

На правах рукописи



**ЗАКАМАЛДИН АНДРЕЙ АНДРЕЕВИЧ**

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ  
В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ  
МОДЕЛИ**

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель – доктор технических наук доцент  
**Шилин Александр Анатольевич**

Официальные оппоненты: **Бобырь Максим Владимирович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники Юго-Западного государственного университета, г. Курск

**Майстренко Андрей Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово

Защита состоится «22» декабря 2022 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.415.02, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ТУСУРа по адресу 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте <https://postgraduate.tusur.ru/urls/ne80v4mq>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Зайченко Татьяна Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Оптимальное управление технологическим процессом (ТП) измельчения в горной промышленности остается сложной проблемой на протяжении многих лет из-за существующих неопределенностей математической модели ТП. Практика показывает, что поддержание массы твердой и жидкой фаз внутри мельницы (внутримельничного заполнения) на оптимальном уровне позволяет извлекать максимальную эффективность из замкнутого цикла измельчения: высокую производительность по руде, необходимую крупность измельчения руды, экономию электроэнергии. Проблема заключается в том, что контролировать параметр внутримельничного заполнения напрямую средствами КИП не представляется возможным, поэтому измеряются параметры, косвенно характеризующие искомый. Этими параметрами являются вибрация, акустический шум, активная мощность привода мельницы и другие. В последние годы определенное влияние на отечественное решение проблемы оказала компания АО «Союзцветметавтоматика», разработавшая метод спектрального анализа параметров внутримельничного заполнения и наиболее распространенное отечественное серийное промышленное решение – виброакустический анализатор загрузки мельницы (ВАЗМ). Однако, как показывает практика, ВАЗМ не обеспечивает требуемую точность определения массы твердой фазы в мельнице, соответственно управление приводом подачи руды в мельницу по показаниям ВАЗМ в режимах функциональной неустойчивости объекта малоэффективно. Разработкой методов оценки объемного заполнения мельницы и метода обработки этого параметра также занимались Вердиян М. А., Кафаров В. В., Олейников В.А., Улитенко К. Я., Утеуш Э.В, Златорунская Г.Е. и многие другие. Их работы в значительной мере способствовали изучению методов автоматического управления измельчительными агрегатами. Управление параметром внутримельничного заполнения составляет сложную задачу, поскольку процесс измельчения сложен и многофакторен. В указанных работах был предложен ряд методов управления ТП измельчения, среди которых основными были методы, основанные на экспертных оценках, производственных правилах и ПИД законах регулирования. Однако в известных подходах не учитывается многофакторность и нестационарность ТП измельчения, в результате система может реагировать на нежелательные отклонения только после их возникновения и, следовательно, такие подходы имеют ряд ограничений. Важным ограничением является неустойчивость в режимах функциональной неустойчивости ТП измельчения. К таким режимам относится эксплуатация мельницы с максимальной производительностью, когда имеется вероятность перегруза мельницы рудой. Таким образом, имеет место проблемная ситуация между необходимостью повышения производительности, энергоэффективности и оперативности управления параметром внутримельничного заполнения шаровой мельницы и возможностями существующих систем контроля и управления этим ТП. Особенно известно это противоречие на апатито-нефилиновых обогатительных фабриках вследствие того, что имеются: значительные колебания влажности

исходной руды, поступающей на измельчение; существенные энергозатраты на эксплуатацию мельниц в режимах с низкой производительности; трудности автоматизации процесса формирования требуемого гранулометрического состава измельченного продукта.

Очевидно, что противоречие определяет актуальную проблему – получить максимальную производительность технологического процесса измельчения в шаровой мельнице в замкнутом цикле с учетом ограничения – не допускается возможность перегрузки мельницы рудой. Получить наилучшие результаты при данных условиях предлагается путем разработки новой системы управления мельницей для работы в режимах функциональной нестабильности ТП измельчения. Критерием оптимизации является максимизация производительности мельницы по руде, измеряемой в тоннах в час (т/ч), не перегружая мельницу.

**Объектом исследования** является технологический процесс измельчения в шаровой барабанной мельнице с разгрузкой через торцевую решетку.

**Предмет исследования** – математические модели процесса измельчения и алгоритмы системы управления мельницей, а именно системы автоматического регулирования (САР) плотностью пульпы, подаваемой на классификацию, и системы автоматического управления (САУ) загрузкой мельницы (внутримельничным заполнением) в условиях нестационарности параметров объекта управления, внешних возмущений и значительных транспортных запаздываний.

**Цель диссертационной работы** – повышение производительности по руде и энергоэффективности агрегата измельчения, не допуская перегрузки мельницы, за счет разработки новой системы управления мельницей в условиях эксплуатации близких к перегрузке и при воздействии внешних возмущений путем применения подхода управления с прогнозирующей моделью (МРС).

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ существующих АСУТП замкнутых циклов измельчения с шаровой мельницей, а также анализ технологии МРС.
2. Используя методы компьютерного моделирования, разработать математическую модель комплекса измельчения для тестирования САР плотности пульпы, поступающей на классификацию, САУ внутримельничного заполнения. Проверить адекватность модели на данных реального объекта.
3. На основании современных подходов, используемых в системах усовершенствованного управления (СУУТП) – регуляторов с прогнозирующей моделью, виртуального анализатора разработать и протестировать на модели измельчения различные структуры АСУТП и выбрать оптимальную для повышения производительности процесса измельчения и устойчивости в условиях внешних возмущений.
4. Разработать программное обеспечение для промышленного логического контроллера (ПЛК) на основе полученных алгоритмов управления САР плотности пульпы на классификацию и САУ внутримельничного заполнения для внедрения в АСУТП комплекса измельчения.

**Методы исследования.** Полученные результаты исследования базируются на использовании методов теории искусственных нейронных сетей в задачах идентификации, теории оптимального управления сложными динамическими системами, метода модельно-ориентированного проектирования, методов систем усовершенствованного управления, а именно подхода управления с прогнозирующей моделью и виртуального анализатора, наблюдателя возмущений, методики программирования ПЛК на языках программирования ST, FBD. Для моделирования и реализации алгоритмов использовался пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений Matlab.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов подтверждается корректным применением методов модельно-ориентированного проектирования в математическом пакете Matlab, верификацией полученных моделей на данных, снятых с действующего производства, непротиворечивостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Научная новизна:**

- предложена новая математическая модель замкнутого цикла мокрого измельчения в мельнице барабанного типа с разгрузкой через торцевую решетку. Модель предназначена для разработки новых систем автоматического регулирования плотностью пульпы на классификацию и автоматического управления загрузкой мельницы и их отладки на режимах работы мельницы близких к перегрузу. Модель отличается использованием нейросетевой модели вибрации разгрузочной цапфы мельницы, и позволяет осуществлять контроль перегруза мельницы рудой по расчетному параметру массы материала в мельнице;
- предложена новая концепция управления для повышения производительности мельницы по руде, снижения колебаний управляемых параметров, экономии электроэнергии, избегая перегрузки мельницы, и отличающаяся от систем усовершенствованного управления значительно более низкой стоимостью;
- предложены новые решения для АСУТП измельчения, отличающаяся от традиционных АСУТП применением на уровне ПЛК регуляторов с линейной прогнозирующей моделью и наблюдателем возмущений.

**Теоретическая значимость** исследования заключается в разработке новой математической модели технологического процесса измельчения в шаровой мельнице с решеткой, которая может быть использована при анализе процесса измельчения и при решении задач синтеза регуляторов контуров управления АСУТП измельчения.

