

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Шилин Александр Анатольевич

Томск – 2022

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Проблемы и пути развития систем автоматизированного управления технологическим процессом измельчения в горно-обогатительной промышленности.....	11
1.1 Проблемы отечественных прикладных решений автоматизации процесса измельчения в шаровых мельницах	13
1.2 Существующие подходы к автоматизации горно-обогатительного производства.....	17
1.2.1 Система автоматического управления внутримельничным заполнением.....	21
1.2.2 Контроль перегруза	25
1.2.3 Системы автоматического регулирования.....	25
1.3 Подход управления с прогнозирующей моделью	26
1.3.1 История развития MPC.....	27
1.3.2 Современные MPC технологии	33
1.3.3 Актуальность MPC для России	40
1.4 Постановка задач исследования	43
1.5 Выводы по первой главе	44
Глава 2. Моделирование процесса измельчения в шаровой мельнице с решеткой в замкнутом цикле	45
2.1 Описание технологического процесса.....	45
2.2 Параметры технологического процесса измельчения	51
2.2.1 Показатели качества измельчения	51
2.2.2 Влияние заполнения мельницы шарами.....	54
2.2.3 Влияние пробега мельницы	57
2.2.4 Химический состав руды	60
2.2.5 Внутримельничное заполнение	61

2.2.6	Активная мощность электропривода мельницы	64
2.3	Моделирование технологического процесса измельчения с шаровой мельницей в замкнутом цикле с грохочением	66
2.3.1	Постановка задачи моделирования процесса измельчения.....	66
2.3.2	Барабанная шаровая мельница с решеткой.....	68
2.3.3	Гранулометрический состав измельченного продукта.....	70
2.3.4	Вибрация мельницы.....	72
2.3.5	Износ футеровки и шаров	77
2.3.6	Зумпф	78
2.3.7	Трубопроводы	79
2.3.8	Регулирующий клапан.....	79
2.3.9	Центробежный насос	80
2.3.10	Вибрационные грохоты.....	80
2.3.11	Моделирование схемы измельчения.....	81
2.4	Валидация модели измельчения в шаровой мельнице с решеткой	82
2.5	Выводы по второй главе.....	86
Глава 3.	Построение усовершенствованной системы управления процессом измельчения в шаровой мельнице с решеткой в замкнутом цикле	88
3.1	Используемые методы.....	88
3.1.1	Методы моделирования	88
3.1.2	Математическое описание подхода управления с прогнозирующей моделью	88
3.1.3	Оценки качества.....	94
3.2	Построение системы автоматического регулирования с прогнозирующей моделью для стабилизации плотности и уровня в зумпфе слива мельницы..	94
3.2.1	Структура САР	94
3.2.2	Прогнозирующая модель для САР.....	97

3.2.3 Синтез САР в Matlab	98
3.2.4 Тестирование САР	102
3.3 Построение системы автоматического управления объемом заполнением шаровой мельницы материалом	106
3.3.1 Структура САУ	106
3.3.2 Виртуальный анализатор перегруза.....	107
3.3.3 Регулятор объемного заполнения	108
3.3.4 Тестирование САУ.....	110
3.4 Реализация алгоритмов модельно-прогнозирующего управления в аппаратно-программном комплексе АСУТП.....	117
3.4.1 Блок схема алгоритма для ПЛК.....	118
3.4.2 Расчет системных требований к алгоритму	121
3.4.3 Структура программы	122
3.5 Выводы по третьей главе	124
Заключение	126
Список условных обозначений.....	129
Список литературы	130
Приложение 1. Функция Matlab для линеаризации прогнозирующей модели объекта управления для МРС регулятора.....	145
Приложение 2. Проект программного обеспечения регулятора МРС с наблюдателем возмущений для ПЛК на языках стандарта МЭК 61131-3.....	146
Приложение 3. Акт внедрения научной работы на ООО «НПО ВЭСТ»	178
Приложение 4. Акт внедрения научной работы в учебный процесс Национального исследовательского Томского политехнического университета	179

Введение

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, производционных 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 нестабильности 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 – получение максимальной производительности технологического процесса измельчения в шаровой мельнице в замкнутом цикле, не допуская возможности перегрузки мельницы рудой. Получить наилучшие результаты при данных условиях предлагается путем разработки новой оптимальной 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), а именно регуляторов с прогнозирующей моделью, виртуального анализатора разработать и протестировать на модели измельчения различные структуры АСУТП, выбрать из них 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, отличающиеся 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 мельницей, 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 САУ 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 производительность 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» Современные проблемы машиностроения» (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».

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии в постановке задач исследования, получении исходных данных, в проведении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, анализе и оформлении результатов работы в виде научных публикаций и докладов на научных конференциях.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 печатных изданиях: два [91, 116] изданы в журналах, рекомендованных ВАК; две [98, 118] публикации проиндексированы в базе Scopus или WoS; три – в тезисах докладов [1, 8, 99]; одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [134].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка условных обозначений, списка литературы из 134 наименований и четырех приложений. Основной текст диссертации (без приложений) изложен на 144 страницах и содержит 50 рисунков и 18 таблиц.

Глава 1. Проблемы и пути развития систем автоматизированного управления технологическим процессом измельчения в горно-обогатительной промышленности

Недра Российской Федерации преисполнены полезными ископаемыми, о чем говорит количество и масштабность разрабатываемых карьеров на территории всей страны. Российские ведущие горнодобывающие компании оказывают значительный вклад в экономику государства и являются одними из лидеров на мировом рынке.

Горно-обогатительный комбинат (ГОК) в цепочке рудоподготовки стоит ровно посередине между рудником и заводом, для которого сырьем являются концентраты и другие продукты обогащения.

Крупные ГОКи РФ, в основном, построены во времена СССР и были спроектированы с расчетом на длительный срок эксплуатации. До сих пор такие фабрики работают и стабильно выполняют свой план, при этом большая часть аппаратов осталась с советских времен. Конечно, горнообогатительные предприятия проводят закономерные модернизации и реконструкции мощностей фабрик внедряя современное оборудование, зачастую зарубежное. Но есть ключевое оборудование, которое заменить достаточно не просто по причинам больших капитальных затрат, невозможности вывести из эксплуатации действующее оборудование так как это понизит производительность фабрики или оборудование стабильно работает на своих номинальных параметрах, что удовлетворяет стратегии предприятия. Конкретным примером такого оборудования являются мельницы для дробления руды.

В схеме обогащения минерального сырья при подготовке исходного сырья дробление является основной операцией разрушения руды до требуемых размеров и при этом ее раскрытия на зерна отдельных минералов.

Дробление, в свою очередь, операция стадийная, может включать в себя последовательное разрушение руды в дробилках разного класса: крупного,

среднего, мелкого. В завершении операции дробления, руда перед обогащением поддается стадии тонкого дробления (измельчения).

В данной работе во внимание берется стадия измельчения, которая имеет ряд особенностей. Во-первых, агрегат измельчения может быть представлен мельницами шаровыми или стержневыми, а также мельницами самоизмельчения и полусамоизмельчения. В шаровых и стержневых мельницах измельчаемый материал дробится с помощью соответствующих мелющих тел – шаров и стержней. В мельницах самоизмельчения разрушение материала протекает в результате взаимодействия кусков руды друг с другом. При полусамоизмельчении в мельницу самоизмельчения добавляют крупные стальные шары (5-10 % от объема мельницы). На территории стран СНГ мельницы типа МЩЦ и МШР Новокузнецкого машиностроительного завода (НКМЗ) были и есть основной незаменимой частью стадии измельчения. На сегодня завод по-прежнему поставляет свои мельницы на крупнейшие ГОКи России и в другие страны. Также эксплуатируются и мельницы зарубежных компаний, которые специализируются на технических решениях в отрасли горно-обогатительной промышленности: Metso, Flsmidth, Andritz, Eriez, Cemtec, Outotec, китайские производители и другие. У этих компаний есть преимущество по отношению к отечественным в том, что помимо самого оборудования они поставляют еще и инженеринговые решения для извлечения максимальной эффективности.

Эффективность измельчения заключается в следующем:

- получение высоких технологических показателей при наименьших эксплуатационных расходах;
- относительная производительность мельницы – по ней можно оценить эффективность мельницы в сравнении с идеальным циклом, при котором эффективность грохочения равна 100 %;
- циркулирующая нагрузка одностадийной схемы измельчения – это отношение расхода песков грохотов к расходу руды в мельницу.

1.1 Проблемы отечественных прикладных решений автоматизации процесса измельчения в шаровых мельницах

В горнодобывающей и горно-обогащительной промышленности технологические линии производства являются крупномасштабными объектами с большим числом единиц энергоемких машин и аппаратов. К примеру, мельничный передел – самый энергоемкий в обогащении апатито-нефелиновой руды. Суммарная мощность, потребляемая двигателями основного и вспомогательного оборудования одной секции измельчения, составляет порядка 4-6 МВт. Стоимость 1 маш.-ч эксплуатации оборудования секции в плановом режиме при тарифе 2,68 руб./кВт·ч составляет 10720 руб. Если проектная производительность мельницы МШЦ 5,5х6,5 - 400 т/ч по руде, то на практике средняя производительность с учетом ряда факторов - 360-380 т/ч. Учитывая что любое повышение производительности даёт соответствующее снижение удельного расхода энергии на тонну продукции, то, экономия 100 маш.-ч окажет экономический эффект порядка 1000000 руб [1]. Следовательно, повышение производительности барабанных шаровых мельниц может значительно повысить экономическую отдачу производства. С другой стороны, эксплуатируя мельницу не на максимальной производительности, процесс измельчения достаточно устойчив, изменение влажности руды и другие возмущения не выведут процесс измельчения в режим функциональной нестабильности.

Дело в том, что для работы мельницы с максимальной производительностью необходимо поддерживать объемное заполнение мельницы материалом (внутримельничное заполнение) на оптимальном уровне. Для этого нужно обеспечить соответствующее соотношение жидкого и твердого в рудной пульпе в цикле, управляя приводами исполнительных механизмов, подающих в цикл руду и воду. Проблема заключается в том, что параметр внутримельничного заполнения напрямую средствами КИП измерить не представляется возможным. Поэтому чтобы оценить объемное заполнение мельницы измеряют параметры, косвенно характеризующие искомый. Этими параметрами являются:

- вибрация;

- акустический шум;
- активная мощность привода мельницы;
- давление масла в смазочной системе коренных подшипников мельницы;
- вес у разгрузки, измеренный тензометрическими датчиками, установленными под коренным подшипником мельницы и др.

Поскольку сам процесс измельчения сложен и многофакторен, известно, что стабилизация любого из этих параметров составляет сложную задачу. В связи с этим исследования ведутся в основном в двух направлениях:

1. поиск оптимального параметра, по которому оценивать объемное заполнение, и метода программной оценки и обработки этого параметра;
2. синтез системы автоматического управления (САУ) для стабилизации данного параметра, удовлетворения требованиям производства и повышения эффективности эксплуатации комплекса измельчения.

Практика показывает, что поддержание заполнения мельницы материалом на оптимальном уровне дает как максимальные качественные показатели измельчения, так и позволяет избежать «перегрузки» мельницы рудой [2]. Под перегрузом мельницы рудой понимается переход режима измельчения в «центрифужный» (см. Рисунок 1.1), когда мелющие тела вместе с материалом за счет центробежной силы и сил трения «налипают» по периметру барабана. В таком режиме рядом с мельницей наступает тишина т.к. шары перестают соударяться.

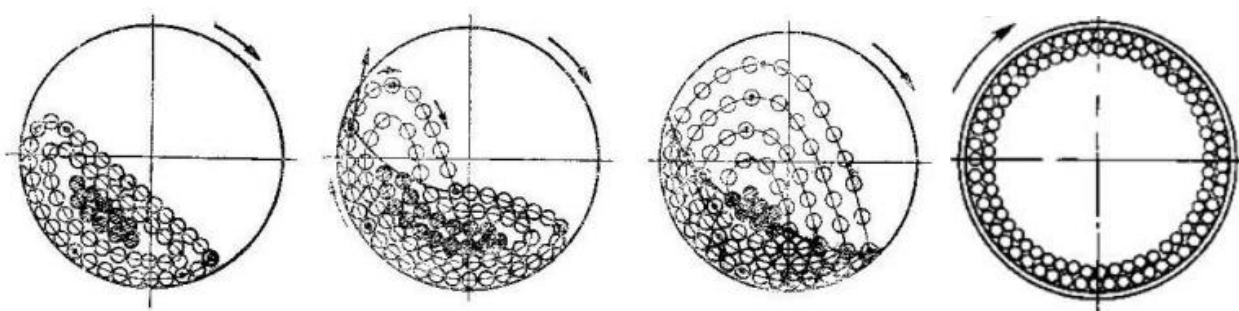


Рисунок 1.1 – Схема движения мелющих тел в барабане мельницы для различных режимов движения (слева-направо): каскадный, смешанный, водопадный, «центрифужный».

В рамках этих двух проблем работали множество ученых и практиков, так в работе [3] авторы рассматривают системы управления процессом измельчения в барабанных мельницах с точки зрения интереса для дальнейших исследований. Выделяется, что сущность недостатков всех систем довольно разнородна, в связи с этим тонкое измельчение минерального сырья до сих пор представляет серьезную научно-практическую проблему. Значительное транспортное запаздывание по основному каналу управления не позволяет эффективно использовать традиционные регуляторы поскольку при резком изменении свойств руды мельница может перейти в режим функциональной нестабильности. В связи с этим управление ведется заведомо на пониженной производительности по руде. Помимо этого, оптимальное управление процессом измельчения остается сложной проблемой из-за существующих неопределенностей модели, нелинейностей, изменений параметров и их взаимозависимости [2]. Современные САУ измельчения включают в себя алгоритм стабилизации внутримельничного заполнения на основе различных подходов управления [4], [5], [6]. Отечественные системы в основном разработаны на базе каскадного ПИД-регулятора, причем все еще часто работают в ручном режиме или в ограниченной степени. Они стабильны и эффективны, но только вокруг заданной номинальной рабочей точки. К примеру, с появлением современных технических средств контроля и управления процессами измельчения и классификации на апатито-нефелиновой фабрике АНОФ-3 в г. Апатиты была разработана и внедрена система оптимального управления процессом измельчения – САУ [7]. Цель САУ заключается в максимальном использовании производственной мощности путем управления материальными потоками в замкнутом цикле измельчения для оптимального сочетания максимальной производительности с надежностью и качеством продукта. Это достигается поддержанием:

- оптимального запаса материала в мельнице;
- оптимального наполнения мельницы шарами.

Под надежностью здесь понимается способность системы не выходить за рамки, установленные из соображений технологических ограничений, целостности

оборудования и безопасности. Особо важным является способность системы вовремя среагировать на возможный перегруз мельницы и уйти от него [8]. Это достигается системой контроля перегруза мельницы и ухода от перегруза и системой оптимального внутримельничного заполнения. Система контроля перегруза мельницы постоянно следит за величиной сигнала активной мощности электродвигателя мельницы и вычисляет скорость уменьшения мощности - показатель перегруза. По достижению показателя перегруза критического, определенного заранее значения, система начинает разгружать мельницу. Определение уставок построено на основе экспертных оценок и производционных правил, поэтому система может реагировать на нежелательные отклонения только после их возникновения, следовательно, должна работать в консервативном режиме. В связи с ограничениями управления мельница работает не с максимальной производительностью. Основными параметрами работы мельницы являются: активная мощность двигателя мельницы и вибрация («шум»), косвенно характеризующая запас материала в мельнице. Отдельное и взаимное поведение этих параметров использованы в САУ при работе систем оптимизации запаса материала в мельнице с контролем за перегрузом. Оптимизация запаса материала в мельнице реализуется на базе каскадного контура ПИД-регулирования. Причем оптимальное задание ведущему регулятору определяется системой периодически в зависимости от приближения мельницы к перегрузу. Когда показатель перегруза достигает принятой уставки, САУ фиксирует значение вибрации и устанавливает новое оптимальное задание. Таким образом, эффективность этой системы зависит от точности определения перегруза мельницы – критической уставки, определенной опытами.

Таким образом, первая проблема существующих САУ заключается в эффективности используемых методов регулирования параметра объемного заполнения, среди которых методы, основанные на экспертных оценках, производционных правилах, ПИД законах регулирования и более современных подходах [9], [10]. Такие подходы имеют ряд ограничений вследствие того, что имеются чувствительные возмущения по влажности исходной руды [11],

поступающей на измельчение, а также значительные запаздывания по каналам управления [12] для управления в режиме эксплуатации мельницы с максимальной производительностью, когда имеется вероятность перегруза мельницы рудой. При этом управляемость усугубляется тем, что параметр объемного заполнения измеряется не напрямую, а по косвенным параметрам.

Вторая проблема заключается в том, что основной метод контроля за перегрузом в таких САУ основан на взаимном поведении параметров активной мощности электропривода мельницы и вибрации коренного подшипника у разгрузки мельницы. Большое распространение получил вибродиагностический метод [13], но такие подходы стабильны и эффективны, но вокруг заданной номинальной рабочей точки [14] и, сравнивая с современными возможностями, уже являются устаревшими [15]. Поэтому управление приводом подачи руды в мельницу по таким показаниям в режимах функциональной нестабильности может привести к перегрузу.

Третья проблема состоит в том, что применение самой наилучшей САУ может быть малоэффективно если второстепенные контуры регулирования (САР) имеют плохие показатели качества регулирования. Так, например, контуры автоматического регулирования (САР) плотности пульпы на классификацию и САР уровня в зумпфе слива мельницы могут «раскачивать» процесс в следствие внешних возмущений.

