

О разработке гибридного интеллектуального блока управления шаговым экстремальным регулятором

С.Ю. Халапян, А.О. Анпилов

*Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал)
Национального исследовательского технологического университета «МИСИС»*

Аннотация: Целью работы является повышение производительности процесса обезвоживания железорудного концентрата. В ходе ранее проведённых исследований была разработана автоматизированная система с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого вакуум-фильтра. В настоящей работе предложено дополнить данную систему гибридным интеллектуальным блоком управления экстремальным шаговым регулятором, разработаны структурно-функциональная схема и алгоритм функционирования системы управления.

Ключевые слова: обезвоживание железорудного концентрата, дисковый вакуум-фильтр, искусственная нейронная сеть, нечёткая нейронная сеть, автоматизированная система управления, индивидуальное регулирование, экстремальный регулятор, разрежение, плотность пульпы, производительность вакуум-фильтра, влажность осадка.

Целью данной работы является повышение производительности и снижение удельного энергопотребления дисковых вакуум-фильтров, которые активно применяются на горно-металлургических предприятиях в процессе обезвоживания железорудного концентрата. При этом должно выполняться обязательное условие: влажность выходного продукта поддерживается на уровне, определенном технологией.

Актуальность данного исследования подтверждается широкой распространённостью дисковых вакуум-фильтров на горно-металлургических производствах, высокими затратами энергоресурсов на работу вакуум-фильтров, а также тем, что рассматриваемые агрегаты работают с заниженной производительностью. Это обстоятельство вызвано использованием лабораторного анализа влажности осадка и группового усреднённого управления вакуум-фильтрами (управление производится не индивидуально каждым агрегатом, а в среднем одинаково всеми агрегатами).

На основе анализа литературы в работе [1] была предложена оригинальная автоматизированная система управления процессом

обезвоживания с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого вакуум-фильтра, позволяющая учесть индивидуальные характеристики агрегатов, в частности загрязнённость фильтроткани.

При условии поддержания влажности осадка на заданном уровне зависимости производительности фильтра от плотности пульпы питания и от положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка носят экстремальный характер, поэтому особого внимания в разработанной системе управления заслуживает контур регулирования производительности, в котором первоначально было предложено использовать шаговый экстремальный регулятор, функционирующий на основе метода покоординатного подъёма.

В результате проведённого сравнительного моделирования базовой системы управления (СУ) процессом обезвоживания, в которой переключение заданий плотности пульпы и положения задвижки производилось оператором, и разработанной системы управления с экстремальным регулятором (ЭР) были получены графики, представленные на рис. 1. Чёрные штриховые графики относятся к базовой СУ, серые – к разработанной системе с ЭР. При моделировании синусоидально изменялась крупность концентрата в пульпе питания и линейно – загрязнённость фильтроткани.

По графикам изменения производительности вакуум-фильтра было установлено, что внедрение разработанной системы управления с экстремальным регулятором позволит повысить производительность вакуум-фильтра на 3,4 %. Однако, как видно из графиков задания плотности пульпы питания, и положения задвижки на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка, шаговый экстремальный регулятор в процессе своей работы постоянно переключает задания [2]. Это обстоятельство приводит к избыточному 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. Для уменьшения количества переключений заданий плотности пульпы и положения задвижки с целью увеличения ресурса работы задвижек и их приводов в настоящем исследовании разработан гибридный интеллектуальный блок управления экстремальным регулятором (ГИБУЭР) с пятью входами (рис. 2).

