

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

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»

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ**  
кандидат технических наук, доцент,  
Халапян Сергей Юрьевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**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 управлении процессом обезвоживания в настоящей работе выполнен 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.

В рамках проведённого исследования для организации косвенного измерения влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра предложено использовать технологию искусственных нейронных сетей. Свойства ИНС рассмотрены в работах Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубии Юсоф, Л. Рутковского, С. Осовского и других. В состав блока управления экстремальным регулятором входят ИНС и нечёткая нейронная сеть. Свойства ННС рассмотрены в работах Д. Рутковской, М. Пилиньского, Л. Рутковского и других.

**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 систем 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 пульпы, 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 приложении к диссертации.

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.

**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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** доказана актуальность темы исследования, представлены его цель и задачи, приведено краткое содержание диссертационной работы по главам, показаны основные результаты работы, определены: научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

**В первой главе** проведён анализ: основных видов вакуум-фильтров, их принципов работы, основных технологических параметров процесса обезвоживания, проблем в управлении данным процессом. В результате было определено две основные проблемы в управлении вакуум-фильтрами, 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-фильтров.

Был проведён анализ методов интенсификации процесса обезвоживания. Рассмотрены следующие методы: выбор рациональной структуры узлов дискового вакуум-фильтра, установка импульсной отдувки, установка пульсационного оборудования, применение электроосмоса, магнитных полей, химических добавок, керамических вакуум-фильтров, гипербарфильтров и 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. Это позволит учесть индивидуальные характеристики на каждом из фильтров, в частности загрязнённость фильтроткани. Данная система автоматического управления должна содержать следующие контуры регулирования: 1) контур регулирования влажности осадка; 2) контур регулирования уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра; 3) контур регулирования плотности пульпы в ванне вакуум-фильтра; 4) контур регулирования положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка; 5) контур регулирования уровня пульпы в пульподелителе; 6) контур регулирования производительности дискового вакуум-фильтра.

Важнейшими технологическими параметрами процесса обезвоживания являются влажность осадка и производительность 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. Поэтому для организации необходимых контуров регулирования в настоящем исследовании предложена методика косвенного измерения влажности осадка и производительности дискового

вакуум-филтра на основе выявления скрытых взаимосвязей технологических параметров процесса обезвоживания железорудного концентрата.

**Во второй главе** данного исследования была разработана система автоматического управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-филтра и построены функциональные схемы контуров регулирования.

Также была произведена разработка модуля косвенного измерения влажности осадка и производительности дискового вакуум-филтра. Для выявления зависимости в выборках ретроспективных данных на первоначальном этапе использовался метод регрессионного анализа. Выборка экспериментальных данных была проверена на наличие аномальных значений и отфильтрована. Проведённый анализ исходных данных показал, что выходные параметры имеют нормальное распределение и их дисперсии воспроизводимости однородны, следовательно, использование регрессионного анализа обосновано.

Были проведены две серии экспериментов, которые заключались в изменении степени уравнивания полиномиальной регрессии и подборе значений его коэффициентов с целью снижения средней ошибки. В результате этих экспериментов минимальная средняя ошибка для производительности филтра составила 7,52 %, а для влажности осадка 6,64 %, 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. В результате оптимизации её структуры, заключающейся в подборе количества нейронов в скрытом слое и функции их активации была получена НС с 10 нейронами в скрытом слое. В выходном слое функция активации – линейная, в скрытом – «гиперболический тангенс». Входами НС являются: частота вращения дисков, величина давления разрежения и амплитуды вибрации в двух точках ресивера. Выходами – влажность осадка и производительность дискового вакуум-филтра.

Итоговая структура нейронной сети, реализующей модуль косвенного измерения влажности осадка и производительности дискового вакуум-филтра, представлена на рис. 1.

Для проведения сравнительного анализа были построены модели базовой системы управления (СУ) процессом обезвоживания и системы управления с автоматическим регулированием влажности осадка (АРВО) с использованием МКИ. В результате моделирования полученных систем управления процессом обезвоживания были получены следующие графики, представленные на рис. 2 и 3.

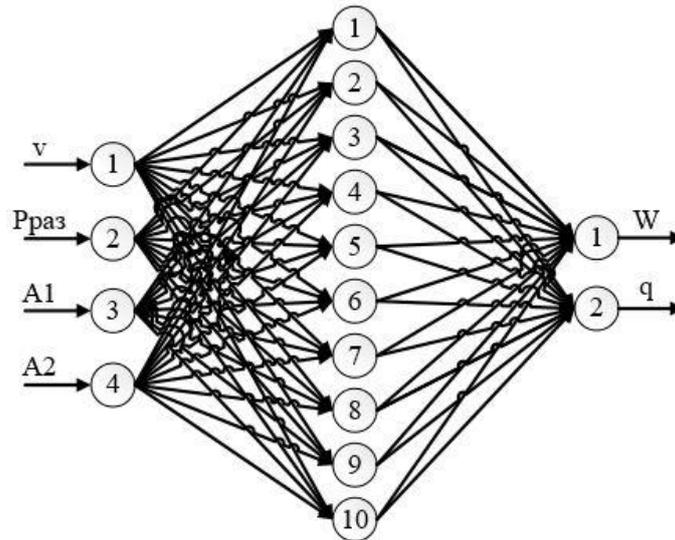


Рисунок 1. Нейронная сеть, реализующая модуль косвенного измерения влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра

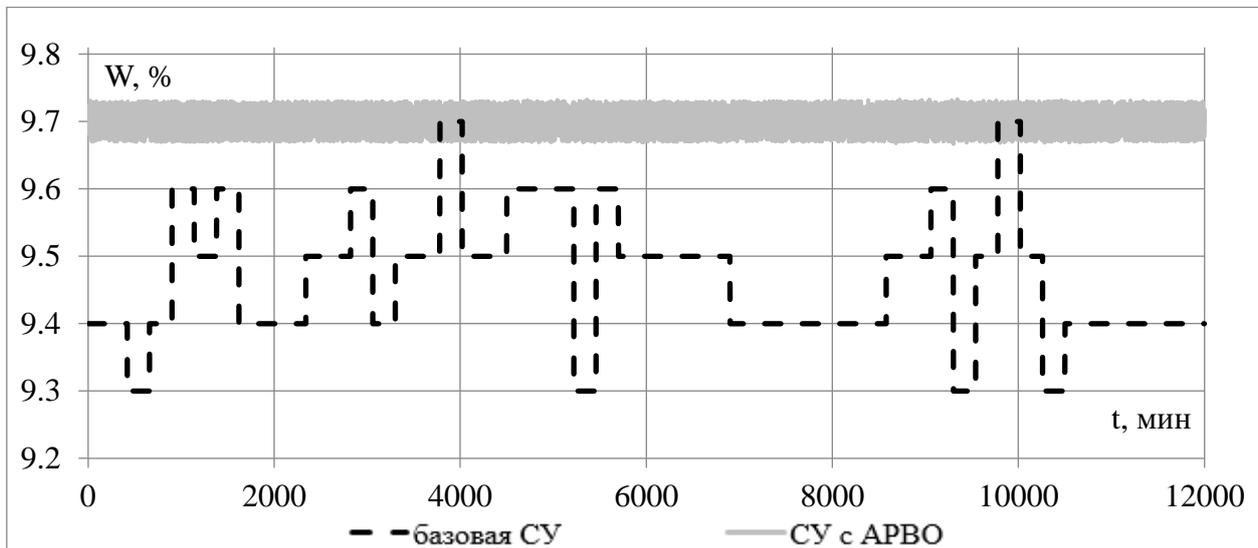


Рисунок 2. Графики изменения влажности осадка при использовании базовой СУ и СУ с АРВО; (t – время)

На рис. 2 представлены следующие графики: чёрный штриховой — график изменения влажности осадка при использовании базовой системы управления с лабораторным анализом влажности, серый — при использовании системы управления с автоматическим регулированием влажности осадка. Из рис. 2 видно, что влажность осадка при использовании базовой системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата в среднем поддерживается на уровне 9,5 %. При этом возникают отклонения влажности осадка от среднего значения до 0,2 %, что является следствием лабораторного анализа влажности, проводимого с малой периодичностью и большим запаздыванием. 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 снижается производительность дискового вакуум-фильтра. По серому графику видно, что при использовании системы управления с автоматическим регулированием влажности осадка данный параметр в среднем поддерживается на заданном уровне 9,7 %. При этом наблюдаются отклонения величины влажности от задания до 0,03 %. Данные отклонения минимальны и практически не влияют на качество управления дисковым вакуум-фильтром, что дало возможность увеличить задание влажности с 9,5 % до 9,7 %. Это привело к увеличению среднего значения частоты вращения дисков, соответственно, производительности дискового вакуум-фильтра (ДВФ). Графики данного параметра представлены на рис. 3.

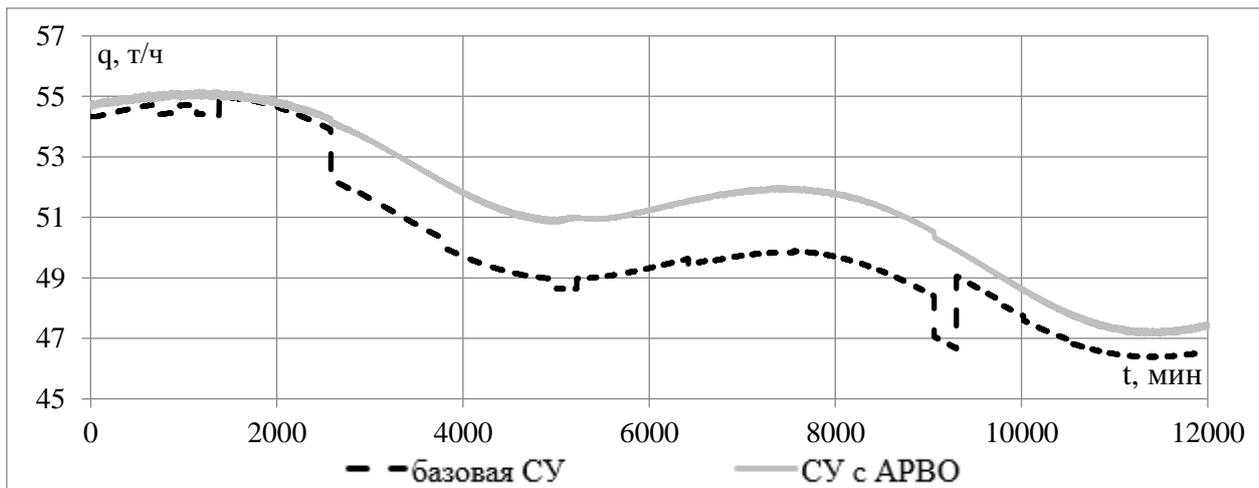


Рисунок 3. Графики производительности дискового вакуум-фильтра при использовании базовой СУ и СУ с АРВО; (t – время)

На рис. 3 приведены следующие графики: чёрный штриховой — график изменения производительности вакуум-фильтра при использовании базовой системы управления и серый — при использовании системы управления процессом обезвоживания с автоматическим регулированием влажности осадка.

По графику изменения производительности вакуум-фильтра при использовании системы управления с автоматическим регулированием влажности осадка было установлено, что данная величина в среднем на 1,9 % больше среднего значения производительности фильтра при использовании базовой системы управления.

В разработанной системе управления процессом обезвоживания в контур регулирования производительности был установлен шаговый экстремальный регулятор, функционирующий на основе метода по координатного подъёма. Функциональная схема разработанной системы управления с данным экстремальным регулятором, представлена на рис. 4.