**Практическая значимость** исследования заключается в разработке алгоритмического и программного обеспечения для систем автоматического управления мельницами, которые могут быть рекомендованы для применения в АСУТП замкнутых циклов измельчения в шаровой мельнице с решеткой для повышения производительности и устойчивости технологического процесса и уменьшения затрат электроэнергии приводом мельницы.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- использование предложенной математической модели технологического процесса измельчения в замкнутом цикле с применением нейронных сетей и принятых допущений позволяет достичь повторение поведения реального процесса с точностью более 70 % по критерию на основе нормированной среднеквадратичной ошибки;
- применение предложенной структуры АСУТП на базе регуляторов с прогнозирующей моделью для управления комплексом измельчения в шаровой мельнице с разгрузкой через решетку, которая включает в себя новые САР уровня пульпы в зумпфе (емкости) слива мельницы и плотности пульпы на классификацию, САУ внутримельничным заполнением материалом с возможностью контроля за перегрузом мельницы рудой, позволяет достичь повышения производительности передела измельчения по руде до 3 %;
- алгоритмическое и программное обеспечение многопараметрического регулятора с прогнозирующей моделью и наблюдателем возмущений для реализации САУ и САР на типовом ПЛК АСУТП секции измельчения позволяют снизить колебания управляемых параметров, уменьшив интегральную ошибку регулирования более чем в 2 раза, сократить относительное среднеквадратическое отклонение (RSD) на 4-7 % при синусоидальных и постоянных внешних возмущениях по отношению к типовым каскадным контурам ПИД-регулирования.

**Апробация результатов.** Основные результаты диссертационной работы были представлены на научно-технических конференциях и семинарах: «IV международный молодёжный форум «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2016), «XII международная научно-практическая конференция «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2019), «Международная научная конференция «Безопасность: информация, техника, управление» (Санкт-Петербург, 2020) и в период аспирантской подготовки докладывались на семинарах отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики НИ ТПУ и отделения автоматизации ООО «НПО «СПбЭК». Основные результаты диссертации, полученные автором при выполнении исследований, прошли проверку на данных, полученных в условиях эксплуатации апатито-нефелиновой обогатительной фабрики №2 КФ АО «Апатит». Документы, подтверждающие внедрение, приложены к диссертации.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы проблема, цель и задачи исследований, научная новизна и практическая ценность, приведены результаты реализации работы.

**В первой главе** выполнен аналитический обзор научно-технической литературы в рамках поставленной проблемы исследования. Рассмотрены современные технологии автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) в горно-обогатительной промышленности. Проанализированы актуальные проблемы АСУТП секций

измельчения апатито-нефелиновых обогатительных фабрик №2 и №3 (АНОФ-2, АНОФ-3) КФ АО «Апатит» и предложены пути усовершенствования АСУТП для их решения. Выделена технология управления с прогнозирующей моделью (MPC) как базис для разработки новой усовершенствованной АСУТП в составе системы оптимального внутримельничного заполнения (САУ), систем автоматического регулирования плотности пульпы на классификацию и уровня в зумпфе слива (САР) для шаровой мельницы барабанного типа с разгрузкой через торцевую решетку в замкнутой схеме измельчения с вибрационным грохочением (рис. 1). Рассмотрены основные периоды в истории теоретического и практического развития MPC, преимущества, цели и проблемы. Показана актуальность и поставлены задачи для разработки новой усовершенствованной структуры АСУТП измельчения методами MPC, виртуальных анализаторов, присущих системам усовершенствованного управления (СУУТП).

На обогатительных фабриках основное внимание уделяется непрерывной работе оборудования и эффективными характеристиками извлечения. Основываясь на этом, а также учитывая особенность измельчения в барабанных мельницах, что повышение производительности даёт соответствующее снижение удельного расхода энергии на тонну продукции, очевиден вывод о том, что, повысив производительность агрегата измельчения, можно значительно повысить экономическую отдачу производства. Однако, при увеличении производительности растет вероятность вывода процесса в режим функциональной нестабильности – перегруза мельницы рудой, из-за возможных внешних возмущений – изменений влажности руды. В связи с этим, особое внимание уделяется САУ, отвечающей за стабилизацию параметра внутримельничного заполнения, на оптимальном уровне и контролирующей перегруз. Синтез оптимальной САУ остается сложной проблемой на протяжении многих лет из-за существующих неопределенностей модели объекта управления, нелинейностей, изменений параметров и их взаимозависимости.

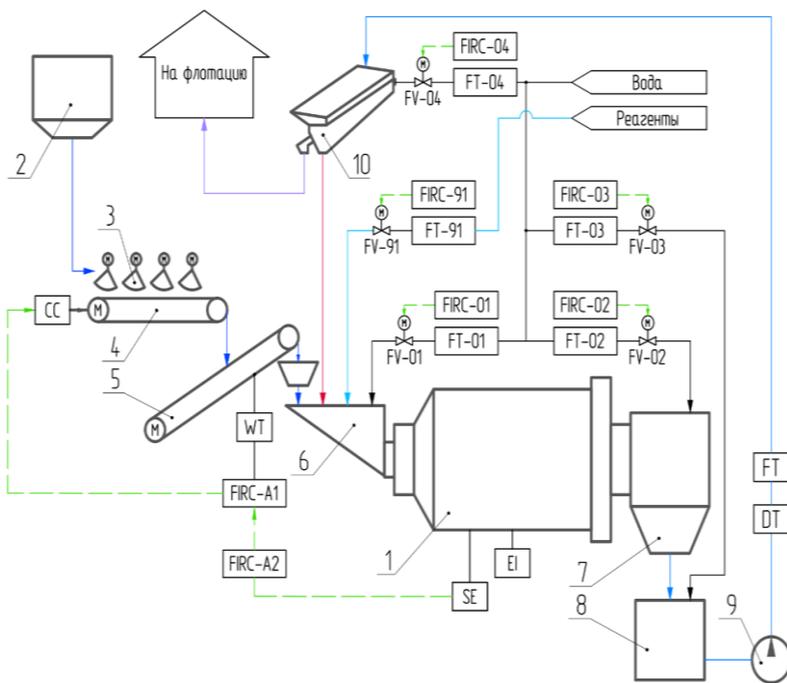


Рис. 1. Функциональная схема процесса измельчения в замкнутом цикле: 1-МШР, 2-бункер, 3-челюстные затворы, 4-конвейер-питатель, 5-наклонный конвейер, 6-загрузка мельницы, 7-разгрузка мельницы, 8-зумпф слива мельницы, 9-насос, 10-вибрационные грохота. СС-шкаф с преобразователем частоты, DT-плотномер, EI-датчик мощности, FIRC-регулятор расхода, FT-расходомер, FV-клапан с пневмоприводом, SE-датчик вибрации, WT-весы.

Отечественные общепромышленные САУ в основном разработаны на базе каскадного ПИД-регулятора. Для стабилизации внутримельничного заполнения и контроля за перегрузом в таких САУ использовано отдельное и взаимное поведение параметров активной мощности электропривода мельницы и вибрации коренного подшипника у разгрузки мельницы. Такие подходы стабильны и эффективны, но только вокруг заданной номинальной рабочей точки. Проведенный обзор методов определения перегруза мельницы показал, что для контроля перегруза применяются различные алгоритмы обработки сигналов активной мощности и вибрации:

- на основе скорости изменения сигнала активной мощности;
- нейросетевой анализ спектра сигнала виброускорения;
- на основе закономерностей изменения показателя Херста звукометрического сигнала;
- виброакустический анализ шумовых параметров: акустический шум, вибрационный шум, энергетический шум и др.