1.2 Существующие подходы к автоматизации горно-обогатительного производства

Простой передела измельчения ГОКа ведет за собой нарушение сбалансированности процесса и крупные финансовые потери. Поэтому основное внимание уделяется непрерывной работе с минимальным временем простоя и эффективными характеристиками извлечения. В связи с этим, особое внимание уделяется автоматизации технологических процессов – АСУТП. Автоматизация с точки зрения влияния на производительность и качество конечного продукта является ключевым фактором. Внедрение новейших инновационных технических средств и математических методов способно существенно повлиять на успешность

производства. Подавляющее большинство применяемых сейчас технологий автоматизации достаточно тривиальны. Наиболее распространен разомкнутый или замкнутый контур управления с классическим ПИД-регулятором или же управление, основанное на базе производционных правил. Стоит отметить, что конечный продукт является товаром, а, следовательно, повышение производительности извлечения продукта быстро повысит экономическую отдачу. Системы автоматизации могут быть полезны по разным критериям. Оценка их влияния на процессы извлечения полезного продукта из руды учитывает следующее:

- увеличение производительности;
- улучшение стабильности процесса;
- более эффективное использование сырья;
- сокращение необходимости технического обслуживания и повышение безопасности производства;
- расширение информационного поля знаний о процессе.

Большинство из этих преимуществ АСУТП взаимосвязаны. Экономическая оценка этих преимуществ может быть осуществлена с помощью стандартных методологий. Важно подчеркнуть, что преимущества, возникающие из-за потенциальной реализации усовершенствованного решения, должны быть основой требований к характеристикам и функционалу АСУТП. Также стоит отметить, что подобные уникальные функции, предъявляемые к АСУТП, предполагают значительную материальную базу.

Основной целью усовершенствованного управления технологическим процессом является создание динамической математической модели и сокращение невязки модели с реальным объектом. Процесс управления динамической системой гораздо сложнее, особенно в системах, где одновременно задействовано несколько значимых переменных процесса.

Благодаря автоматике процессы обогащения приблизились к постоянной производительности более качественного готового продукта с меньшим количеством рабочей силы. Стоимость рабочей силы является также важным

компонентом эксплуатационных расходов. Любое сокращение рабочей силы, несомненно, приведет к большей прибыли.

В целом, развитие АСУТП обогатительных фабрик с точки зрения технологий было соизмеримо с развитием информатики и приборостроения. В этом плане комплекс технических средств АСУТП может быть представлен для более простых систем – PLC (Programmable Logic Controller) для более сложных – распределенными системами управления (Distributed Control System, DCS), Direct Digital Controller (DDC), SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) [16]. Дальнейшие структурные изменения в управлении процессом поддерживаются многими вторичными концепциями такими как компьютерная инженерия (CAE). Компьютерный инжиниринг применим для автоматизации особых технологических операций производства, обеспечивающих конкурентоспособность промышленной продукции. Современные возможности таких систем инженерного анализа позволяют разрабатывать и применять рациональные математические модели, обладающие высоким уровнем адекватности реальным объектам [17], [18], [19]. В связи с этим, задачи, о решении которых всего несколько лет назад инженеры лишь мечтали, сейчас можно формулировать и решать, более того, получать численные решения с высокой степенью точности. Благодаря CAE разрабатываются более глубокие знания о поведении процессов, которые привели к созданию более надежных математических моделей различных важных единичных процессов. Многие из математических моделей, которые были разработаны теоретически или автономно от процесса, имели ограниченное значение в автоматическом управлении, наиболее успешные модели были разработаны онлайн с помощью эмпирических средств. Часто улучшение знаний о процессе, полученных в ходе разработки модели, приводит к улучшению методов управления системой [20].

Обычно при наличии множества контуров управления используется распределенная система управления (DCS). Она состоит из трех основных компонентов: шины данных, станции оператора и микропроцессорного контроллера с удаленными устройствами ввода/вывода. Шина данных

обрабатывает поток информации между компонентами, обеспечивающими эффективную связь. Микропроцессорные контроллеры отвечают за эффективное управление процессами и сконфигурированы для работы в качестве одно- или многоконтурных контроллеров. Рабочая станция оператора позволяет дать команду управления и отображать информацию о процессе.

Управление технологическими процессами переработки полезных ископаемых обычно структурировано с использованием связанных блоков, разделенных на три или четыре уровня:

1. Уровень 1 – основной блок. Это уровень регуляторов, например, контуры ПИД-регулирования, которые включают в себя контроль тоннажа подаваемой руды из бункеров, расход добавления воды в процесс, скорость насоса и контроль уровня в зумпфах, регулирование плотности сливов сгустителя и т. д. (в зависимости от технологической схемы).
2. Уровень 2 – стабилизация и оптимизация. Это этап контроля, который включает в себя стабилизацию и оптимизацию процесса, обычно используя каскадную петлю. Например, в шаровой мельнице контур управляет водой шаровой мельницы, в то время как каскадная петля управляет размером частиц продукта, манипулируя уставкой тоннажа.
3. Уровень 3 – ограничения. Элементы управления на этом уровне включают максимизацию пропускной способности схемы, ограничение циркулирующей нагрузки (там, где это применимо).
4. Уровень 4 – блокировки. Это более высокая степень контроля за различными операциями, включая остановки оборудования для обслуживания или аварийной ситуации.

Возможности разработки стратегий управления в промышленном процессе сильно зависят от того, какие датчики доступны. В случае обогащения минерального сырья существуют датчики для измерения различных переменных процесса, таких как:

- скорость ленты конвейера-питателя с частотно регулируемым приводом (ЧРП), производительность конвейера, расход воды, частота вращения

мельницы, уровень пульпы, скорость ЧРП насоса, объемный расход пульпы, плотность пульпы, давление в напорном пульпопроводе, а также мощность мельницы, насосов и циклонов;

- скорость потока пульпы, уровни пульпы в флотационных машинах, расход воздуха, расход реагентов, расход воды на промывку и кислотность рН пульпы;
- датчики распределения частиц и гранулометрического состава пульпы.

За последние несколько лет наблюдается значительное увеличение доступности промышленных датчиков применимых для переработки полезных ископаемых, некоторые из которых включают в себя интеллектуальные технологии. К ним, например, относятся датчики измерения гранулометрического состава пульпы или мелкодробленной руды, позволяющие определять рабочие состояния мельницы.

1.2.1 Система автоматического управления внутримельничным заполнением

Погрешность САУ внутримельничным заполнением мельницы материалом при стабилизации по параметру вибрации («шума») коренного подшипника на разгрузочной цапфе мельницы по рекомендациям технологов апатито-нефелиновой обогатительной фабрики не должна превышать $\pm 3\%$, чтобы не допустить раскочки процесса и выхода мельницы в режим перегрузки. При этом регулятор должен быть с высоким быстродействием и учитывать технологические ограничения [21].

Используя, одну из самых передовых технологий – MPC (model predictive control, управление с прогнозирующей моделью), можно повысить эффективность управления процессом. MPC с несколькими входами и выходами (Multiple Input – Multiple Output, МИМО) для управления одновременно гранулометрическим составом и производительностью измельчаемого материала показала значительное увеличение производительности измельчения по сравнению с каскадным ПИД-регулятором [22], [23]. Системы управления электроприводом подачи сырья в

шаровую мельницу на основе MPC с применением нетривиальных методов численной оптимизации целевой функции управления сократили время регулирования и перерегулирование по сравнению с ПИД в 2-4 раза [24], [25].

Многопараметрический MPC довольно сложный алгоритм, требующий больших вычислительных мощностей из-за наличия оценочной модели объекта и решения задачи оптимизации онлайн. 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 нечеткой логикой [26] (см. Рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Структура САУ на базе нечеткой логики и MPC регулятора

Известная технология BrainWave (см. Рисунок 1.3) на базе MPC, разработанная американской компанией Andritz Automation, имеет целый ряд примеров успешного внедрения технологии для мельниц полусамоизмельчения [27].

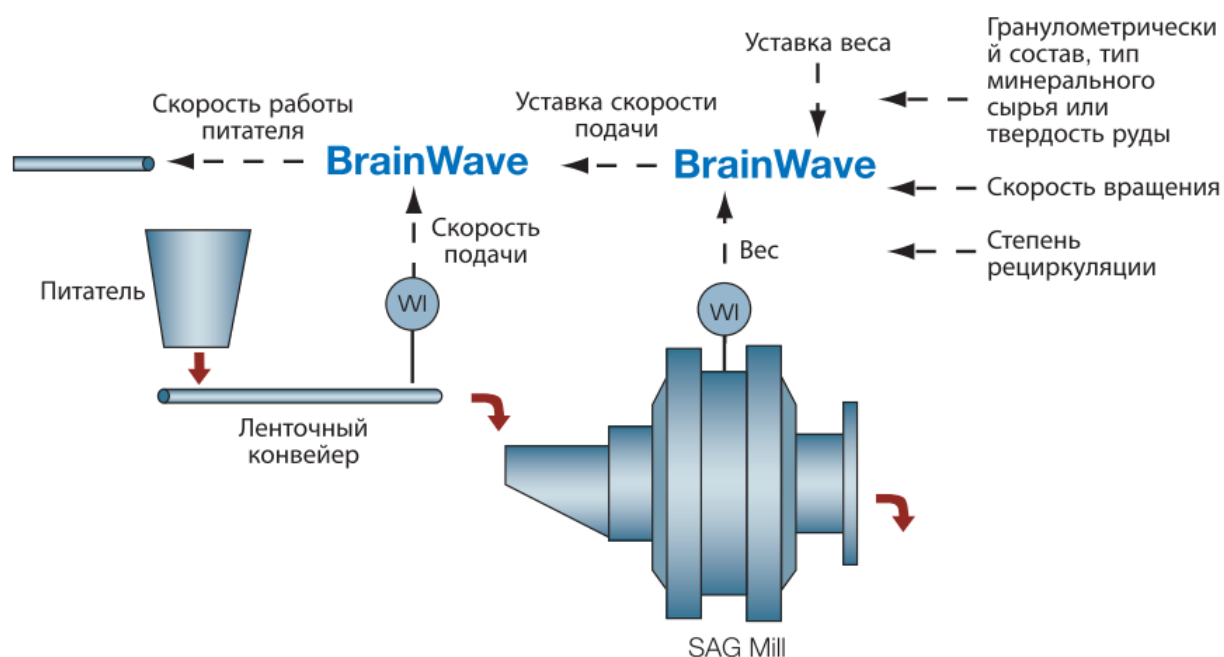


Рисунок 1.3 – Схема управления мельницей с технологией BrainWave

Основными отличительными особенностями BrainWave технологии от других это:

- управление процессами с значительным запаздыванием;
- система реагирует на нежелательные изменения до того, как управляемая величина начнет отклоняться от задания;
- учет нелинейностей процесса.

В работах [28], [29] для управления шаровой мельницей предложен метод управления с прогнозирующими моделями на основе нечетко-определенных импульсных моделей оценки состояния системы. Метод позволяет добиться большего выхода готового товарного концентрата при ошибке регулирования в пределах 5 %.

MPC с несколькими входами и выходами (MIMO) для управления одновременно мелкозернистостью измельчаемого материала и производительностью рассмотрен в [23]. АСУ с применением линейной прогнозирующей модели при моделировании показала значительное улучшение производительности измельчения по сравнению с каскадным ПИД-регулятором.

Проведенные исследования [24], [25] систем управления электроприводом подачи сырья в шаровую мельницу на основе MPC с применением нетривиальных

методов численной оптимизации целевой функции управления резюмировали, что эффективность MPC по сравнению с ПИД в разы очевидна: время регулирования сократилось в 2,5-5 раз, перерегулирование уменьшилось в 2-5 раз.

MPC охватывает алгоритмы, основными понятиями которых являются [30]:

- использование явной динамической модели для прогнозирования выходов процесса в отдельные моменты времени в будущем по горизонту прогнозирования;
- вычисление последовательности будущих управляющих воздействий путем оптимизации целевой функции с заданными ограничениями и желаемыми опорными траекториями для выходов процесса;
- повторение процесса оптимизации в каждый момент выборки и применение первого значения вычисленной контрольной последовательности (стратегия отступающего горизонта).

Эти три характеристики позволяют MPC обрабатывать многовариантные, нестабильные и нелинейные процессы с разомкнутым контуром с большой задержкой времени и включение, при необходимости, ограничений для управляемых и/или контролируемых переменных.

Управляющая последовательность получается путем оптимизации целевой функции, которая описывает цели, которые стратегия управления должна достичь. В классическом MPC целевая функция минимизирует ошибку между прогнозируемыми выходами и заданными точками во время горизонта прогнозирования, а также усилие управления во время горизонта управления. Функция может включать жесткие или мягкие ограничения. Для линейных неограниченных систем эта задача оптимизации является приемлемой и может быть решена аналитически, но в общих приложениях принято учитывать ограничения или нелинейности, в таких случаях задача оптимизации должна решаться с использованием итеративных численных методов.

1.2.2 Контроль перегруза

Анализ работ по этой теме [31], [32] показал, что определение перегруза возможно по параметрам мощности, вибрации, акустического шума как совместно, так и по отдельности, применяя различные алгоритмы обработки сигналов:

- нейросетевой анализ спектра сигнала виброускорения [33];
- на основе закономерностей изменения показателя Херста звукометрического сигнала [34];
- виброакустический анализ шумовых параметров: акустический шум, вибрационный шум, энергетический шум [35] и др.

Многие авторы отдают превосходство методу виброакустического анализа, но на практике, хоть и получив широкое применение, подход себя не зарекомендовал [36]. В ходе эксплуатации ВАЗМ заменяют на более простые системы, в основном на экспертные системы, созданные силами специалистов АСУТП непосредственно на производстве.

Имеются примеры алгоритма определения перегруза с автоматическим поиском оптимального «шума» на базе нечеткой логики. Нечеткая логика – сочетание простоты, человеческой интуиции и опыта, уже эффективно себя показывает в аналогичных системах [37]. С учетом сложности процесса измельчения, возможности критических ситуаций, нелинейности объекта управления, наличия большого объема экспертных данных применение алгоритма нечеткой логики с целью определения перегруза считается перспективным.

1.2.3 Системы автоматического регулирования

Усовершенствование САР плотности пульпы на классификацию и САР уровня в зумпфе слива мельницы в горно-обогатительной промышленности является актуальной задачей для процессов перемешивания пульпы в различном технологическом оборудовании: мешалки, флотационные машины, агитационные чаны, сгустители, зумпфы [38], [39], [40]. Перечисленное оборудование – это емкости, в которые входят и перемешиваются потоки разных плотностей. Из емкостей выходит один или несколько потоков, плотность которых требуется

стабилизировать в определенном допустимом диапазоне [41]. Требуемые характеристики можно достичь методами, рассмотренными в [38], [39], однако, существует перспективный альтернативный метод многопараметрического управления с прогнозирующей моделью MPC [42].

Проблема рассматриваемых САР проявляется при внешних возмущениях и заключается в наблюдаемой высокой квадратичной интегральной ошибке регулирования (ISE – Integral Squared Error). Для замкнутых циклов измельчения, изменение влажности руды во время процесса измельчения – основное неконтролируемое возмущающее воздействие. Реакция систем автоматического регулирования плотности и уровня на возмущение не должно приводить к «раскачке» параметров плотности и расхода в процессе измельчения, поскольку это приводит к нестабильности САУ и возможному перегрузу мельницы. Ко всему прочему, существующие недостатки САР в виде шума датчиков, плохо настроенных контуров ПИД-регулирования не позволяют исключить колебательность расхода и плотности циркулирующей нагрузки в замкнутом цикле измельчения. Таким образом, от эффективности САР плотности и уровня в зумпфе слива зависит стабильность технологического процесса измельчения в целом [43]. Поэтому представляет интерес использование подхода MPC для САР плотности пульпы на классификацию и САР уровня в зумпфе слива мельницы.

1.3 Подход управления с прогнозирующей моделью

Технология управления с прогнозирующей моделью (MPC) позволяет решать задачу ограниченной динамической оптимизации – оптимального управления параметрами технологического процесса (ТП) с учетом различных ограничений, связанных с технологией, безопасностью, экономикой производства и др. Подход подразумевает использование прогнозирующей модели (ПМ) – явной модели ТП как элемента регулятора для того, чтобы компенсировать динамику разомкнутого объекта и описания наблюдаемых и ненаблюдаемых переменных объекта, тем самым улучшая свойства замкнутой системы управления.

Из-за возможности решения задач такого рода, с 1980-х годов MPC послужил толчком для прогресса в промышленности, где технология нашла свое основное

применение. С тех пор технология MPC развивалась стремительно и доминирует в тысячах разнопрофильных приложениях передового производства, экономики, медицины и других областях по всему миру и приносит миллиардную прибыль. Коммерциализация продуктов MPC достигла своего пика в конце 1990-х и начале 2000-х годов, когда произошло слияние зарекомендовавших себя фундаментальных разработок MPC. Несмотря на успех, за последние 20 лет приложения MPC значительно продолжали пересматриваться и модернизироваться из-за роста технических возможностей, появляющихся теоретических и практических проблем и новых требований к управлению с ограниченной оптимизацией. В условиях жесткой конкуренции, длившейся на протяжении всего времени развития технологии, определились мировые лидеры MPC, рассмотренные далее.

1.3.1 История развития MPC

Ниже приведена диаграмма развития наиболее значимых мировых технологий MPC (см. Рисунок 1.4), дополняющая аналогичную диаграмму в [44], [45], [46].

Теория MPC начинается с разработок американского исследователя Р. Калмана начала 1960-х годов. Фильтрация Калмана была взята за основу линейно-квадратичного гауссовского регулятора (LQG). Данный дискретный регулятор с квадратичным критерием оптимальности обладал высокой стабильностью в отношении линейных моделей, описанных в пространстве состояний с учетом возмущений. Тем не менее, он не позволял производить вычисления с учетом ограничений на управляемые (MV), контролируемые переменные (CV), нелинейностей ТП.

В 1976 г. исследователями французской компании Adersa был разработан подход эвристического управления с ПМ – МРНС и его программное воплощение для промышленного использования – IDCOM (Identification and Command) [44]. Первое ММО приложение IDCOM было применено на установках каталитического крекинга на нефтеперерабатывающих заводах [47]. В IDCOM были неявно учтены ограничения на входные и выходные переменные, использовалась квадратичная целевая функция с конечным горизонтом

прогнозирования, ПМ описывалась конечной импульсной характеристикой (КИХ) в дискретном времени. Идентификация коэффициентов КИХ проводилась путем подгонки модели к данным переходной характеристики ТП. Такая модель не гарантировала точность прогноза, но ее было достаточно для решения задачи, поэтому подход назван эвристическим [48].