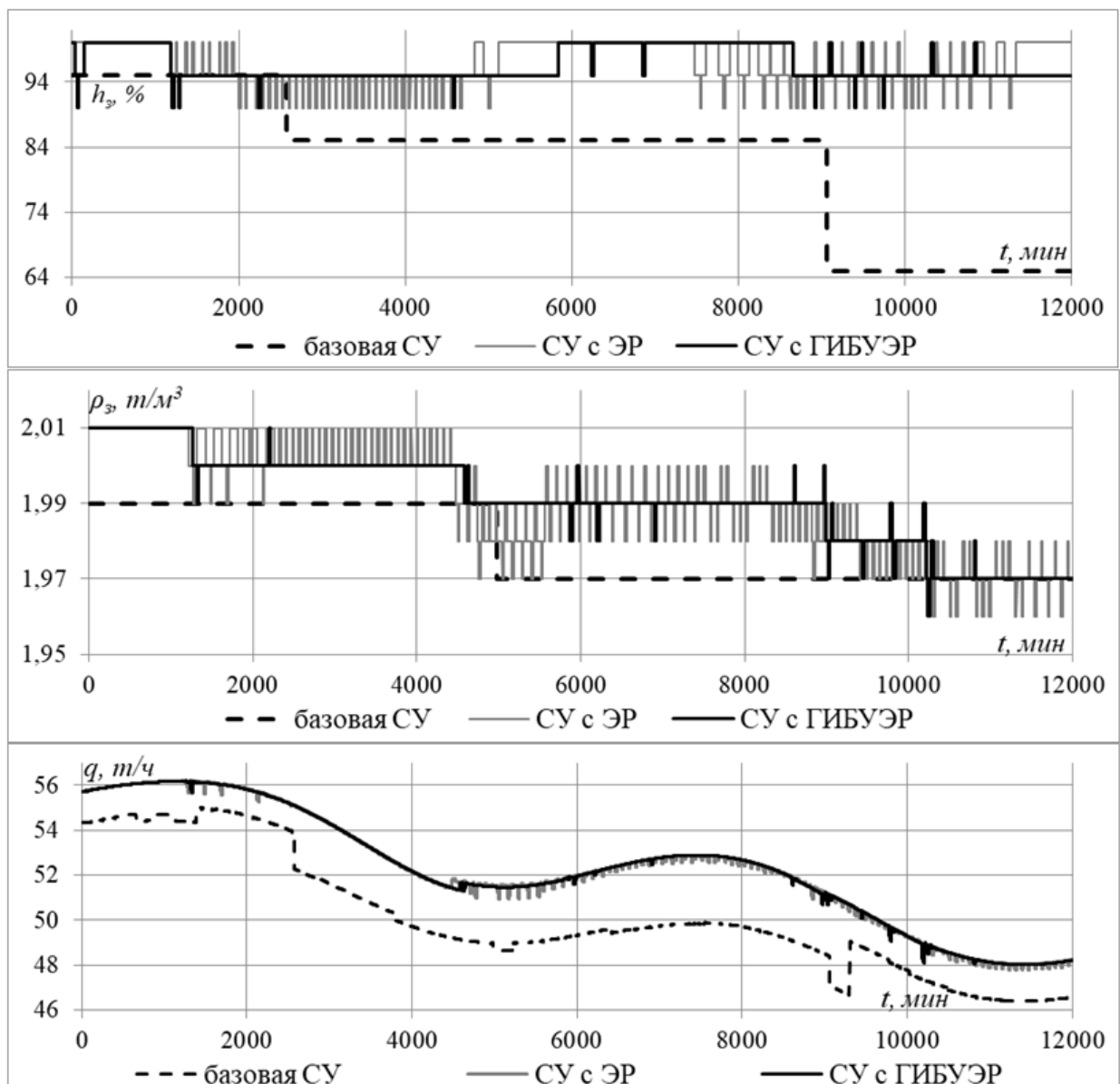


Рис. 1. – Графики заданий положения задвижки и плотности пульпы и производительности дискового вакуум-фильтра при использовании базовой СУ, разработанной СУ с ЭР и разработанной СУ с ГИБУЭР

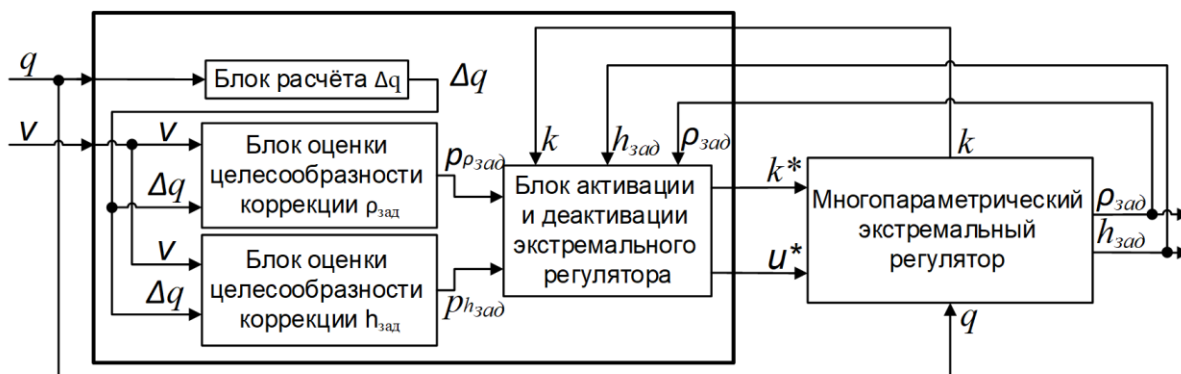


Рис. 2. – Структурная схема разработанного интеллектуального блока управления экстремальным регулятором

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

Частота вращения дисков вакуум-фильтра v даёт БУ 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. 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.

