации, по 9 узлов в слоях

правил и заключений нечётких правил и 1 узел в слое агрегирования результата.

3.2 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ГИБРИДНЫМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ БЛОКОМ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

Для сравнения качества функционирования разработанной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с многопараметрическим шаговым экстремальным регулятором и разработанной системы управления процессом обезвоживания с гибридным интеллектуальным блоком управления экстремальным регулятором была разработана модель системы управления с ГИБУЭР, представленная на рисунке 73.

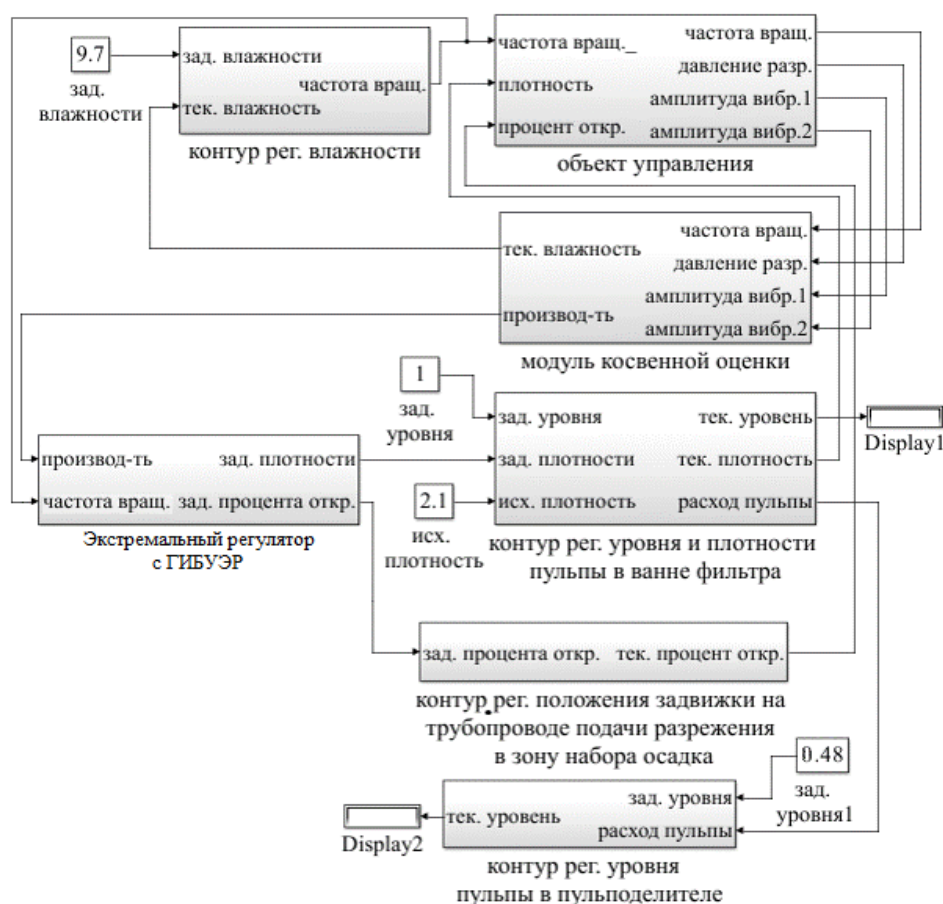


Рисунок 73. Модель разработанной системы управления с ГИБУЭР

Система, представленная на рисунке 73, отличается от исходной разработанной системы управления наличием гибридного интеллектуального блока управления экстремальным регулятором.

В результате моделирования разработанной системы управления с ГИБУЭР были получены графики, представленные на рисунках 74-77.

При моделировании было установлено, что частота вращения дисков фильтра при использовании разработанной системы управления имеет среднее значение равное 1,011 об/мин, что на 7,21 % больше среднего значения частоты вращения дисков фильтра при использовании базовой системы управления.

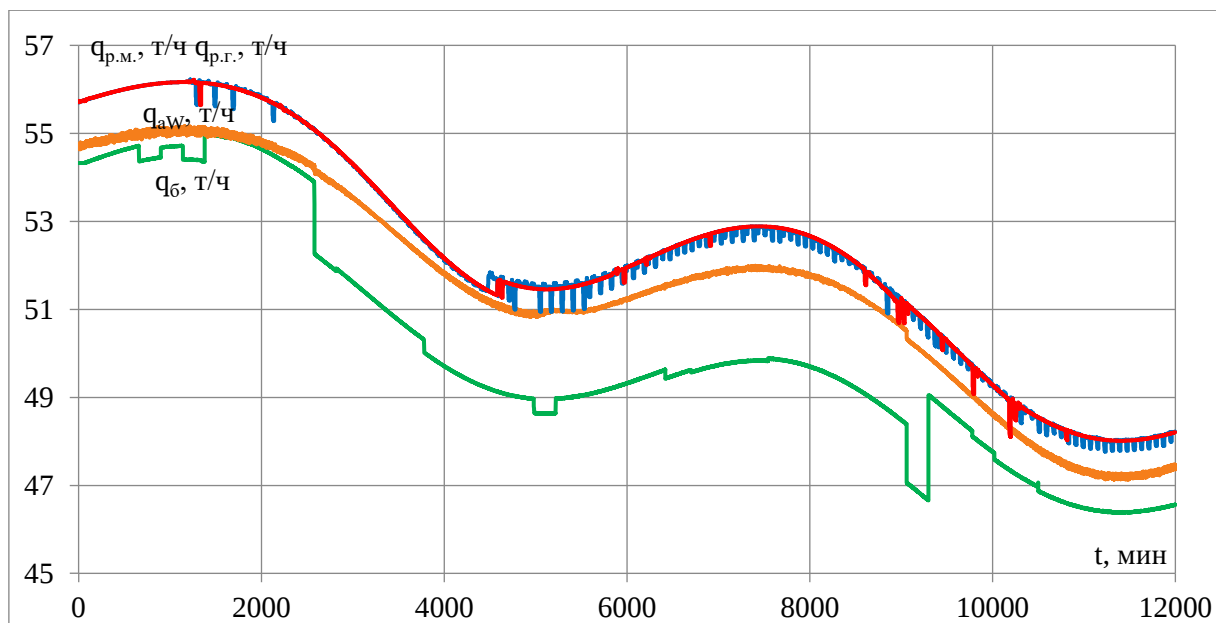


Рисунок 74. Графики изменения производительности дискового вакуум-фильтра при использовании базовой СУ ($q_б$), СУ с АРВО ($q_{ав}$), СУ с ЭР ($q_{р.м.}$) и СУ с ГИБУЭР ($q_{р.г.}$); (t – время)

На рисунке 74 приведены следующие графики: зелёный — график изменения производительности вакуум-фильтра при использовании базовой системы управления, оранжевый — график изменения производительности вакуум-фильтра при использовании системы управления с АРВО, синий — график изменения производительности вакуум-фильтра при использовании разработанной системы управления с многопараметрическим экстремальным регулятором, красный — график изменения производительности вакуум-фильтра при использовании разработанной системы управления с ГИБУЭР.

По графику изменения производительности вакуум-фильтра при использовании разработанной системы управления с ГИБУЭР было установлено, что данная величина имеет среднее значение равное 52,32 т/ч,

что на 3,5 % больше среднего значения производительности фильтра при использовании базовой системы управления, на 1,6 % больше среднего значения производительности фильтра при использовании системы управления с АРВО и на 0,1 % больше среднего значения производительности вакуум-фильтра при использовании разработанной системы управления с многопараметрическим экстремальным регулятором. Отсюда можно сделать вывод, что при использовании ГИБУЭР в разработанной системе управления производительность вакуум-фильтра практически не поменялась (увеличилась на величину погрешности).

Работа экстремального регулятора с ГИБУЭР, представлена на рисунках 75-76.

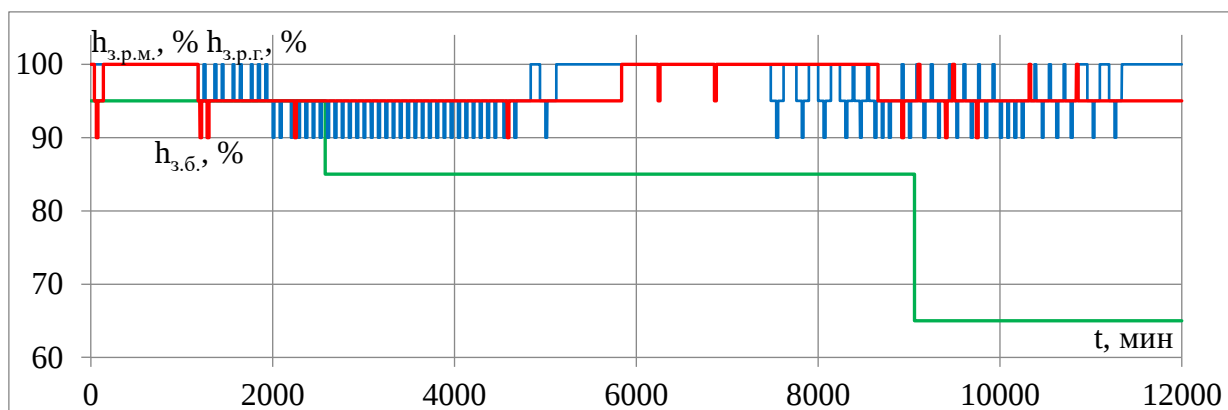


Рисунок 75. Графики заданий положения задвижки при использовании базовой СУ ($h_{з.б.}$), СУ с ЭР ($h_{з.р.м.}$) и СУ с ГИБУЭР ($h_{з.р.г.}$); (t – время)

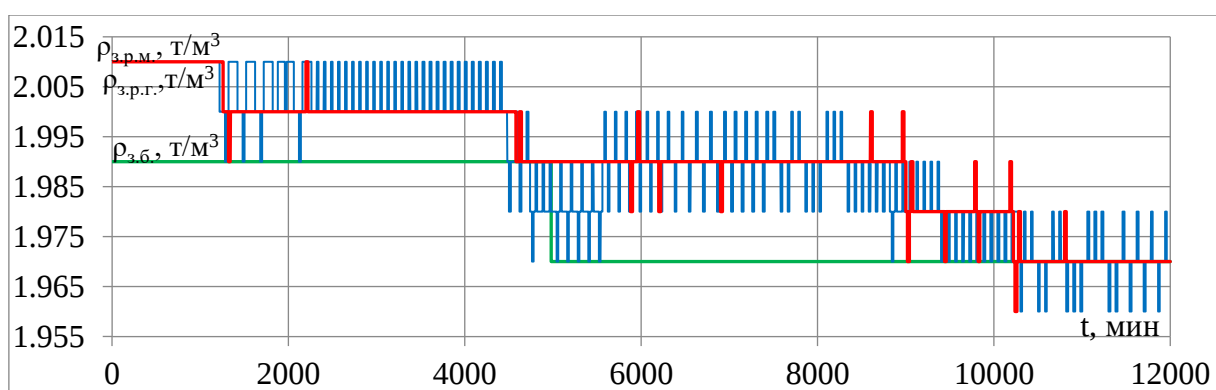


Рисунок 76. Графики заданий плотности пульпы при использовании базовой СУ ($\rho_{з.б.}$), СУ с ЭР ($\rho_{з.р.м.}$) и СУ с ГИБУЭР ($\rho_{з.р.г.}$); (t – время)

На рисунках 75 и 76 показаны графики заданий положения задвижки и плотности пульпы. Зелёные — графики, относящиеся к базовой системе управления, синие — к разработанной системе управления с шаговым

экстремальным регулятором, красные — к разработанной системе управления с ГИБУЭР.

По графикам можно сделать вывод, что экстремальный регулятор с ГИБУЭР в целом повторяет работу обычного, но при этом делает в среднем в 7 раз меньше переключений заданий, что снизит износ приводов и задвижек, регулирующих разрежение в зоне набора осадка и подачу воды и пульпы в ванну вакуум-фильтра. Также снижение количества переключений заданий плотности пульпы и положения задвижки приведёт к уменьшению колебаний влажности осадка, частоты вращения дисков и производительности дискового вакуум-фильтра. Влажность осадка при этом поддерживается на требуемом уровне (рисунок 77).