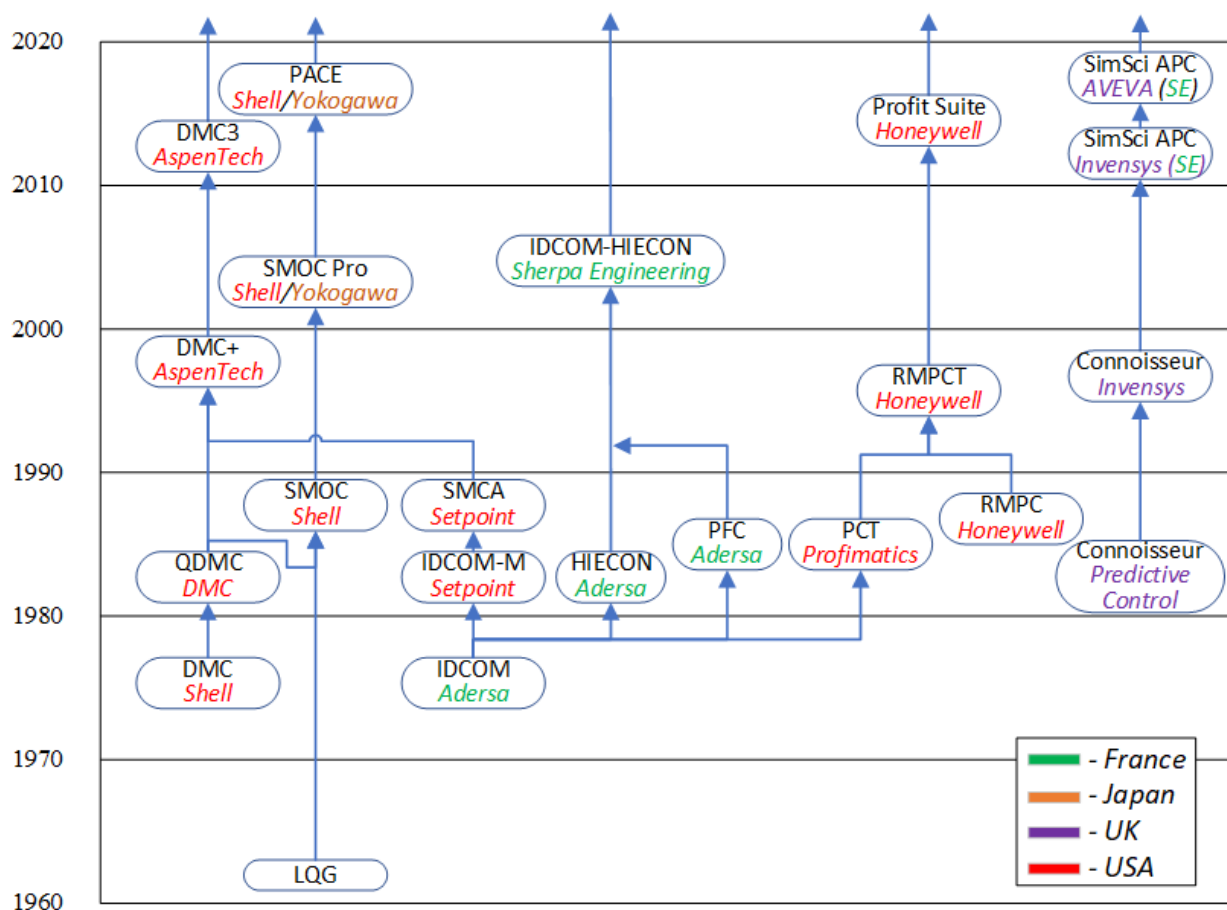


Рисунок 1.4 – Диаграмма развития технологии MPC на мировом рынке

Хотя зарубежная литература не включает в свои обзоры работы И.И. Перельмана [49], представленные в 1975 г., в узких кругах считают, что именно метод, приоритетно сформулированный И.И. Перельманом, был первым так называемым MPC [50]. В работе описывался метод динамической оптимизации, впервые сочетавший идеи разномасштабной во времени (двухшкальной) модели с методом управления на скользящем конечном горизонте.

В 1979 г. Shell Oil были представлены алгоритмы динамического матричного управления DMC (Dynamic Matrix Control) и результаты первых его применений на ректификационных колоннах [44]. Особенностью DMC было использование

динамической матрицы, полученной из переходной характеристики объекта, для прогноза выхода в виде линейной комбинации будущих управляющих воздействий. Оптимальное управление вычислялось методом наименьших квадратов для квадратичной целевой функции на конечном горизонте, что не требовало большого количества вычислений [45].

Второе поколение MPC (QDMC, Connoisseur) отличалось от первого (IDCOM и DMC) наличием явной формализации ограничений в задаче оптимизации.

Компанией Predictive Control ltd в 1988 г. был разработан алгоритм Connoisseur (Control and Identification package) в котором применялся рекурсивный метод наименьших квадратов (RLS) для оперативной оценки модели процесса, представленной в виде КИХ или авторегрессии с внешним входом (ARX). Connoisseur позволял учитывать жесткие и мягкие ограничения.

Компанией Shell Oil в 1983 г. было описано применение квадратичного программирования (QP) в новом алгоритме QDMC с линейными ограничениями [51]. В 1986 г. QDMC продемонстрировал высокую эффективность на пиролизной печи в приложениях Shell Oil с размерностями до 12 CV и 12 MV [52]. Успех QP был в простоте и быстром онлайн исполнении. Но при конечном горизонте прогнозирования алгоритм QP мог иметь недопустимое решение, что стало одним из следующих направлений исследований. Решения этой проблемы, а также усовершенствования в отказоустойчивости и изменениях структуры при потере одного из физических сигналов были отражены в разработках третьего поколения MPC (IDCOM-M, HIECON, SMCA, SMOC, PFC, PCT, RMPC).

Алгоритм IDCOM доработала инжиниринговая компания Setpoint и назвала IDCOM-M в 1988 г. [53]. В свою очередь, Adersa представила идентичную версию – Hierarchical constraint control (HIECON). Алгоритм был предназначен для ММО приложений и отличался использованием двух целевых функций, одной для MV и одной для CV в случае, если количество MV больше CV. ПМ описывалась в виде КИХ, а ограничения могли быть как жесткие с учетом приоритетности, так и мягкие. В дальнейшем IDCOM-M был объединен с другими разработками

компании Setpoint по идентификации в единое целое и получил название – Single Multivariable Control Architecture (SMCA).

Инженеры Shell в 1988 г. разработали Shell Multivariable Optimizing Controller (SMOC), где в алгоритмах MPC применили описание объекта в пространстве состояний, позволяющее представить всю линейную динамику процесса [54]. В SMOC используется фильтр Калмана для оценки состояний объекта и неизмеряемых возмущений, вводится различие между контролируемыми переменными CV, являющимися целью управления, и другими переменными обратной связи, которые используются для оценки состояния (MD).

К третьему поколению (1980-1990 гг.) также относят алгоритм PFC (Predictive Functional Control), разработанный Adersa, задачи которого несколько отличались от MPC конкурентов. PFC предназначен для устойчивых SISO процессов с запаздыванием и позиционировался как альтернатива регуляторам базового уровня (ПИД, предиктор Смита) [55]. По своей сути PFC – это упрощенный MPC, требующий минимум вычислений, и простой в реализации на ПЛК, неявно учитывающий ограничения на CV и MV. PFC выбирает из ограниченного набора возможных будущих управляющих последовательностей ту, которая дает желаемый прогноз. Прогноз делается, используя для простоты модель первого порядка, а желаемое поведение процесса – опорная траектория, выбирается, исходя из желаемого времени его установления. PFC определяет наилучший прогноз и соответствующее управление методом наименьших квадратов.

На третьем этапе развития MPC обсуждалась важность устойчивости замкнутой системы управления с ПМ. В.М. Дозорцевым отмечалось, что устойчивость системы в методах с линейно-квадратичным критерием гарантируется в случае бесконечного горизонта прогнозирования, или другими словами, чем больше горизонт прогнозирования, тем более устойчива система [56]. Проблема увеличения горизонта заключалась в чувствительном увеличении вычислительных операций для чего требовались недоступные вычислительные ресурсы.

В 1997 г. насчитывалось более 2200 внедрений MPC, из них в нефтеперерабатывающей сфере – 67 %, а алгоритм DMC применялся в 26 % всех приложений [57].

В четвертом поколении алгоритмы RMPС (Robust Multivariable Predictive Control) от Honeywell и PСТ (Predictive Control Technology) от Profimatics были объединены под брендом Honeywell в новый продукт – RMPСТ (Robust Multivariable Predictive Control Technology) в 1994 г. RMPСТ и DMC+ от Aspen Tech стали самыми востребованными алгоритмами в период 1990-2000 гг. – четвертого поколения MPC [48]. Они отличались от третьего поколения, в первую очередь, учетом неопределенности модели процесса, графическим интерфейсом пользователя, построенным на базе ОС Windows, дополнительными уровнями оптимизации для разделения задач управления по приоритетности, также улучшились технологии идентификации и применялись последовательные автоматизированные пошаговые методы тестирования модели. В RMPСТ используются алгоритмы для поддержания стабильности процесса:

- Singular Value Thresholding (SVT) – ограничение пороговых значений. Если модель процесса по каналу, например, MV1-CV1 плохо обусловлена, то при расчете управления MV1, для CV1 будут возникать большие ошибки, и процесс может стать нестабильным. Модель процесса принимается плохо обусловленной, когда наименьшие значения переходной характеристики намного меньше наибольших значений. SVT удаляет значения выхода модели процесса ниже минимального порога, который, вызовет большие ошибки прогнозирования. Таким образом, реакция управления становится медленнее, но стабильность процесса остается неизменной.
- Range Control Algorithm (RCA) – управление диапазоном CV. Чтобы улучшить качество управления при сильной корреляции нескольких CV или значительном несоответствии прогнозирующих моделей, RCA стремится удерживать CV в определенном динамическом диапазоне, а не на уровне уставки (SP). Диапазоны используются в расчетах RMPСТ на каждом временном шаге. RMPСТ не видит ошибки управления для CV, лежащей в

пределах диапазона, что дает больше стабильности в управлении процессом.

DMC Plus от Aspen Technology имел свои инновационные технологии, а именно применение рекуррентного (последовательного) метода наименьших квадратов (SLS) для решения оптимизационной задачи MPC, что имело преимущество для устойчивости системы [48]. Но были и свои минусы, так как требовалось долгие заводские тестирования для разработки высокоточных моделей перед развертыванием приложения.

В 2000-х г. чтобы удовлетворить потребности рынка, некоторые вендоры начали разработку продуктов с нелинейным MPC (NMPC), в то время как все рассмотренные ранее продукты были линейными MPC [44], [48]. Большинство промышленных технологических процессов имеют нелинейный характер, т.е. поведение того или иного параметра или параметров процесса описывается с применением нелинейных дифференциальных или разностных уравнений. Поскольку для максимально производительного управления построение более точной модели процесса очень важно, то для приложений, где недостаточно эффективности линейного MPC, использующего линеаризованную модель нелинейного процесса, имеет смысл применять NMPC. Методы идентификации, алгоритмы численного решения задачи динамической оптимизации, обработка ограничений соответственно отличаются от методов для линейного MPC сложностью реализации и требованиям к вычислительному оборудованию.

Основываясь на неполных статистических данных в 2003 г., было известно о более чем 4600 применений MPC, из них 2 % - нелинейных, что, вероятно, связано с вычислительной сложностью алгоритмов NMPC. Большинство внедрений замечено в химической промышленности, а именно в нефтехимии, также в нефтепереработке, целлюлозно-бумажной, пищевой, аэрокосмической, автомобильной, горнодобывающей, металлургической промышленности.

Общими для первых поколений MPC (1970-2000 гг.) можно выделить основные проблемы:

1. Продукты, использующие ПМ в форме КИХ или переходной характеристики, применимы как правило к строго устойчивым процессам, что было замечено разработчиками, которые стали применять модели в пространстве состояний или модели авторегрессии [47].
2. Устойчивость алгоритмов не была гарантирована. Применение бесконечного горизонта прогнозирования и управления все еще было не реализовано.
3. Теоретические исследования MPC с самого начала отставали от практических применений, из-за этого нелинейные задачи управления, которые существуют на практике в большом количестве, еще были недостаточно рассмотрены.
4. Так называемая вычислительная проблема была крайне актуальна [58], так как в некоторых алгоритмах используются неоптимальные решения для динамической оптимизации для того, чтобы ускорить время решения.
5. Одними из главных проблем считались процедуры идентификации и настройки MPC при наладке ПО на объекте. Для разработки эмпирической модели и настройка контроллеров MPC для стабильной работы требуется большое количество тестовых данных, что в эквиваленте времени простоя производства выливалось в очень дорогостоящую процедуру.
6. Опыт технических специалистов играет ключевую роль в успехе применения MPC, а высокий уровень знаний, необходимых для эксплуатации MPC, стал препятствием для ее дальнейшего применения. Затраты на обслуживание и обучение, а также требования к вычислительной периферии были высоки [59].

1.3.2 Современные MPC технологии

За последние годы поле исследований технологии MPC существенно расширилось, поэтому трудно охватить все направления в академических исследованиях. Ко всему прочему, полная информация о существующих на сегодня на рынке АСУТП коммерческих продуктах MPC, о применяемых в них алгоритмах не доступна, поскольку каждая компания представляет свой продукт в достаточно

ограниченном объеме. Современные коммерческие продукты MPC (см. Таблица 1.1) представляют собой программные пакеты приложений необходимых для развертывания алгоритмов MPC и относятся к системам усовершенствованного управления (СУУТП или с англ.: APC).

Таблица 1.1 – Наиболее востребованные компании и продукты, использующие MPC, на момент 2021 г. и способы их интеграции в аппаратно-программном комплексе АСУТП

№	Компания	Продукт	Серверное ПО	ПО для ПЛК
1	Rockwell	Pavilion8	да	-
		PlantPAx MPC	-	да
2	Siemens	PCS7 APL	-	да
3	Emerson	DeltaV Predict	-	да
		DeltaV PredictPro	да	-
4	Honeywell	Profit Suite	да	-
5	Yokogawa/Shell	PACE	да	-
6	AspenTech	DMC3	да	-
7	Aveva (Schneider Electric)	SimSci APC	да	-
8	ABB	800xA APC	да	-
		Ability Expert Optimizer	да	-
9	Mintek	StarCS	да	-
10	Andritz	BrainWave	да	-

Большинство проблем (1-4), выделенных в предыдущем разделе, уже решены в современных продуктах, а задачи 5 и 6 остаются актуальными. Сегодня основным направлением конкуренции между вендорами APC является улучшение удобства этапов разработки, внедрения, сервиса предоставляемых ими услуг как для разработчиков, так и для клиентов. Все компании заявляют о перспективах своих продуктов, что они гарантированно показывают заметную эффективность: снижение колебаний управляемых параметров до 75 %, экономия энергии до 10 %, увеличение выхода готового продукта до 15 %. Цифры достаточно субъективные, но производители наглядно демонстрируют в отчетах увеличение эффективности производства после внедрения APC.

Каждый программный пакет APC (см. Таблица 1.1) обладает двумя или тремя уникальными техническими особенностями, но в общем все имеют похожую структуру (см. Рисунок 1.5) и составные модули:

- модуль идентификации для построения моделей в автономном режиме;
- модуль автономного тестирования;
- модуль управления MPC;
- модуль оценки качества – виртуальный анализатор (ВА, англ.: soft sensor);
- модуль мониторинга и диагностики производительности.

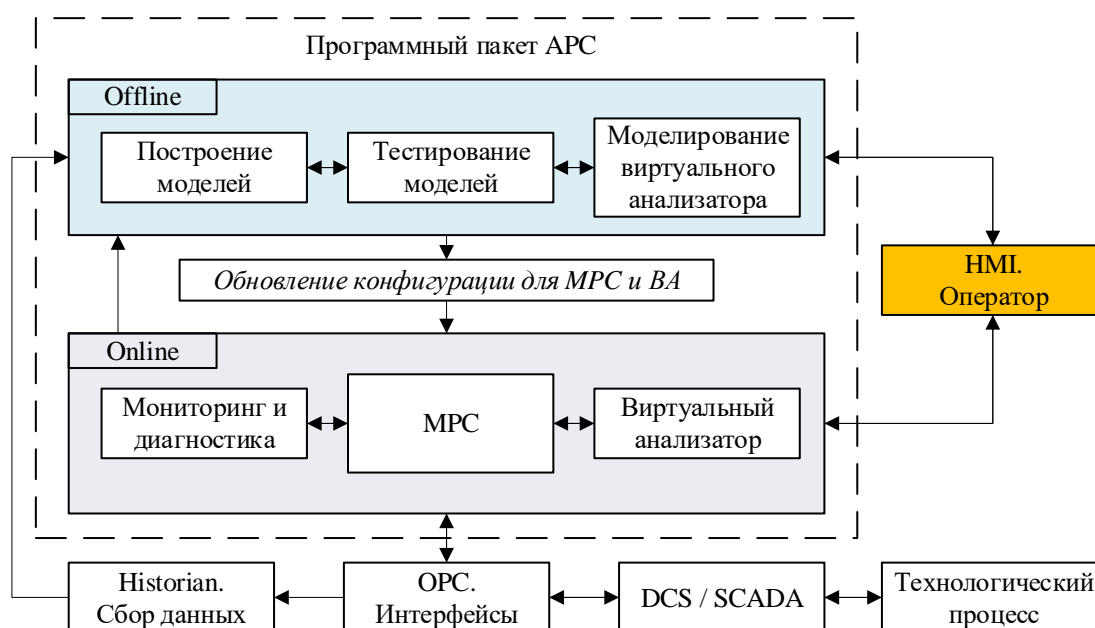


Рисунок 1.5 – Общая структура серверного программного обеспечения APC

ВА применяются для оценки ключевых параметров качества управления, не измеряемых напрямую датчиками, по косвенным показателям ТП методами прогнозирования параметра по математической модели, построенной по результатам наблюдений – историческим данным или тестирования, реже применяются аналитические модели объекта. В некоторых пакетах поставщиков применяются модели нейронных сетей, которые автоматически выбирают структуру сети и могут быть объединены с фильтрацией Калмана.