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 регулирования k экстремального регулятора (плотность или положение задвижки) 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 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 $p_{зад}$ 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 $\rho_{зад}$ и положения задвижки $h_{зад}$ был проведён анализ работы многопараметрического шагового экстремального регулятора, а также принципов операторского управления дисковым вакуум-фильтром.

С целью описания зависимостей, имеющих в выборках ретроспективных данных, вначале использовался метод регрессионного анализа. 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 (НС) [3-5]. 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 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 до 8 и количество эпох обучения от 50 до 300. При этом в нейронах скрытого слоя сети использовались следующие функции активации: сигмоидальная (logsig) и гиперболический тангенс (tansig). В результате проверки нейронных сетей на тестовой выборке были получены следующие результаты, представленные на рис. 3.

Из графика видно, что в результате оптимизации структуры для блока оценки целесообразности коррекции задания плотности пульпы была получена нейронная сеть, имеющая минимальную ошибку обобщения и состоящая из 3 слоёв. Во входном — 2 нейрона, в выходном — 1 с линейной функцией активации (purelin) 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.

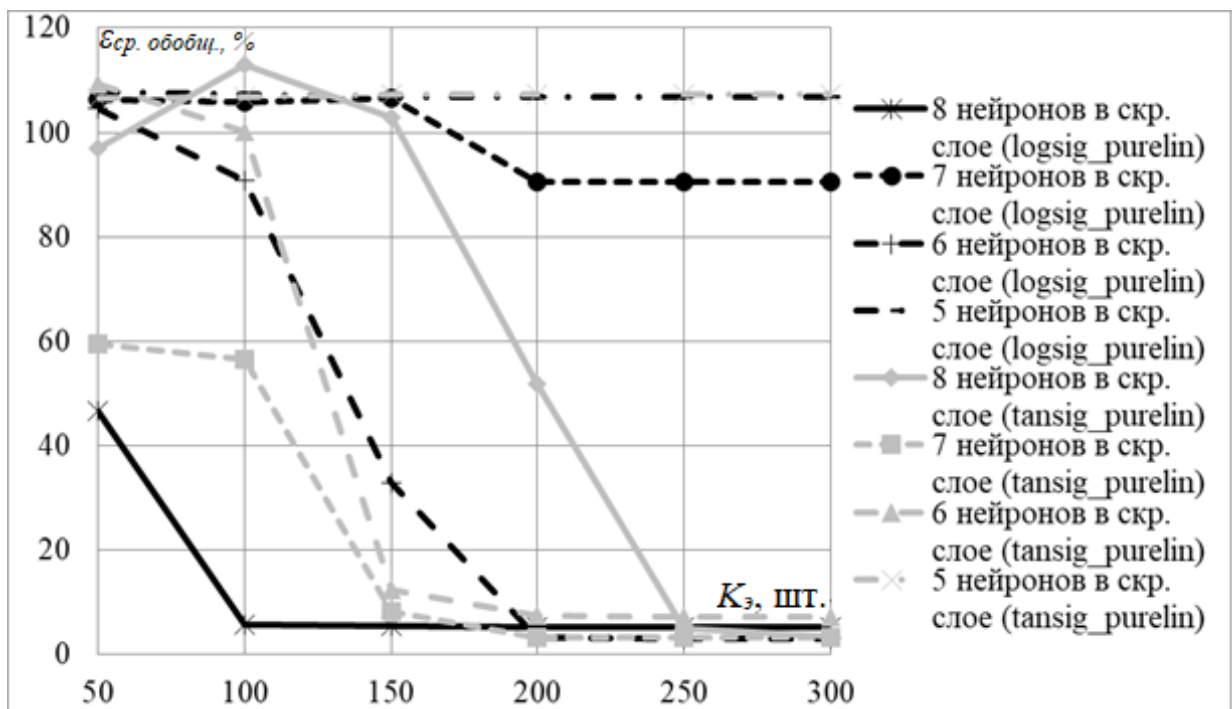


Рис. 3. – Графики средней ошибки обобщения НС ($\epsilon_{ср. обобщ.}$) при использовании в скрытом слое сигмоидальной функции активации и функции активации «гиперболический тангенс»; ($K_э$ – количество эпох обучения)