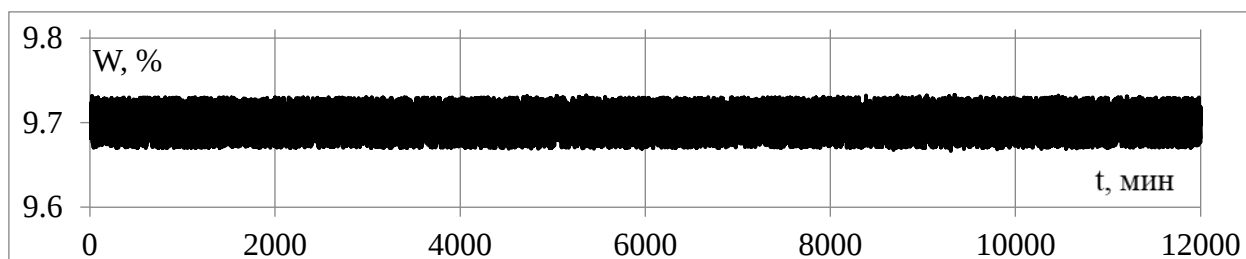


Рисунок 77. График изменения влажности осадка (W); (t – время)

Исходя из полученных при моделировании данных можно сделать вывод, что использование в системе управления разработанного ГИБУЭР не снижает качества регулирования влажности осадка и не приводит к снижению производительности дискового вакуум-фильтра по сравнению с системой управления с экстремальным регулятором.

3.3 ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ГИБРИДНЫМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ БЛОКОМ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

В ходе данного исследования была разработана система управления процессом обезвоживания с использованием МКИ и ГИБУЭР. Структурная схема данной системы управления представлена на рисунке 78.

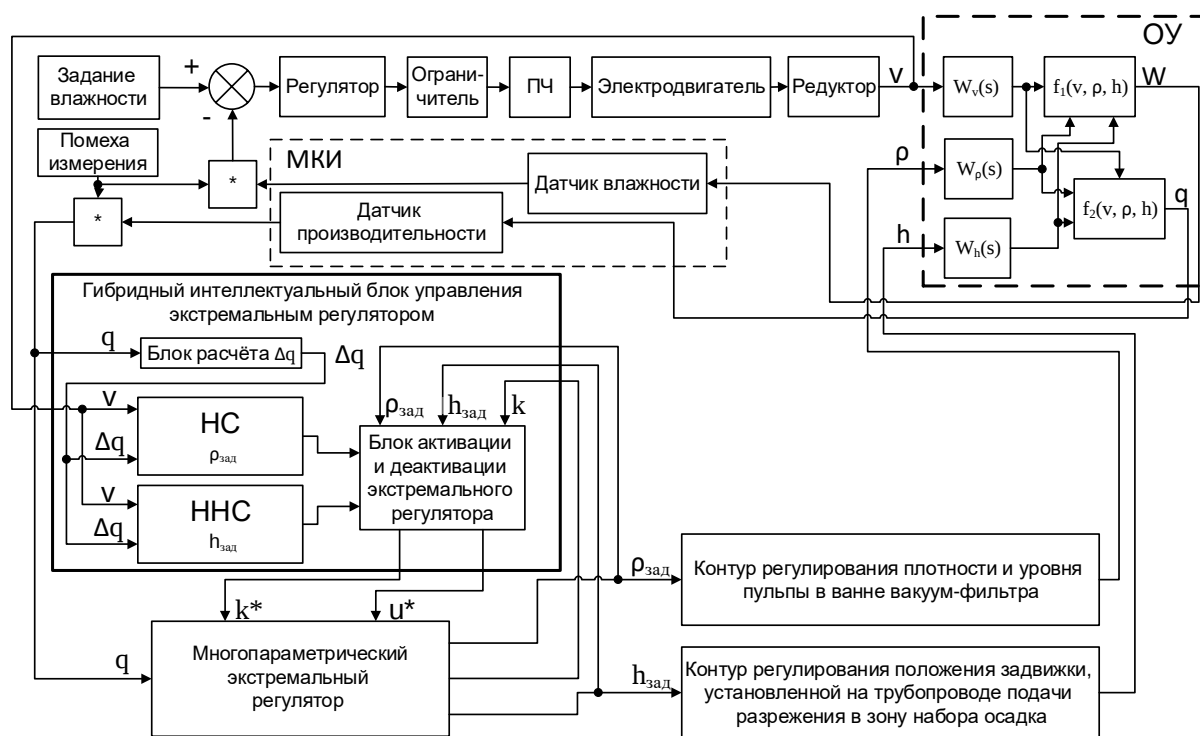


Рисунок 78. Структурная схема разработанной системы управления с МКИ и ГИБУЭР

Устойчивость обычной системы управления характеризует её способность возвращаться в состояние равновесия после прекращения действия внешних сил, которые вывели её из этого состояния [99].

Требование устойчивости автоколебаний для системы экстремального регулирования (СЭР) является столь же необходимым, как условие устойчивости для обычных систем. Обеспечение устойчивости экстремальных систем представляет значительно большие трудности, чем у обычных систем регулирования. Если автоколебания в СЭР неустойчивы, то система будет удаляться от экстремума и может прийти к состоянию, определяемому крайними положениями регулирующего органа. Экстремум будет «потерян» [100].

Для оценки устойчивости полученной системы управления последняя была представлена в виде трёх подсистем: 1 – подсистема регулирования влажности осадка, 2 – подсистема регулирования производительности путём изменения плотности пульпы, 3 – подсистема регулирования производительности путём изменения положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка. Работа каждой из подсистем

является возмущением для двух остальных. Нейросетевой МКИ представляется в виде двух безинерционных датчиков: влажности осадка и производительности вакуум-фильтра, которые проводят измерения с погрешностью, обусловленной точностью нейронной сети. Многопараметрический экстремальный регулятор рассматривается как два шаговых экстремальных регулятора для подсистем 2 и 3. Преобразованная структурная схема разработанной системы управления с ГИБУЭР представлена на рисунке 79.

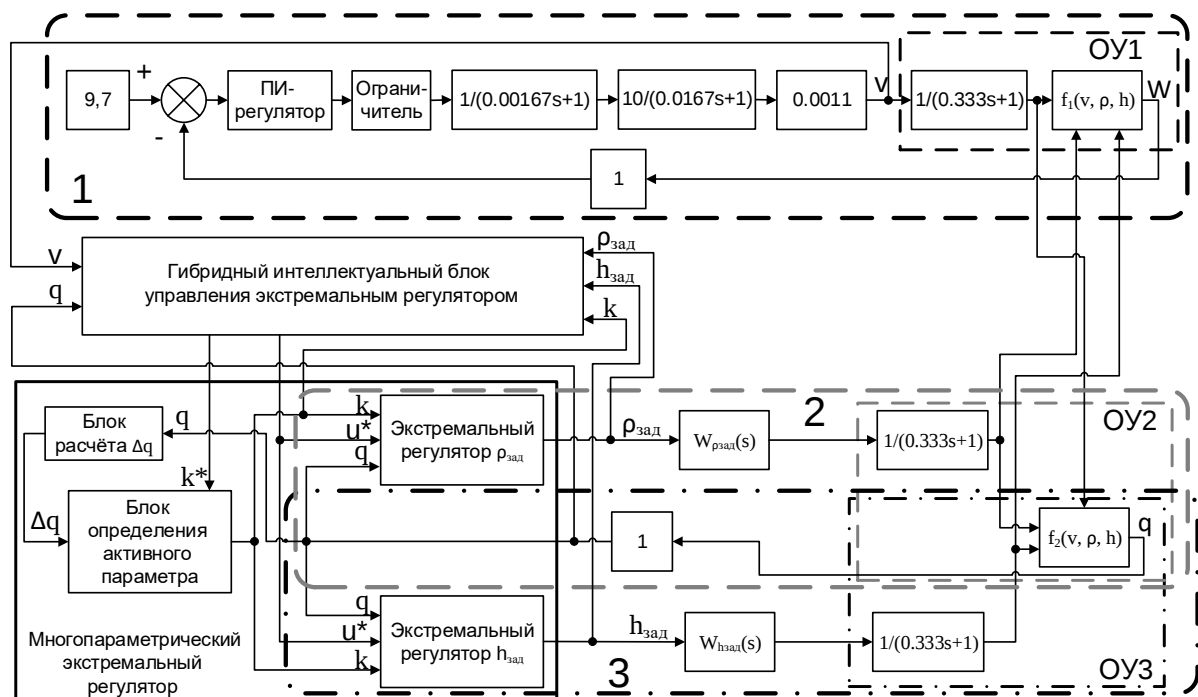


Рисунок 79. Преобразованная структурная схема разработанной системы управления с МКИ и ГИБУЭР

Оценка устойчивости проводится при функционировании системы управления в следующих условиях:

- оба шаговых экстремальных регулятора не отключены ГИБУЭР;
- каждый из шаговых экстремальных регуляторов делает шаг только после завершения переходных процессов во всей системе управления;
- устойчивость системы управления оценивается при функционировании фильтра в окрестности рабочей точки;
- динамически меняющаяся постоянная времени в передаточных звеньях на входах объектов управления рассматривается как постоянная и принята

равной 0,333, что соответствует функционированию фильтра в окрестности рабочей точки (средняя частота вращения дисков равна 1 об/мин);

- в объектах управления подсистем 2 и 3 зависимость $q = f_2(v, \rho, h)$ имеет экстремальный характер.

Устойчивость подсистемы 1 была доказана с использованием метода абсолютной устойчивости В.И. Попова [101]. Линейная часть системы имеет следующую модифицированную АФЧХ ($k_n=12$):

$$W(s) = \frac{(180s + 120) \cdot 0.0011}{(0.00167s + 1)(0.0167s + 1)(0.333s + 1)s} \quad (26)$$

Модифицированная АФЧХ подсистемы 1 представлена на рисунке 80.

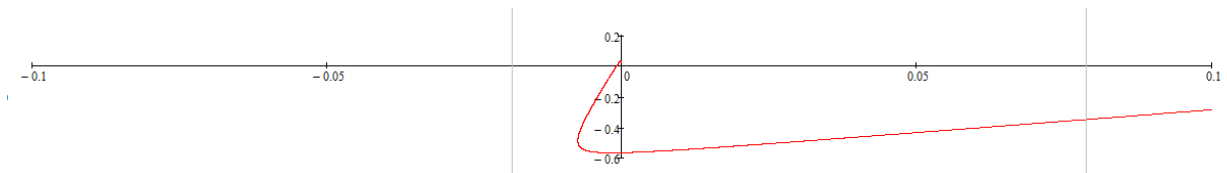


Рисунок 80. Модифицированная АФЧХ подсистемы 1

По АФЧХ на рисунке 80 видно, что через точку $(-1/12; 0)$ можно провести прямую так, чтобы АФЧХ была справа от неё и не пересекала, следовательно, подсистема 1 устойчива.

Устойчивость внутреннего контура регулирования положения задвижки подсистемы 3 также была доказана с использованием метода абсолютной устойчивости В.И. Попова [101]. Линейная часть системы имеет следующую модифицированную АФЧХ ($k_n=12$):

$$W(s) = \frac{100}{1.05s} \quad (27)$$

Модифицированная АФЧХ внутреннего контура регулирования положения задвижки подсистемы 3 представлена на рисунке 81.

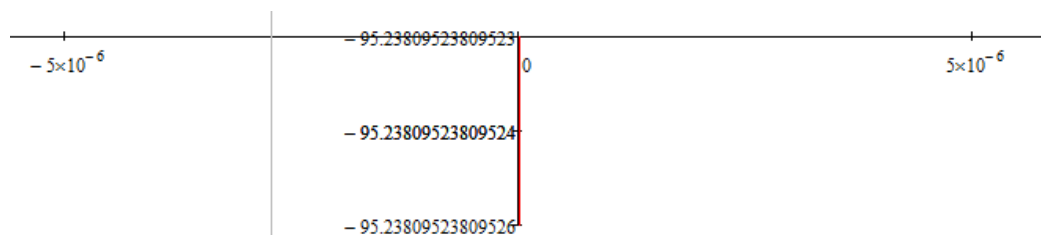


Рисунок 81. Модифицированная АФЧХ внутреннего контура регулирования положения задвижки подсистемы 3

По АФЧХ на рисунке 81 видно, что через точку $(-1/12;0)$ можно провести прямую так, чтобы АФЧХ была справа от неё и не пересекала, следовательно, внутренний контур регулирования положения задвижки подсистемы 3 устойчив.

Внутренний разомкнутый контур регулирования плотности пульпы подсистемы 2 является устойчивым, так как не содержит неустойчивых звеньев (рисунок 48).

Устойчивость подсистем 2 и 3 доказана с помощью методики, представленной в работе Либерзона и Родова [100], используемой для оценки устойчивости подобных экстремальных систем. В данной методике используется классический подход Ляпунова и рассматривается поведение отклонений от установившегося периодического движения [102].

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

В третьей главе для уменьшения количества переключений заданий плотности пульпы и положения задвижки, находящейся на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка с целью увеличения ресурса работы задвижек и их приводов был разработан гибридный интеллектуальный блок управления экстремальным регулятором, который содержит в себе знания оператора, управляющего вакуум-фильтром. Данный интеллектуальный блок управления регулятором определяет момент, когда экстремальный регулятор найдёт экстремум производительности, и отключает его. Затем на основе входных данных определяется момент включения экстремального регулятора, активный параметр в этот момент и направление его шага.