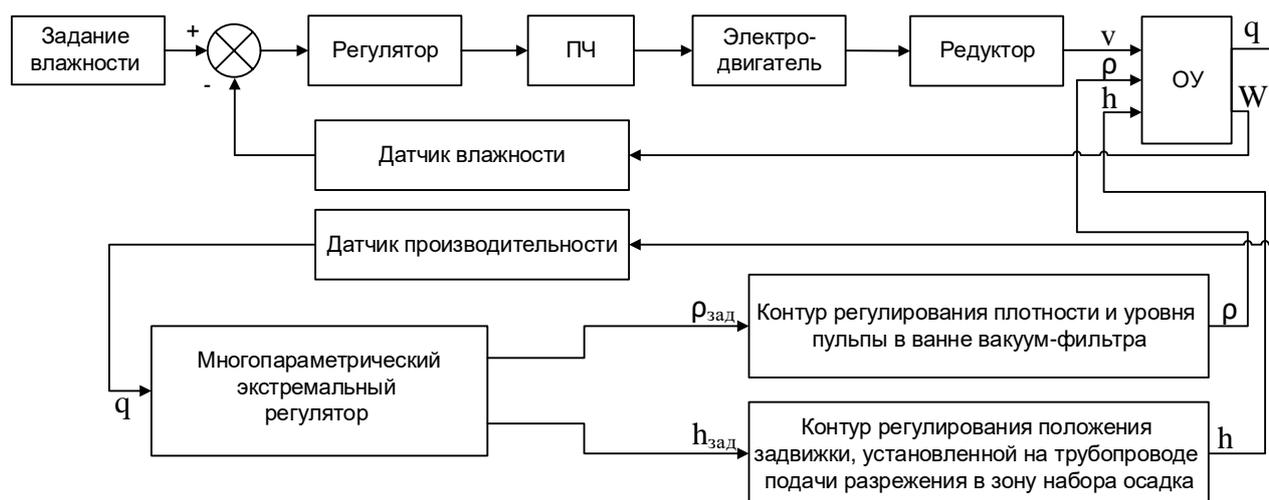


Рисунок 4. Функциональная схема системы управления с использованием экстремального регулятора

В результате моделирования систем управления процессом обезвоживания железорудного концентрата были получены графики производительности дискового вакуум-фильтра, представленные на рис. 5.

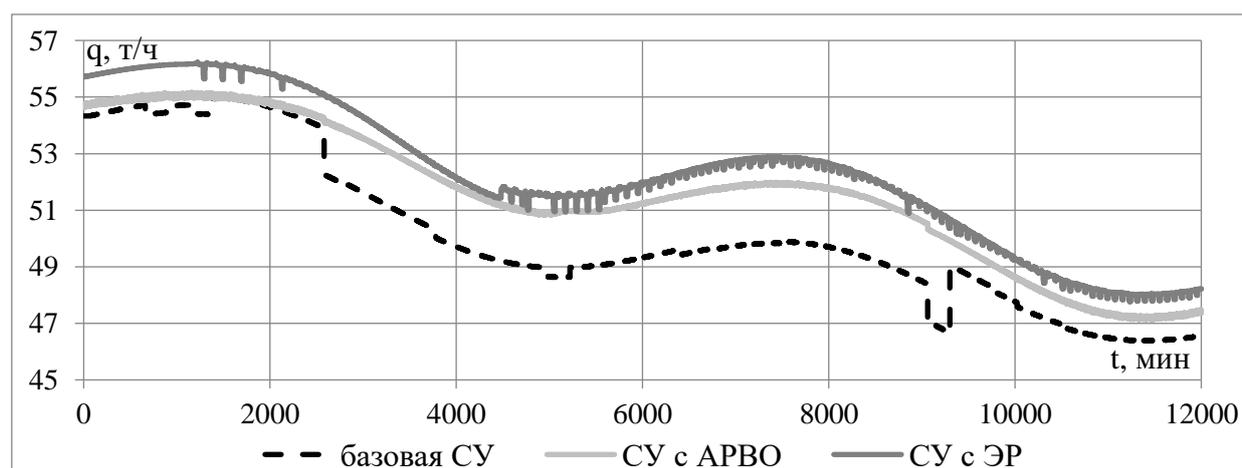


Рисунок 5. Графики производительности ДВФ при использовании базовой СУ, СУ с АРВО и разработанной СУ с ЭР; (t – время)

На рис. 5 приведены следующие графики: чёрный штриховой — график изменения производительности вакуум-фильтра при использовании базовой системы управления, светло-серый — при использовании системы управления с автоматическим регулированием влажности осадка, тёмно-серый — при использовании разработанной системы управления с шаговым экстремальным регулятором.

По графику изменения производительности вакуум-фильтра при использовании разработанной системы управления с шаговым экстремальным регулятором было установлено, что данная величина в среднем на 1,5 % больше среднего значения производительности фильтра при использовании системы управления с автоматическим регулированием влажности осадка и на 3,4 % больше среднего значения производительности фильтра при использовании

базовой системы управления.

Работа шагового экстремального регулятора, заключающаяся в подборе оптимальных значений заданий плотности пульпы и положения задвижки, представлена на рис. 6 и 7.

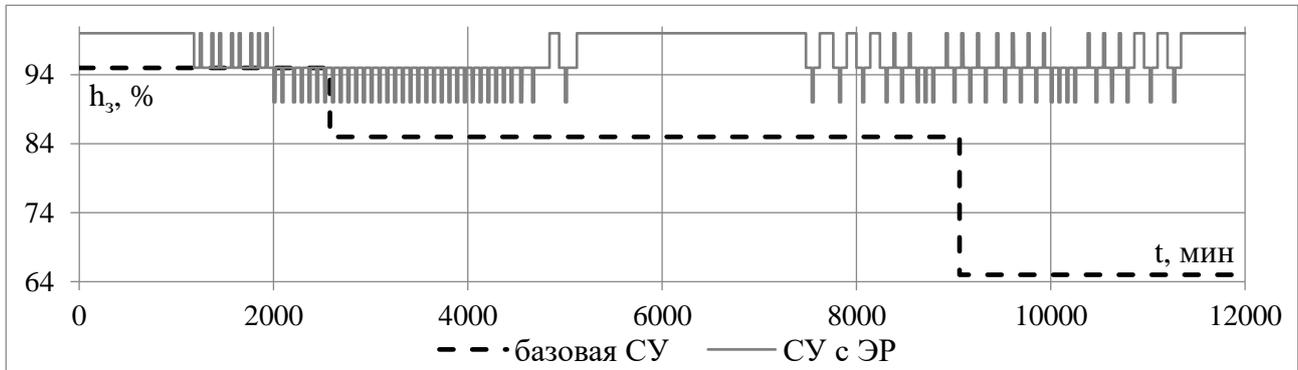


Рисунок 6. Графики заданий положения задвижки при использовании базовой СУ и разработанной СУ с ЭР; ( $t$  — время)