Многие авторы отдают превосходство методу виброакустического анализа загрузки мельницы ВАЗМ, но на практике, хоть и получив широкое применение, подход себя не зарекомендовал.

Кроме того, САУ должна соответствовать следующим требованиям – погрешность стабилизации внутримельничного заполнения мельницы не должна превышать  $\pm 3\%$ , чтобы не допустить раскочки процесса и выхода мельницы в режим перегрузки, при этом важно не допускать, чтобы другие системы регулирования, а именно САР уровня в зумпфе и плотности на классификацию не были причиной этих колебаний. Поэтому следует рассматривать усовершенствованное решение и для САР.

На мировом рынке вышеуказанным требованиям во многом удовлетворяют зарубежные аналоги на основе регуляторов с прогнозирующей моделью (MPC). В последние годы применение MPC для сложных динамических систем стало важной областью исследований. Технология MPC представлена у ряда ведущих мировых лидеров промышленной автоматизации: ABB, Andritz, Emerson Process Management, Honeywell, Invensys, Metso Minerals, Mintek, Rockwell, SGS. MPC довольно сложный алгоритм, требующий больших вычислительных мощностей из-за решения оптимизационной задачи в онлайн режиме. Основное преимущество MPC над ПИД-регулятором в том, что в отличие от ПИД, который реагирует только после появления ошибки регулирования, MPC, оценивая отклик объекта на несколько шагов вперед, воздействует на объект с упреждением. Также MPC успешно применяется в управлении с ограничениями и в контурах с большой задержкой времени. Фундаментальным элементом MPC является модель, используемая для характеристики динамического поведения процесса.

Таким образом, проанализировав проблемы современных САУ, обоснована цель работы и показано, что для усовершенствования системы оптимального внутримельничного заполнения шаровой мельницы барабанного типа с разгрузкой через торцевую решетку в замкнутой схеме измельчения с вибрационным грохочением целесообразно применить MPC наработки

зарубежных аналогов на основе оценочной модели, синтезированной из условий влияния возмущающих факторов при эксплуатации мельницы в режиме функциональной неустойчивости. Усовершенствованная САУ может быть полезна по следующим критериям: увеличение производительности, улучшение стабильности процесса, более эффективное использование сырья. Ко всему прочему, повышение производительности на 1 % позволяет сэкономить от 1 млн. рублей в год на расходы электроэнергии одной секцией измельчения.

**Во второй главе** рассматриваются особенности технологического процесса измельчения апатито-нефелиновых руд и математическое моделирование процесса в целом и структурных элементов по отдельности. Имитационная модель разработана для замкнутого цикла мокрого измельчения в мельнице барабанного типа с разгрузкой через торцевую решетку. Модель формирует динамические отклики переменных процесса и гранулометрического состава измельчаемого материала на основании принципа материального баланса. Механический процесс уменьшения зерен каждой фракции при измельчении реализован по подобию химическим и физическим хаотическим процессам на основе вероятностной модели измельчения материалов В.П. Малышева.

В работе приняты допущения: концентрации всех размерных фракций равномерно распределены по объему материала в мельнице, соответственно, плотность пульпы одинакова по всему объему, и уравнение материального баланса для мельницы в таком случае имеет вид:

$$V_m(t) \frac{d\rho}{dt} = Q_1(t)\rho_1(t) + Q_5(t)\rho_5(t) - Q_3(t, V)\rho_3(t), \quad (1)$$

где  $Q_1, \rho_1$  – расход и плотность исходной руды, разбавленной водой В1 (рис. 2);  $Q_5, \rho_5$  – расход и плотность надрешетного продукта грохочения (песков);  $Q_3, \rho_3$  – расход и плотность пульпы в сливе мельницы;  $V_m$  – объем материала в мельнице.

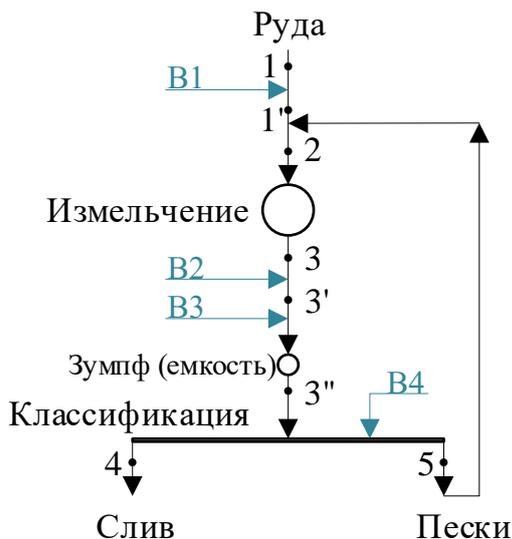


Рис. 2. Одностадийная замкнутая схема измельчения: 1 – 5 – исходная руда и продукты схемы

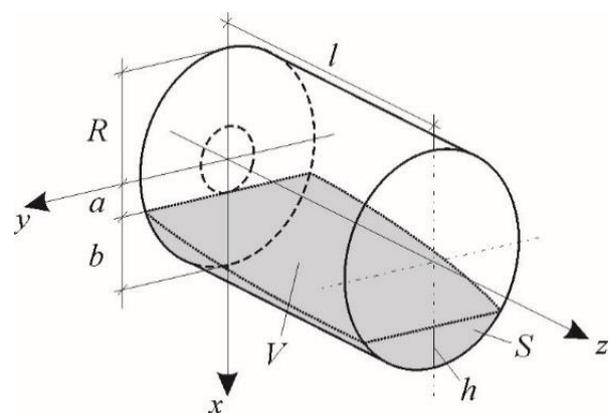


Рис. 3. Графическое изображение распределения материала внутри шаровой барабанной мельницы с разгрузкой через торцевую решетку

Для расчета объема пульпы внутри мельницы принято второе допущение: распределение пульпы при работе мельницы в штатном режиме описывается

моделью неравномерного распределения от загрузочной цапфы до решетки по длине мельницы (рис. 3).

$$V(h) = \frac{2l}{b-h} \left[ \frac{1}{3} (R^2 - h^2)^{3/2} + \frac{a}{2} \left( a\sqrt{R^2 - a^2} - R^2 \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{a}{R} \right) \right) \right] - \frac{1}{3} \left[ R^2 - (R^2 - h^2)^2 \right]^{3/2} - \frac{R-h}{2} \left[ (R-h)\sqrt{R^2 - (R-h)^2} - R^2 \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{R-h}{R} \right) \right], \quad (2)$$

где  $a$  – радиус загрузочной цапфы;  $R$  – радиус окружности по футеровке мельницы. Для установления зависимости уровня пульпы у разгрузочной решетки  $h$  от объема пульпы в мельнице  $h(V_m)$ , обратная функция по отношению к (2) аппроксимируется в диапазоне  $h \in [0; R]$ .

Третье допущение: истечение жидкости из торцевой решетки с множеством конических наружу отверстий заменяется истечением из одного круглого конического отверстия площадью, соответствующей текущему уровню пульпы у торцевой решетки. Таким образом, расход пульпы из мельницы  $Q_3$  зависит только от уровня пульпы у разгрузочной решетки  $h$  и параметров решетки.

$$Q_3(h) = S(h) \cdot \delta \cdot \mu \sqrt{2gh}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент истечения;  $\delta$  – доля площади живого сечения разгрузочной решетки в площади  $S(h)$ , занятой материалом при уровне  $h$ :

Взяв в расчет принятые допущения, решение уравнения материального баланса (1) позволяет определить плотность пульпы в мельнице и тем самым рассчитать массу внутримельничного заполнения  $G$ .