Была проведена разработка блоков оценки целесообразности коррекции заданий плотности пульпы и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения, в ходе которой было установлено в ГИБУЭР в качестве блока оценки целесообразности коррекции задания плотности пульпы целесообразно использовать многослойную нейронную

сеть, а в качестве блока оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки – нечёткую нейронную сеть.

Для проведения сравнительного анализа систем управления процессом обезвоживания железорудного концентрата была разработана модель системы управления с МКИ и ГИБУЭР и проведено моделирование её работы. В результате ее сравнения с описанными во второй главе настоящей диссертации системами управления было установлено, что при использовании ГИБУЭР производительность вакуум-фильтра имеет среднее значение на 3,5 % больше среднего значения производительности фильтра при использовании базовой системы управления, на 1,6 % больше среднего значения производительности фильтра при использовании системы управления с АРВО и на 0,1 % больше среднего значения производительности вакуум-фильтра при использовании разработанной системы управления с экстремальным регулятором.

Было установлено, что экстремальный регулятор с ГИБУЭР в целом повторяет работу обычного экстремального регулятора, но при этом делает в среднем в 7 раз меньше переключений заданий, это снизит износ приводов и задвижек, регулирующих разрежение в зоне набора осадка и подачу воды и пульпы в ванну вакуум-фильтра. Снижение количества переключений заданий плотности пульпы и положения задвижки также приведёт к уменьшению колебаний частоты вращения дисков и производительности дискового вакуум-фильтра.

В результате проведенной проверки была установлена устойчивость каждого из контуров, входящих в состав разработанной системы управления с МКИ и ГИБУЭР.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

4.1 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ И АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АСУ ПРОЦЕССОМ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

В ходе дальнейшего исследования были разработаны структура и алгоритм функционирования автоматизированной системы управления процессом обезвоживания с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра с использованием МКИ и ГИБУЭР, а также алгоритм функционирования ГИБУЭР.

Автоматизированная система управления процессом обезвоживания с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра состоит из трёх уровней: верхнего (операторский), среднего (уровня управления) и нижнего (полевого уровня).

Нижний уровень АСУ представлен датчиками и исполнительными механизмами (ИМ). На среднем уровне находится программируемый логический контроллер (ПЛК). Верхний уровень АСУ включает в себя автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора.

На среднем уровне АСУ выполняются следующие функции:

- Сбор данных от датчиков;
- Формирование управляющих воздействий;
- Обмен данными с верхним уровнем АСУ;
- Реализация многопараметрического экстремального регулятора;
- Выдача вычисленных управляющих воздействий на

исполнительные механизмы.

На верхнем уровне АСУ выполняются следующие функции:

- Обмен данными со средним уровнем АСУ;
- Визуализация технологического процесса обезвоживания железорудного концентрата;
- Дистанционное управление оборудованием (пуск и останов);

- Ввод заданий для локальных контуров регулирования;
- Архивирование данных работе оборудования и о протекании процесса обезвоживания в целом;
- Хранение и отображение архивных данных;
- Вывод на экран текущих значений параметров технологического процесса;
- Выдачу аварийных сообщений;
- Вывод истории изменения технологических параметров в виде трендов;
- Переключение между ручным и автоматическим режимом работы системы управления;
- Расчёт в МКИ текущих значений влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра;
- Расчёт в ГИБУЭР управляющих параметров для экстремального регулятора.

АРМ оператора, находящаяся на верхнем уровне АСУ, включает в себя: SCADA-систему, а также модуль косвенного измерения и гибридный интеллектуальный блок управления экстремального регулятора, реализованные на языке программирования C++.

Структурно-функциональная схема автоматизированной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров вакуум-фильтра представлена на рисунке 82.

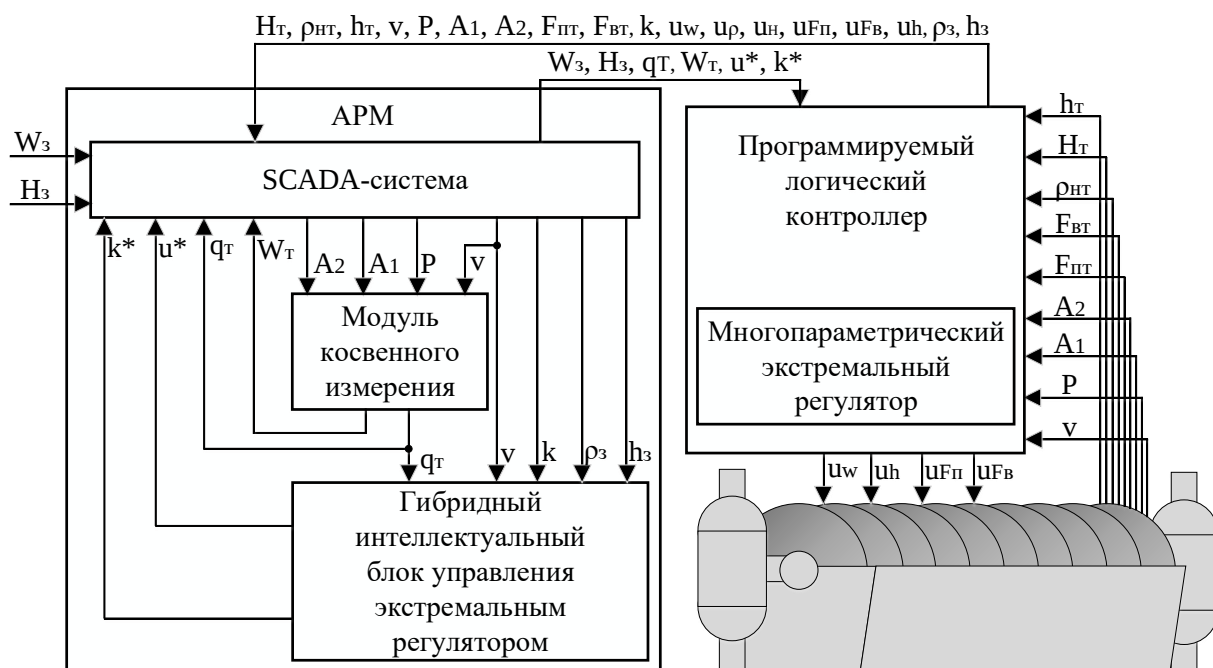


Рисунок 82. Структурно-функциональная схема АСУ процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров вакуум-фильтра

Автоматизированная система управления процессом обезвоживания, структурная схема которой представлена на рисунке 82, имеет следующие потоки данных:

1. От датчиков к программируемому логическому контроллеру. По данному потоку передаются показания датчиков: уровня (H_T), плотности (ρ_{HT}), положения задвижки (h_T), частоты вращения дисков (v), давления разрежения (P), вибрации (A_1 , A_2), расхода пульпы и воды ($F_{ПТ}$, $F_{ВТ}$).

2. От программируемого логического контроллера к объекту управления. По данному потоку передаются рассчитанные значения управлений: для преобразователя частоты (u_w), для задвижки, регулирующей расход пульпы ($u_{FП}$), для задвижки, регулирующей расход воды ($u_{FВ}$), для задвижки, регулирующей разрежение в зоне набора осадка (u_h).

3. Двухнаправленный поток данных между ПЛК и SCADA-системой. По данному потоку в SCADA-систему передаются следующие данные: управление для преобразователя частоты (u_w), управление для задвижки, регулирующей расход пульпы ($u_{FП}$), управление для задвижки, регулирующей расход воды ($u_{FВ}$), управление для задвижки, регулирующей

разрежение в зоне набора осадка (u_h), управление от контура регулирования плотности пульпы (u_p), управление от контура регулирования уровня пульпы (u_n), значение уровня (H_T), значение плотности (ρ_{HT}), значение положения задвижки (h_T), значение частоты вращения дисков (v), значение давления разрежения (P), значение вибрации (A_1, A_2), значения расхода пульпы и воды (F_{HT}, F_{BT}), задание плотности пульпы (ρ_3), задание положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка (h_3).

По данному потоку из SCADA-системы в ПЛК передаются следующие данные: задание влажности осадка (W_3), задание уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра (H_3), текущее значение влажности осадка (W_T), текущее значение производительности фильтра (q_T), управляющие параметры (k^*) и (u^*).

4. Двухнаправленный поток данных между МКИ и SCADA-системой. По данному потоку из SCADA-системы в МКИ передаются следующие данные: значение частоты вращения дисков (v), значение давления разрежения (P), значение вибрации (A_1, A_2).

По данному потоку из МКИ в SCADA-систему передаются следующие данные: текущее значение влажности осадка (W_T) и текущее значение производительности дискового вакуум-фильтра (q_T).

5. Из МКИ в ГИБУЭР. По данному потоку передаётся значение производительности дискового вакуум-фильтра (q_T).

6. Двухнаправленный поток данных между ГИБУЭР и SCADA-системой. По данному потоку из SCADA-системы в ГИБУЭР передаются следующие данные: частота вращения дисков (v), задание плотности пульпы (ρ_3), задание положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка (h_3), активный параметр экстремального регулятора (k).

По данному потоку из ГИБУЭР в SCADA-систему передаются следующие данные: управляющие параметры (k^*) и (u^*).

7. От оператора в SCADA-систему. По данному потоку передаются следующие данные: задание влажности осадка (W_3), задание уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра (H_3).

Для практической реализации разработанной системы управления был сформирован алгоритм её функционирования, блок-схема которого приведена на рисунке 83.

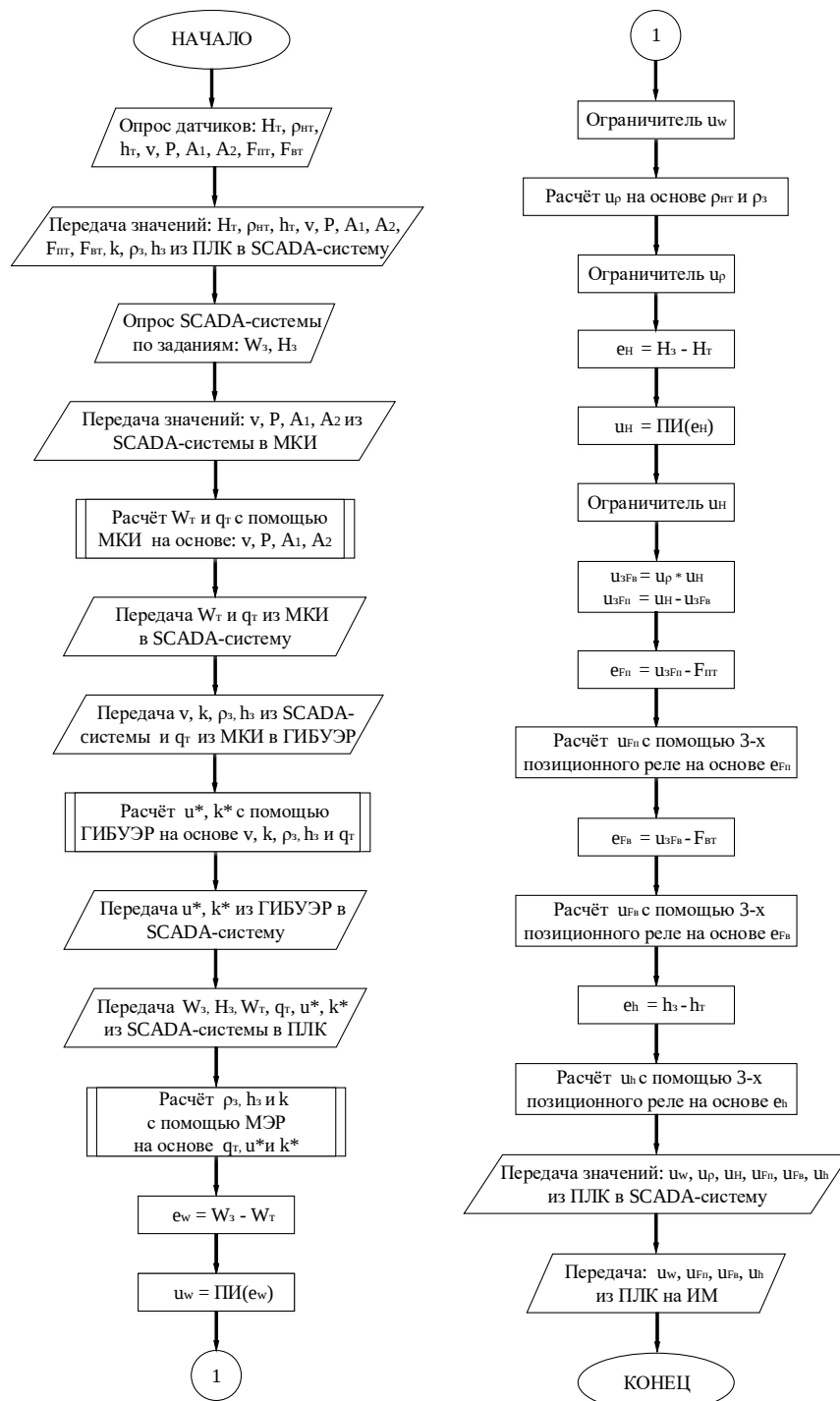


Рисунок 83. Блок-схема алгоритма функционирования разработанной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата

Алгоритм функционирования разработанной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров вакуум-фильтра, представленный на рисунке 83, предусматривает следующие действия:

1. Опрос датчиков уровня (H_T), плотности (ρ_{HT}), положения задвижки (h_T), скорости (v), давления разрежения (P), вибрации (A_1, A_2), расхода пульпы и воды ($F_{пт}, F_{вт}$);
2. Передача полученных значений ($H_T, \rho_{HT}, h_T, v, P, A_1, A_2, F_{пт}, F_{вт}, k, u^*$);
3. Опрос SCADA-системы по заданиям влажности осадка (W_3) и уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра (H_3);
4. Передача значений частоты вращения дисков (v), давления разрежения (P), вибрации в двух точках ресивера (A_1, A_2) из SCADA-системы в МКИ;
5. Расчёт текущей влажности осадка (W_T) и производительности дискового вакуум-фильтра (q_T) с помощью многослойной нейронной сети на основе значений v, P, A_1, A_2 ;
6. Передача рассчитанного значения текущей влажности осадка (W_T) и производительности дискового вакуум-фильтра (q_T) из МКИ в SCADA-систему;
7. Передача значения частоты вращения дисков (v), задание плотности пульпы (ρ_3), задание положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка (h_3), активный параметр экстремального регулятора (k) из SCADA-системы и текущего значения производительности дискового вакуум-фильтра (q_T) из МКИ в ГИБУЭР;
8. Расчёт в ГИБУЭР управляющих параметров (k^*) и (u^*) на основе v, q_T, ρ_3, h_3 и k с использованием многослойной нейронной сети и нечёткой нейронной сети;
9. Передача рассчитанных управляющих параметров (k^*) и (u^*) из ГИБУЭР в SCADA-систему;

10. Передача управляющих параметров (k^*) и (u^*), заданий влажности осадка (W_3) и уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра (H_3), текущих значений влажности осадка (W_T) и производительности вакуум-фильтра (q_T) из SCADA-системы в ПЛК;

11. Расчёт задания плотности пульпы (ρ_3), задания положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка (h_3) и активного параметра (k) с помощью многопараметрического экстремального регулятора на основе k^* , u^* и q_T ;

12. Расчёт ошибки по влажности осадка (e_w) на основе значений заданной и текущей влажности осадка (W_3 и W_T);

13. Расчёт управления для ПЧ (u_w) по ПИ-закону регулирования на основе ошибки по влажности (e_w);

14. Ограничение значения u_w в заданном диапазоне;

15. Расчёт управления от контура регулирования плотности пульпы (u_p) на основе задания плотности (ρ_3) и начальной плотности пульпы ($\rho_{нт}$);

16. Ограничение значения u_p в заданном диапазоне;

17. Расчёт ошибки по уровню пульпы в ванне вакуум-фильтра (e_n) на основе значений заданного и текущего уровня пульпы (H_3 и H_T);

18. Расчёт управления от контура регулирования уровня пульпы (u_n) по ПИ-закону регулирования на основе ошибки по уровню пульпы (e_n);

19. Ограничение значения e_n в заданном диапазоне;

20. Расчёт заданий для контуров регулирования расхода пульпы ($u_{зФп}$) и воды ($u_{зФв}$) в ванну вакуум-фильтра на основе управлений от контуров регулирования плотности (u_p) и уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра (u_n);

21. Расчёт ошибки по расходу пульпы в ванну вакуум-фильтра ($e_{Фп}$) на основе значений заданного ($u_{зФп}$) и текущего расхода пульпы ($F_{пт}$);

22. Расчёт управления для задвижки, регулирующей расход пульпы ($u_{Фп}$) с помощью 3-х позиционного реле на основе ошибки по расходу пульпы в ванну вакуум-фильтре ($e_{Фп}$);

23. Расчёт ошибки по расходу воды в ванну вакуум-фильтре ($e_{FВ}$) на основе значений заданного ($u_{зFВ}$) и текущего расхода воды ($F_{ВТ}$);

24. Расчёт управления для задвижки, регулирующей расход воды ($u_{FВ}$) с помощью 3-х позиционного реле на основе ошибки по расходу воды в ванну вакуум-фильтре ($e_{FВ}$);

25. Расчёт ошибки по положению задвижки, установленной на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка (e_h) на основе значений заданного и текущего положения задвижки (h_z и h_T);

26. Расчёт управления для задвижки, регулирующей разрежение в зоне набора осадка (u_h) с помощью 3-х позиционного реле на основе ошибки по положению задвижки (e_h);

27. Передача рассчитанных значений управлений: u_w , u_p , u_h , $u_{Fп}$, $u_{FВ}$, u_h из программируемого логического контроллера в SCADA-систему;

28. Передача рассчитанных значений управлений: u_w , $u_{Fп}$, $u_{FВ}$, u_h из программируемого логического контроллера на исполнительные механизмы.

Рассмотренный алгоритм разработанной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров вакуум-фильтра выполняется циклически.

Использование разработанной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра позволит:

- повысить производительность передела и снизить удельное затраты ресурсов, необходимых для протекания процесса, таких как электричество, сжатый воздух, технической воды, за счёт индивидуального управления каждым дисковым вакуум-фильтром, а также за счёт повышения частоты и снижения времени задержки измерения влажности выходного продукта процесса;
- снизить нагрузку на оператора;

- предоставлять данные о ходе протекания технологического процесса в режиме реального времени;
- управлять всеми вакуум-фильтрами отделения удалённо с одного АРМ оператора;
- получать при необходимости текущие значения технологических параметров, а также предысторию их изменения;
- управлять процессом в ручном и автоматическом режимах.

4.2 РАСЧЁТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В результате моделирования было установлено, что при использовании базовой системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата среднее значение производительности дискового вакуум-фильтра составляет 50,56 т/ч, при использовании разработанной автоматизированной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра на основе МКИ и ГИБУЭР среднее значение производительности дискового вакуум-фильтра составляет 52,32 т/ч. Следовательно, что при внедрении разработанной системы управления производительность отделения фильтрации в среднем вырастет на:

$$52,32 \text{ т/ч} \cdot 100 \% / 50,56 \text{ т/ч} - 100 \% = 3,5 \ \%.$$

При одновременной работе девяти дисковых вакуум-фильтров со средней производительностью равной 50,56 т/ч при использовании базовой системы управления отделение фильтрации производит:

$$50,56 \text{ т/ч} \cdot 9 = 455,04 \text{ т/ч}.$$

При повышении средней производительности дисковых вакуум-фильтров до 52,32 т/ч, в связи с внедрением разработанной АСУ, одновременно работающих фильтров, обеспечивающих ту же производительность отделения фильтрации, будет:

$$455,04 \text{ т/ч} / 52,32 \text{ т/ч} = 8,7 \text{ шт.}$$

При использовании базовой системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата удельные затраты электроэнергии в среднем составляют:

$$(450 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 5,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 4,4 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 0,25 \text{ кВт}\cdot\text{ч}) \cdot 9 / 1 \text{ ч} / 455,04 \text{ т/ч} = \\ = 9,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т.}$$

где $450 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 5,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 4,4 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 0,25 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ – суммарная работа всех агрегатов вакуум-фильтра, 9 – количество одновременно работающих вакуум-фильтров.

При использовании разработанной системы управления процессом обезвоживания удельные затраты электроэнергии составят:

$$(450 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 5,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 4,4 \text{ кВт}\cdot\text{ч} + 0,25 \text{ кВт}\cdot\text{ч}) \cdot 8,70 / 1 \text{ ч} / 455,04 \text{ т/ч} = \\ = 8,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т.}$$

Следовательно, при внедрении разработанной системы управления процессом обезвоживания удельные затраты на электроэнергию снизятся на:

$$100 \% - 8,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т} \cdot 100 \% / 9,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т} = 3,3 \ \%.$$

При использовании базовой системы управления удельный расход сжатого воздуха составляет в среднем $23,84 \text{ м}^3/\text{т}$.

При использовании 8,7 одновременно работающих фильтров, обеспечивающих производительность отделения фильтрации $455,04 \text{ т/ч}$, удельный расход сжатого воздуха составит:

$$23,84 \text{ м}^3/\text{т} \cdot 8,7 / 9 = 23,05 \text{ м}^3/\text{т}.$$

Следовательно, при внедрении разработанной системы управления процессом обезвоживания удельные затраты сжатого воздуха уменьшаться на:

$$100 \% - 23,05 \text{ м}^3/\text{т} \cdot 100 \% / 23,84 \text{ м}^3/\text{т} = 3,3 \ \%.$$

При использовании базовой системы управления процессом обезвоживания удельный расход технической воды составляет в среднем:

$$45 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot 9 / 455,04 \text{ т/ч} = 0,89 \text{ м}^3/\text{т}.$$

При повышении средней производительности фильтров до 52,32 т/ч, в связи с внедрением разработанной АСУ, и использовании 8,7 одновременно работающих фильтров, обеспечивающих ту же производительность отделения фильтрации (455,04 т/ч), удельный расход технической воды составит:

$$45 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot 8,7 / 455,04 \text{ т/ч} = 0,86 \text{ м}^3/\text{т}.$$

Следовательно, при внедрении разработанной системы управления процессом обезвоживания удельные затраты на техническую воду уменьшаются на:

$$100 \% - 0,86 \text{ м}^3/\text{т} \cdot 100 \% / 0,89 \text{ м}^3/\text{т} = 3,4 \ \%.$$

Результаты расчёта экономической эффективности от внедрения разработанной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с использованием ГИБУЭР и МКИ представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Результаты внедрения разработанной АСУ процессом обезвоживания железорудного концентрата

<i>Параметр</i>	<i>Размерность</i>	<i>Старое значение</i>	<i>Новое значение</i>	<i>Разница, %</i>	<i>Повышение/понижение</i>
Производительность дискового вакуум-фильтра	т/ч	50,56	52,32	3,5	повышение
Удельный расход электроэнергии	кВт•ч/т	9,1	8,8	3,3	понижение
Удельный расход сжатого воздуха	м ³ /т	23,84	23,05	3,3	понижение
Удельный расход технической воды	м ³ /т	0,89	0,86	3,4	понижение

Было установлено, что для функционирования девяти вакуум-фильтров и сопутствующего оборудования необходимо в среднем 5 МВт•ч электроэнергии на 1 час работы.

Отсюда следует, что при использовании базовой системы управления процессом обезвоживания для работы отделения фильтрации необходимо электроэнергии:

$$5 \text{ МВт} \cdot \text{ч} \cdot 24 \text{ ч} \cdot (365 \text{ дней} - 14 \text{ дней}) = 42120 \text{ МВт} \cdot \text{ч/год},$$

где 24 ч – количество часов в сутках, 365 дней – количество дней в году, 14 дней – остановка участка фильтрации на плановый ремонт.

Следовательно, при внедрении разработанной системы управления процессом обезвоживания количество необходимой электроэнергии для функционирования отделения фильтрации составит:

$$42120 \text{ МВт}\cdot\text{ч/год} \cdot ((100 \% - 3,3 \%) / 100 \%) = 40730,04 \text{ МВт}\cdot\text{ч/год}.$$

Экономия от внедрения разработанной системы управления процессом обезвоживания составит:

$$42120 \text{ МВт}\cdot\text{ч/год} - 40730,04 \text{ МВт}\cdot\text{ч/год} = 1389,96 \text{ МВт}\cdot\text{ч/год},$$

что позволяет предположить экономию денежных средств предприятия на уровне более 8 миллионов рублей в год.

Капитальные затраты на внедрение автоматизированной системы управления процессом обезвоживания с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра на основе МКИ и ГИБУЭР составляют около 10 миллионов рублей, что при экономии более 8 миллионов рублей в год позволит окупить проект менее чем за 1,5 года.

По полученным данным можно сделать вывод, что внедрение разработанной автоматизированной системы управления процессом обезвоживания на основе МКИ и ГИБУЭР приведёт к росту производительности участка фильтрации, снижению удельных расходов используемых в процессе обезвоживания энергоресурсов, таких как электроэнергия, сжатый воздух и техническая вода и экономии денежных средств предприятия на уровне более 8 миллионов рублей в год.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

В четвертой главе данного исследования были разработаны структурно-функциональная схема и алгоритм функционирования системы автоматического управления процессом обезвоживания с индивидуальным

регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра с использованием МКИ и ГИБУЭР.