Как правило, приложения APC являются отдельным проектом для конечного заказчика и интегрируются уже в существующую систему управления промышленного объекта. Алгоритм MPC у разных поставщиков может выполняться на разных уровнях АПК. Большинство вендоров предлагают

реализацию в виде серверного ПО, т.е. программный продукт MPC устанавливается на отдельном сервере, который не является частью DCS, и посредством протокола OPC осуществляется обмен данными с DCS. Такой подход является стандартным подходом для больших задач. Компании лидеры рынка Honeywell, AspenTech, Yokogawa (совместно с Shell), Schneider Electric (на правах владельца Invensys), имеющие самый большой опыт работы с технологией MPC, предлагают свои решения только как серверное ПО – более функциональное и предназначенное для сложных приложений.

Из общей тенденции выделяются компании Siemens, Rockwell и Emerson, которые используют и менее производительную реализацию алгоритмов MPC на уровне ПЛК. Siemens PCS7 APL подразумевает применение только ПЛК Siemens для развертывания алгоритмов MPC и включает два многопараметрических контроллера: MPC 4x4 (до 4 MV, 4 CV) и MPC 10x10. Американская компания Rockwell, включающая в себя бренд Allen-Bradley, предлагает продукт, результат миграции Pavilion8 на уровень ПЛК – PlantPAx MPC, предназначенный для работы на базе контроллерного оборудования Logix. Модуль-сопроцессор PlantPAx MPC устанавливается в одно шасси к основному процессорному модулю и рассчитан на выполнение до пяти функциональных блоков MPC 10x10. Приложение DeltaV Predict от Emerson, которое интегрировано в DCS DeltaV, имеет блоки: MPC, MPCPro, использование которых ограничено количеством управляемых переменных. Блоки MPC и MPCPro также могут исполняться не на ПЛК, а на отдельной рабочей станции. Реализация MPC на уровне ПЛК упрощает интеграцию с любой DCS и повышает удобство использования при этом решение предназначено для более простых приложений с невысокой размерностью и только линейными ПМ.

Американская компания Rockwell Automation, включающая в себя бренд Allen-Bradley, предлагает решения MPC в виде двух продуктов. Первый, давно зарекомендовавший себя – Pavilion8, основанный на серверном ПО. Pavilion8 интегрируется в любую DCS, имеет в своем составе MPC с линейной или нелинейной математической моделью объекта управления и неограниченное

количество переменных. Второй, более новый продукт, результат миграции Pavilion8 на физический уровень ПЛК – PlantPAx MPC, предназначенный для работы на базе стандартного контроллерного оборудования Logix. Модуль-сопроцессор PlantPAx MPC устанавливается в одно шасси к основному процессорному модулю и рассчитан на выполнение до пяти функциональных блоков MPC до 10 CV, 10 MV и 10 DV. Реализация MPC на уровне ПЛК упрощает интеграцию с любой DCS и повышает удобство использования. Не смотря на удобство PlantPAx MPC, Pavilion8 более функционален и предназначен для сложных приложений [60].

Приложения DeltaV Predict и DeltaV PredictPro от Emerson, которые интегрированы в DCS DeltaV, предлагают три типа блоков: MPC (DeltaV Predict), MPCPro и MPCPlus (DeltaV PredictPro), использование которых ограничено количеством управляемых переменных (MV). Лицензии на дополнительные выходы MV приобретаются отдельно. Загрузка ЦПУ ПЛК DeltaV при использовании блока MPC 8x8 с его вызовом каждую секунду составляет 0,3-2 %, для блока MPCPro 10x10 с его вызовом каждую секунду – 1 %; 20x20 каждые 15 с – 4 %; 80x40 каждые 30 с – 10 %. Блоки MPC и MPCPro также могут исполняться не на ПЛК, а на отдельной рабочей станции. Решение MPCPlus возможно только в составе серверного ПО. MPCPlus отличается количеством возможных входов/выходов, количеством возможных целевых функций, наличием расширенных опций для алгоритма оптимизации [61].

Profit Suite – продукт Honeywell, одним из компонентов которого является приложение Profit Controller для прогнозирующего многопараметрического управления. Profit Suite использует протокол OPC, встроен в DCS Experion PKS и может интегрироваться в DCS стороннего производителя. В Profit Controller используется подход RMPCT (Robust Model Predictive Control Technology), т.е. контроллер MPC способен адаптироваться к неточностям прогнозирующей модели. Для этого в составе ПО есть виртуальный анализатор качества Profit SensorPro. Такое несоответствие возникает из-за износа оборудования, нелинейных процессов или ошибок при получении модели. Блоки RMPCT вызываются на ПК с

интервалами Δt в зависимости от времени переходных процессов по каждой CV. Так, для CV с наибольшим временем t_{max} должно быть 200-300 контрольных интервалов, с наименьшим – более 10 интервалов. Это позволяет достигать баланс между производительностью RMPCT и вычислительной мощностью компьютера. Продолжительность интервала рассчитывается как: $\Delta t = 4t_{max}/300, c$. Также блоки RMPCT вызываются со смещением по времени для предотвращения одновременного выполнения всех Profit Controllers и распределения нагрузки на ЦП [62].

В 2003 году партнеры в сфере MPC разработок Shell и Yokogawa, выпустили SMOСPro, а в 2015 результатом многолетнего сотрудничества стала платформа PACE – одна из самых инновационных на рынке MPC. В PACE применен алгоритм MPC с дополнительными переменными, называемые выходными переменными процесса (POV), которые улучшают качество прогнозирования поведения ОУ. Идентификация процессов, которые могут быть цепью нескольких технологических операций, с использованием POV проще и надежнее, поскольку разработчик ПМ выбирает серию моделей POV-POV, а не сразу отношения MV-CV. Еще одна особенность касается технологии для оценки качества управления по косвенным технологическим параметрам, которая позволяет на основании «программного» датчика – оценщика определять ошибки прогнозирования. PACE использует современный решатель оптимизационной задачи, который позволяет использовать нелинейные функции для целевых функций. Кроме того, PACE позволяет одновременно оптимизировать несколько целевых функций с учетом приоритетности по отношению друг к другу. Переход от ограниченного горизонта прогнозирования, который был в предыдущих продуктах, к формулировке бесконечного горизонта в PACE позволил решить проблему устойчивости. Для удобства наладки и обслуживания ПО PACE поддерживает онлайн изменения параметров, не переводя контроллер в режим ожидания [63].

Продукт компании AspenTech DMC3 сочетающий технологию DMCplus с наиболее инновационными инструментами похож на продукт Yokogawa. DMC3 также как и PACE использует фоновый оценщик качества, который в реальном

времени регистрирует изменения параметров ОУ по косвенным критериям, что позволяет адаптировать ПМ к изменениям условий работы завода. Возможна настройка нескольких целевых функций и, используя графические инструменты понятные для инженеров-технологов, установка активности контроллера по той или иной цели управления для обеспечения устойчивости, робастности, для снижения риска при определенных условиях эксплуатации. Таким образом обеспечивается плавное регулирование соотношения между технологическими и экономическими факторами управления [64].

Schneider Electric принадлежат разработки MPC компании Invensys, которые были объединены под брендом Aveva, и продаются как серверное ПО SimSci APC, сохранившее вычислительный механизм Connoisseur, но с модернизированным графическим интерфейсом пользователя с учётом потребностей конечного пользователя.

MPC в компании ABB первоначально использовался как стороннее решение от других поставщиков. Позже были реализованы собственные платформенные решения ABB Predict & Control и Expert Optimizer, которые потом объединены в Ability Expert Optimizer. Новый продукт 800xA APC полностью интегрирован в DCS 800xA как доступное расширение для развертывания MPC с линейной или нелинейной ПМ.

Компания Mintek разработала ПО StarCS, основой которого является робастный нелинейный MPC – RNMPC (Robust Nonlinear Model Predictive Controller). StarCS применяется как отдельно, так и в составе специализированных решений Mintek MillStar и FloatStar для управления переделами измельчения и флотации соответственно. Применение StarCS RNMPC для управления циклом измельчения и подготовки питания флотации с размерностью 7 CV и 5 MV показало, что на выполнение алгоритма RNMPC требуется менее 1 секунды, при этом блок запускался каждые 10 секунд в реальном времени на Intel Core i5-750. Общее влияние StarCS RNMPC для объектов измельчения и флотации оценивается увеличением извлечения минералов до 3 % по сравнению с ПИД регуляторами [65].

BrainWave – программный пакет многопараметрического MPC (до 48 CV и 12 MV) для ПК на базе Windows, который разработан компанией Andritz для решения наиболее распространенных типов сложных задач промышленного регулирования. BrainWave использует эффективный метод идентификации и моделирования процесса, основанный на передаточной функции ряда Лагерра, требующий минимальной априорной информации. Этот метод позволяет выполнять онлайн-адаптацию модели процесса автоматически, что чрезвычайно ценно для эксплуатации. Модели процесса по каналам возмущающих переменных также можно получать автоматически. Эта уникальная возможность позволяет BrainWave обеспечивать наилучшее подавление помех [66].

1.3.3 Актуальность MPC для России

Сегодня мировая промышленность развивается экспоненциальными темпами в условиях четвертой промышленной революции, когда цифровые решения позволяют достичь большей эффективности, стабильности и безопасности производства. Среди цифровых технологий особое место занимают APC и RTO (системы оптимизации реального времени, CORP) [67], использующие в своей основе алгоритм MPC. Располагая инструментами MPC, виртуальными анализаторами, автономными системами идентификации, встроенными средствами диагностики, оптимизатора с линейными и квадратичными целевыми функциями, приложение APC на каждом такте (~1 мин) вырабатывает необходимое корректирующее воздействие, которое служит уставкой для базового ПИД управления. Система RTO с аналогичным набором алгоритмов на каждом такте (~1 ч) в свою очередь за счет оптимизации по экономическому критерию (максимизации прибыли или минимизации затрат) и, например, логистическим ограничениям задает соответствующие уставки для APC. Для RTO уставками являются задачи календарного производственного планирования (ERP). Как отмечается в [68], наибольший эффект от APC и RTO достигается не столько за счет качества управления, что безусловно является необходимым условием, сколько за счет оптимизации работы технологического оборудования по экономическому критерию.

Специалисты Honeywell отмечают, что на 2020 г. в России успешно внедрено всего около 100 приложений APC [69]. Подавляющее большинство заказчиков относятся к нефтегазоперерабатывающей, нефтехимической и химической отраслям [70], а основные объекты автоматизации — это установки ректификации, каталитического риформинга, гидрокрекинга и газофракционирующие установки. Сроки окупаемости проектов – от нескольких месяцев до года, в зависимости от состояния объекта [71]. Наиболее активные в этом плане компании – ПАО «НК «Роснефть», ПАО Лукойл, ПАО Сибур, которые последние 10 лет при тесном сотрудничестве с мировыми лидерами промышленной автоматизации Honeywell и Yokogawa успешно реализуют проекты уровня APC, RTO и СГДО (систем глобальной динамической оптимизации) [72].

В России кроме нефтепереработки и нефтехимии, целевыми отраслями применения технологий APC и RTO, где они потенциально принесут ощутимый экономический эффект, являются горнодобывающая, горно-обогатительная, целлюлозно-бумажная, производство извести, цемента, стекла. Цепи аппаратов флотации, измельчения полезных ископаемых, а именно флотационные машины, перемешивающие аппараты, сгустители, барабанные мельницы, экструзионные установки наиболее актуальны для внедрения рассматриваемых технологий [73], поскольку в мировой практике уже накоплен огромный опыт компаниями Metso Minerals, Andritz, Mintek и др.

Хотя в России много мест применения технологий MPC, есть объективный ряд причин не спешить с внедрением. В наши дни заказчиков очень волнует вопрос информационной безопасности (кибербезопасности), а именно риски за безопасную цифровую логику данных завода, подключенного к глобальной сети. Соединение с интернетом подразумевают, например, удаленная наладка и сервисная поддержка или облачное хранение данных. Наличие моделей в приложениях MPC обязательно требует сопровождения, что на данный момент сделать на местах не представляется возможным из-за необходимой особой квалификации персонала для:

- корректировки параметров контроллеров;

- доработки существующих моделей ВА;
- поиска технологических режимов, в которых ВА дают некорректный прогноз
- оценки качества прогноза по моделям, т.е. сопоставления кривых прогноза по модели и фактическими значениями;
- оценки степени точности ВА на основе математических критериев;
- создания отчетов по эффективности работы контроллеров, виртуальных анализаторов на основе данных проведенной диагностики.

Существуют новые решения, которые позволят командам разработчиков интегрировать и поддерживать проект удаленно и безопасно. Одним из таких является применение совместно с APC и RTO программ Cogent DataHub для защищенного туннелирования данных OPC по протоколу TCP и сервиса облачного хранения реального времени Skkynet SkkyHub [74], которые гарантируют отсутствие уязвимостей для кибератак и задержку обновления данных всего в несколько миллисекунд.

Несомненно, внедрение цифровых технологий мероприятие дорогостоящее, и для конечного заказчика не совсем понятно сможет ли такое мероприятие обеспечить положительную рентабельность вложенных инвестиций из-за возможных производственных потерь или простоев при интеграции, тестировании технологии или упущенного времени, затраченного на пилотные проекты.

Один из самых важных вопросов – кадровый [75]. Для обслуживания и эксплуатации технологий таких как MPC требуются соответствующие компетенции от персонала – этот вопрос является наиболее актуальным. В нефтегазовом секторе уже требуются инженеры СУУТП, но другой вопрос, где таких специалистов обучить. Вектор образовательного развития в РФ не сонаправлен с вектором развития прикладной математики, об этом говорит то, что на русском языке не достаточно книг по тематике управления с прогнозирующими моделями в промышленности, мало статей и диссертационных работ на тему MPC, а представленные в них разработки остаются на уровне моделей.

В условиях импортозамещения чтобы в РФ образовались свои активы в направлении предоставления услуг, связанных с системами усовершенствованного управления, требуется развитие сотрудничества. Необходимо сотрудничество ВУЗов с компаниями мировыми лидерами в области СУУТП, компаниями занимающихся системной интеграцией продуктов АСУТП, компаниями разработчиками промышленного ПО и совместное исследование и разработка программной платформы для дальнейшей коммерциализации и создания центра компетенций в этой области. Западные организации ведут стратегическую активность в этом плане и российские академические и коммерческие организации должны брать с них пример. Например, инновационная ИТ-компания-стартап Ayasdi занимающаяся системами анализа информации по «большим данным» и промышленный гигант Siemens объединились в рамках совместно реализуемых инноваций [76].

1.4 Постановка задач исследования

Для усовершенствования АСУТП шаровой мельницы с разгрузкой через торцевую решетку, с постоянной скоростью вращения в режимах эксплуатации близких к перегрузке с сохранением качества измельчения сырья, увеличения производительности, улучшения стабильности процесса, более эффективного использования сырья поставлены следующие задачи:

1. Используя методы компьютерного моделирования, разработать имитационную модель комплекса измельчения для тестирования САР плотности пульпы, поступающей на классификацию, САУ объемным заполнением мельницы материалом. Проверить адекватность модели на данных реального объекта.
2. На основании современных подходов используемых в системах СУУТП – регуляторов с прогнозирующей моделью, виртуального анализатора разработать и протестировать на модели структуру АСУТП для повышения производительности процесса измельчения и устойчивости в условиях внешних возмущений. Усовершенствованная АСУТП должна включать:

- 2.1 решения для уменьшения среднеквадратической относительной ошибки (ISE) САР регулирования плотности пульпы, поступающей на классификацию и уровня в зумпфе по отношению к традиционным ПИД-регуляторам;
 - 2.2 решения для уменьшения среднеквадратической относительной ошибки (ISE) САУ управления параметром характеризующим объемное заполнение мельницы материалом по отношению к традиционным ПИД-регуляторам;
 - 2.3 решение для возможности контроля за перегрузом в условиях работы мельницы в режимах функциональной нестабильности.
3. Разработать алгоритмическое и программное обеспечение предложенной структуры управления для возможности реализации и масштабирования решения на рядовых промышленных ПЛК.

1.5 Выводы по первой главе

Выполнен аналитический обзор научно-технической литературы в рамках поставленной проблемы исследования. Рассмотрены современные технологии 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». Предложены пути усовершенствования АСУТП методами СУУТП, а именно путем использования подхода управления с прогнозирующей моделью (MPC) и виртуального анализатора в решении поставленных задач в рамках САР, САУ и контроля за перегрузом мельницы. 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 шаровой мельницы барабанного типа с разгрузкой через торцевую решетку в замкнутой схеме измельчения с вибрационным грохочением вышеприведенными методами.

Глава 2. Моделирование процесса измельчения в шаровой мельнице с решеткой в замкнутом цикле

2.1 Описание технологического процесса

Процесс тонкого дробления (измельчения) может быть реализован несколькими способами. В зависимости от требований к процессу, которые вытекают из технических условий для определенного типа руды, в общем случае передел измельчения может быть представлен «сухим» и «мокрым», открытым и замкнутым циклом (см. Рисунок 2.1). В замкнутые циклы добавлена система классификации, которая тоже может быть различна в зависимости от физико-механических свойств руды [77].