Адекватность моделирования параметра массы внутримельничного заполнения проверена на данных реального объекта. Рост массы  $G$  при приближении к перегрузу (снижению вибрации мельницы  $ST$ ) очевиден на рис. 4, что говорит о возможности оценки перегруза по массе  $G$ .

Модель «производительность мельницы по руде – механическая вибрация коренного подшипника мельницы» получена методом нейросетевой идентификации. Подход

заключается в синтезе оптимальной структуры нелинейной авторегрессионной модели с внешним входом на основе нейронной сети (НС), обучении НС методом Левенберга–Марквардта на данных вход/выход, снятых с реального оборудования в текущей рабочей точке, и проверки полученной НС на данных,

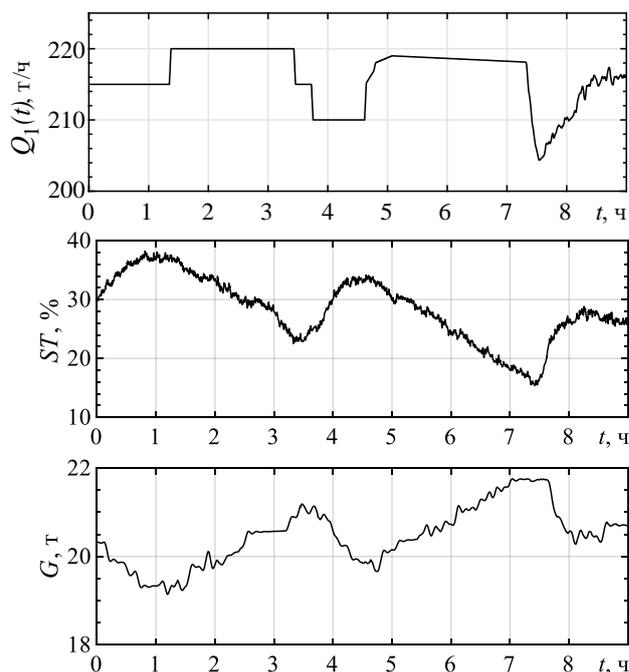


Рис. 4. Результаты моделирования параметра  $G$  и проверка его соответствия вибрации  $ST$

не участвующих в обучении. Наличие корреляции между моделью с оптимальной структурой (рис. 5) и реальным объектом оценивалось по критерию

$$fit = \left( 1 - \sum_k \frac{(y_k - \hat{y}_k)^2}{(y_k - \bar{y})^2} \right) \cdot 100\% , \quad (4)$$

и сравнивались с другими методами нелинейной идентификации. Точность разработанной модели ('0831', см. рис. 5) по критерию (4) составила 72,1 %.

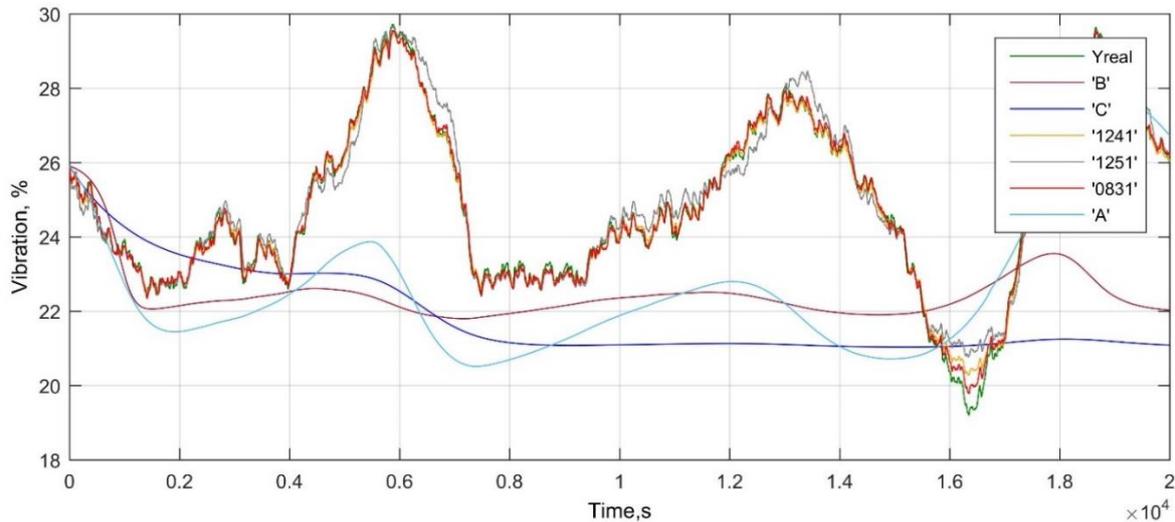


Рис. 5. Результаты моделирования вибрации нейросетевым методом и сравнение с другими нелинейными методами: «А» – модель Гаммерштейна-Винера, «В» – Вейвлет-преобразование; «NARX2» – метод «treepartition»

Имитационная модель цикла измельчения реализована в виде структурной Simulink модели в среде Matlab (рис. 6) и также включает в себя:

- модели параметров нестационарности оборудования: износ мелющих тел, износ футеровки мельницы (изменение рабочего объема и массы мельницы, массы шаровой загрузки), пренебрегая торцевым износом;
- интегральную вероятностную модель выхода фракций (учет содержания расчетного класса в измельченном продукте);
- модель зумпфа слива мельницы;
- модель трубопроводов (учет временных задержек);
- модель регулирующего клапана (учет динамики расхода воды ВЗ);
- модель центробежного насоса;
- модель вибрационных грохотов.

Определение параметров, а также проверка имитационной модели цикла измельчения проводилась на комплексе измельчения апатито-нефелиновой руды с мельницей типа МШР 4,5х5,0. Качество моделирования оценивалось по

величине средней абсолютной ошибки:  $MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \left( \frac{|y_{Ri} - y_{Mi}|}{y_{Ri}} \right) \cdot 100\% .$

Максимальная средняя ошибка модели составила 7 % (рис.7, г) от фактических значений. При этом точность полученной модели составила:

$$Accuracy = 100\% - MAPE_{MAX} = 93\% , \quad (5)$$

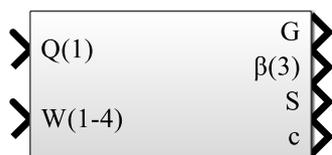
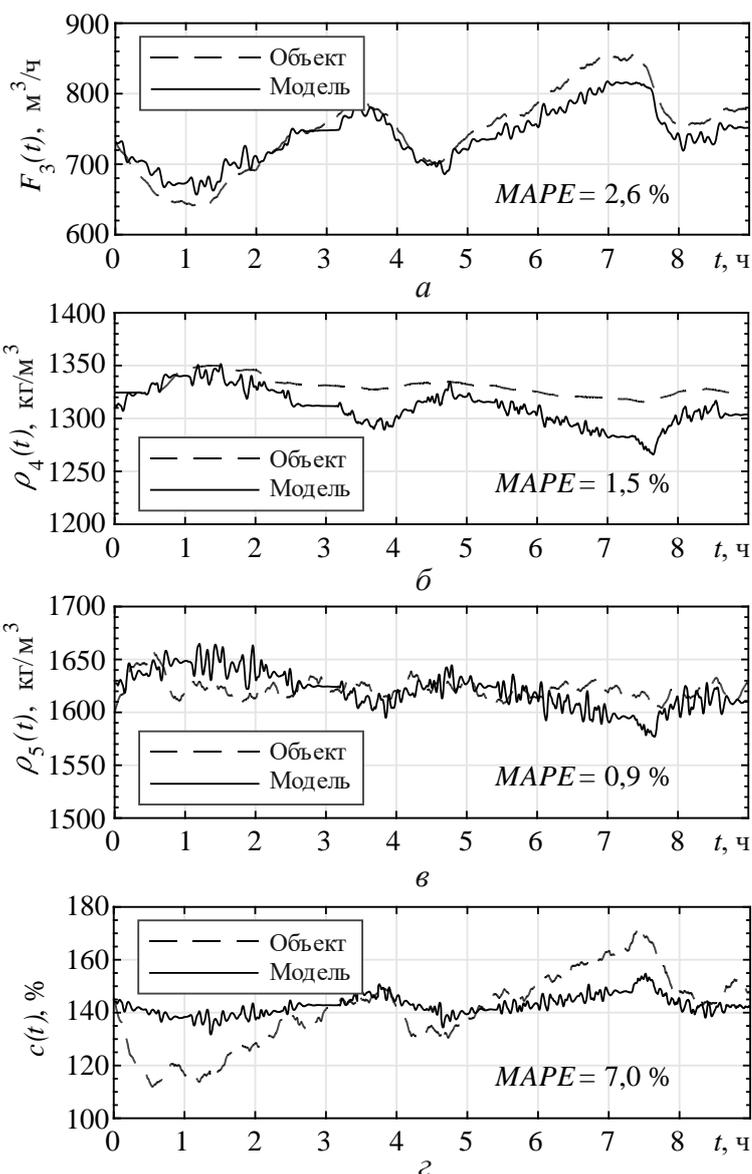


Рис. 6. Интерфейс имитационной модели ТП: Q1 – производительность мельницы по руде, т/ч; W – расходы воды в точках 1-4 схемы измельчения, м<sup>3</sup>/ч; G – масса внутримельничного заполнения, т; β3 – содержание расчетного класса в продукте 3, %; S – механическая вибрация мельницы, %; c – циркулирующая нагрузка, %

Рис. 7. Результаты моделирования параметров ТП: а – расход продукта на грохочение; б – плотность подрешетного продукта грохочения; в – плотность надрешетного продукта грохочения; г – циркулирующая нагрузка



В третьей главе предложено новое решение САР стабилизации параметров уровня и плотности на классификацию для задачи измельчения, которое также распространяется на аппараты с функцией перемешивания пульпы на горно-обогатительных фабриках (см. рис. 8).

Предложенные стратегии управления для САР позволили достичь уменьшения квадратичный интеграла от ошибки регулирования (ISE) при стабилизации плотности и уровня в зумпфе слива мельницы по сравнению с ПИД-регуляторами. Результаты были получены с использованием разработанной имитационной модели в разделе 2 и учетом случайных шумов по контролируемым и неконтролируемым величинам на

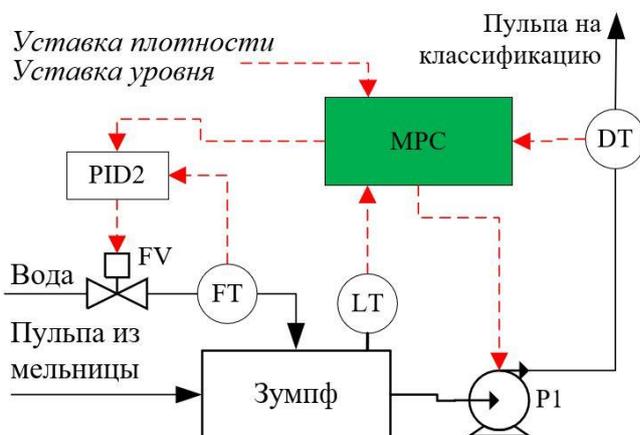


Рис. 8 – Структурная схема САР с МИМО MPC

протяжении всего времени моделирования для следующих условий:

- изменение уставки плотности выходного продукта (см. рис. 9);
- изменение уставки уровня пульпы в зумпфе (см. рис. 10);
- влияние возмущения в виде скачка плотности продукта на входе в зумпф, что зачастую является причиной вывода процесса из установившегося режима на реальном объекте (см. рис. 11).

Полученное графическое и статистическое сравнение показывает, что стратегии с применением MPC превосходят стандартное ПИД-регулирование по критерию ISE во всех трех экспериментах: 1)  $0,520 < 1,059$  (см. Таблица 1); 2)  $0,361 < 0,625$  (см. Таблица 2); 3)  $0,158 < 0,468$  (см. Таблица 3). Также MPC-регуляторы имеют меньшее перерегулирование, что особо важно при системных возмущениях в виде изменения плотности входного продукта. Реализованные стратегии MPC соответствовали более стабильному процессу и большей эффективности процесса по критерию RSD.

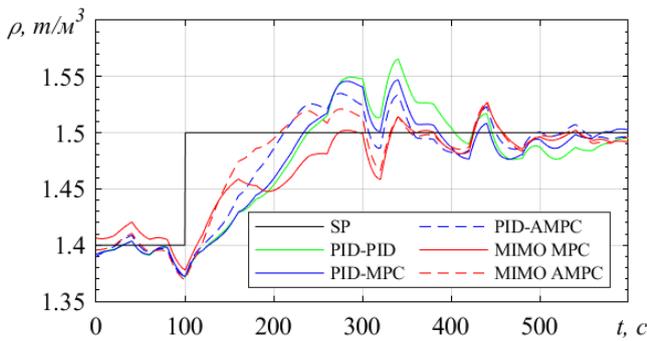


Рисунок 9 – Эксперимент №1: результаты моделирования САР

Таблица 1 - Статистическая эффективность стратегий управления САР на изменение задания плотности (на основе моделирования)

Стратегия САР	Критерии оценки		
	ISE	RSD, %	$\sigma$ , %
PID-PID	1,059	2,558	4,369
PID-MPC	0,929	2,356	3,132
PID-AMPC	0,720	2,091	2,339
MIMO MPC	0,628	1,749	1,886
MIMO AMPC	0,520	1,721	1,858

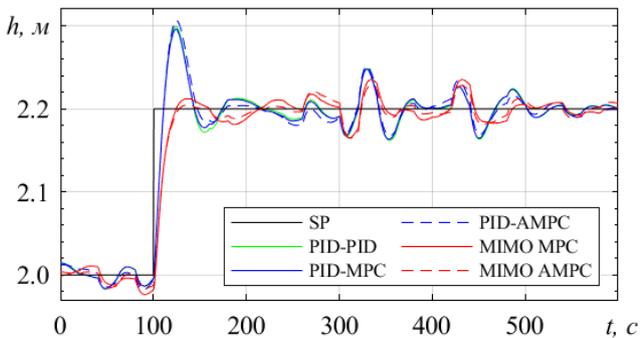


Рисунок 10 – Эксперимент №2: результаты моделирования САР

Таблица 2 - Статистическая эффективность стратегий управления САР на изменение задания уровня (на основе моделирования)

Стратегия САР	Критерии оценки		
	ISE	RSD, %	$\sigma$ , %
PID-PID	0,625	1,381	4,513
PID-MPC	0,511	1,254	4,352
PID-AMPC	0,466	1,199	4,828
MIMO MPC	0,39	1,096	1,598
MIMO AMPC	0,361	1,053	1,272