Разработанная система управления процессом обезвоживания состоит из трёх уровней. Верхний уровень представлен АРМ оператора, средний программируемым логическим контроллером и нижний датчиками и исполнительными механизмами.

Расчёт текущих значений влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра и управляющих параметров (k^*) и (u^*) для экстремального регулятора производится на верхнем уровне. На среднем уровне на основе информации с верхнего и нижнего уровней производится расчёт необходимых управляющих воздействий и заданий для контуров регулирования плотности пульпы и положения задвижки, установленной трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка.

АРМ оператора включает в себя SCADA-систему, модуль косвенного измерения влажности осадка и модуль, реализующий гибридный интеллектуальный блок управления экстремальным регулятором. Данный набор программного обеспечения предоставляет оператору возможность индивидуального регулирования технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра как в ручном, так и в автоматическом режиме. Наличие в системе модуля косвенного измерения даёт возможность повысить частоту измерения влажности осадка, что приводит к более оперативному анализу протекания процесса обезвоживания и управлению им. Экстремальный регулятор с разработанным ГИБУЭР, входящий в состав системы, позволяет наилучшим образом настроить каждый дисковый вакуум-фильтр отделения при различных значениях загрязнённости фильтроткани и гранулометрического состава концентрата в пульпе питания фильтров с минимальным количеством переключений заданий плотности пульпы и положения задвижки, что снижает износ исполнительных механизмов, а также колебания влажности осадка.

Произведённый в данной работе расчёт экономической эффективности показал, что внедрение разработанной автоматизированной системы управления процессом обезвоживания с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра на основе МКИ и ГИБУЭР приведёт к росту производительности участка фильтрации, снижению удельных расходов используемых в процессе обезвоживания энергоресурсов и экономии денежных средств предприятия на уровне более 8 миллионов рублей в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена решению важной научно-технической задачи повышения производительности дискового вакуум-фильтра при условии поддержания влажности осадка на заданном уровне. В ходе решения данной задачи автором лично были получены следующие основные результаты:

1. Проведён анализ основных видов вакуум-фильтров, работы дискового вакуум-фильтра, параметров, влияющих на процесс обезвоживания, проблем, связанных с управлением процессом обезвоживания.

2. Проведено исследование технологических методов интенсификации процесса обезвоживания и методов, использующих автоматизацию.

3. Разработана оригинальная система управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра.

4. Разработана методика косвенного измерения влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра, позволяющая на основе разработанной нейросетевой модели технологического агрегата определять данные параметры с высокой частотой.

5. На основе сравнительного анализа работы моделей базовой системы управления и системы управления с автоматическим регулированием влажности осадка доказана целесообразность применения МКИ в системе управления.

6. Получена методика разработки гибридного интеллектуального блока управления экстремальным регулятором, обеспечивающего снижение в среднем в 7 раз наработки исполнительных механизмов.

7. Разработан оригинальный алгоритм функционирования гибридного интеллектуального блока управления экстремальным регулятором, определяющий порядок взаимодействия блоков оценки целесообразности

коррекции задания плотности пульпы и положения задвижки, а также блока активации и деактивации экстремального регулятора.

8. В результате проведённого анализа функционирования моделей разработанной системы управления без использования и с использованием ГИБУЭР доказана целесообразность применения последнего.

9. Оценена устойчивость каждого из контуров, входящих в состав разработанной системы управления с МКИ и ГИБУЭР.

10. Разработана структурно-функциональная схема автоматизированной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра на основе МКИ и ГИБУЭР и алгоритм функционирования АСУ.

11. Произведён расчёт экономической эффективности показывающий, что внедрение разработанной автоматизированной системы управления процессом обезвоживания на основе МКИ и ГИБУЭР приведёт к росту производительности участка фильтрации на 3,5 % и снижению удельного расхода электроэнергии на 3,3 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафонов Д.Н. Управление процессом разделения технологических пульп медно-никелевого производства в современных фильтр-прессах: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.06. – СПб., 2012. – 120 с.
2. Nomitech [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nomitech.ru/articles-and-blog/ustroystvo_i_printsip_raboty_vakuum_filtrov.html (дата обращения: 04.10.17).
3. ENCE GmbH [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.oil-filters.ru/filter-presses.php> (дата обращения: 04.10.17).
4. Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт вакуум-фильтров участка дробления и фильтрации отделения окомкования ЦОиМ. Технологическая инструкция по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту оборудования ТИО ОА - 2014.
5. Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт вакуум-насосов участка дробления и фильтрации отделения окомкования ЦОиМ. Технологическая инструкция по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту оборудования ТИО ОА - 2014.
6. Гольберт Ю.С. Обезвоживание концентратов черных металлов / Ю.С. Гольберт, А.А. Гонтаренко. – М. : Недра, 1986. – 182 с.
7. Ширяева Е.В. Процессы фильтрования суспензий и обезвоживания осадков на промышленных вакуум-фильтровальных установках непрерывного действия : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.17.08. – М., 2011. – 19 с.
8. Отбор и подготовка проб кека, бентонитового и известнякового порошков, сырых окатышей. Технологическая инструкция ТИ ОА - 182 - 2015.
9. Анпилов А.О. Модернизация системы управления вакуум-фильтра обогатительной фабрики / А.О. Анпилов, Ю.И. Ерёменко // Наука, образование, общество: проблемы и перспективы развития. – 2015. – Т.2. – С. 18-19.

10. Еременко Ю.И. О повышении эффективности работы дискового вакуум-фильтра / Ю.И. Еременко, С.Ю. Халапян, А.О. Анпилов // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. – 2015. – С. 167-171.

11. Садыков В.Х. Совершенствование процесса фильтрования железорудного концентрата на основе выбора рациональной структуры и параметров дискового вакуум-фильтра : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 25.00.13. – Магнитогорск, 2008. – 21 с.

12. Садыков В.Х. Совершенствование дисковых вакуум-фильтров для обезвоживания железорудных концентратов / В.Х. Садыков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2007. – №3. – С. 19-22.

13. Стовпенко А.С. Анализ и усовершенствование существующих конструкций вакуум-фильтров при помощи имитационного моделирования / А.С. Стовпенко // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – С. 1539-1541.

14. Лозовая С.Ю. Интенсификация процессов разделения пульпы в дисковых вакуум фильтрах / С.Ю. Лозовая, Г.И. Чемеричко, А.С. Стовпенко, В.Ю. Наризных // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – №2. – С. 95-98.

15. Белоглазов И.Н. Основы расчёта фильтрационных процессов / И.Н. Белоглазов, В.О. Голубев. – М. : Руда и металлы. 2002. – 210 с.

16. Губин Г.Г. Применение электроосмоса на дисковом вакуум-фильтре : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.15.08. – Кривой Рог, 1996. – 23 с.

17. Губин Г.В., Инновации ждут применения / Г.В. Губин, В.И. Мулявко, Г.Г. Губин // Вестник Криворожского национального университета. – 2013. – №34(1). – С. 74-77.

18. Надутый В.П. Фильтрация железорудного концентрата с применением магнитных полей / В.П. Надутый, В.В. Челышкина //

Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. - Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. – 2012. – №97. – С. 199-205.

19. Пилов П.И. Интенсификация процессов обезвоживания под воздействием микроволнового электромагнитного излучения / П.И. Пилов, А.А. Березняк, Д.П. Буртовой, Д.Ю. Хохуля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2005. – №5. – С. 342-345.

20. Пат. US 4156649 A, US 05/880,267. Dewatering ore concentrates with branched alkyl ethoxylated alcohol / J. E. Quinn, L. S. Wittenbrook, C. E. Donegan. – Заявлено 22.02.1978; Опубл. 29.05.1979. – 4с.: ил.

21. Пат. US 4207186 A, US 05/966,706. Process for dewatering mineral concentrates / S.S. Wang, M.E. Lewellyn, C. Dugan. – Заявлено 05.12.1978; Опубл. 10.06.1980. – 7с.: ил.

22. Пат. US 5545332 A, US 08/347,324. Process for dewatering fine-particle solids suspensions / R. Koester, G. Stoll, P. Daute. – Заявлено 24.05.1993; Опубл. 13.08.1996. – 4с.: ил.

23. Морозова Л.А. Исследования по применению флокулянтов для интенсификации работы сгустительного и обезвоживающего оборудования / Л.А. Морозова, А.В. Бояренко, А.Г. Резниченко, И.А. Загний // Обогащение полезных ископаемых. – 2013. – №53(94).

24. Воловиков А.Ю. Методика проведения экспериментов в рамках исследования процесса обезвоживания железорудного концентрата с использованием вакуумных дисковых фильтров / А.Ю. Воловиков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – №8. – С. 296-299.

25. Спинеев В.А. Интенсификация обезвоживания продуктов флотации ПАО "ДТЭК" Добропольская ЦОФ" / В.А. Спинеев, О.А. Морозов, А.В. Федоров // Обогащение полезных ископаемых. – 2013. – №53(94).

26. Кутлубаев И.М. Анализ влияния режима отдувки на влажность осадка при обезвоживании железорудных концентратов на дисковых вакуум-

филтрах / И.М. Кутлубаев, В.Х. Садыков, Б.А. Третьяк, И.Г. Усов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2008. – №2. – С. 12-14.

27. Стовпенко А.С. Усовершенствование конструкции вакуум фильтров с применением современных материалов / А.С. Стовпенко, С.Ю. Лозовая // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – 2014. – С. 303-306.

28. Конструкции вакуум-фильтров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://studopedia.ru/3_65444_konstruktsii-vakuum-filtrov.html (дата обращения: 10.02.17).

29. Бондарь В.В. Состояние и перспективы применения дисковых вакуумных фильтров с керамическими фильтрующими элементами в технологии обезвоживания горно-обогатительных производств / В.В. Бондарь, Б.Л. Красный // Металлург. – 2007. – №2. – С. 77-81.

30. ООО "Рудгормаш" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rudgormashural.ru/produktsiya/vakuum-filtry/keramicheskie-vakuum-filtry-kdf> (дата обращения: 10.02.17).

31. Бондарь В.В. Применение современной фильтрующей керамики - эффективный способ энергосбережения / В.В. Бондарь, А.Г. Буртовой, Б.Л. Красный, П.Н. Рубцов. // Металлург. – 2004. – №5. – С. 26-29.

32. Стовпенко А.С. Анализ работы керамических дисковых вакуум фильтров / А.С. Стовпенко, В.Ю. Наризных, С.Ю. Лозовая // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – №3-1. – С. 81-85.

33. Сизов А.Б. Автоматизированная система контроля и мониторинга работы керамических дисковых фильтров КДФ-75 / А.Б. Сизов // Молодёжь и новые информационные технологии. – 2016. – С. 262-267.

34. Воловиков А.Ю. Разработка математической модели засорения керамических вакуумных дисковых фильтров при обезвоживании железорудного концентрата / А.Ю. Воловиков, Ю.В. Шариков // Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №5. – С. 39-41.

35. Воловиков А.Ю. Влияние отдельных флотационных реагентов на засорение материала керамических вакуумных дисковых фильтров / А.Ю. Воловиков, Ю.В. Шариков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №5. – С. 35-38.

36. Вакуум-фильтрация и пресс-фильтрация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studref.com/638567/geografiya/vakuum_filtrovanie_press_filtrovanie (дата обращения: 23.11.17).

37. Инновационные разработки в области обезвоживания флотационного концентрата [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dakt-engineerin.livejournal.com/3534.html> (дата обращения: 23.11.17).

38. АКС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://a-k-c.su/site/stati/oborudovanie-dlya-obezvozhivaniya-i-filtracii-kompanii-andritz> (дата обращения: 23.11.17).

39. Пат. SU 1713617 А1 СССР, МКИ В 01 D 37/04. Способ автоматического управления работой вакуум-фильтра / Г.Г. Кононенко, А.Н. Бокатий, В.В. Дядюра, М.А. Шаркевич, В.Г. Дейнега. – № 4793799/26; Заявлено 03.01.1990; Оpubл. 23.02.1992, Бюл. № 7. – 3с.: ил.

40. Пат. 601029 СССР, МКИ В 01 D 37/04. Способ управления процессом обезвоживания в вакуум-фильтрах / Ю.Г. Гончаров, П.С. Энгель, А.М. Рясной, Ю.М. Кайгородцев, А.А. Миллер, В.П. Подопригора, Д.И. Малюта, Б.Е. Халецкий, Ю.Г. Гончаров. – № 1885749/23-26; Заявлено 19.02.1973; Оpubл. 05.04.1978, Бюл. № 13. – 2с.: ил.