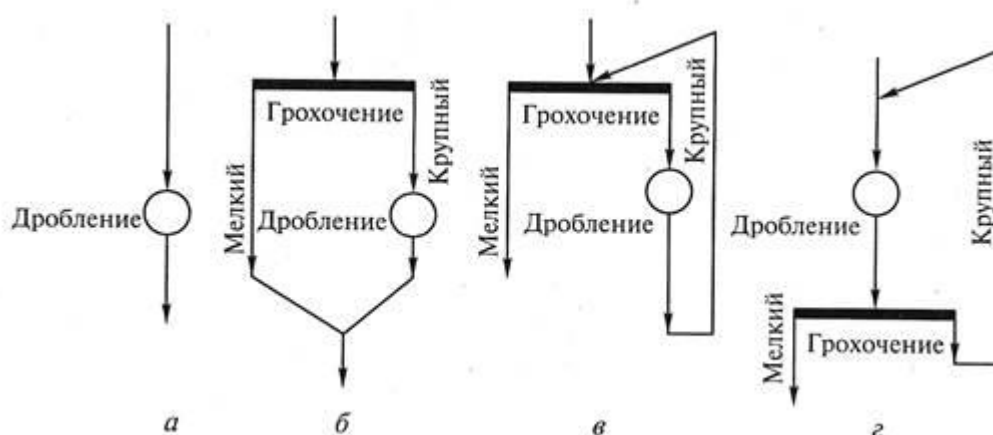


Рисунок 2.1 - Схемы дробления: а – открытый цикл; б – открытый цикл с предварительным грохочением; в – замкнутый цикл с предварительным и поверочным грохочением; г – замкнутый цикл с грохочением

Рассматривая технологические схемы [78] крупнейшего в мире отечественного предприятия по производству высокосортного (с содержанием P_2O_5 39 %) апатитового концентрата - Кировского филиала АО «Апатит», было принято решение в качестве объекта исследования использовать схему процесса мокрого измельчения апатито-нефелиновой руды в замкнутом цикле с грохочением (см. Рисунок 2.1, г).

Описание выбранной для исследования схемы в первую очередь можно начать с рассмотрения схемы цепей аппаратов, дополненной техническими средствами КИПиА (см. Рисунок 2.2).

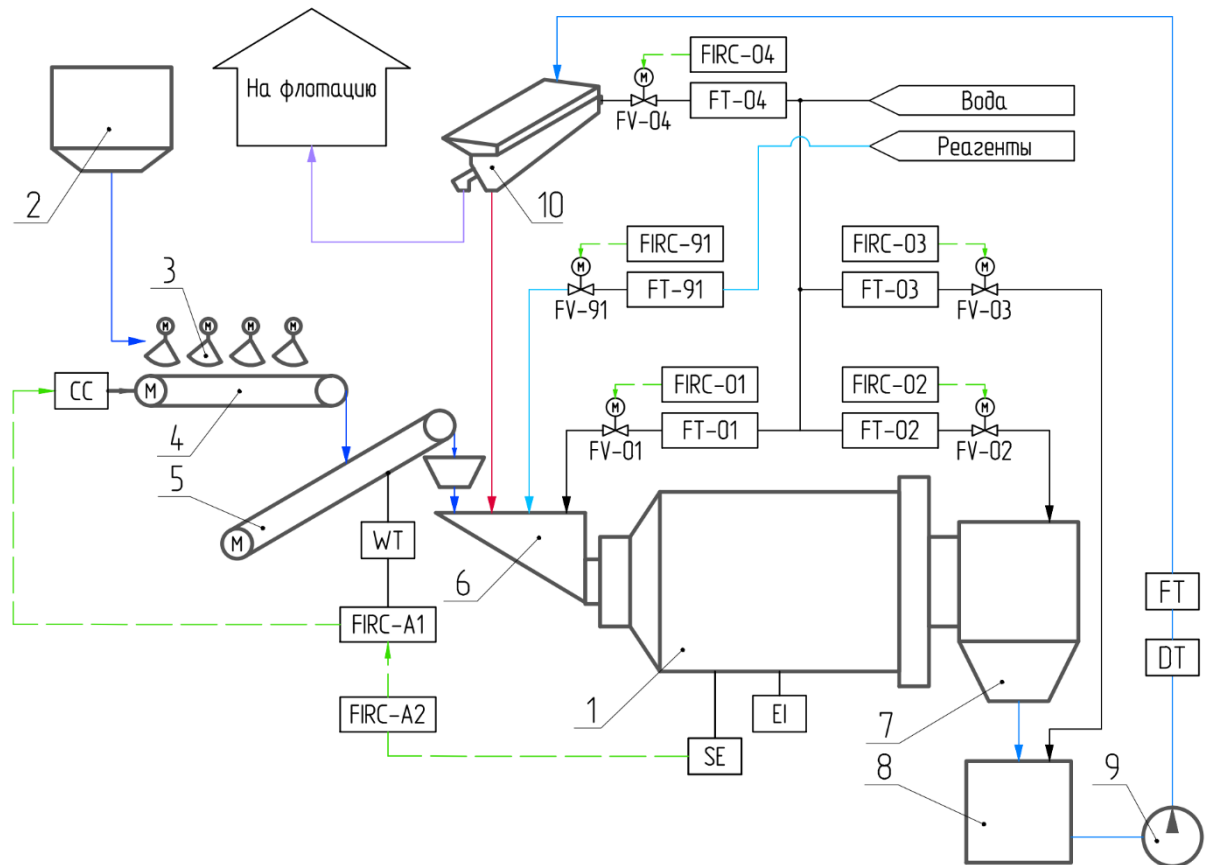


Рисунок 2.2 - Схема процесса измельчения в замкнутом цикле: 1-МШЦ, 2-бункер, 3-челюстные затворы, 4-конвейер-питатель, 5-наклонный конвейер, 6-загрузка мельницы, 7-разгрузка мельницы (бутара), 8-зумпф слива мельницы, 9-насос, 10-вибрационные грохота. СС-шкаф с преобразователем частоты, DT-плотномер, EI-датчик мощности, FIRC-регулятор расхода, FT-расходомер, FV-клапан с пневмоприводом, SE-датчик вибрации («шума»), WT-весы.

Мелкодробленая руда из бункеров 2, через челюстные затворы 3, поступает на питающие ленточные конвейеры 4 и с помощью сборного ленточного конвейера 5 подается в загрузку 6 шаровой мельницы с решеткой (МШР 4,5x5) 1. В загрузку мельницы также поступают: надрешетные продукты грохотов, вода и раствор жидкого стекла. Смесь воды и измельченной руды (пульпа) из разгрузки мельницы 7 самотеком поступает в зумпф промежуточного продукта измельчения 8. Затем с помощью центробежного насоса 9 выполняется подача пульпы в узел классификации материала по крупности. Классификация материала по крупности производится с помощью вибрационных грохотов 10. Крупные частицы, не прошедшие через классификационные сита грохотов, иными словами,

надрешетный продукт, самотеком возвращаются в мельницу. Подрешетные продукты грохотов поступают в зумпф готового измельченного продукта, откуда центробежным насосом перенаправляются в питание флотации.

Особо следует выделить контролируемые и регулируемые материальные потоки цикла измельчения. В частности, вода подается в цикл в нескольких точках для транспорта продукта, для предотвращения забивки рудой узлов цикла, для получения необходимого соотношения жидкое/твердое в пульпе:

1. В желоба грохотов для транспорта надрешетного продукта. Стабилизация расхода воды в диапазоне 30-45 м³/ч осуществляется путем изменения степени открытия регулирующего клапана FV-04, установленного на линии подачи смешанной воды в желоб надрешетного продукта (см. Рисунок 2.1).
2. В загрузочную точку мельницы. Стабилизация расхода воды в диапазоне 15-50 м³/ч осуществляется путем изменения степени открытия регулирующего клапана, установленного на линии подачи смешанной воды в загрузочную точку мельницы (FV-01).
3. В бутару мельницы. Стабилизация расхода в диапазоне 10-30 м³/ч осуществляется путем изменения степени открытия регулирующего клапана, установленного на линии подачи смешанной воды в бутару мельницы (FV-02).
4. В зумпф слива мельницы. Стабилизация расхода в диапазоне 100-500 м³/ч осуществляется путем изменения степени открытия регулирующего клапана, установленного на линии подачи смешанной воды в зумпф слива мельницы (FV-03).

Кроме воды в мельницу подается раствор жидкого стекла, необходимого для получения измельчаемым продуктом нужных свойств для дальнейшей флотации. Стабилизация расхода раствора жидкого стекла в диапазоне 0,15-0,3 кг/т руды осуществляется путем изменения степени открытия регулирующего клапана, установленного на линии подачи раствора жидкого стекла в загрузочную точку мельницы (FV-91). Объем раствора жидкого стекла $V_{\text{ж.стекла}}$ м-ца(м³/час) подаваемого в мельницу, рассчитывается исходя из удельного расхода жидкого

стекла $Q_{ж.стекла}$ м-ца (кг/т руды) подаваемого в данную точку, концентрации раствора жидкого стекла $с_{ж.стекла}$ (т/м³) и производительности мельницы по сухой руде $Q_{м-ца}$ руда сух. (т/час), определяемой по данным конвейерных весов и корректируемой с учетом влажности руды. В свою очередь конвейерные весы, установленные на сборном ленточном конвейере, настраиваются в диапазоне 0-300 т/ч. При этом расход мелкодробленой руды стабилизируется в диапазоне 150-280 т/ч, путем изменения частоты вращения привода ленточного конвейера - питателя.

Помимо входящих материальных потоков, поступающих в цикл измельчения, отдельно стоит рассмотреть внутренние материальные потоки. К ним относятся потоки пульпы в разных точках технологического процесса, которые отличаются процентным соотношением жидкое/твердое, гранулометрическим составом, температурой и другими параметрами.

1. Пульпа на классификацию. Плотность пульпы, подаваемой на классификацию мельницы, измеряется преобразователем плотности, в диапазоне измерения плотности – 1,00-1,70 т/м³ и стабилизируется в диапазоне 1,40-1,60 т/м³ водой, подаваемой в зумпф слива мельницы. Расход пульпы контролируется в диапазоне измерения 0-1200 м³/ч преобразователем расхода, установленным на линии подачи пульпы на классификацию.
2. Пульпа на флотацию. Плотность пульпы, подаваемой на флотацию, измеряется преобразователем плотности, в диапазоне измерения плотности – 1,0-1,4 т/м³ и стабилизируется в диапазоне 1,31-1,38 т/м³ водой, подаваемой в зумпф слива подрешетного продукта грохотов. Расход пульпы контролируется в диапазоне измерения 0-900 м³/ч преобразователем расхода, установленным на линии подачи пульпы на классификацию.
3. Пульпа внутри мельницы и пульпа после классификации, возвращающаяся в мельницу (циркулирующая нагрузка) непосредственно не контролируются средствами КИПиА. Их сложно физически измерить, и они не являются приоритетными для мониторинга. Технологическими испытаниями установлено, что циркулирующая нагрузка тем больше, чем

выше производительность мельницы по руде и чем выше плотность питания грохотов. Параметры могут быть рассчитаны численно в случае наличия системы вычисления водного баланса для контроля работоспособности первичных приборов (весы, плотномеры, расходомеры воды), выявления потерь жидкой и твердой фаз на водоводах и при транспортировке пульпы или течи пульпы на оборудовании. Расчетом водного баланса сравнивают общий расход воды, поступающей в процесс измельчения с количеством воды, выходящей из процесса с готовым продуктом. При значимом расхождении проверяются первичные приборы и наличие потерь.

Таким образом, обозначив все материальные потоки в замкнутом цикле измельчения, важно теперь узнать параметры тех потоков, которые не контролируются приборами, поскольку система управления измельчением манипулирует именно потоками для достижения поставленных целей процесса измельчения. Имея набор рассмотренных датчиков расхода, плотности, нужные параметры пульпы будем получать расчётами, исходя из баланса твердого/жидкого в замкнутом цикле измельчения при идеальных условиях, когда нет потерь продукта по ходу процесса. Потери при исправном технологическом оборудовании возможны при переливе зумпфов слива мельницы или флотации. Уровни пульпы в зумпфах стабилизируются путем изменения числа оборотов двигателя центробежного насоса, поэтому переливы возникают лишь в нештатных ситуациях.

Мелкодробленая руда всегда содержит некоторое количество влаги, поэтому поток влажной руды состоит из потоков воды и руды:

$$F_p = Q_p + W_p, \quad (2.1)$$

где F_p – производительность наклонного конвейера по влажной руде, т/ч;

Q_p – производительность наклонного конвейера по сухой руде, т/ч;

W_p – расход воды с сырой рудой, т/ч.

С учетом влажности руды, расход воды и сухой руды, поступающих в цикл измельчения, рассчитывается по формуле:

$$W_p = F_p \cdot m, \quad (2.2)$$

$$Q_m = F_m \cdot (100 - w)/100, \quad (2.3)$$

где w – содержание жидкой фазы в пульпе по массе, %.

Имея мгновенные расходы твердого и жидкого во влажной руде, получим разжижение по массе R , у.е.:

$$R = \frac{Q_m}{W_m} = \frac{w}{T}, \quad (2.4)$$

где T – содержание твердого в пульпе по массе, %.

Тогда плотность пульпы:

$$\rho = \frac{\rho_{мс} \cdot \rho_{жс} \cdot (1 + R)}{(\rho_{жс} + \rho_{мс} \cdot R)}, \quad (2.5)$$

где $\rho_{тв}$ – плотность твердой фазы, т/м³;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкой фазы, т/м³.

Аналогичные формулировки справедливы для расчета характеристик пульпы на различных участках процесса измельчения. Так, по данным плотномера пульпы на классификацию или флотацию может быть вычислено содержание твердого в пульпе в соответствующей точке процесса:

$$T = \frac{\left(\frac{\rho}{10^3} - 1\right) \cdot \delta \cdot 10^5}{(\delta - 1) \cdot \rho}, \quad (2.6)$$

где ρ – плотность пульпы (показания плотномера) г/л;

$\delta = 3$ – удельный вес апатитовой руды, г/см³.

Следует выделить, что при содержании твердого в сливе шаровой мельницы 83 % и более пульпа теряет текучесть, и материал в мельнице накапливается, вязкость увеличивается, крупные куски руды и шары выносятся из мельницы. При хорошо загруженной мельнице содержание твердого в песках классификатора 80-81 %. Рудная пульпа должна содержать столько же твердого. Вода в мельницу подается из расчета превратить сухую руду в пульпу с содержанием твердого 79-82 %. Значительное снижение расхода воды в мельницу приводит к преждевременному «перегрузу» мельницы, а увеличение – к повышению циркулирующей нагрузки.

Решение уравнения баланса, а именно нахождения всех параметров пульпы в конкретных точках процесса, дает подспорье для дальнейшего моделирования и наращивания точности модели отталкиваясь от базового понимания движения материальных потоков в цикле измельчения.

2.2 Параметры технологического процесса измельчения

Рассмотрим параметры процесса измельчения, затрагивающие цель создания «хорошей» модели, которая решает задачу разработки оптимальной системы управления.

2.2.1 Показатели качества измельчения

Целью обогатительной фабрики является обеспечение максимального извлечения полезного компонента и выпуска готовой продукции производства при заданном значении по качеству при минимальных затратах трудовых, энергетических и материальных ресурсов [79]. Здесь обратим внимание на понимании термина «полезный компонент» в отношении процесса измельчения апатито-нефелиновой руды на обогатительных фабриках АО «Апатит».

Производительность барабанной мельницы рассчитывается по формуле:

$$Q = q_0 \cdot V, \quad (2.7)$$

где Q – производительность по руде, т/ч;

q_0 – удельная производительность, т/(м³ч);

V – объем мельницы, м³.

Значение q_0 определяется по формуле:

$$q_0 = \frac{q_d}{\beta_d - \alpha_d} = \frac{Q}{V}, \quad (2.8)$$

где q_d – удельная производительность по вновь образованному расчетному классу крупности, т/(м³ч);

α_d, β_d – содержание расчетного (характерного) класса крупности соответственно в питании мельницы и в измельченном продукте, доли ед.

Расчетным является класс, содержанием которого оценивается крупность готового продукта. Для апатитового концентрата расчетным принят класс +0,16

мм (диаметр зерна $> 0,16$ мм), а эффективность работы мельницы оценивается по удельной производительности по вновь образованному расчетному классу $q^{0,16}$, т/(м³ч).

Таким образом, «полезный компонент» в случае обогащения апатита является процент содержания зерен класса крупности $+0,16$ мм в единице объема готового продукта. Установлено [80], что содержание 20 % класса $+0,16$ мм достигается наибольшее извлечение P_2O_5 .

Крупность измельчения главным образом контролируется размером отверстий сит грохотов. При размере отверстия сит грохотов $0,39$ мм диапазон изменения крупности измельчения (слива грохотов, поступающего на флотацию) составляет $\sim 30-36\%$ класса $+0,16$ мм и чем больше плотность слива грохотов, тем ниже его крупность. Однако некоторое нежелательное снижение крупности возможно за счет увеличения плотности питания грохотов при заданной производительности мельницы или за счет снижения производительности мельницы при заданной плотности питания грохотов. Оптимальными параметрами измельчения, обеспечивающие полное раскрытие минералов и одновременно кондиции получаемого апатитового концентрата, являются содержание классов $+0,16$ мм – 13-14 %, $-0,071$ мм – 38,8-40,8 % [81].

На обогатительных фабриках АО «Апатит» может производиться несколько сортов апатитового концентрата, одной из отличительных характеристик является их крупность:

1. «Стандарт». Крупность концентрата не более 13,5 % класса $+ 0,16$ мм. Для соблюдения заданной крупности концентрата устанавливается крупность помола руды по тому же классу 20-21 %, которая достигается при стабилизации плотности готового слива 1380-1390 г/л.
2. «Супер». Крупность концентрата 32-40 % класса $+ 0,16$ мм. При производстве такого концентрата крупность помола увеличивается до 25-26 % класса $+ 0,16$ мм, что соответствует плотности готового слива 1450-1460 г/л.

Как отмечалось выше, состав измельчаемого материала по крупности является одним из ключевых параметров готового продукта, и обозначенные ограничения по содержанию класса +0,16 мм должны быть учтены в требованиях к системе управления процессом измельчения.

Помимо качества выпускаемой продукции у обогатительной фабрики существует план по выпуску готового продукта, который нужно выполнить или, что еще лучше, превзойти. Выполнение плана напрямую зависит от средней производительности мельниц передела измельчения. Повышение производительности секций измельчения наглядно просматривается в развитии АО «Апатит». Увеличение мощностей апатито-нефелиновых обогатительных фабрик, развитие рудно-сырьевой базы предприятия в той или иной мере связано с увеличением производительности отдельных переделов технологической схемы получения апатитового концентрата. Возрастающий спрос на апатитовый концентрат, прежде всего для передела измельчения апатит-нефелиновой руды дал толчок к внедрению новых технологий, перенастройки процесса измельчения, модернизациям и реконструкциям [7].