Для реализации блока оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки предложено использовать нечёткую нейронную сеть (ННС) [6-8]. 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 (trimf), трапециевидная (trapmf), гауссова (gaussmf), двухсторонняя гауссова (gauss2mf), пи-образная (pimf). В слое заключений нечётких правил использовались следующие функции принадлежности: линейная (linear) и константа (const).

В результате работы полученных нечётких нейронных сетей на тестовой выборке были получены следующие результаты, представленные на рисунке 4.

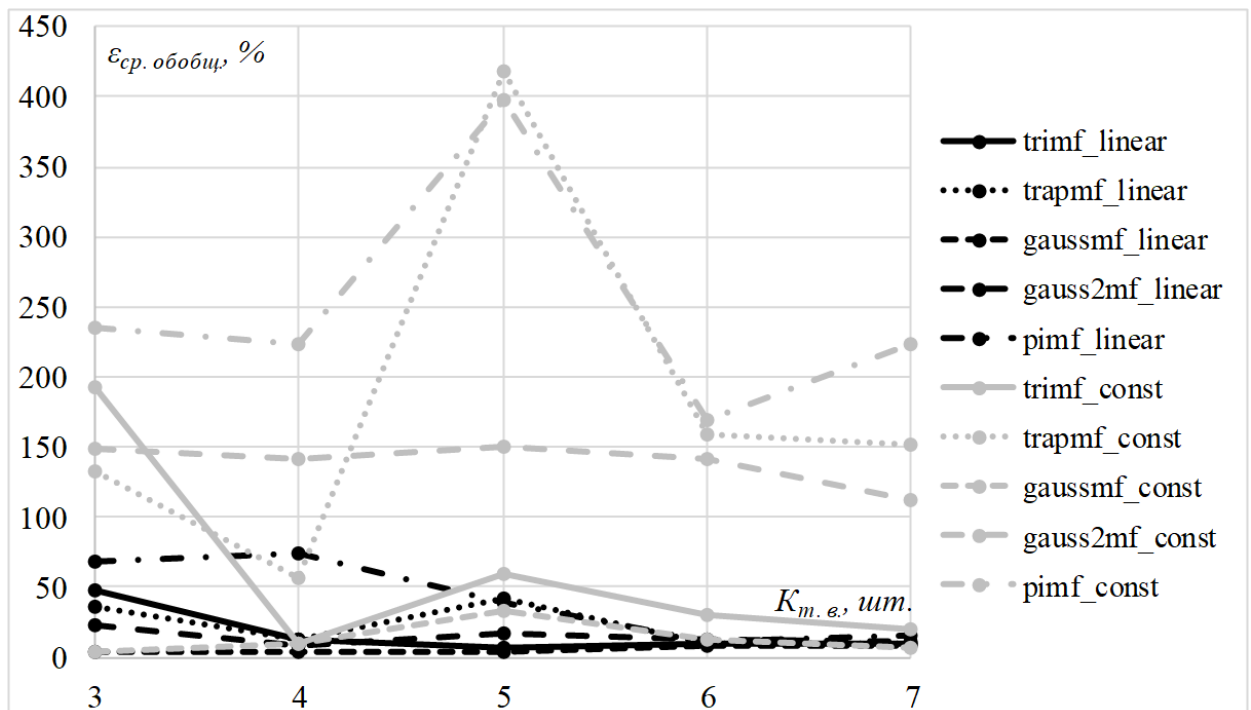


Рис. 4. – Графики средней ошибки обобщения ННС ($\varepsilon_{ср. обобщ.}$), реализующей блок оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки; ($K_{м.в.}$ – количество термов входных переменных)

В результате оптимизации структуры для блока оценки целесообразности коррекции задания положения задвижки была получена нечёткая нейронная сеть, имеющая минимальную ошибку обобщения и 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 терминами 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.