41. Пат. 349864 СССР, МКИ F 27b 21/00. Устройство для автоматического регулирования технологических параметров / А.Я. Щеголихин. – № 1449987/22-1; Заявлено 18.06.1970; Оpubл. 04.09.1972, Бюл. № 26. – 2с.: ил.

42. Пат. 381369 СССР, МКИ В 01d 37/04. Способ автоматического регулирования процесса фильтрации / Р.Х. Нураев, В.Н. Авилов. –

№ 1365677/23-26 ; Заявлено 22.09.1969; Оpubл. 22.05.1973, Бюл. № 22. – 2с.: ил.

43. Пат. 691156 СССР, МКИ В 01 D 37/04 Способ автоматического управления дисковым вакуум-фильтром А.Я. Пацкан, А.А. Щелинский, Ю.П. Черник, А.И. Золотарёв. – № 2434376/23-26; Заявлено 15.10.1979; Оpubл. 15.10.1979, Бюл. № 38. – 3с.: ил.

44. Пат. SU 1725971 A1 СССР, МКИ В 01 D 37/04. Способ автоматического управления процессом обезвоживания суспензии в барабанном или ленточном вакуум-фильтре / Б.А. Вишняк, С.М. Бурштейн, С.А. Бродская. – № 4816665/26; Заявлено 23.04.1990; Оpubл. 15.04.1992, Бюл. № 14. – 3с.: ил.

45. Пат. SU 1194463 А СССР, МКИ В 01 D 37/04. Способ управления режимом работы фильтра непрерывного действия / М.С. Симкина, В.Л. Рдушкевич, Р.И. Батырев, Б.Ф. Зарецкий, Ю.Н. Бочков, Ю.В. Гутин. – № 3765099/23-26; Заявлено 29.06.1984; Оpubл. 30.11.1985, Бюл. № 44. – 4с.: ил.

46. Пат. SU 1200942 А СССР, МКИ В 01 D 37/04. Способ автоматического управления дисковым вакуум-фильтром / В.Н. Молодцов, А.Д. Гришунин, О.А. Калайтанова. – № 3725612/23-26; Заявлено 05.01.1984; Оpubл. 30.12.1985, Бюл. № 48. – 2с.: ил.

47. Пат. 519208 СССР, МКИ В 01 D 37/04. Устройство для автоматического регулирования работы фильтровального отделения / В.В. Стальский, А.Г. Цай. – № 2105235/26; Заявлено 17.02.1975; Оpubл. 30.06.1976, Бюл. № 24. – 3с.: ил.

48. Сунцев Д.А. Автоматизация управления технологическим комплексом механического обезвоживания осадков сточных вод : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.13.06. – М., 2004. – 18 с.

49. Вишняк Б.А. Автоматизированное управление сушильно-фильтровальным комплексом сильвинитовых обогатительных фабрик: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.07. – Минск, 1984. – 215 с.

50. Симкина М.С. Оптимизация режимов работы фильтров в углеобогащении: дис. ... канд. тех. наук: 05.15.08. – М., 1984. – 228 с.

51. Борщев В.А. Адаптивная система управления нестационарным объектом (на примере фильтрования вискозы): дис. ... канд. тех. наук: 05.13.07. – М., 1984. – 247 с.

52. Группа компаний Элтикон [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elticon.ru/produkcija/sistemnye-resheniya/sistema-izmereniya-vlazhnosti-zapolnitelej> (дата обращения: 06.10.17).

53. Пат. 811084 СССР, МКИ G 01 J 1/04. Оптический влагомер / Н.Г. Чирков, Ю.И. Щербаков. – № 2759311/18-25; Заявлено 25.04.1979; Оpubл. 07.03.1981, Бюл. № 9. – 2с.: ил.

54. Пат. 617710 СССР, МКИ G 01 N 27/04. Устройство для измерения влажности сыпучих материалов / Н.А. Давыдов, А.И. Аверин, Ю.М. Дорошенко. – № 2404103/18-24; Заявлено 10.09.1976; Оpubл. 30.07.1978, Бюл. № 28. – 3с.: ил.

55. Пат. 1712831 СССР, МКИ G 01 N 9/36. Устройство для измерения влажности железорудного концентрата / Н.М. Зайцев, Т.В. Малащенко, В.И. Базаря, В.С. Замыцкий. – № 4499325/25; Заявлено 28.10.1988; Оpubл. 15.02.1992, Бюл. № 6. – 4с.: ил.

56. Пат. 1002933 СССР, МКИ G 01 N 27/22. Ёмкостный датчик для измерения влажности сыпучих материалов в потоке / Р.З. Икрамов, А. Халиков. – № 3348696/18-25; Заявлено 30.10.1981; Оpubл. 07.03.1983, Бюл. № 9. – 4с.: ил.

57. Пат. US5380440 A, G 05 D 22/02. Two dewatering of slurries controlled by video system / E.R. Chipps. – Заявлено 20.05.1993; Оpubл. 10.01.1995. – 4с.: ил.

58. RMT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rmt.cz/katalog/vlhko/KL/KL-02-Q-901_0408_SPEKTRA_RU.pdf (дата обращения: 23.11.17).

59. Мохар А. Опыт использования влагомеров КЕТТ JE-400 для непрерывного измерения влажности продуктов обогащения / А. Мохар, Н. Стаценко // Горная промышленность. – 2007. – №2(72). – С. 42-43.

60. Производственно-коммерческая группа "Гранат" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http: // granat-e.ru / fizepr-sw100-10.html](http://granat-e.ru/fizepr-sw100-10.html) (дата обращения: 23.11.17).

61. ООО."Технология" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http: // vlagomer-urovnmeter.ru / katalog / vlagomery / potochnyj-vlagomer-mikroradar-113a](http://vlagomer-urovnmeter.ru/katalog/vlagomery/potochnyj-vlagomer-mikroradar-113a) (дата обращения: 06.10.17).

62. КИП Эксперт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http: // www.kipexpert.ru / component / content / article / 103-oborudovanie / 278-vlagomer-obzor.html](http://www.kipexpert.ru/component/content/article/103-oborudovanie/278-vlagomer-obzor.html) (дата обращения: 06.10.17).

63. ООО."СВР-СИСТЕМС" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http: // www.swrsystems.ru / msens2.html](http://www.swrsystems.ru/msens2.html) (дата обращения: 15.11.17).

64. Микроволновые зонды измерения влажности BASIC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http: // www.promsat.com // content / files / cat / franzludwig / FL_zond_basic. pdf](http://www.promsat.com/content/files/cat/franzludwig/FL_zond_basic.pdf) (дата обращения: 06.10.17).

65. Группа компаний Элтикон [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http: // www.elticon.ru / produkciya / sistemnye-resheniya / sistema-izmereniya-vlazhnosti-zapolnitelej / 28](http://www.elticon.ru/produkcija/sistemnye-resheniya/sistema-izmereniya-vlazhnosti-zapolnitelej/28) (дата обращения: 15.11.17).

66. TENZO-PRIBOR [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.tenzo-pribor.ru/catalog/vesy_promyshlennye/vesy_konveyernye/2784/ (дата обращения: 15.11.17).

67. Сибтезоприбор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sibtenzo.com/products/vesy-konveyernye/vesy-konveyernye-vk-m-1-1000-1/> (дата обращения: 15.11.17).

68. ООО "Город инструмента" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http: // www.sensoren.ru / opticheskie _datchiki _ rasstoyaniya _leuze _ electronic _ odsl _8.html](http://www.sensoren.ru/opticheskie_datchiki_rasstoyaniya_leuze_electronic_odsl_8.html) (дата обращения: 23.11.17).

69. ООО "Город инструмента" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// www.sensoren.ru /opticheskie_datchiki_rasstoyaniya_balluff_bod_26k.html](http://www.sensoren.ru/opticheskie_datchiki_rasstoyaniya_balluff_bod_26k.html) (дата обращения: 26.11.17).

70. ООО "Город инструмента" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// www.sensoren.ru / opticheskie_datchiki_rasstoyaniya_ifm_electronic_serii_oid.html](http://www.sensoren.ru/opticheskie_datchiki_rasstoyaniya_ifm_electronic_serii_oid.html) (дата обращения: 23.11.17).

71. Русавтоматизация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// rusautomation.ru / lazernye-datchiki-rasstoyaniya-baum](http://rusautomation.ru/lazernye-datchiki-rasstoyaniya-baum) (дата обращения: 26.11.17).

72. Гольберт Ю.С. Процессы и оборудования для обезвоживания руд / Ю.С. Гольберт, А.А. Гонтаренко, В.Т. Баришполец, Б.В. Гищук. – М.: Недра, 1977. – 168 с.

73. Fan Y., Dong X., Li H. Dewatering effect of fine coal slurry and filter cake structure based on particle characteristics // Vacuum. 2015. Vol. 114. P. 54-57.

74. Ширяева Е.В. Процессы фильтрования суспензий и обезвоживания осадков на промышленных вакуум-фильтровальных установках непрерывного действия [Текст]: дис. ... канд. тех. наук : 05.17.08 : защищена 17.11.11 . – М., 2011. – 130 с.

75. Халапян С.Ю. Разработка модели процесса обезвоживания железорудного концентрата / С.Ю. Халапян, А.О. Анпилов // Системы управления и информационные технологии. – 2021. – №4(86). – С. 18-22.

76. Ерёменко Ю.И. Повышение энергоэффективности процесса обезвоживания железорудного концентрата путем его автоматизации на основе нейросетевых технологий / Ю.И. Ерёменко, С.Ю. Халапян, А.О. Анпилов // Горный журнал. – 2020. – №3. – С. 62-66.

77. Халапян С.Ю. Об организации косвенного измерения влажности и толщины осадка на дисках вакуум-фильтра с целью повышения его производительности / С.Ю. Халапян, А.О. Анпилов, А.И. Безмельцев,

В.В. Ананьев // Вестник научных конференций. – 2016. – №9-5(13). – С. 202-203.

78. Халапян С.Ю. Применение нейросетевых технологий для организации косвенных измерений в системе управления процессом обезвоживания железорудного концентрата / С.Ю. Халапян, А.О. Анпилов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – №12. – С. 195-200.

79. Балдин К.В. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник / К.В. Балдин, В.Н. Башлыков, А.В. Рукоусев. – М. : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2008. – 473 с.

80. Ерёменко Ю.И. Экспертная система технического обслуживания машин / Ю.И. Ерёменко, В.Б. Крахт, Е.В. Ошовская, В.Я. Седуш, Г.В. Сопилкин; под редакцией Сопилкина Г.В. – Старый Оскол, СОФ МИСиС, 1999. – 306 с.

81. Khalapyan S.Y., Rybak L.A., Glushchenko A.I., Mamaev Y.A. On neural network model development to solve parallel robots kinematics and control problems // International Journal of Pharmacy & Technology. – 2016. – Vol. 8, № 4. – P. 25085-25095.

82. Serrano F., Yen K., Caballero A., Brezina T. Control of a Stewart platform with fuzzy logic and artificial neural network compensation // Florida International University. – 2007. – P. 156-160.

83. Koldaev A.I. The Neuro-Fuzzy Controller of Reactor Installation Management of Butanol Hydrogenation // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2014. – Vol. 3. – P. 1568-1571.

84. Каллан Роберт. Основные концепции нейронных сетей. : Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 288 с. : ил. – Парал. тит. англ.

85. Fang M., Zhuo Y., Lee Z. The application of the self-tuning neural network PID controller on the ship roll reduction in random waves // Ocean Engineering. – 2010. – №37.

86. Сигеру Омату. Нейроуправление и его приложения. Пер. с англ. Н.В. Батина. Под редакцией А.И. Галушкина, В.А. Птичкина / Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф. – М. : ИПРЖР, 2000. – 272 с.

87. Funahashi K., Nakamura Y. Approximation of Dynamical Systems by Continuous Time Recurrent Neural Networks // Neural Networks. 1993. Vol. 6, No. 6. P. 801-806.

88. Hecht-Nielsen R. Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem // Proc. IEEE First Annual Int. Conf. On Neural Networks. San Diego, CA, 1987. Vol. 3. P. 11–14.

89. Mamghaderi H., Gharabaghi M., Noaparast M. Optimization of role of physical parameters in the filtration processing with focus on the fluid flow from pore // Minerals Engineering. 2018. Vol. 122. P. 220-226.

90. Shao P., Darcovich K., McCracken T., Ordorica-Garcia G., Reith M., O'Leary S. Algae-dewatering using rotary drum vacuum filters: Process modeling, simulation and techno-economics // Chemical Engineering Journal. 2015. Vol. 268. P. 67-75.

91. Huttunen M., Nygren L., Kinnarinen T., Häkkinen A., Lindh T., Ahola J., Karvonen V. Specific energy consumption of cake dewatering with vacuum filters // Minerals Engineering. 2017. Vol. 100. P. 144-154.