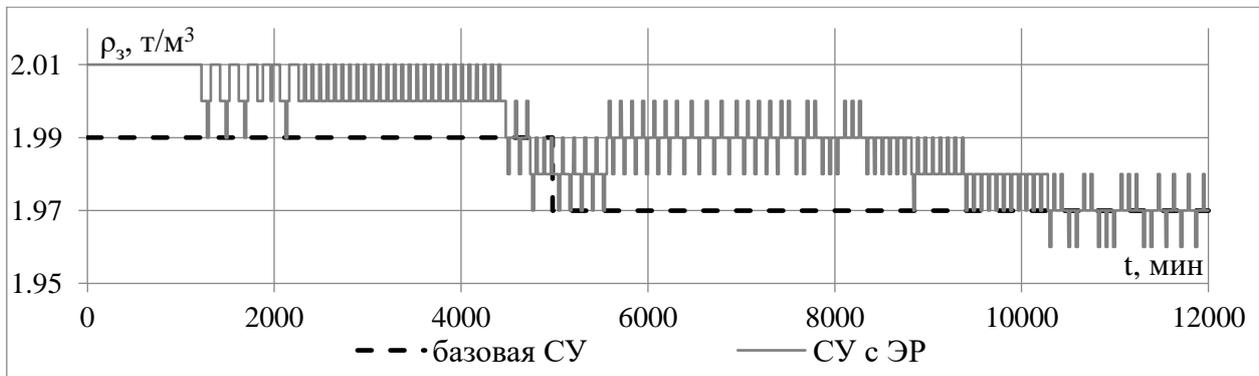


Рисунок 7. Графики заданий плотности пульпы при использовании базовой СУ и разработанной СУ с ЭР; ( $t$  — время)

По графикам на рис. 6 и 7 видно, что экстремальный регулятор определяет экстремум производительности вакуум-фильтра при изменении крупности концентрата в пульпе питания и загрязнённости фильтроткани. Характер данных возмущений можно оценить по графикам на рис. 5. Здесь синусоидально меняется крупность концентрата в пульпе питания и линейно загрязнённость фильтроткани.

По графикам задания плотности пульпы питания и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка видно, что многопараметрический шаговый экстремальный регулятор при своей работе постоянно переключает 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 (см. рис. 5).

**В третьей главе** для уменьшения количества переключений заданий плотности пульпы и положения задвижки с целью увеличения ресурса работы задвижек и их приводов в данном исследовании был разработан гибридный интеллектуальный блок управления экстремальным регулятором с пятью входами (рис. 8).

По истории изменения производительности дискового вакуум-фильтра ( $q$ ) БУ регулятором получает информацию о смещении её максимума.

Частота вращения дисков вакуум-фильтра ( $v$ ) даёт БУ регулятора 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. Рост суммарного удельного сопротивления, в условиях поддержания влажности осадка, плотности пульпы и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения на постоянном уровне приводит к снижению частоты вращения дисков фильтра.

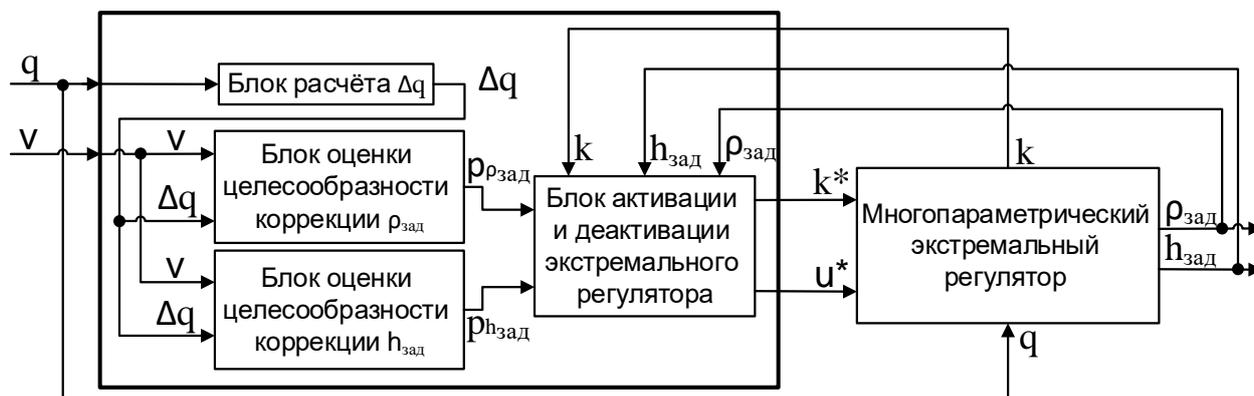


Рисунок 8. Структурная схема разработанного интеллектуального блока управления экстремальным регулятором

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 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.

Алгоритм функционирования интеллектуального блока управления вызывается циклически (раз в 20 минут) 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  $\Delta q$  определяет изменение производительности фильтра в результате последнего шага работы регулятора.

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

4. На основе значений  $p_{зад}$  и  $p_{hзад}$  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  $p_{зад}$ ,  $h_{зад}$  и  $k$  определил факт достижения экстремума производительности, экстремальный регулятор деактивируется, путем установки параметра  $u^*$  в значение 0.

Для разработки блоков оценки целесообразности коррекции заданий плотности пульпы ( $p_{зад}$ ) и положения задвижки ( $h_{зад}$ ) был проведён анализ работы классического многопараметрического экстремального регулятора, а также принципов операторского управления дисковым вакуум-фильтром.

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 исходных данных показал, что выходные параметры имеют нормальное распределение и их дисперсии воспроизводимости однородны, следовательно, использование регрессионного анализа обосновано.

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 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. В результате оптимизации структуры для блока оценки целесообразности коррекции задания плотности пульпы была получена нейронная сеть, состоящая из 3 слоёв. 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 рис. 9.