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. 1. Чёрные штриховые графики относятся к базовой системе управления, серые – к системе с ЭР, чёрные – к системе с ГИБУЭР.

Анализ результатов моделирования показал, что производительность вакуум-фильтра при использовании разработанной системы управления с ГИБУЭР в среднем больше среднего значения производительности фильтра при использовании разработанной системы управления с шаговым экстремальным регулятором на 0,1 %, базовой системы управления – на 3,5 %.

Заметим, что установка ГИБУЭР практически не повлияла на производительность вакуум-фильтра (она увеличилась на величину погрешности).

По графикам заданий положения задвижки и плотности пульпы можно сделать вывод, что экстремальный регулятор с ГИБУЭР в среднем 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.

Разработанная в ходе исследования структурно-функциональная схема автоматизированной системы управления (АСУ) процессом обезвоживания с индивидуальным регулированием технологических параметров каждого дискового вакуум-фильтра приведена на рис. 5.

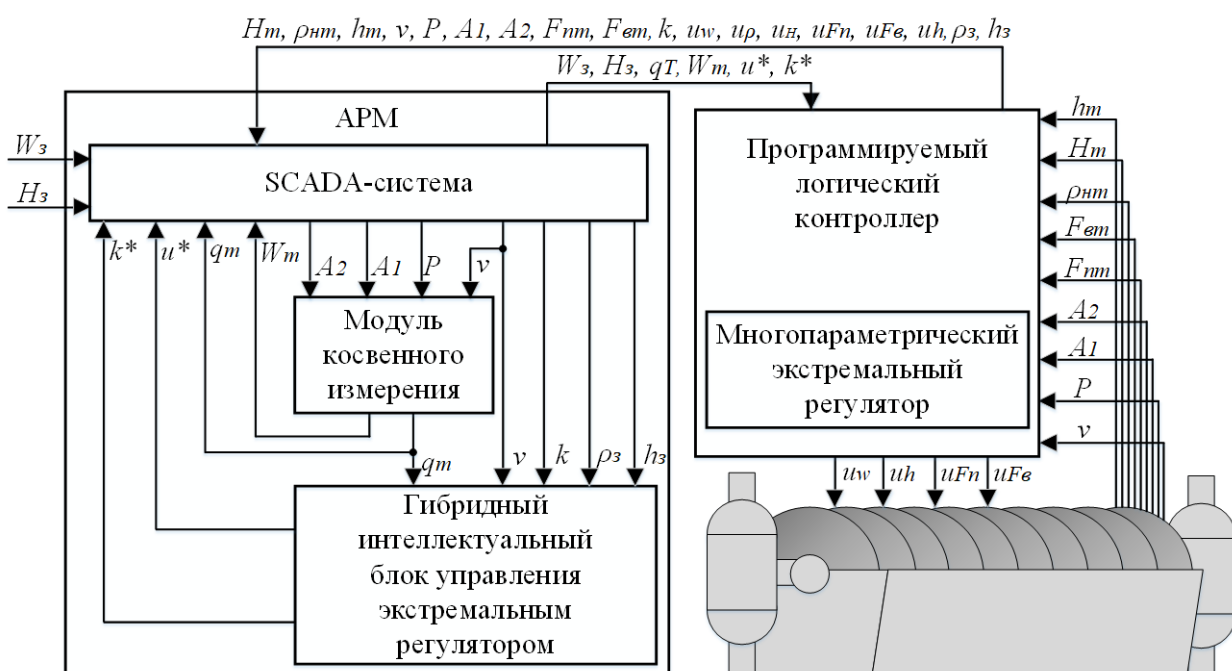


Рис. 5. – Структурно-функциональная схема разработанной АСУ ($h_m, H_m, \rho_m, F_{em}, F_{nm}, A_1, A_2, P, v$ – данные с датчиков; $u_w, u_\rho, u_H, u_{Fn}, u_{Fe}, u_h$ – вычисленные системой управления; W_z, H_z – уставки оператора; k – активный параметр ЭР; k^*, u^* – управляющие параметры;

W_m и q_m – текущие влажность осадка и производительность фильтра)

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

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 на трубопроводе подачи разрежения в зону набора осадка, а также необходимых управляющих воздействий.

Автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора включает в себя SCADA-систему, модуль косвенного измерения влажности осадка и производительности фильтра [9, 10] и модуль, реализующий гибридный интеллектуальный блок управления экстремальным регулятором.