По результатам промышленной эксплуатации с 2010 по 2017 гг. отмечено повышение производительности измельчения до 30 %, что было оправдано в технологическом экономическом и экологическом отношении [82].

Конечно же увеличение производительности возможно только в пределах, удовлетворяющих показателям технологического процесса и техническим характеристикам оборудования. В первую очередь ограничением является максимально заявленная заводом изготовителем производительность мельницы. На обогатительных фабриках АО «Апатит» используются шаровые барабанные мельницы разного типа, наиболее распространены мельницы НКМЗ МШЦ-5500х6500 и НКМЗ МШР-4500х5000 с максимальной производительностью 400 т/ч и 300 т/ч соответственно. К примеру, в 2014 году для мельниц МШЦ-5500х6500 на АНОФ-3 была достигнута максимальная за все время средняя годовая производительность 349 т/ч [82], к чему привели масштабная реконструкция и внедрение системы стабилизации оптимального запаса материала в мельнице.

Следует добавить, ограничение при эксплуатации мельниц НКМЗ МЩЦ-5500х6500 составляло 360 т/ч, что соответствовало ограничениям переделов, следующих после измельчения – флотации, сушки.

Установлено, что при работе мельницы в режимах близких к перегрузу наблюдается снижение потребляемой активной мощности электродвигателем мельницы. Отсюда следует вывод, что работа с высокой производительностью позволяет экономить на энергопотреблении.

Таким образом, разрабатывая модель процесса измельчения, в целях решения задачи оптимизации производства, а именно максимизации выхода готового продукта и снижения энергетических затрат [83], целевая функция должна включать фактор производительности.

2.2.2 Влияние заполнения мельницы шарами

Известно, что потребляемая активная мощность двигателем мельницы зависит от шарового заполнения мельницы: $N = f(\varphi_{шар})$. Эта зависимость носит экстремальный характер, ее максимальное значение приходится на объемное заполнение шарами $\varphi_{шар} = 50 \div 53\%$ (данные для МЩР 4500х5000, АНОФ-2, см. Рисунок 2.3), дальнейшее увеличение шарового заполнения приводит к снижению мощности.

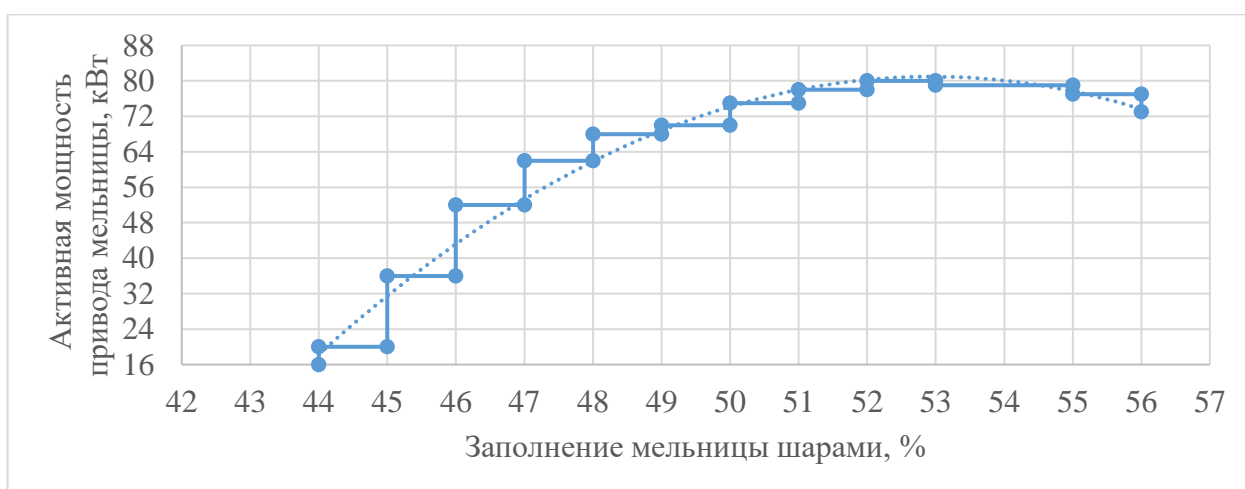


Рисунок 2.3 - Зависимость потребляемой активной мощности привода от объемного заполнения шарами для мельниц МЩР 4500х5000 АНОФ-2 в момент догрузки шаров

Эффективность измельчения по содержанию класса $-0,16$ мм также является экстремальной зависимостью от шарового заполнения: $q_{0,16} = f(\varphi_{шар})$, ее оптимальное значение $q_{0,16}^{opt}$ соответствует $\varphi_{шар} = 48\%$ (данные для МШР 4500x5000, АНОФ-2, см. Рисунок 2.4).

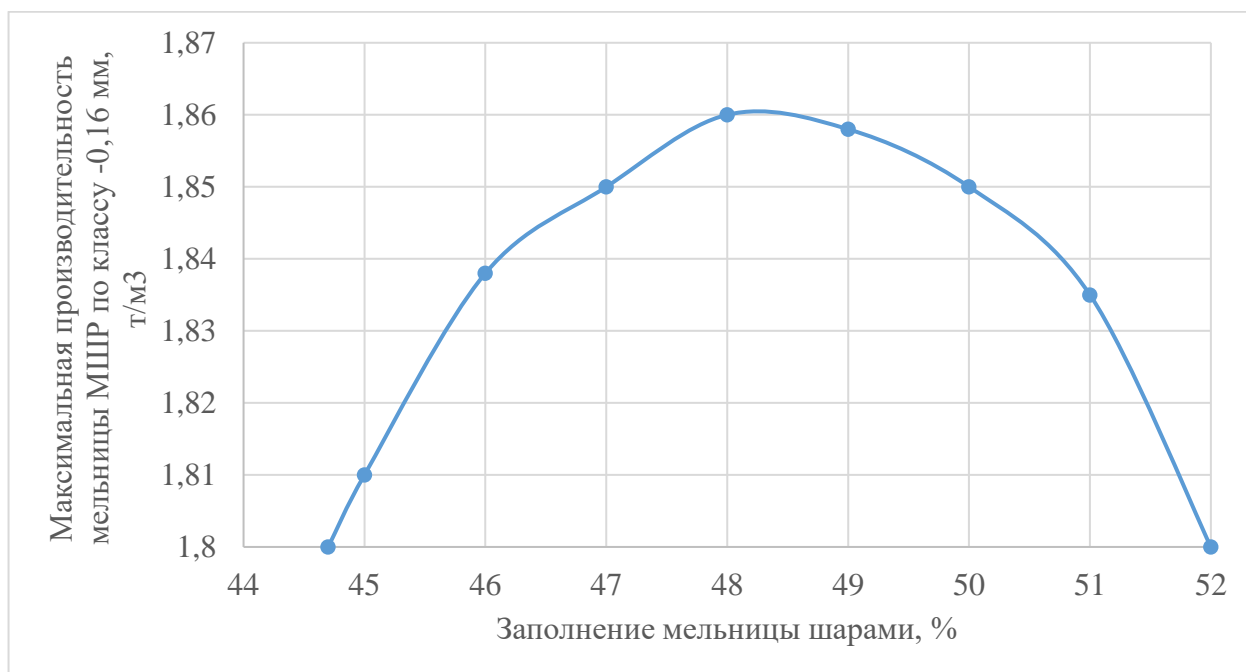


Рисунок 2.4 - Зависимость производительности по классу $-0,16$ мм, т/м^3 от объемного заполнения шарами для мельниц МШР 4500x5000 АНОФ-2

На АНОФ-3 для мельниц с центральной разгрузкой МШЦ 5500x6500 значение наполнения мельницы шарами составляет не более 42%. В противном случае, поскольку в разгрузке мельницы нет решетки, шары будут выходить из мельницы, что недопустимо. Установлено, что поддержание заполнения МШЦ шарами на максимально возможном значении $\varphi_{шар} = 42\%$, позволяет достичь оптимальной удельной производительности по содержанию класса $-0,16$ мм $q_{0,16}^{opt}$. Относительные значения удельной производительности по вновь образованному расчетному классу:

$$C = \frac{q_{0,16}^{\varphi_n}}{q_{0,16}^{opt}}, \text{ доли ед.}, \quad (2.9)$$

где за единицу ($C=1$) принимается удельная производительность, соответствующая оптимальной $q_{0,16}^{opt}$ (см. Рисунок 2.5).

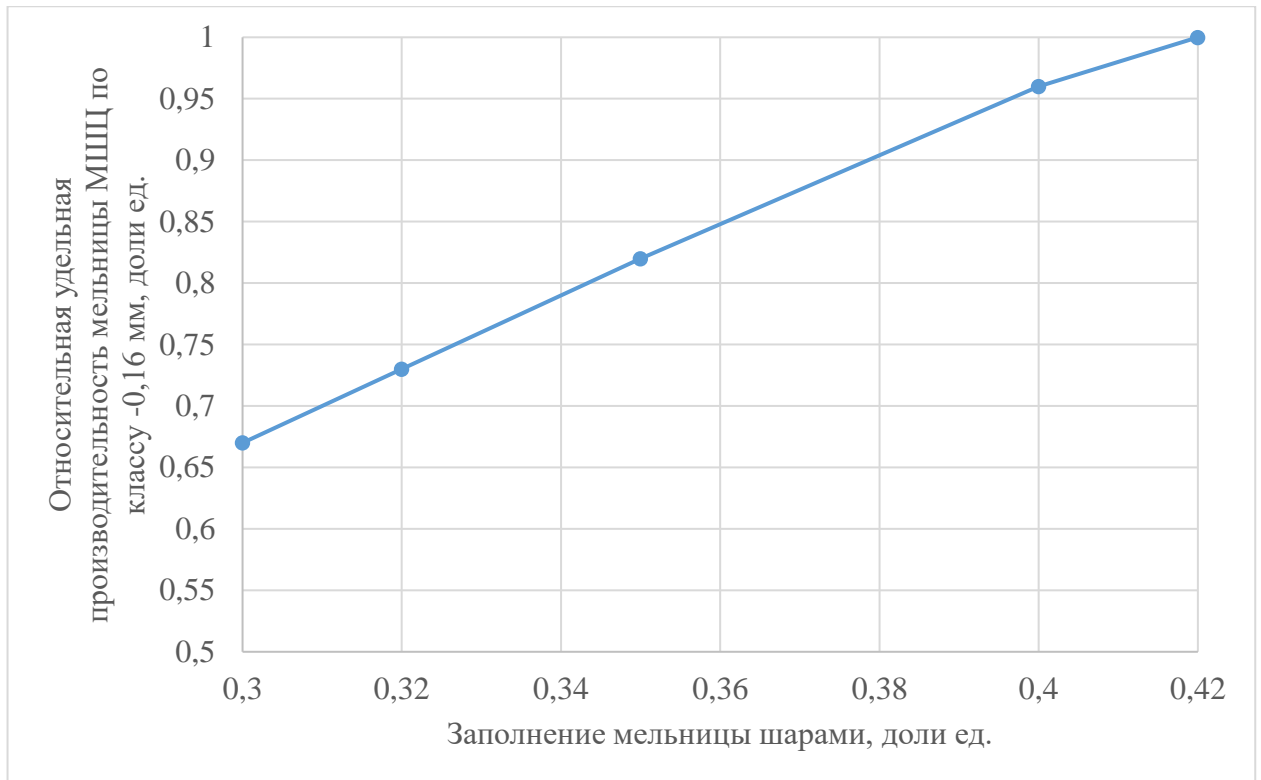


Рисунок 2.5 - Влияние заполнения мельницы МШЦ шарами на относительную удельную производительность по вновь образованному расчетному классу

(- 0,16 + 0 мм), где за единицу принимается $q_{0,16}^{opt}$ при $\varphi_{шар} = 42\%$

Таким образом, зная производительность мельницы при оптимальном шаровом заполнении согласно (см. Рисунок 2.6), можно определить производительность мельницы по сырой руде при любом $\varphi_{шар}$ по следующей формуле:

$$Q = \frac{q_{0,16} \cdot V_M}{(\beta_d - \alpha_d) \cdot (1 - W)}, \text{ м / ч.} \quad (2.10)$$

Это так же показывает, насколько важно поддерживать оптимальное шаровое заполнение мельницы при эксплуатации.

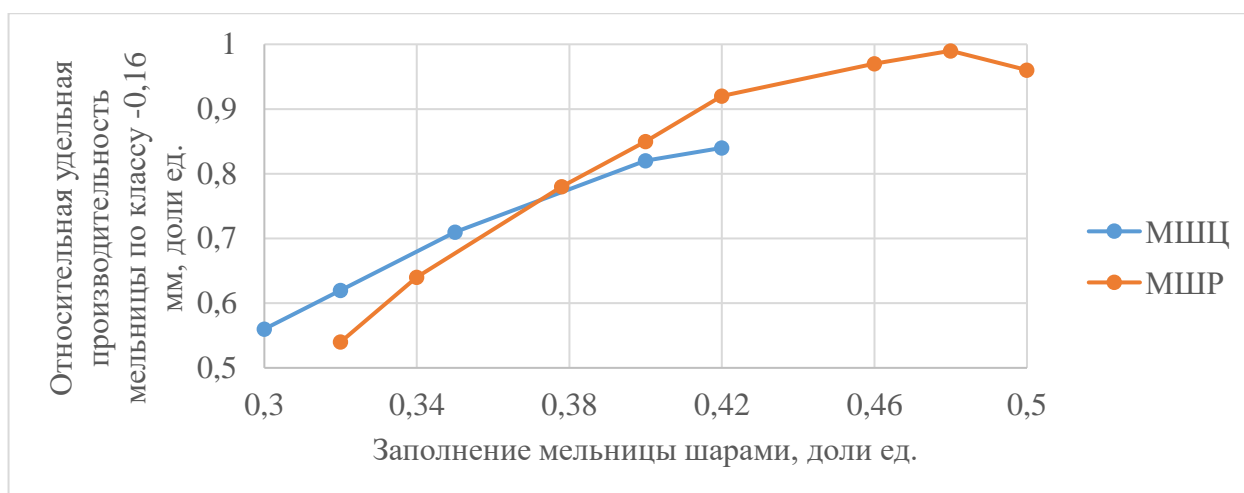


Рисунок 2.6 - Влияние заполнения мельниц МШР и МШЦ шарами на относительную удельную производительность мельниц по вновь образованному расчетному классу (-0,16 + 0 мм), где за единицу принята удельная производительность $q_{0,16}^{онт}$ мельницы с решеткой.

2.2.3 Влияние пробега мельницы

В процессе эксплуатации шаровой мельницы износу подвергается в первую очередь поверхность мельницы, взаимодействующая непосредственно с мелющими телами. Для защиты от износа внутренней поверхности шаровой мельницы, а также для придания измельчающей среде определенной траектории движения применяют защитную футеровку. Футеровка представляет собой набор элементов – футеровочных броней, закрепленных, как правило, болтовым соединением на внутренние рабочие поверхности шаровой мельницы: цилиндр, торцевые крышки, загрузочная и разгрузочная цапфы.

Футеровочные брони могут быть выполнены из разного материала, формы в зависимости от характеристик мельницы, направления вращения мельницы со стороны загрузочной цапфы, мелющего тела и эксплуатационных характеристик. Преимущественно элементы футеровки изготавливаются из износостойкой стали, реже резины и комбинированных материалов. Практика применения показывает, что применение резиновой футеровки имеет преимущества перед стальной, во-первых, за счет меньшего веса, более продолжительного срока службы и низкого

шума при работе мельницы. Во-вторых, снижается расход шаров на 10 %, расход электроэнергии на 7-10 % и растёт раскрытие рудных зёрен на 1,8-3,0 % [84].

С увеличением пробега мельниц после капитального ремонта увеличивается объем мельницы ($V_{раб}$) в результате износа футеровки. В случае оптимального режима эксплуатации шаровой мельницы зависимость может быть описана линейным уравнением (см. Рисунок 2.7). К примеру, для МШЦ 5,5х6,5:

$$V_{раб} = 0,0005 \cdot h + 140, м^3. \quad (2.11)$$

где h – пробег мельницы, маш. час.

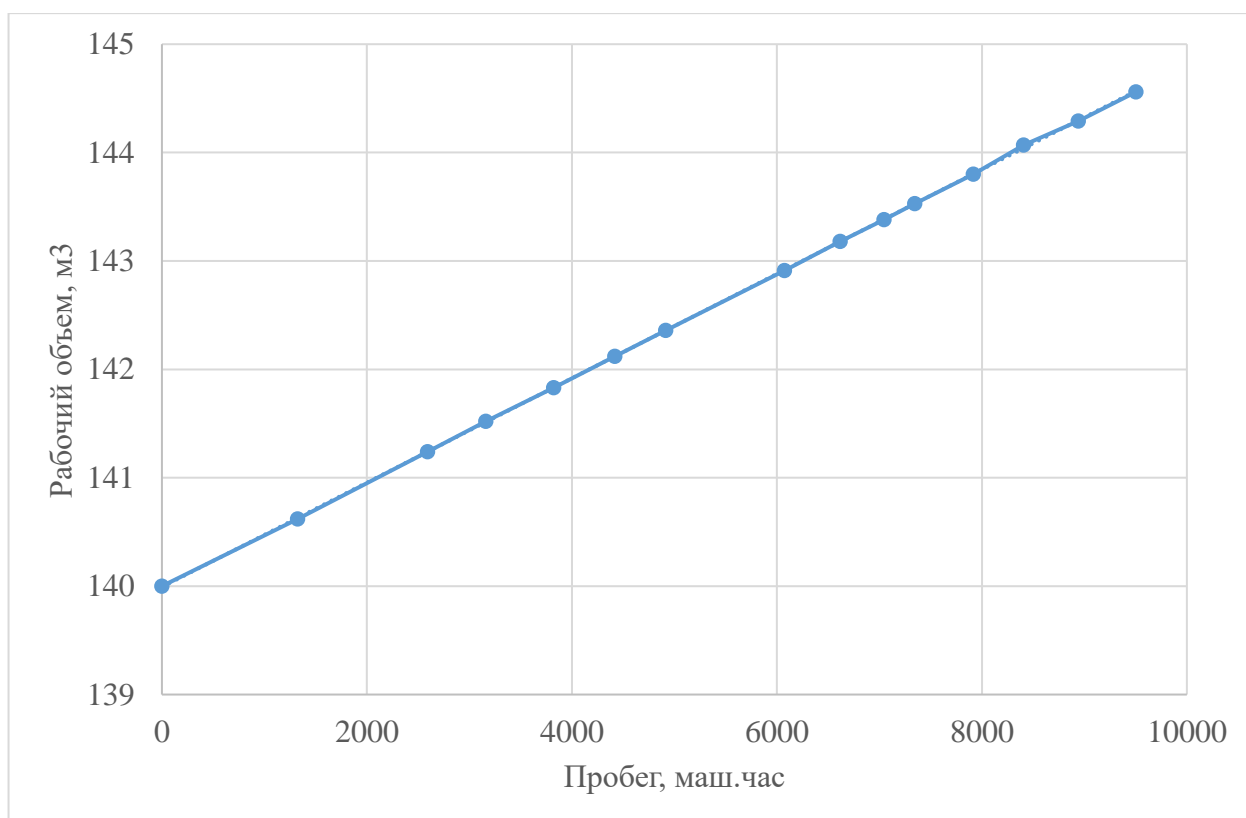


Рисунок 2.7 - Зависимость рабочего объема мельницы МШЦ 5,5х6,5 с резиновой футеровкой от пробега при шаровом заполнении $\varphi_{шар} = 42\%$

Увеличение рабочего объема мельницы следует учитывать для поддержания оптимального шарового наполнения мельницы, т.к. со временем масса мелющих тел в мельнице будет пропорционально расти. Также состояние футеровки из-за увеличения $V_{раб}$ влияет на оптимальную производительность мельницы по руде (см. Рисунок 2.8).