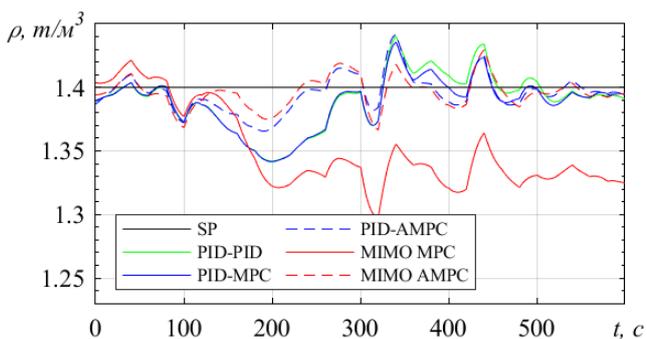


Рисунок 11 – Эксперимент №3: результаты моделирования САР

Таблица 3 - Статистическая эффективность стратегий управления САР на изменение плотности пульпы на входе в зумпф (на основе моделирования)

Стратегия САР	Критерии оценки		
	ISE	RSD, %	$\sigma$ , %
PID-PID	0,468	1,489	4,147
PID-MPC	0,403	1,34	4,177
PID-AMPC	0,206	1,004	2,972
MIMO MPC	3,152	2,85	7,285
MIMO AMPC	0,158	0,871	2,388

Разработана новая САУ внутримельничным заполнением шаровой мельницы с разгрузкой через торцевую решетку в замкнутом цикле измельчения, отличающаяся использованием MPC с наблюдателем возмущений (DOB), виртуального анализатора (ВА) – модель для прогнозирования веса материала в мельнице для контроля за перегрузом и формирования ограничений для MPC. Тестирование САУ проведено с использованием ПЛК Schneider Electric в реальном времени в контуре с Simulink-моделью, разработанной в разделе 2, посредством Modbus OPC для обмена данными между ПК и ПЛК. САУ тестировалась в следующих условиях:

- стабилизация вибрации  $S$  при изменении уставки, без внешних возмущений (см. рис. 12);
- стабилизация вибрации  $S$  при изменении уставки при воздействии синусоидальных возмущений (см. рис. 13);
- стабилизация вибрации  $S$  при воздействии ступенчатого возмущения 3 % в интервале времени 1700-3000 с (см. рис. 14).

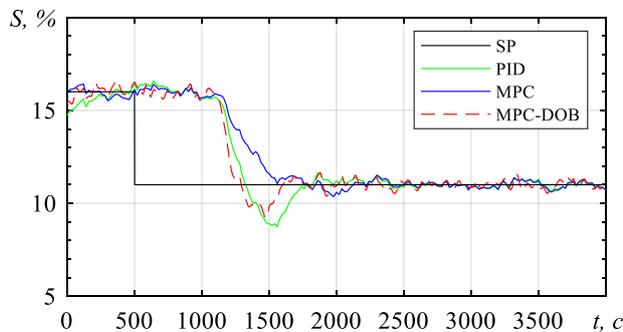


Рисунок 12 – Эксперимент №1: результаты моделирования САУ

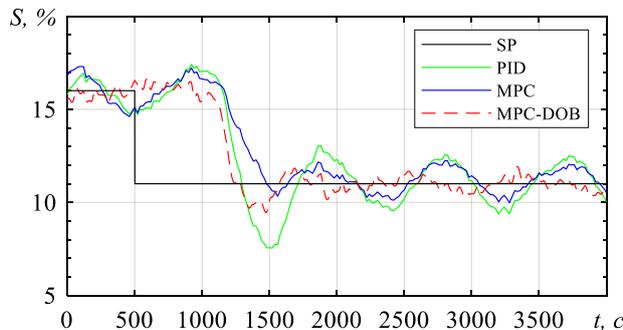


Рисунок 13 – Эксперимент №2: результаты моделирования САУ

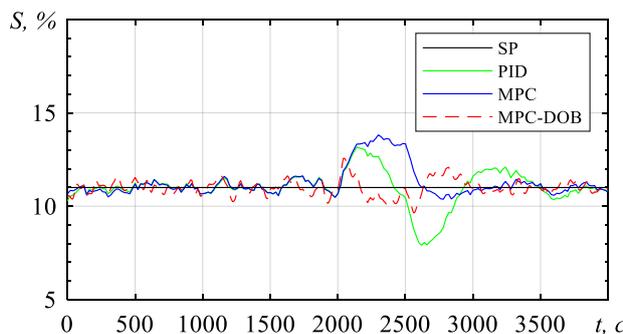


Рисунок 14 – Эксперимент №3: результаты моделирования САУ

Таблица 4 - Статистическая эффективность стратегий управления на изменение уставки (на основе моделирования)

Стратегия САУ	Критерии оценки		
	ISE	RSD, %	$\sigma$ , %
PID	5154,3	11,925	20,460
MPC	6026,3	12,894	5,748
<b>MPC-DOB</b>	<b>4432,4</b>	<b>11,062</b>	<b>16,209</b>

Таблица 5 - Статистическая эффективность стратегий управления на изменение уставки при синусоидальных возмущениях (на основе моделирования)

Стратегия САУ	Критерии оценки		
	ISE	RSD, %	$\sigma$ , %
PID	10994,3	17,415	31,377
MPC	8016,51	14,872	11,234
<b>MPC-DOB</b>	<b>4005,4</b>	<b>10,515</b>	<b>14,092</b>

Таблица 6 - Статистическая эффективность стратегий управления на ступенчатое возмущающее воздействие (на основе моделирования)

Стратегия САУ	Критерии оценки		
	ISE	RSD, %	$\sigma$ , %
PID	3348,7	9,603	28,036
MPC	2814,1	8,803	25,644
<b>MPC-DOB</b>	<b>673,7</b>	<b>4,308</b>	<b>14,249</b>

ПИД-регулирование имеет нежелательное перерегулирование ( $\sigma = 20,460\%$ ), MPC показывает медленное, но надежное регулирование ( $\sigma = 5,748\%$ ), что в данном случае важнее быстрой стабилизации с наименьшей интегральной ошибкой ISE, которую показывает MPC-DOB (см. Таблица 4). При синусоидальных возмущениях у ПИД-регулирования наблюдается отклонение в момент 1500 с более 3 % от уставки ( $\sigma = 31,377\%$ ), которое может привести к перегрузу мельницы - падение шума ниже 6 % на практике зачастую является фактическим перегрузом мельницы. По ISE и RSD видно, что MPC-DOB успешно подавляет синусоидальные возмущения в отличие от ПИД и MPC (см. Таблица 5). В условиях ступенчатого возмущения, которое на практике может быть результатом изменения влажности исходной руды, лучшие показатели (ISE = 673,7, RSD = 4,308 %,  $\sigma = 14,249\%$ ) у САУ с наблюдателем возмущений (MPC-DOB). ПИД-регулирование отличается опасным отклонением в момент 2700 с, а MPC медленным, но безопасным регулированием (см. Таблица 6). Структурная схема предложенного регулятора для САУ представлена на рисунке 15.