Данный набор программного обеспечения позволяет оператору индивидуально регулировать технологические параметры каждого дискового вакуум-фильтра как в ручном, так и в автоматическом режиме. Модуль косвенного измерения, входящий в состав системы, позволяет увеличить частоту измерения влажности осадка. Это приводит к повышению оперативности контроля протекания процесса обезвоживания и управления им. Шаговый экстремальный регулятор с гибридным интеллектуальным блоком управления позволяет подобрать оптимальный режим функционирования каждого дискового вакуум-фильтра отделения фильтрации при различных возмущениях (загрязнённости фильтроткани и гранулометрического состава концентрата в пульпе питания фильтров) при

минимальном количестве переключений заданий плотности пульпы и положения задвижки. Это последнее обстоятельство позволяет снизить износ исполнительных механизмов в сравнении с системой управления без ГИБУЭР.

Для практической реализации разработанной системы управления был создан алгоритм её функционирования, выполняемый циклически. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 6.

Итак, в ходе проведенного исследования для разработанной автоматизированной системы управления был предложен гибридный интеллектуальный блок управления экстремальным регулятором (описана методика построения, экспериментально доказана его эффективность), разработаны структурно-функциональная схема и алгоритм функционирования системы управления.

Применение разработанного гибридного интеллектуального блока управления совместно с экстремальным регулятором позволило повысить качество регулирования, выражающееся в снижении в 7 раз количества переключений заданий плотности пульпы и положения задвижки экстремальным регулятором без блока управления. Это приведёт к снижению износа исполнительных механизмов, увеличению срока их службы и уменьшению требуемого количества запасных частей.

Было установлено, что внедрение разработанной системы управления позволит повысить производительность вакуум-фильтра на 3,5 %, снизить удельный расход используемых энергоресурсов, сэкономить денежные средства предприятия (около 8 миллионов рублей в год при средней производительности отделения фильтрации порядка 450 т/ч).

Предложенная система управления процессом обезвоживания может быть адаптирована для большого класса технологических агрегатов схожего

принципа действия, применяемых в различных отраслях промышленности, таких, как барабанный вакуум-фильтр, гипербарфильтр и т.п.