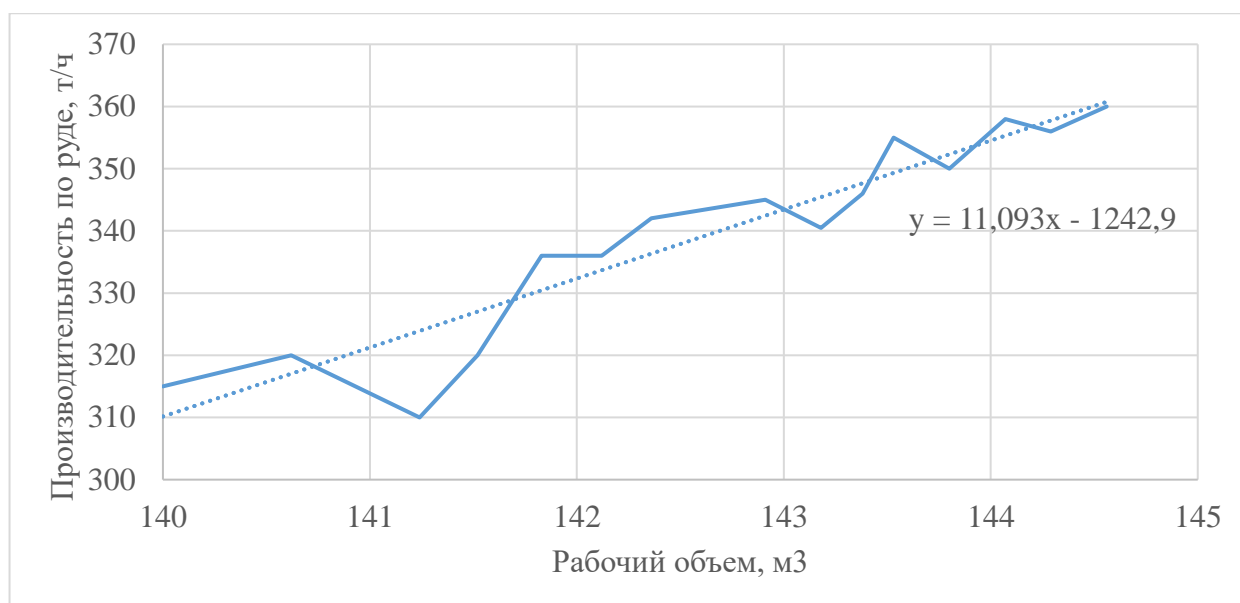


Рисунок 2.8 - Зависимость оптимальной производительности по руде мельницы МШЦ 5,5х6,5 с резиновой футеровкой от рабочего объема мельницы при шаровом заполнении $\varphi_{шар} = 42\%$

Кроме футеровки в разы большему по массе износу подвержены мелющие тела. Шары различаются по крупности, плотности и твердости. Плотность кованных и катаных стальных шаров составляет в среднем $7,8 \text{ г/см}^3$, литых – $7,5 \text{ г/см}^3$, чугунных при низком качестве литья – $7,1 \text{ г/см}^3$ (см. Таблица 2.1). Объем и масса шара вычислены по номинальному диаметру при плотности стали $7,85 \text{ г/см}^3$.

Таблица 2.1 - Параметры и размеры шаров

Условный диаметр, мм	Номинальный диаметр, мм	Пред. откл. по номинальному диаметру, мм	Расчетный номинальный объем, см^3	Расчетная номинальная масса, кг
80	83,0		299	2,35
90	94,0	$\pm 4,0$	435	3,41
100	104,0		589	4,62
110	114,0		776	6,09
120	125,0	$\pm 5,0$	1023	8,03

Обычно мельница загружается разноразмерными шарами 80 и 100 мм [85], а оптимальное шаровое заполнение определяется по расстоянию от шаровой поверхности до футеровки в верхней точке барабана мельницы. При этом мельница

30-40 мин. вырабатывается и затем производится замер. Для мельницы МШЦ 5,5х6,5 расстояние 3,05 м соответствует $\varphi_{шар} = 42\%$.

Установлено, что объемная доля шаров в шаровой загрузке составляет $\varepsilon = 0,6$. То есть при оптимальном заполнении мельницы шарами насыпная плотность стальных шаров составляет $\rho_n = \rho_{см} \cdot \varepsilon = 7,85 \cdot 0,6 = 4,71$ г/см³. Эту цифру допустимо принимать при ориентировочных расчетах шаровой загрузки.

Масса шаров в мельнице:

$$m_{шаров} = \rho_n \cdot \varphi_{шар} \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L, \text{ м}^3. \quad (2.12)$$

где D – диаметр мельницы в свету, м;

L – длина барабана мельницы, м.

2.2.4 Химический состав руды

Горнодобывающее производство АО «Апатит» ведет добычу фосфатных руд преимущественно буровзрывным способом на рудниках Кольского полуострова, расположенных в Хибинах (см. Таблица 2.2, Таблица 2.3).

Таблица 2.2 - Химический состав исходной руды [86]

Химическое соединение	Массовая доля в руде, %	Молярная масса, г/моль
P ₂ O ₅	13,1	141,94
Al ₂ O ₃	14,3	101,96
SiO ₂	29,2	60,08
CaO	15,7	56,08
Na ₂ O	13,6	61,98
Fe ₂ O ₃	5,5	159,69
K ₂ O	20,5	94,20
MgO	2,4	40,30
F	0,9	19,00
TiO ₂	0,9	79,88
SrO	0,9	103,62
Прочие	0,5	-

Таблица 2.3 - Химический состав апатитового концентрата [87]

	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	R ₂ O	прочие
% по массе	40,91	0,19	0,41	52,51	0,1	0,22	2,74

Исходная руда транспортируется на обогатительную фабрику, где в первую очередь проходит трехстадийное дробление. Куски руды размерами 300-1500 мм последовательно разрушают сначала на стадии крупного дробления, затем на стадии среднего дробления и далее мелкого дробления. В продукте последней стадии дробления руда имеет размеры 3-10 мм, именно такой она поступает в передел измельчения. Так или иначе, дойдя до тонкого измельчения, руда впитывает влагу. Плановая влажность руды в питании мельницы составляет 3 % от общей массы.

Процесс измельчения чувствителен к высокой влажности мелкодробленой руды, поскольку полезного компонента (P_2O_5) становится меньше. При высокой влажности руды, для достижения определенных условий измельчаемости, производительность мельницы по руде снижается (см. Рисунок 2.9).

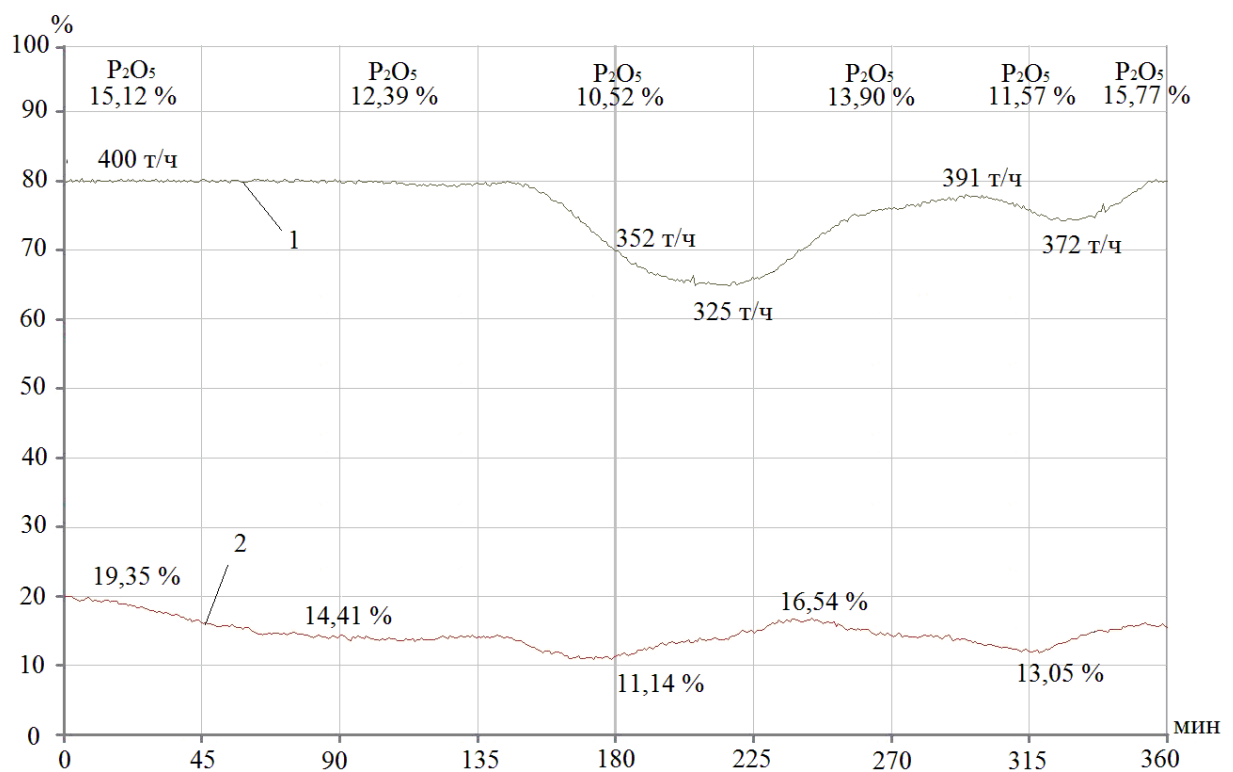


Рисунок 2.9 - Влияние химического состава на процесс измельчения в шаровой мельнице МШЦ: 1 – производительность по руде, 2 – вибрация мельницы

2.2.5 Внутримельничное заполнение

Повышение производительности мельницы означает необходимость постоянного поддержания оптимального наполнения мельницы рудой. Для этого

необходимо контролировать параметр внутримельничного заполнения [88]. Измерить такой параметр напрямую с применением КИП невозможно в связи с технологическими условиями измельчения, но существуют альтернативные параметры, по которым можно оценивать наполнение мельницы материалом:

- акустический шум – уровень громкости звука, издаваемого мельницей;
- вес нагруженной мельницы;
- нижняя точка положения загрузки внутри мельницы («носок»), измеренная с помощью измерителя колебаний и напряжений футеровочного болта;
- вибрация, измеренная на подшипнике разгрузочной цапфы мельницы.

Первые два параметра имеют ряд недостатков. Измерение акустического шума одной мельницы, как правило будет сопровождаться возмущениями от работы соседних мельниц и другого оборудования, также акустические датчики динамического звукового давления имеют свои конструктивные недостатки в связи с низким классом защиты чувствительного элемента. Вес мельницы измеряют по давлению в подшипниках или тензометрическими датчиками. Как показала практика непостоянство веса мельницы без руды из-за износа футеровки и шаров, критично для точности и стабильности измерения заполнения мельниц. Также переменный характер данных измерений давления на практике позволил сделать вывод о том, что измерение веса стоит заменить другим способом контроля заполнения мельницы.

Технология определения нижней точки положения загрузки мельницы – «носок», одна из самых современных. Измеритель, состоящий из тензометрического преобразователя и датчика виброускорения, устанавливается непосредственно на барабан мельницы – на футеровочный болт. Такое решение само по себе является выгодным поскольку чувствительный элемент приближен максимально к процессу. Результаты внедрений показывают, что измеренные данные стабильны и отражают характер объемного заполнения материала в полной мере. Стабилизация заполнения мельницы материалом с такой технологией позволяет получать максимальную выработку и не допускать перегрузок.

Наиболее распространенный на действующих производствах метод измерения объемного заполнения является вибрация мельницы, измеряемая пьезоэлектрическими акселерометрами. Датчики могут быть установлены как на загрузочной и разгрузочной цапфах мельницы, так и только на разгрузочной. В зависимости от пробега вибрация мельницы изменяется, но не изменяется характер измеренных данных. Высокая вибрация означает, что шары ударяются об футеровку, следовательно, мельница недостаточно загружена материалом. При низкой вибрации мельница загружена близко к предельной загрузке (см. Рисунок 2.10). В случае, когда вибрация минимальна – шары перестали падать и соударяться друг с другом и футеровкой, то мельница перегружена материалом и следует снизить производительность по руде.

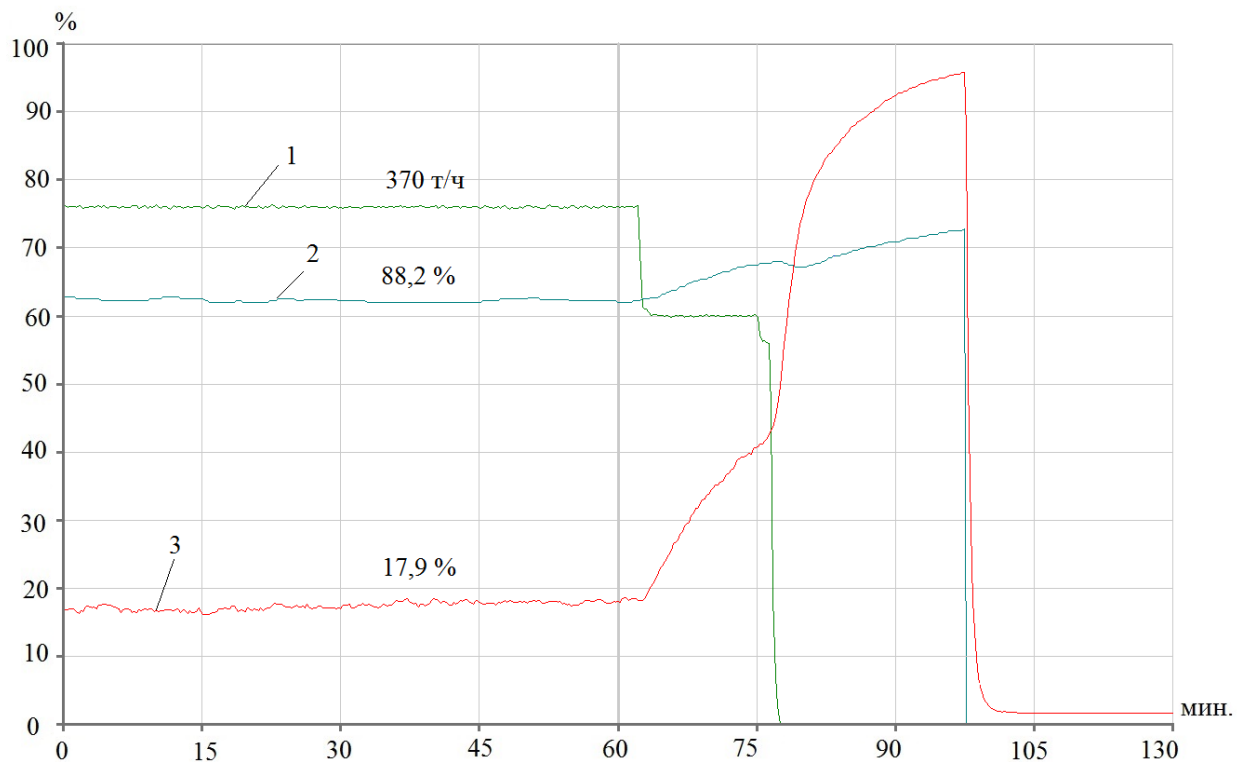


Рисунок 2.10 - Изменение вибрации при снятии нагрузки по руде:

- 1 – производительность по руде, 2 – полезный сигнал активной мощности,
3 – вибрация мельницы

Стабилизация параметра вибрации для оптимального управления объемным заполнением мельницы зарекомендовала себя на обогатительных фабриках АО «Апатит» где в качестве датчиков используется разработанный на производстве

комплекс для измерения виброускорения имеющий возможность калибровки под конкретную мельницу.