92. Комашинский В.И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 94 с.

93. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта [Текст] / Л. Рутковский ; пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком. – 2010. – 520 с.

94. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком. – 2006. – 452 с.: ил.

95. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

96. Wang L.X., Mendel J.M. Back-propagation fuzzy system as nonlinear dynamic system identifiers // IEEE International Conference on Fuzzy System. 1992. P. 1409-1418.
97. Wang L.X., Fuzzy systems are universal approximators // IEEE International Conference on Fuzzy System. 1992. P. 1163-1170.
98. Wang L.X., Mendel J.M. Fuzzy Basis Functions, Universal Approximation, and Orthogonal Least-Squares Learning // IEEE transactions on neural networks. 1992. Vol. 3. NO. 5. P. 807-814.
99. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М.: Наука, 1972. – 786 с.
100. Либерзон Л.М. Системы экстремального регулирования / Л.М. Либерзон, А.Б. Родов. – М.–Л.: Энергия, 1965. – 160 с.
101. Зайцев Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – 2-е изд., перераб. и доп.— К.: Высш. шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.
102. Казакевич В.В. Об экстремальном регулировании, Диссертация, МВТУ, 1944.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Методы интенсификации процесса обезвоживания без использования САУ

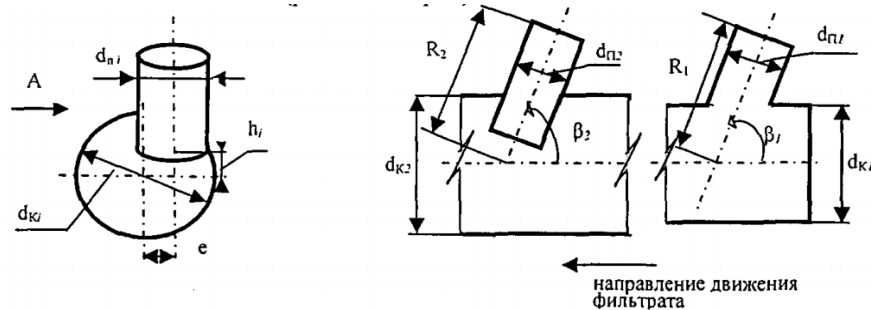
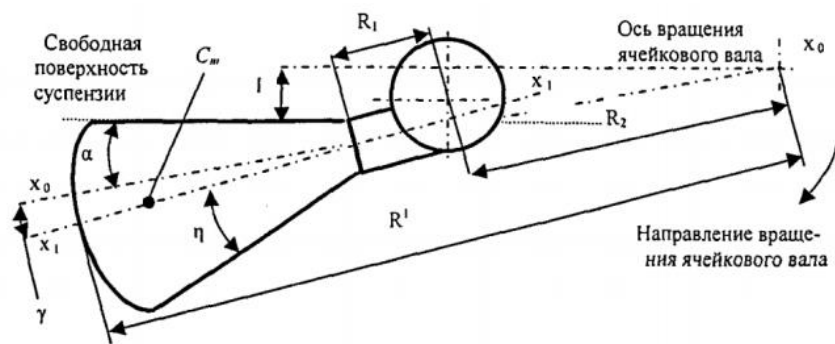


Рисунок А.1. Соединение патрубка сектора с трубой коллектора



R' - максимальный радиус приводного вала в сборе с сектором, м;

d_{Π} - диаметр патрубка сектора, м; n' - число секторов в ряду;

$\omega_{\text{в}}$ - угловая скорость ячеечного вала, рад/с

Рисунок А.2. Положение сектора

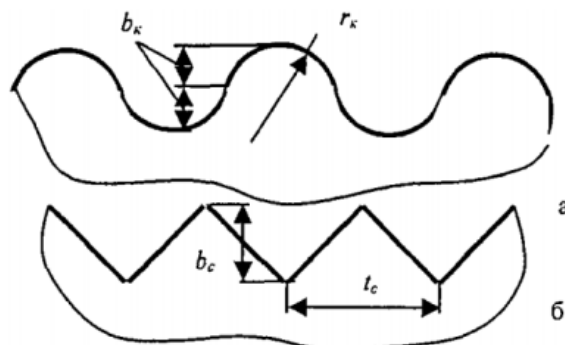


Рисунок А.3. Профили поверхности сектора

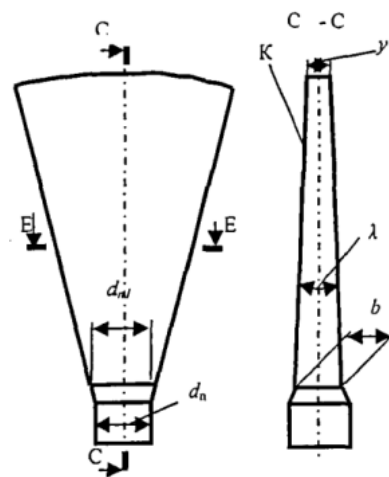


Рисунок А.4. Модернизированный сектор

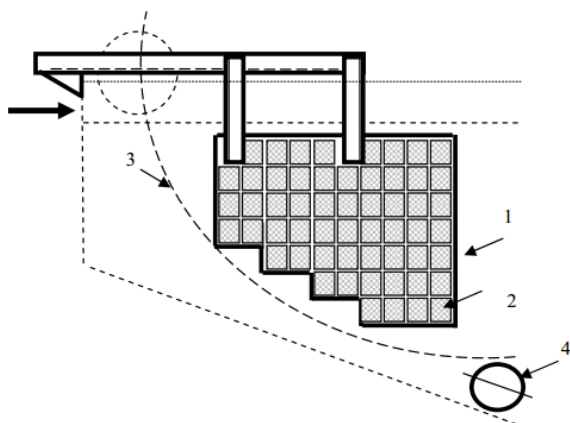


Рисунок А.5. Пластина магнитной системы фильтра

Способы автоматического управления процессом обезвоживания

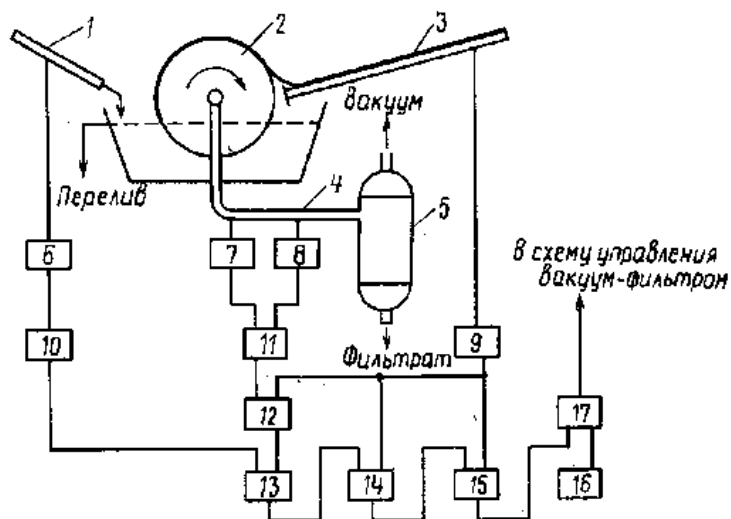


Рисунок Б.1. САУ вакуум-фильтром (патент № SU 1713617 A1)

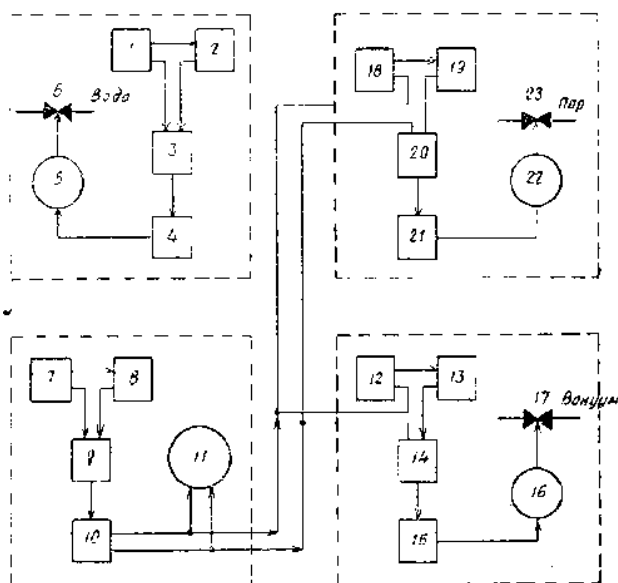


Рисунок Б.2. САУ вакуум-фильтром (патент № 601029)

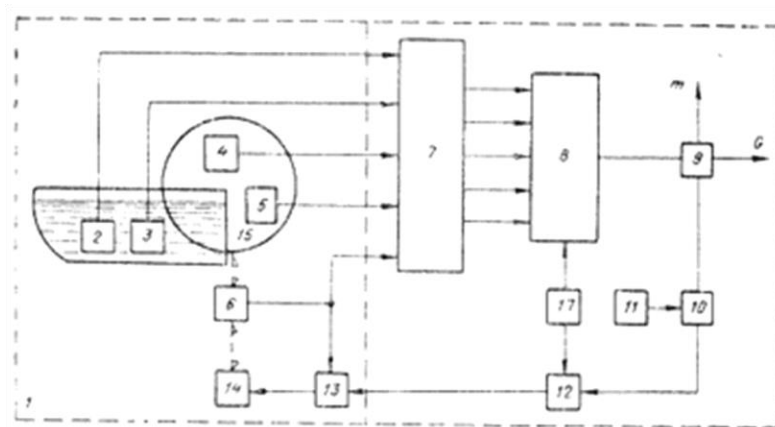


Рисунок Б.3. САУ вакуум-фильтром (патент № 349864)

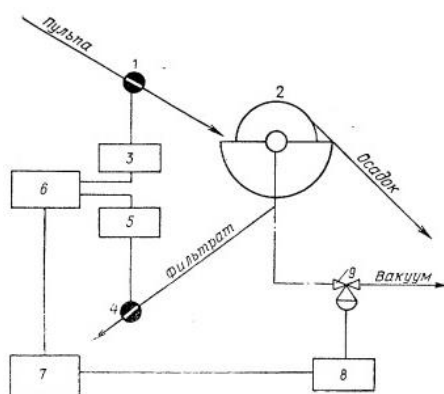


Рисунок Б.4. САУ вакуум-фильтром (патент № 381369)

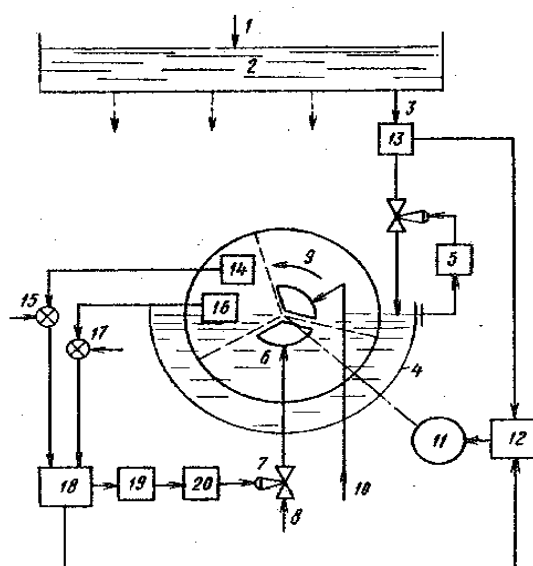


Рисунок Б.5. САУ вакуум-фильтром (патент № 691156)

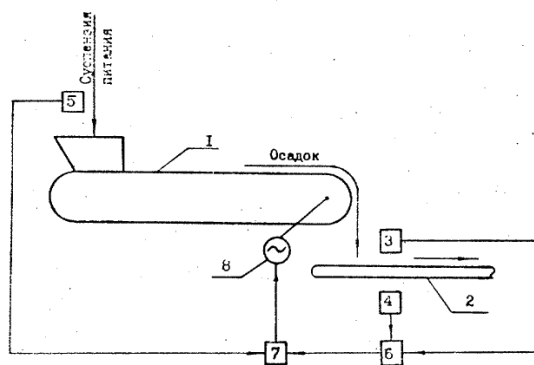


Рисунок Б.6. САУ вакуум-фильтром (патент № SU 1725971 A1)

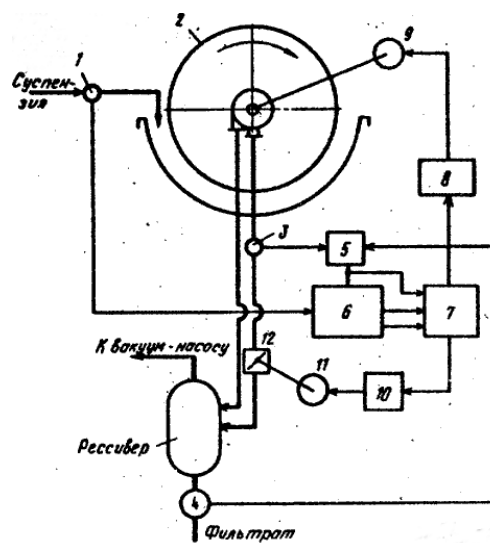


Рисунок Б.7. САУ вакуум-фильтром (патент № SU 1194463 A)