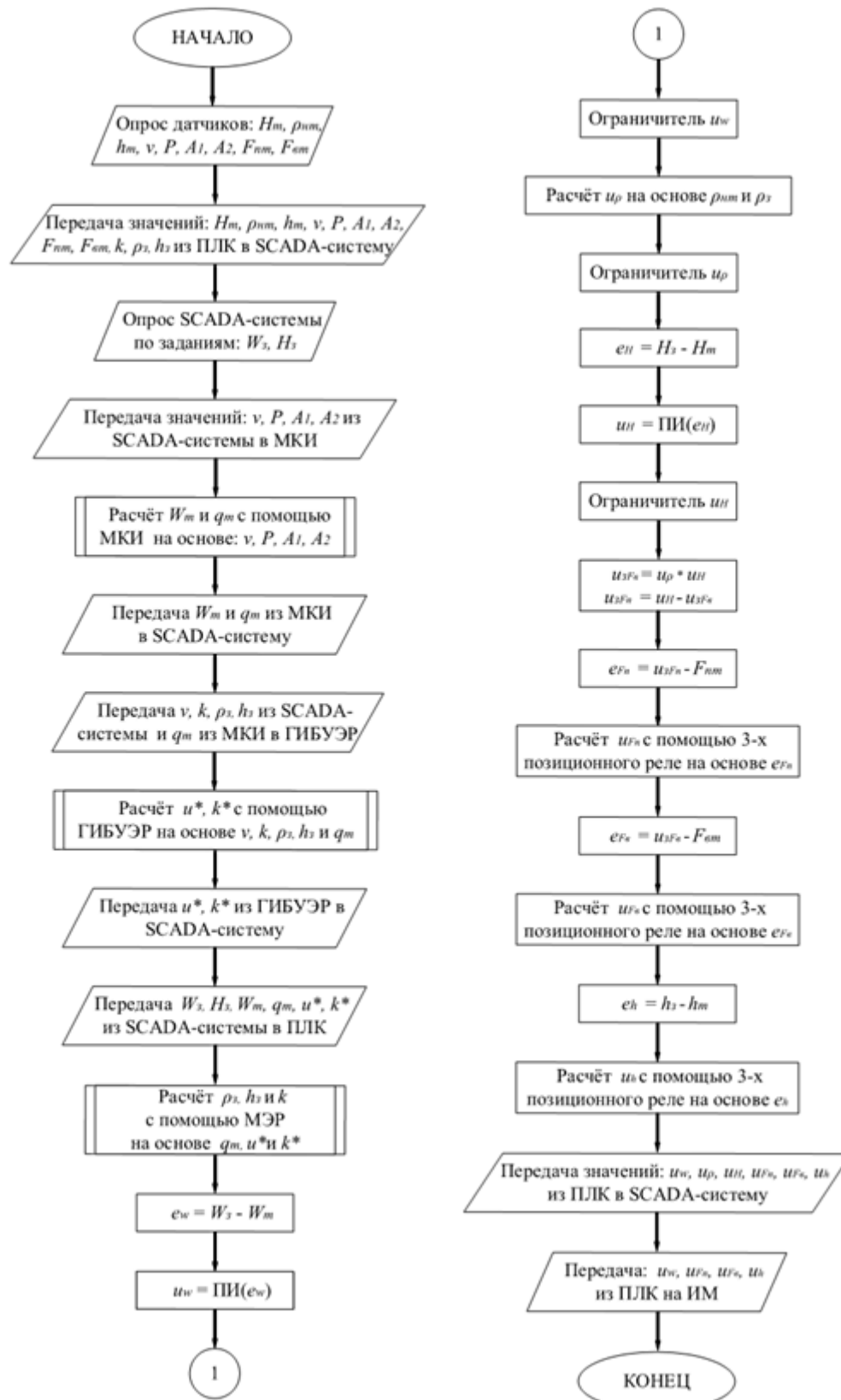


Рис. 6. – Блок-схема алгоритма функционирования разработанной системы управления

Литература

1. Ерёменко Ю.И., Анпилов А.О. Интенсификация процесса вакуумной фильтрации железорудного концентрата на основе системы экстремального регулирования производительности // Управление большими системами: сборник трудов XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Воронеж. 2018. Т. 2. С. 8-12.
2. Полещенко Д.А., Бровинских М.Д. Повышение эффективности работы шаровой мельницы путем совместного использования наблюдателя состояний и экстремального регулятора // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7964.
3. Funahashi K., Nakamura Y. Approximation of Dynamical Systems by Continuous Time Recurrent Neural Networks // Neural Networks. 1993. Vol. 6. No. 6. pp. 801-806.
4. Романов Д.Е. Нейронные сети обратного распространения ошибки // Инженерный вестник Дона. 2009. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2009/143.
5. Cybenko G. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal Function // Mathematics of Control Signals and Systems. 1989. Vol. 2. No. 4. pp. 303-314.
6. Serrano F., Caballero A., Yen K., Brezina T. Control of a Stewart platform with fuzzy logic and artificial neural network compensation // Recent Advances in Mechatronics. 2007. pp. 156-160.
7. 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. pp. 807-814.

8. Wang L.X. Fuzzy systems are universal approximators // IEEE International Conference on Fuzzy System. 1992. pp. 1163-1170.

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

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

References

1. Erjomenko Ju.I., Anpilov A.O. Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov XV Vserossijskoj shkoly-konferencii molodyh uchenyh. 2018. T. 2. С. 8-12.

2. Poleshenko D.A., Brovinskih M.D. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7964.

3. Funahashi K., Nakamura Y. Neural Networks. 1993. Vol. 6. No. 6. pp. 801-806.

4. Romanov D.E. Inzhenernyj vestnik Dona. 2009. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2009/143.

5. Cybenko G. Mathematics of Control Signals and Systems. 1989. Vol. 2. No. 4. pp. 303-314.

6. Serrano F., Caballero A., Yen K., Brezina T. Recent Advances in Mechatronics. 2007. pp. 156-160.

7. Wang L.X., Mendel J.M. IEEE Transactions on neural networks. 1992. Vol. 3. No. 5. pp. 807-814.

8. Wang L.X. IEEE International Conference on Fuzzy System. 1992. pp. 1163-1170.



9. Khalapyan S.Yu., Anpilov A.O. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 12. pp. 195-200.

10. Eremenko Y.I., Khalapyan S.Y., Anpilov A.O. Gornyi Zhurnal. 2020. No. 3. pp. 62-66.