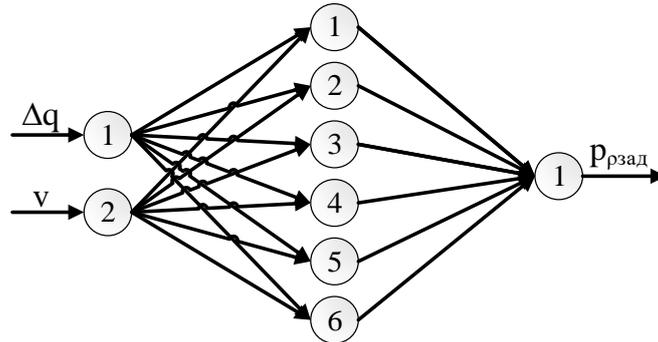


Рисунок 9. Структура нейронной сети, реализующей блок оценки целесообразности коррекции задания плотности пульпы

Для реализации блока оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки предложено использовать нечёткую нейронную сеть, имеющую следующую структуру: 6 узлов в слое фазификации, по 9 узлов в слоях правил и заключений нечётких правил и 1 узел в слое агрегирования результата. Работает нечёткая нейронная сеть с 3 термами входных переменных, гауссовой функцией принадлежности в слое фазификации и линейной функцией принадлежности в слое заключений нечётких правил. 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. Полученная структура нечёткой нейронной сети представлена на рис. 10.

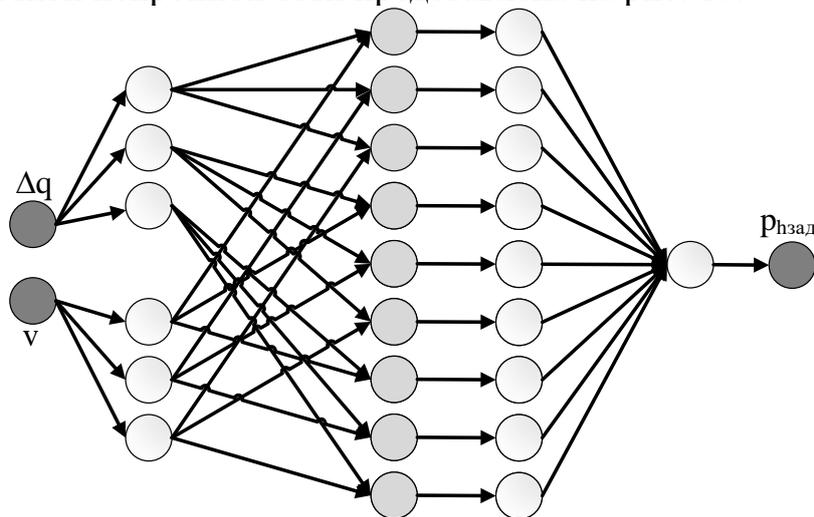


Рисунок 10. Структура нечёткой нейронной сети, реализующей блок оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки

Для сравнения качества функционирования разработанной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с шаговым экстремальным регулятором и разработанной системы управления процессом обезвоживания с ГИБУЭР была построена модель системы управления с

интеллектуальным блоком управления регулятором.

В результате моделирования разработанной системы управления с ГИБУЭР были получены графики, представленные на рис. 11-13.

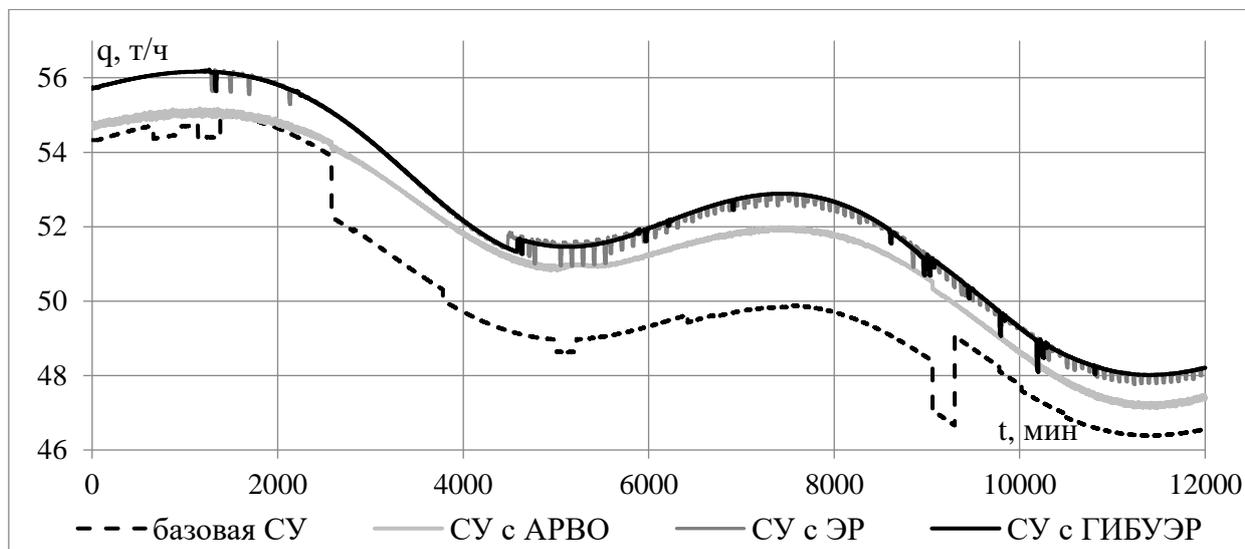


Рисунок 11. Графики производительности дискового вакуум-фильтра при использовании базовой СУ, СУ с АРВО, разработанной СУ с ЭР и разработанной СУ с ГИБУЭР; (t – время)

На рис. 11 приведены следующие графики: чёрный штриховой — график изменения производительности вакуум-фильтра при использовании базовой системы управления, светло-серый — при использовании системы управления с автоматическим регулированием влажности, тёмно-серый — при использовании разработанной системы управления с шаговым экстремальным регулятором, чёрный — при использовании разработанной системы управления с ГИБУЭР.

Анализ результатов моделирования показал, что производительность вакуум-фильтра при использовании разработанной системы управления с ГИБУЭР больше среднего значения производительности фильтра при использовании разработанной системы управления с шаговым экстремальным регулятором на 0,1 %, системы управления с автоматическим регулированием влажности осадка – на 1,6 %, базовой системы управления – на 3,5 %, Заметим, что установка ГИБУЭР практически не повлияла на производительность вакуум-фильтра (она увеличилась на величину погрешности).

На рис. 12 и 13 показаны графики заданий положения задвижки и плотности пульпы. Чёрные штриховые — графики, относящиеся к базовой системе управления, серые — к разработанной системе управления с шаговым экстремальным регулятором, чёрные — к разработанной системе управления с ГИБУЭР.