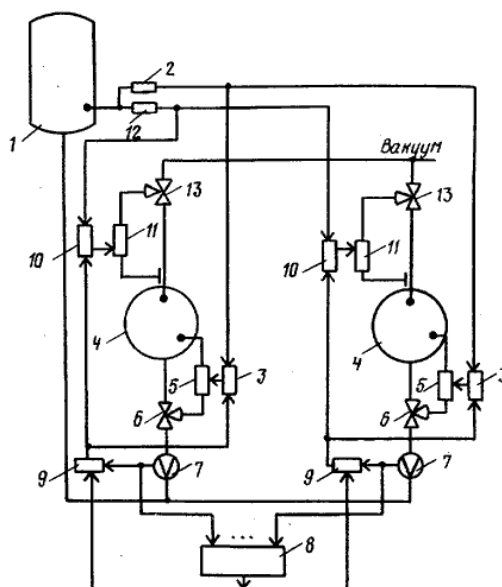


Рисунок Б.8. САУ группой вакуум-фильтров (№ SU 1200942 A)

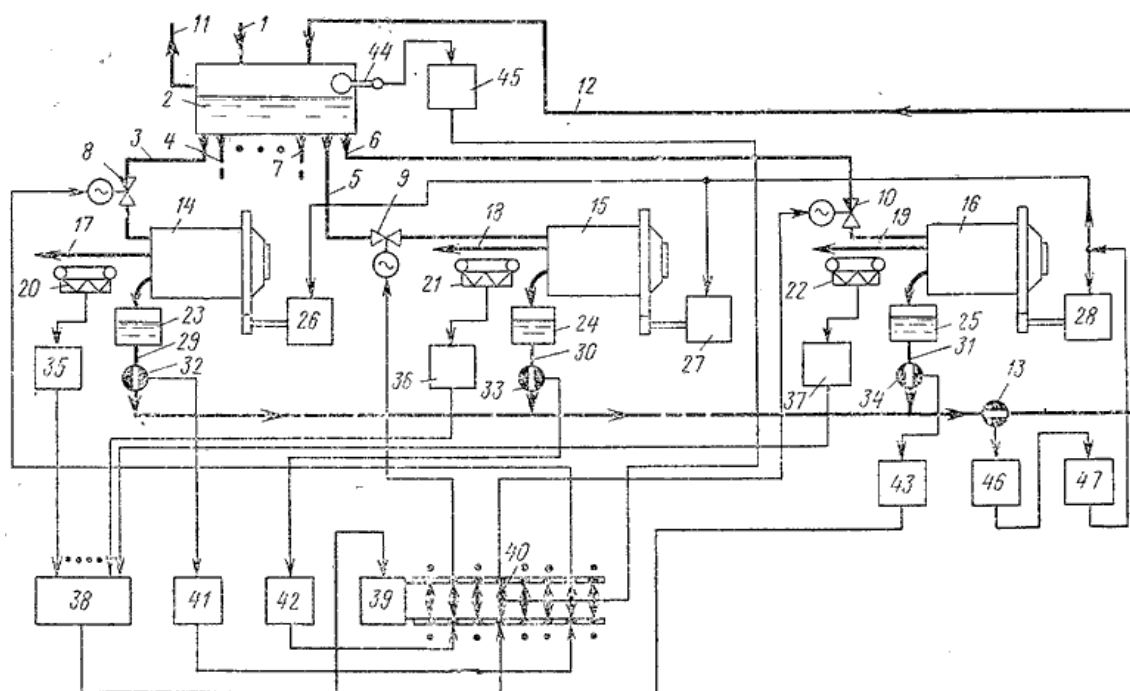


Рисунок Б.9. САУ группой вакуум-фильтров (патент № 519208)



Рисунок Б.10. Структурная схема системы управления

Способы измерения влажности железорудного концентрата

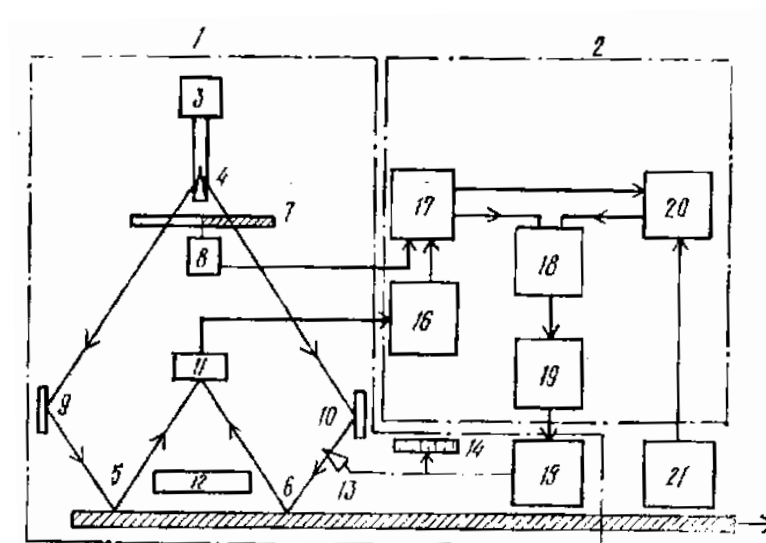


Рисунок В.1. Оптический влагомер (патент № 811084)

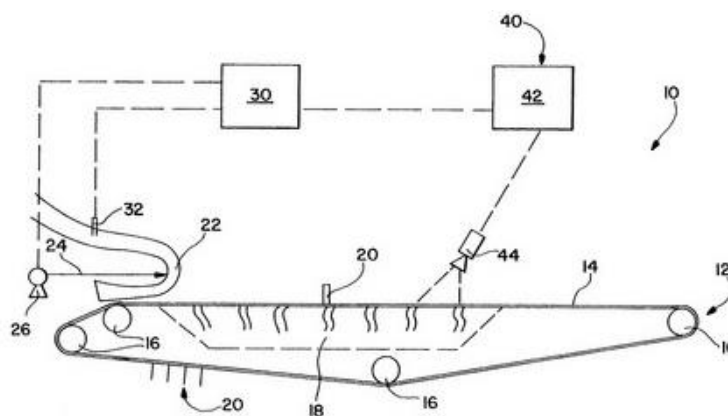


Рисунок В.2. Two dewatering of slurries controlled by video system
(патент № US5380440 А)

Программа, реализующая работу многопараметрического экстремального регулятора

```
function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = sfuntmpl(t,x,u,flag)
switch flag,
    case 0,
        [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes;
    case 1,
        sys=mdlDerivatives(t,x,u);
    case 2,
        sys=mdlUpdate(t,x,u);
    case 3,
        sys=mdlOutputs(t,x,u);
    case 4,
        sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
    case 9,
        sys=mdlTerminate(t,x,u);
    otherwise
        DASTudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
end
function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes

sizes = simsizes;

sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 4;
sizes.NumOutputs = 5;
sizes.NumInputs = 1;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;

sys = simsizes(sizes);
x0 = [1 1 1 1];
str = [];
ts = [-1 0];

simStateCompliance = 'UnknownSimState';

function sys=mdlDerivatives(t,x,u)
sys = [];

function sys=mdlUpdate(t,x,u)
global x1;
global x2;
global x3;
global x4;

s1=0.01;
s2=5;
d=0.3;

if mod(t,20)==0
    if abs(u(1)-x(3))<=d
        x(1)=x(1)*-1;
    end
if x(1)==1
if u(1)<x(3)
    x(4)=x(4)*(-1);
end
end
```

```

if u(1)>x(3) && x(4)==1
    x(4)=1;
end
if u(1)>x(3) && x(4)==-1
    x(4)=-1;
end
x1=x1+x(4)*s1; x(3)=u(1);
x3=x(4)*s1;

end

if x(1)==-1
if u(1)<x(3)
    x(2)=x(2)*(-1);
end
if u(1)>x(3) && x(2)==1
    x(2)=1;
end
if u(1)>x(3) && x(2)==-1
    x(2)=-1;
end
x2=x2+x(2)*s2;
x(3)=u(1);
x4=x(2)*s2;
end

if x1>2.01
x1=2.01;
end
if x1<1.9
x1=1.9;
end

if x2>100
x2=100;
end
if x2<60
x2=60;
end

end

sys(1)=[x(1)];
sys(2)=[x(2)];
sys(3)=[x(3)];
sys(4)=[x(4)];

function sys=mdlOutputs(t,x,u)
global x1;
global x2;
global x3;
global x4;
sys = [x(1) x1 x2 x3 x4]

function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)
sampleTime = 1;
sys = t + sampleTime;

function sys=mdlTerminate(t,x,u)
sys = [];

```

Справка о возможности использования в АО «ОЭМК им. А.А. Угарова»

Утверждаю
Главный инженер
АО «Оскольский
электрометаллургический
комбинат им. А.А. Угарова»
Е.Н. Носов
сентябрь 2023г.



СПРАВКА

о возможности использования результатов диссертационного исследования Анпилова А.О., направленных на решение актуальной научно-технической задачи повышения производительности технологического процесса обезвоживания железорудного концентрата путём интеллектуального экстремального регулирования производительности каждого дискового вакуум-фильтра, выносимых на защиту кандидатской диссертации

Настоящая справка подтверждает, что следующие результаты, полученные лично Анпиловым А.О. в рамках выполнения исследований, являются актуальными для предприятия и представляют практический интерес:

- методика косвенного измерения (МКИ) влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра на основе разработанной нейросетевой модели технологического агрегата;
- структурно-функциональная схема и алгоритм функционирования автоматизированной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра.

Перечисленные результаты, на наш взгляд, являются весомым вкладом в развитие систем управления отделения фильтрации, что может позволить за счет улучшения качества управления стабилизировать влажность выходного продукта и увеличить производительность вакуум-фильтра более чем на 3 %.

Результаты исследований Анпилова А.О. в части модернизации существующей системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата могут быть рекомендованы к использованию на фабрике окомкования и металлизации АО «ОЭМК им. А.А. Угарова».

Технический директор
АО «ОЭМК им. А.А. Угарова»

Гулов П.В.

Справка о возможности использования в ООО «Гипрометз»

СПРАВКА

о возможности использования результатов диссертационного исследования Анпилова А.О., направленных на решение актуальной научно-технической задачи повышения производительности технологического процесса обезвоживания железорудного концентрата путём интеллектуального экстремального регулирования производительности каждого дискового вакуум-фильтра, выносимых на защиту кандидатской диссертации

Настоящая справка подтверждает, что разработанная в рамках диссертационной работы Анпиловым А.О. автоматизированная система управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра является эффективным способом для стабилизации влажности выходного продукта процесса и определения оптимальных заданий для локальных контуров регулирования плотности пульпы питания и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка. Её внедрение в условиях изменения свойств пульпы и самих вакуум-фильтров позволит повысить производительность передела на 3 - 4 % в годовом исчислении.

Результаты исследования Анпилова А.О. целесообразно использовать при модернизации существующих систем управления технологическим процессом обезвоживания железорудного концентрата.

Начальник ОПЦ

07.06.23

К.А. Локтионов



Приложение Ж

Акт о внедрении результатов диссертационной работы в образовательный процесс Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиала) ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

УТВЕРЖДАЮ



Заместитель директора СТИ НИТУ «МИСИС»
по науке и инновациям, д.т.н.
А.А. Кожухов
« 04 » 07 2023 г.

Акт

о внедрении в образовательный процесс результатов кандидатской диссертационной работы Анпилова Александра Олеговича

Настоящий акт подтверждает, что результаты исследований, проведённых в диссертационной работе Анпилова Александра Олеговича, где описывается разработка методики построения модуля косвенного измерения влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра и методики построения гибридного интеллектуального блока управления экстремальным регулятором и алгоритма его функционирования, используются в учебном процессе в СТИ НИТУ «МИСИС» на кафедре «Автоматизированных и информационных систем управления им. Ю.И. Еременко» в курсе предметов «Нейронечёткие системы управления» и «Автоматизированные средства диагностики оборудования». Использование результатов диссертационной работы позволяет углубить знания студентов в сфере применения методов искусственного интеллекта в управлении сложными технологическими процессами.

заместитель директора
СТИ НИТУ «МИСИС»
по учебно-методической работе  д.э.н., профессор Ильичева Е.В.

И.о. зав. кафедрой
АИСУ им. Ю.И. Еременко
СТИ НИТУ «МИСИС»  к.т.н., доцент Полященко Д.А.