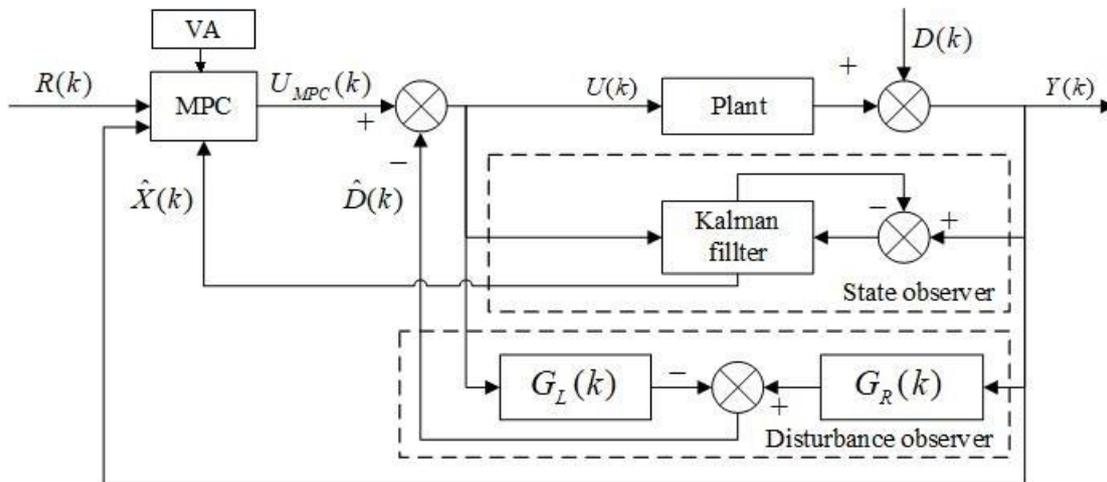


Рис. 15. Структурная схема регулятора MPC-DOB+VA

В качестве прогнозирующей модели MPC используется линейная модель объекта управления (ОУ) с временной задержкой  $\tau$ :

$$G_n(s) = g_n(s)e^{-\tau s},$$

представленная в пространстве состояний, дискретизированная экстраполятором нулевого порядка с интервалом  $T_s = 1$  с:

$$x(k+1) = Ax(k) + B\Delta u(k - \tau_k),$$

$$y(k) = Cx(k),$$

где  $k$  – шаг дискретизации,  $x(k)$  – вектор состояний,  $u(k)$  – вектор входов,  $y(k)$  – вектор выходов,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – матрицы динамики системы, входов и выходов соответственно,  $\tau_k$  – целая часть от  $\tau/T_s$ .

Оптимизационная задача квадратичного программирования для поиска оптимальной управляющей последовательности решается численным методом

Хилдрета, в котором учитываются линейные ограничения на входные переменные:

$$u^{\min} \leq u(k) \leq u^{\max}, \Delta u^{\min} \leq \Delta u(k) \leq \Delta u^{\max},$$

где  $u^{\min}, u^{\max}, \Delta u^{\min}, \Delta u^{\max}$  – минимум, максимум, минимальное и максимально приращение входной переменной. Учитывая рекомендации, ограничения на выходы не учитываются, так как сходимость решение такой задачи не гарантируется. Алгоритм решения задачи оптимизации выполняется циклически, с целью минимизировать квадратическую ошибку приращения входа  $\Delta u(k)$ , между прогнозируемым выходом системы и уставкой  $R(k)$ , пока не достигается заданная точность или будет превышено заданное число итераций.

Для быстрой подстройки выхода прогнозирующей модели под текущее значение выхода ОУ используется наблюдатель состояния на основе дискретного линейного фильтра Калмана. На выходе наблюдателя получаем оценку вектора состояний системы для последующей итерации:

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + K_{ob}(y(k) - C\hat{x}(k)).$$

Весовая матрица  $K_{ob}$  наблюдателя находится методом размещения полюсов.

Особенность алгоритма управления заключается в применении наблюдателя возмущений (DOV) в качестве компенсации как внешних возмущений, так и связанных с несоответствием модели. Для этого действующие внешние возмущения оцениваются следующим образом:

$$\hat{D}(s) = G_R(s) - G_L(s) = H(s)g_n^{-1}(s)Y(s) - H(s)e^{-\tau s}U(s),$$

эффективность подавления возмущений зависит от выбранного фильтра  $H(s)$ .

Дополнительно был применен ВА для оперативного формирования ограничений производительности по спрогнозированному значению веса материала в мельнице. ВА основан на полученной в разделе 2 модели ТП измельчения. Входными данными для расчета являются производительность мельницы  $Q_1$ , расходы воды  $W_1, W_2, W_3, W_4$  во все точки замкнутого цикла измельчения и параметры технологического оборудования  $R$ :

$$f(Q_1, W_1, W_2, W_3, W_4, R, t) = G \rightarrow Q_{\max}.$$

ВА формирует ограничения производительности  $Q_{\max}$  для МРС в момент достижения заранее заданного критического значения массы материала в мельницы  $G_{\max}$ , установленного на основании опытно-промышленной эксплуатации.

Моделирование работы САУ в режиме близком к перегрузу (см. рис. 16) показало, что применение МРС-DOV+ВА позволило повысить на 1 % среднюю производительность в автоматическом режиме до 240,67 т/ч, по сравнению с ПИД – 238,01 т/ч. Можно видеть функционирование ВА в момент  $t = 4,32$  ч – при превышении  $G_{\max}$  было установлено новое ограничение  $Q_{\max} = 243$  т/ч для регулятора МРС. Исходя из полученных результатов моделирования, предложенная структура САУ позволяет повысить устойчивости к внешним возмущениям, эксплуатировать технологическое оборудование цикла измельчения в режимах высокой производительности, избегая перегрузки мельницы.

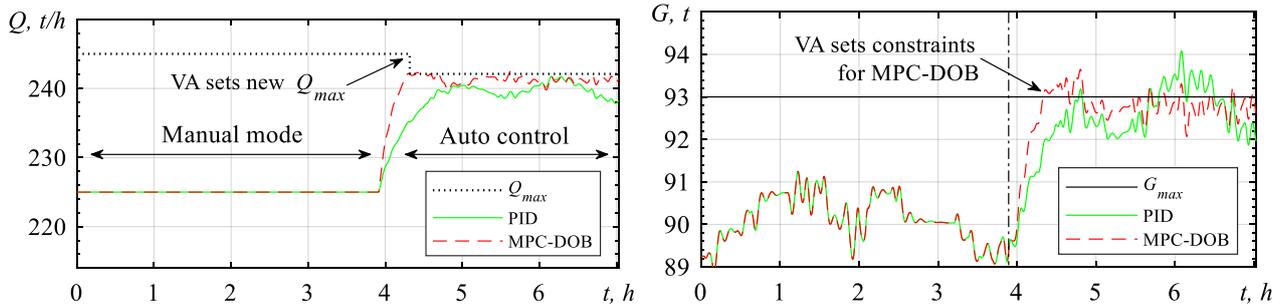


Рис. 16. Производительность (слева) и прогноз массы материалы внутри мельницы виртуальным анализатором (справа) при работе САУ в режиме близком к перегрузу

Как правило, подход управления с прогнозирующей моделью MPC реализуется на системах с большими вычислительными ресурсами и ресурсами памяти, таких как ПК, из-за того, что проблема оптимизации должна решаться в реальном времени. Реализация алгоритмов MPC на менее производительной аппаратуре, а именно на промышленных ПЛК ограничивается их вычислительными ресурсами, поскольку требования к памяти растут квадратично с увеличением горизонта прогнозирования. Несмотря на это проблема реализации MPC в подобных системах была широко исследуемой темой в последние годы. Внедрение MPC в промышленные ПЛК представляет большой интерес из-за их широкого распространения в отрасли по сравнению с ПЛИС или микроконтроллерами. Несмотря на ограничения по памяти и производительности показано, что метод реален и реализуем на ПЛК.

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для интеграции и масштабирования программного кода регулятора MPC-DOB в действующие программно-аппаратные комплексы АСУТП измельчения. На основании приведенного математического описания MPC с наблюдателем возмущений разработана функциональная блок-схема алгоритма для реализации на ПЛК. Программный код на языках программирования МЭК 61131-3 разработан для алгоритма  $4 MV \times 4 CV$  с максимальными горизонтами  $N_c = 4$  и  $N_p = 200$  и требует 120,2 Кбайт для переменных и 150 Кбайт для кода. В качестве варианта интеграции рассмотрен ПЛК Modicon M340 с доступными 256 Кбайт памяти для переменных и среда разработки Unity Pro фирмы Schneider Electric.