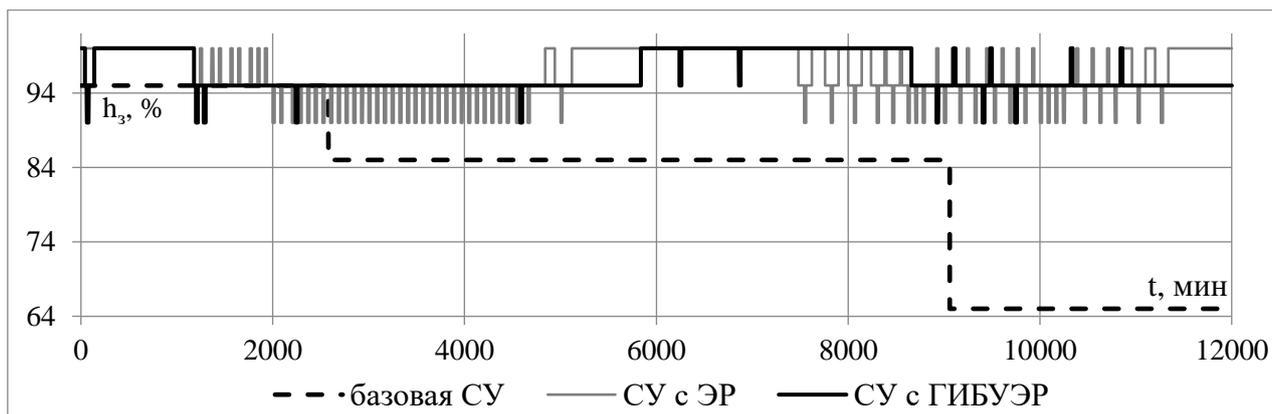


Рисунок 12. Графики заданий положения задвижки при использовании базовой СУ, разработанной СУ с ЭР и разработанной СУ с ГИБУЭР; ( $t$  – время)

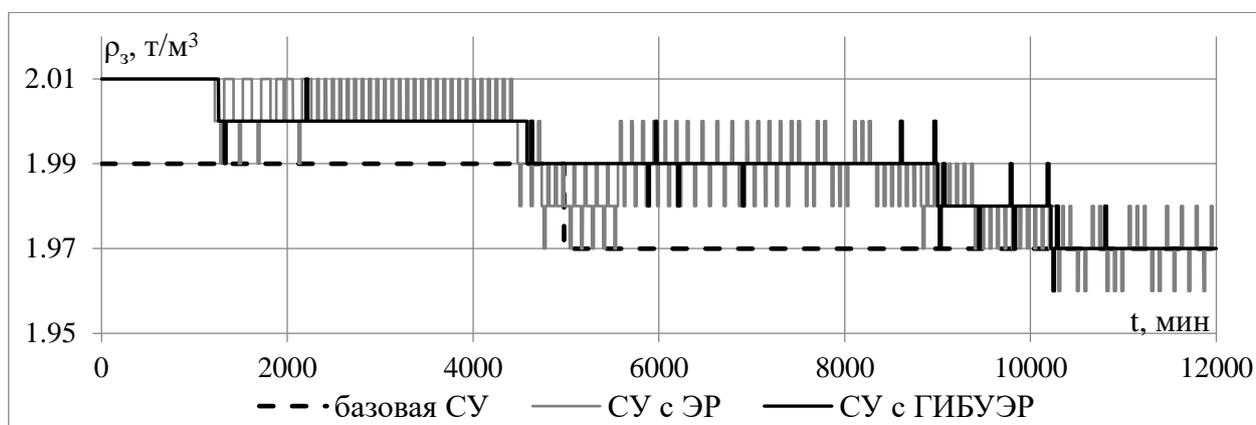


Рисунок 13. Графики заданий плотности пульпы при использовании базовой СУ, разработанной СУ с ЭР и разработанной СУ с ГИБУЭР; ( $t$  – время)

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.

Структурная схема разработанной системы управления с ГИБУЭР представлена на рис. 14.

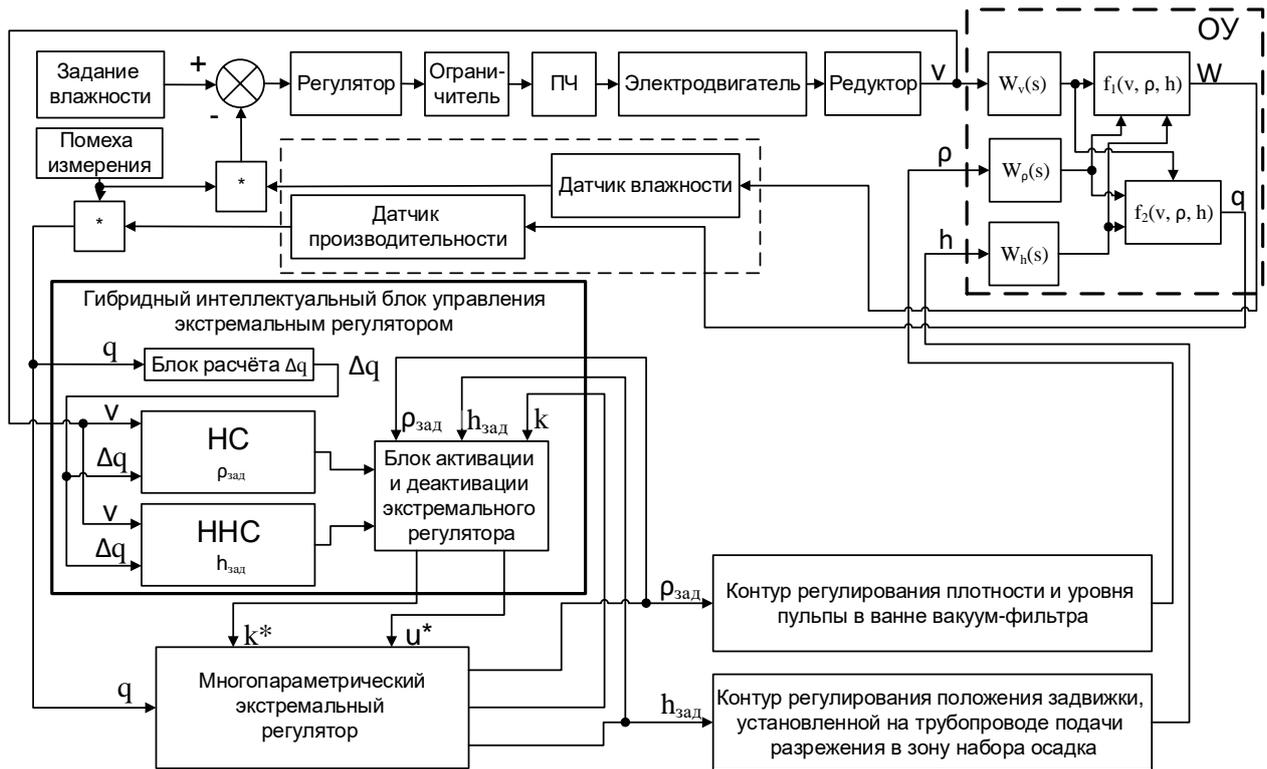


Рисунок 14. Структурная схема разработанной системы управления с ГИБУЭР

**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.

Схема информационных потоков разработанной автоматизированной системы управления процессом обезвоживания железорудного концентрата с индивидуальным регулированием технологических параметров вакуум-фильтра представлена на рис. 15.

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

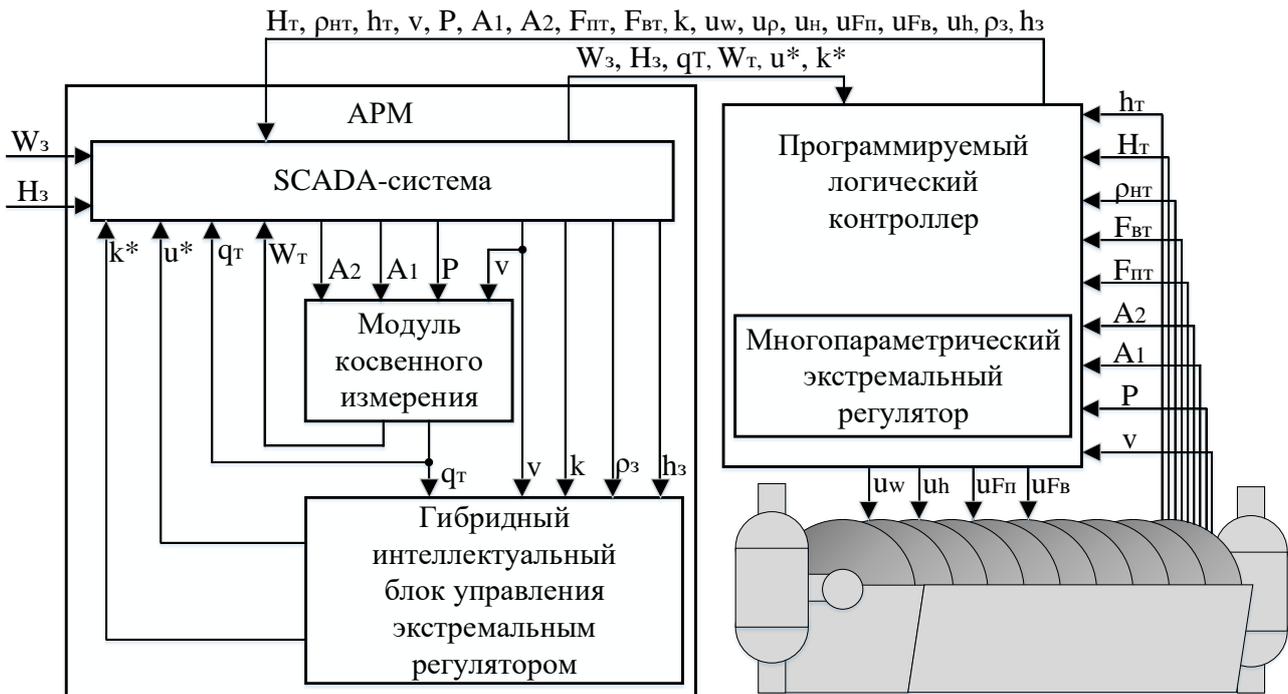


Рисунок 15. Схема информационных потоков разработанной АСУ

Расчёт текущих значений влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра и управляющих параметров для экстремального регулятора производится с помощью технических средств автоматизации верхнего уровня. На среднем уровне с использованием информации с верхнего и нижнего уровней выполняется расчёт заданий для контуров регулирования плотности пульпы и положения задвижки, установленной трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка, а также необходимых управляющих воздействий.

АРМ оператора включает в себя SCADA-систему, модуль косвенного измерения влажности осадка и модуль, реализующий гибридный интеллектуальный блок управления экстремальным регулятором.

Для практической реализации системы управления процессом обезвоживания с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра был разработан алгоритм её функционирования, выполняемый циклически. Блок-схема данного алгоритма приведена на рис. 16.

Произведённый в данной работе расчёт экономической эффективности показал, что внедрение разработанной автоматизированной системы управления железорудного концентрата 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, которая при средней производительности отделения фильтрации около 470 т/ч составит более 8 миллионов рублей в год.