Стоимость интеграции технологии должна быть принята во внимание, так как полученное решение достаточно бюджетное по сравнению с системами СУУТП, а также простое с точки зрения принятия решения о его внедрении, чего не скажешь о СУУТП. Это объясняется тем, что оно может быть применено непосредственно в существующих ПЛК, где не требуется дополнительное оборудование или программное обеспечение, но стоит отметить, что стоимость может меняться прямо пропорционально сфере внедрения.

**В приложениях** приведены функция Matlab для линеаризации прогнозирующей модели объекта управления для адаптивного MPC регулятора и проект программного обеспечения регулятора MPC с наблюдателем возмущений для ПЛК на языках стандарта МЭК 61131-3.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в работе научные исследования представлены следующими новыми результатами.

1. В ходе исследования была разработана математическая нейросетевая модель параметра механической вибрации мельницы, отличающаяся тем, что она адекватно прогнозирует параметр вибрации после ее обучения на данных, снятых при различных сценариях реальной эксплуатации мельницы. При этом точность модели составляет  $\approx 72\%$  по выполненным оценкам (4). Предложенная математическая модель была проверена на адекватность в реальных условиях эксплуатации шаровой мельницы с разгрузкой через торцевую решетку на апатито-нефелиновой обогатительной фабрике.
2. Разработана модель для замкнутого цикла мокрого измельчения в мельнице барабанного типа с разгрузкой через торцевую решетку, формирующая динамические отклики переменных процесса и на основании решения уравнений баланса материальных потоков в цикле. Модель, отличается, тем, что она учитывает процесс уменьшения зерен каждой фракции на основе вероятностной модели и позволяет оценивать текущую массу пульпы внутри мельницы – внутримельничное заполнение, учитывая нестационарность технических параметров агрегата измельчения. При помощи оценки массы внутримельничного заполнения модель осуществлена возможность непосредственного контроля за перегрузом мельницы и фиксировать перегруз в момент когда текущая масса материала в мельнице превышает критическую уставку. Предложенная математическая модель была проверена на адекватность в реальных условиях эксплуатации шаровой мельницы с разгрузкой через торцевую решетку на апатито-нефелиновой обогатительной фабрике. При этом средняя точность модели составляет  $\approx 93\%$  по выполненным оценкам (5).
3. Разработана усовершенствованная САР плотности на классификацию и уровня в зумпфе слива мельницы, где в качестве альтернативы ПИД-регуляторам применен подход многопараметрического и адаптивного управления с прогнозирующей моделью. Приведен пример синтеза регулятора МРС и адаптивного МРС с помощью пакета прикладных программ Matlab. Получены переходные процессы по каналам управления и возмущения для пяти рассматриваемых стратегий управления, выбранных с учетом существующих мировых практик. По результатам вычислительных экспериментов выполнен анализ, на основании которого стратегия с многопараметрическим адаптивным МРС показала лучшее качество регулирования, уменьшив интегральную ошибку более чем в 2 раза. Целесообразно использовать предлагаемые подходы для стабилизации плотности и уровня взамен традиционных регуляторов с ПИД законами регулирования.

4. Разработана новая САУ внутримельничным заполнением материалом шаровой мельницы с разгрузкой через торцевую решетку в замкнутом цикле измельчения с применением управления с прогнозирующей моделью и активным подавлением возмущающих воздействий (MPC-DOB). В дополнение к САУ для контроля за перегрузом мельницы предложен виртуальный анализатор веса материала в мельнице на основе разработанной модели технологического процесса. Проведено тестирование системы управления на лабораторной установке, где в качестве объекта выступала модель мельницы в Simulink, а система управления была реализована на ПЛК. Тестировались САУ с ПИД-регуляторами, MPC, MPC-DOB для различных сценариев. MPC-DOB показал эффективность по отношению к ПИД и MPC при синусоидальных и ступенчатых возмущениях сократив RSD на 4-7 %. Совместное применение MPC-DOB и ВА позволило повысить производительность измельчения на 1 % и улучшить качество стабилизации вибрации мельницы в режиме функциональной неустойчивости. Разработанная САУ, может быть применена в АСУТП измельчения в шаровой мельнице с решеткой для повышения производительности и устойчивости технологического процесса и уменьшения затрат электроэнергии приводом мельницы.
5. Разработано математическое, алгоритмическое и программное обеспечение для потенциальной интеграции разработанных САУ и САУ в АСУТП обогатительных фабрик с возможностью повысить производительность передела измельчения до 3 %, снижения колебаний управляемых параметров до 50 %, экономии энергии до 5 %.

Разработанные решения имеют перспективы внедрения на ГОКах стран СНГ, где нашли применение шаровые мельницы с решеткой отечественного производителя (НКМЗ, ТЯЖМАШ) с постоянной скоростью вращения. Технология отличается разительной дешевизной по сравнению с СУУТП, но и имеет свои особенности. Как показал проведенный опрос случайных ГОКов, большинство из них вообще не имеют системы автоматического управления внутримельничным заполнением. Таким образом, в условиях жесткого импортозамещения потенциальный потребитель для технологии найдется.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **по Перечню ВАК**

1. Закамалдин, А. А. Моделирование замкнутого цикла измельчения в шаровой барабанной мельнице с разгрузкой через торцевую решетку / А. А. Закамалдин, А. А. Шилин // Технология машиностроения. – 2021. – № 8. – С. 12-20.
2. Закамалдин, А. А. Построение системы автоматического управления с прогнозирующей моделью для стабилизации плотности и уровня при перемешивании пульпы в горно-обогатительном оборудовании / А. А. Закамалдин, А. А. Шилин // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического

университета). – 2021. – № 58. – С. 77-83. – DOI 10.36807/1998-9849-2021-58-84-77-83.

#### **Статьи, опубликованные в Scopus или WoS**

3. Zakamaldin A. A., Andyk V. S. Parametric Identification of Control Systems Using Artificial Neural Networks //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2015. – Т. 37. – С. 01064.
4. Zakamaldin A. A. Neural simulation of ball mill grinding process / Zakamaldin A. A., Shilin A. A. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Т. 795. – №. 012010. – С. 1–7.

#### **Статьи, опубликованные в других изданиях**

5. Закамалдин, А. А. Моделирование адаптивной системы нейро-нечеткого управления ветроэнергетической установкой /А. А. Закамалдин, В. С. Андык//Интеллектуальные энергосистемы: труды IV Международного молодёжного форума, 10-14 октября 2016 г., г. Томск 3 т./Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Энергетический институт (ЭНИИ). -2016. -Т. 1. – С. 155-159.
6. Закамалдин, А. А. Пути усовершенствования системы автоматического управления процессом измельчения // Современные научные исследования и разработки. 2018. №10(27). – С. 359-362.
7. Zakamaldin A. A., Plastunova S. N., Shilin A. A. Problems of automated control and avoiding of overloading drum mills with ore //Безопасность: Информация, Техника, Управление. – 2020. – С. 49-52.

#### **Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ**

8. Закамалдин А. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022614491. Регулятор многопараметрической с прогнозирующей моделью и наблюдателем возмущений / Закамалдин А. А. Заявка № 2022613395. Дата поступления 03 марта 2022 г. Зарегистрировано в бюллетене 03 марта 2022 г.