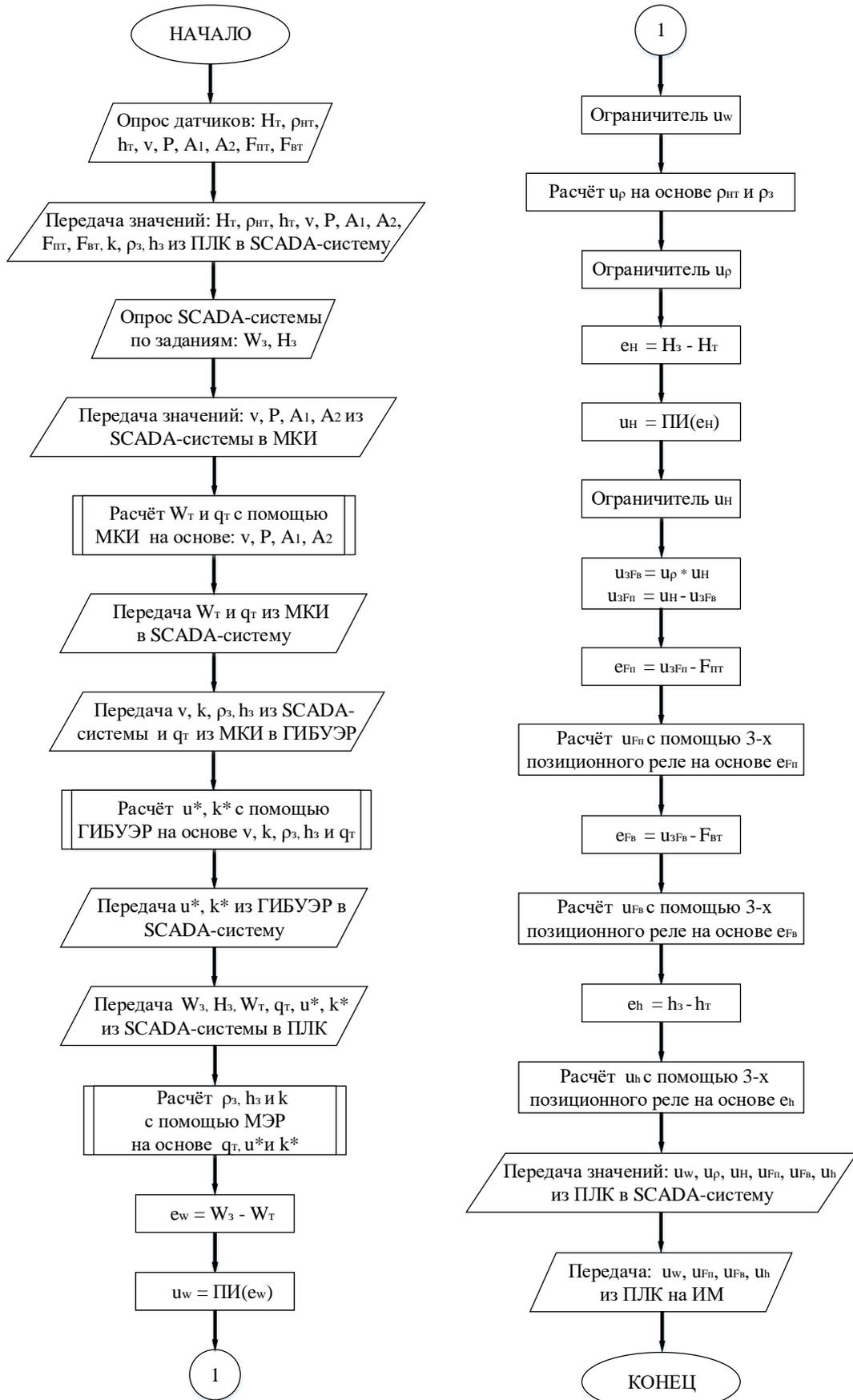


Рисунок 16. Блок-схема алгоритма функционирования разработанной системы управления

## 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. 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.

10. 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 %.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### Публикации в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ

1) 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.

2) 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.

### Публикации, проиндексированные в Scopus

3) Eremenko Y.I. Improving energy efficiency of iron ore concentrate dehydration through automation using neural technologies / Y.I. Eremenko, S.Y. Khalapyan, A.O. Anpilov // Gornyi Zhurnal. – 2020(3). pp. 62-66.

4) Halapyan S. Intelligent Extreme Controller of Iron Ore Concentrate Dehydration Process / S. Halapyan, A. Anpilov // 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Conference Proceeding. – Lipetsk, Russia. – 2022. pp. 643–647.

### Статьи и материалы конференций (выборочно)

5) Ерёменко Ю.И. О применении косвенной нейросетевой оценки технологических параметров в управлении процессом обезвоживания железорудного концентрата / Ю.И. Ерёменко, С.Ю. Халапян, А.О. Анпилов // Труды Международной научно-технической конференции "Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве". – Воронеж, 2017. – С. 285 - 288.

6) Ерёменко Ю.И. Повышение производительности дискового вакуум-фильтра на основе его автоматизации с косвенной оценкой технологических параметров / Ю.И. Ерёменко, С.Ю. Халапян, А.О. Анпилов // Сборник трудов Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики". – Воронеж, 2017. – С. 1632 -1638.

7) Халапян С.Ю. Автоматизация процесса обезвоживания с использованием косвенных измерений на основе нейросетевой модели дискового вакуум-фильтра / С.Ю. Халапян, А.О. Анпилов // Материалы XII международной научно-практической конференции "Современные сложные системы управления. NTCS'2017". – Липецк, 2017. – С. 220 - 224.

8) Ерёменко Ю.И. Об организации автоматического управления процессом обезвоживания железорудного концентрата на основе косвенной нейросетевой оценки технологических параметров / Ю.И. Ерёменко, С.Ю. Халапян,

А.О. Анпилов // Труды XI Всероссийской научно-практической конференции "Системы автоматизации в образовании, науке и производстве". – Новокузнецк, 2017. – С. 165 - 168.

9) Ерёменко Ю.И. Об использовании экстремального управления процессом вакуумной фильтрации / Ю.И. Ерёменко, С.Ю. Халапян, А.О. Анпилов // Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции "Современные сложные системы управления. NTCS'2018". – Старый Оскол, 2018. – С. 36 - 38.

10) Ерёменко Ю.И. Интенсификация процесса вакуумной фильтрации железорудного концентрата на основе системы экстремального регулирования производительности / Ю.И. Ерёменко, А.О. Анпилов // Сборник трудов XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых "Управление большими системами". – Воронеж, 2018. – Т.2. – С. 8 - 12.

11) Халапян С.Ю. Разработка алгоритма функционирования системы интеллектуального управления процессом обезвоживания железорудного концентрата / С.Ю. Халапян, А.О. Анпилов // Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием "современные проблемы горно-металлургического комплекса. наука и производство". – Старый Оскол, 2023. – Т.1. – С. 350 - 354.

Личный вклад автора в работы, выполненные в соавторстве, состоит в разработке методики построения модуля косвенного измерения влажности осадка и производительности дискового вакуум-фильтра [1,2,5,6,7,8,9], а также в разработке методики построения гибридного интеллектуального блока управления экстремальным регулятором и алгоритма его функционирования [3,4,9,10,11].