2.2.6 Активная мощность электропривода мельницы

Мельницы МШР 4,5х5 проектируются в комплекте с синхронным электродвигателем СДС-19-56-40УХЛ4 с тиристорным возбуждением, рассчитанным на напряжение 6000 В, мощность 2500 кВт, КПД 95,2 %, $\cos \varphi = 0,9$. Активная мощность электродвигателя измеряется датчиком Е849М/6 с диапазоном измерения входного сигнала 0-5 А и выходным токовым сигналом 4 - 20 мА, подключенным в цепь вторичной обмотки трансформатора ТПЛ-10М 0,5/10Р 150/5. В программно-аппаратном комплексе АСУ ТП аналоговый сигнал с датчика активной мощности преобразуется в проценты в соответствии: 4 мА – 0 %, 20 мА – 100 %. Затем делается срезка величины мощности, нечувствительной к техпроцессу. Дело в том, что при работе мельницы в пределах изменения производительности по руде активная мощность изменяется в диапазоне от мощности, нечувствительной к техпроцессу, до мощности при оптимальной загрузке мельницы. Поэтому в измеряемом диапазоне датчика активной мощности полезный сигнал масштабируется с учетом среза и коэффициента усиления. Так, к примеру, экспериментально определено, что диапазон изменения полезного сигнала активной мощности лежит в пределах 57 % - 67 %. Для того, чтобы уложить этот сигнал в стандартный диапазон 0 - 100%, применяется повторное масштабирование, где коэффициент среза равен 57 %, а коэффициент усиления равен 10. Таким образом, далее под сигналом активной мощности будет пониматься масштабированный полезный сигнал.

В штатных режимах работы секции измельчения активная мощность зависит от объемного заполнения мельницы шарами и запаса материала в мельнице. Известно, что кривая активной мощности в зависимости от шарового заполнения мельницы имеет экстремум (см. Рисунок 2.4). Эту зависимость активно используют на производстве для догрузки шаров в мельницу. Мельницы грузятся шарами для компенсации их износа пять дней в неделю в дневную смену с учетом

планового удельного расхода шаров на тонну переработанной руды. По мере загрузки мельницы шарами, значение активной мощности возрастает на величину приращения мощности, которое в свою очередь уменьшается с каждым высыпанным кубелем (4 т) шаров (см. Рисунок 2.11). Догруз шаров прекращают, когда, приращение мощности станет равным приращению, свидетельствующему об оптимальном наполнении мельницы шарами $\varphi_{шар} = 42\%$. Приращения определяются экспериментальным путем.

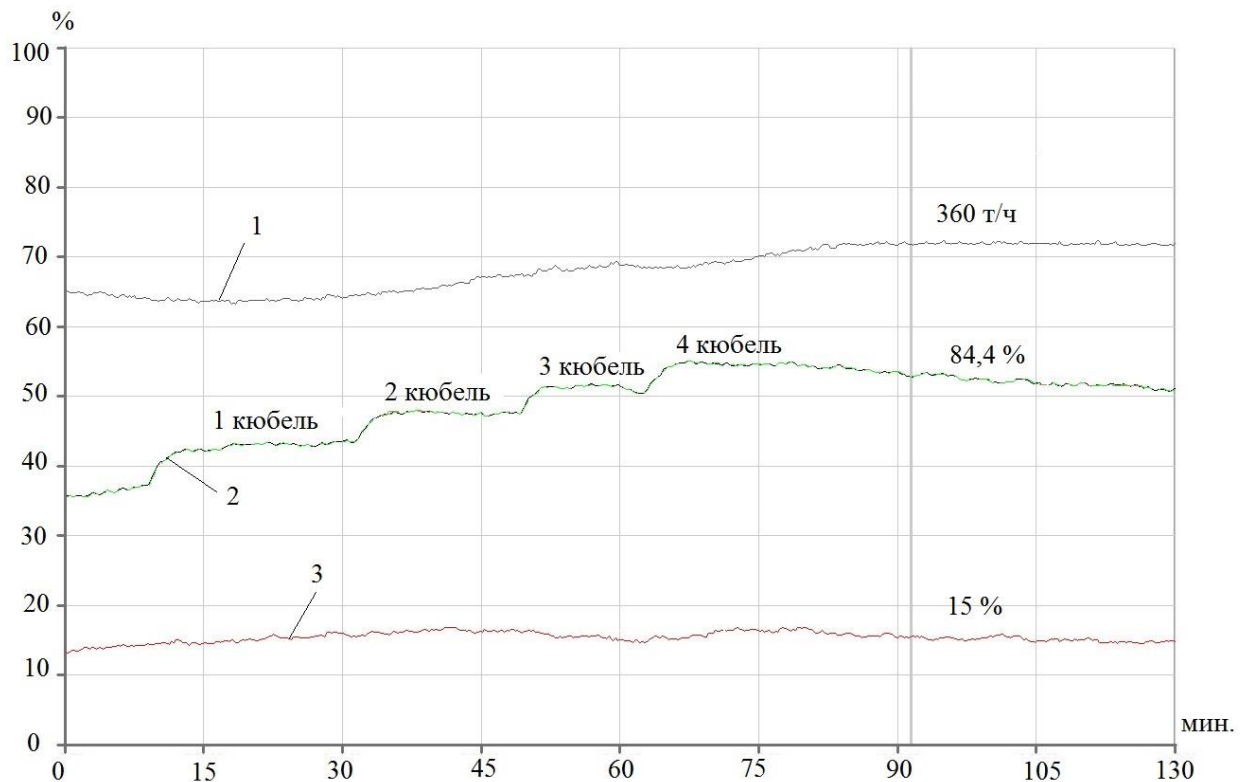


Рисунок 2.11 - Приращение активной мощности при загрузке шаров:

1 – производительность по руде, 2 – полезный сигнал активной мощности,
3 – вибрация мельницы

Будем считать, что перегруз мельницы при оптимальном шаровом наполнении, установившейся скорости вращения барабана мельницы наступает при достижении критической массы пульпового наполнения мельницы. Установлено, что, если при повышении производительности по руде активная мощность растет, то мельницу еще можно догружать до оптимального пульпового заполнения. При дальнейшем увеличении производительности, мощность достигнет своего максимума и начнет медленно уменьшаться (за час 5-10 %). При

медленном уменьшении мощности догрузка мельницы рудой еще допустима, но как только произойдет стремительное падение мощности (за час $>30\%$), то можно говорить о наступлении перегруза. При перегрузе шары вместе с рудной пульпой прилипают к стенкам барабана мельницы и процесс измельчения прекращается. По величине активной мощности можно судить о перегрузе мельницы.

Таким образом, установлено, что приращение мощности в момент подгрузки шаров равное ранее полученному $\sim 6-7\%$ (см. Рисунок 2.11) свидетельствует об оптимальном наполнении мельницы $\varphi_{шар} = 42\%$ и мощность двигателя мельницы тем выше, чем больше шаров в ней при $\varphi_{шар} = const$.

2.3 Моделирование технологического процесса измельчения с шаровой мельницей в замкнутом цикле с грохочением

2.3.1 Постановка задачи моделирования процесса измельчения

Шаровая барабанная мельница с решеткой эксплуатируется в замкнутой схеме измельчения (см. Рисунок 2.12) с максимальной производительностью и энергоэффективностью при оптимальном объемном заполнении мельницы материалом [89].

Известно, что измерение и стабилизация объемного заполнения составляет сложную задачу, поскольку этот параметр зависит от многих неучитываемых при управлении факторов [90]. Для оценки объемного заполнения измеряются параметры, косвенно характеризующие искомый: механическая вибрация, акустический шум, активная мощность привода мельницы, давление в подшипниках мельницы и др. В любом из этих случаев, стабилизация параметра ведется путем обеспечения соответствующего соотношения жидкого и твердого в продуктах схемы, управляя приводами исполнительных механизмов, подающих в цикл руду и воду. Поскольку контроль и управление по косвенным параметрам носит достаточно противоречивый характер, предлагается параметр объемного заполнения получать аналитическим решением, учитывая факторы, которые характеризуют его в процессе эксплуатации мельницы [91].

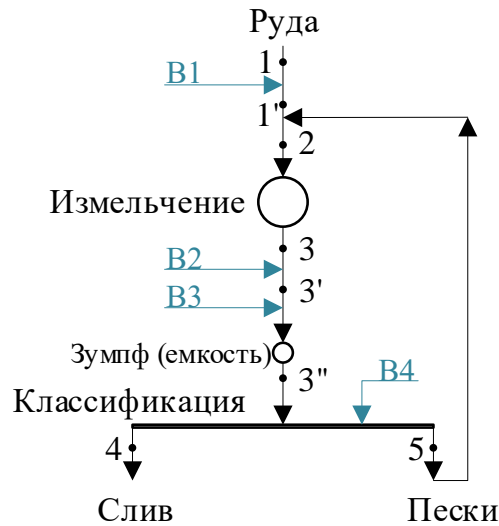


Рисунок 2.12 - Одностадийная замкнутая схема измельчения: 1-5 – исходная руда и продукты схемы

Задача состоит в разработке имитационной модели цикла измельчения, позволяющей решать проблему синтеза и отладки САУ объемного заполнения мельницы материалом в условиях работы мельницы в режимах близких к перегрузу. Имитационная модель должна учитывать аспект качества измельчения и нестационарность параметров оборудования, а также прогнозировать массу объемного заполнения мельницы. Поэтому имитационная модель измельчения для проектирования оптимальной САУ должна иметь следующий интерфейс (см. Рисунок 2.13).



Рисунок 2.13 - Имитационная модель измельчения: Q_1 – производительность мельницы по руде, т/ч; W – расходы воды в точки 1-4 схемы измельчения, м³/ч; G – масса внутримельничного заполнения, т; β_3 – содержание расчетного класса в продукте 3, %; S – механическая вибрация мельницы, %; c – циркулирующая нагрузка, %

2.3.2 Барабанная шаровая мельница с решеткой

Будем рассматривать агрегат измельчения как идеальный смеситель для описания гидродинамического режима смешения [92], [93]. Идеальный аппарат смешения представляет собой емкость с мешалкой, в которую поступают потоки плотностями ρ_1 и ρ_2 и смешиваются в общий поток с плотностью ρ . Емкость в рассматриваемом случае ограничена внутренними поверхностями мельницы и близка по форме к горизонтальному цилиндру. Объем емкости непостоянен и растет в зависимости от степени износа внутренней защитной футеровки мельницы. Измельченный продукт 3 (см. Рисунок 2.12) удаляется из мельницы самотеком, что характеризует мельницу как объект с самовыравниванием. Примем допущение, что концентрации всех размерных фракций равномерно распределены по объему материала в мельнице, соответственно, плотность пульпы одинакова по всему объему. Из этого следует, что потоки, поступающие в мельницу, мгновенно смешиваются с ее содержимым, а параметры изменяются скачкообразно до параметров пульпы внутри мельницы. Уравнение материального баланса для мельницы в таком случае будет иметь вид:

$$V_m(t) \frac{d\rho}{dt} = Q_1(t) \rho_1(t) + Q_5(t) \rho_5(t) - Q_3(t, V) \rho_3(t), \quad (2.13)$$

где Q_1, ρ_1 – расход и плотность исходной руды, разбавленной водой В1;
 Q_5, ρ_5 – расход и плотность надрешетного продукта грохочения (песков);
 Q_3, ρ_3 – расход и плотность пульпы в сливе мельницы;
 V_m – объем материала в мельнице.

Расчет параметров пульпы в точках схемы измельчения, а именно мгновенных значений плотности и расхода пульпы, жидкой и твердой фаз, будем вести по выражениям (2.1) - (2.6). Мельницы с разгрузкой через торцевую решетку, принято называть мельницами с низким уровнем пульпы, это значит, что пульпа внутри мельницы от загрузочной цапфы до решетки распределяется по длине неравномерно (см. Рисунок 2.14). Это связано с конструкцией камеры, находящейся за решеткой, откуда руда принудительно разгружается элеваторным пульпоподъемником при вращении мельницы.

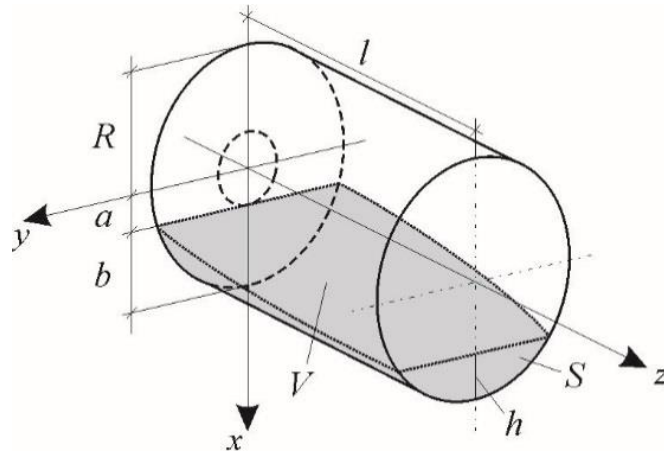


Рисунок 2.14 - Графическое изображение распределения материала внутри шаровой барабанной мельницы с разгрузкой через торцевую решетку

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

$$Q_3(h) = S(h) \cdot \delta \cdot \mu \sqrt{2gh}, \quad (2.14)$$

где μ – коэффициент истечения;

δ – доля площади живого сечения разгрузочной решетки в площади $S(h)$, занятой материалом при уровне h :

$$S(h) = R^2 \arcsin \left[\frac{(R-h) \operatorname{tg}(\arccos(1-h/R))}{R} \right] - (R-h)^2 \operatorname{tg}(\arccos(1-h/R)). \quad (2.15)$$

Выражение для определения объема материала в мельнице при принятых допущениях имеет вид:

$$V = \iiint_G dx dy dz$$

$$G: \begin{cases} a \leq x \leq R \\ \sqrt{R^2 - x^2} \leq y \leq -\sqrt{R^2 - x^2} \\ 0 \leq z \leq \frac{l}{b-h}(x-a) \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
V(h) = & \frac{2l}{b-h} \left[\frac{1}{3} (R^2 - h^2)^{3/2} + \frac{a}{2} \left(a\sqrt{R^2 - a^2} - \right. \right. \\
& \left. \left. - R^2 \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{a}{R} \right) \right) \right] - \frac{1}{3} \left[R^2 - (R^2 - h^2)^2 \right]^{3/2} - \\
& - \frac{R-h}{2} \left[(R-h)\sqrt{R^2 - (R-h)^2} - R^2 \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{R-h}{R} \right) \right], \quad (2.16)
\end{aligned}$$

где a – радиус загрузочной цапфы;

R – радиус окружности по футеровке мельницы.

Поскольку помимо измельчаемого материала в мельнице, объем занимают мелющие тела, получившееся выражение $V(h)$ необходимо поделить на коэффициент доли межшарового пространства U : $v_m(h) = V(h)/U$. Для ускорения расчетов в симуляторе явную зависимость $h(V_m)$ получим, аппроксимируя полиномом функцию обратную к $V_m(h)$ в диапазоне $h \in [0; R]$.

2.3.3 Гранулометрический состав измельченного продукта

Модель фракционного состава измельчения по фундаментальной закономерности рассмотрена в [94], [95], [96]. Предложенная в [95] модель кинетики измельчения материалов в шаровой мельнице построена на принципах молекулярной теории соударений для бимолекулярных последовательных необратимых реакций со множеством стадий. Другими словами, механический процесс измельчения описан по подобию химическим и физическим хаотическим процессам на основе вероятностной теории и статистического подхода [97].

Поскольку при работе мельниц в оптимальном режиме, наполнение мельницы внутри барабана склонно двигаться в водопадном режиме, то если обусловиться, что шары и рудная пульпа перемешиваются хаотично, тогда с точки зрения теории вероятности этот процесс может быть описан с учетом ряда факторов: частотного, стерического, активационного и концентрационного.

В этом случае, функция для расчета скорости уменьшения доли зерен каждой фракции при измельчении имеет вид [95]:

$$k_j = \frac{8d_j(d_{ш} - d_j)\omega G_{ш} G_3}{d_{ш}^2 \left(1 + 2\omega \sqrt{2 \frac{D_{раб}}{g}}\right) \left(\frac{G_{ш}}{\rho_{ш}} + \frac{G_3}{\rho_3} + \frac{G_в}{\rho_в}\right)^2 \rho_{ш} \rho_3} \times \exp \left[\frac{E_б}{RT + \frac{3Mm_{ш}gD_{раб}}{\pi d_j^3 \rho_3}} \right], \quad (2.17)$$

где $j=1, 2, \dots, n$ – номер фракции;

d_j – средний размер зерна для фракции $j=2, 3, \dots, n$, м;

$d_{ш}$ – диаметр мелющего шара, м;

ω – угловая скорость вращения барабана мельницы, рад/с;

$D_{раб}$ – рабочий диаметр мельницы, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$G_{ш}$ – масса шаровой загрузки мельницы, кг;

G_3 – масса руды в мельнице, кг;

$G_в$ – масса воды в мельнице, кг;

$\rho_{ш}$ – плотность материала шаров, кг/м³;

ρ_3 – плотность рудных зерен, кг/м³;

$\rho_в$ – плотность воды, кг/м³;

$E_б$ – энергетический барьер разрушения зерна, Дж/моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль*К);

T – абсолютная температура, К;

M – молекулярная масса руды, кг/моль;

$m_{ш}$ – масса шара, кг;

$$m = \gamma_{ш} v_{ш} = \frac{1}{6} \pi d_{ш}^3 \gamma_{ш}. \quad (2.18)$$

В соответствии с типичным характером последовательного разрушения, кратность измельчения и средний диаметр зерна фракции находятся в следующей зависимости:

$$d_j = d_1 (1/2)^{j-1}. \quad (2.19)$$

Тогда доля любой n -ой фракции от общей массы твердого с учетом влияния на нее более крупных фракций в любой момент времени [95]:

$$P_n = \sum_{j=1}^{n-1} P_{0j} \prod_j^{n-1} k_j \sum_j^n \frac{e^{-k_j \tau}}{\prod_{\substack{j,i=1 \\ i \neq j}}^n (k_i - k_j)} + P_{0n} e^{-k_n \tau}. \quad (2.20)$$

где P_{0n} – исходное содержание n -ой фракций, доли ед.;

P_{0j} – исходное содержание j -ой фракций, доли ед.;

n, j, i – номер фракции;

τ – продолжительность процесса, с;

k_j – константа скорости измельчения фракции n , с^{-1} .

2.3.4 Вибрация мельницы

Для моделирования процесса заполнения мельницы материалом выберем измерительный канал, косвенно характеризующий внутримельничное заполнение: «производительность мельницы по сырой руде – вибрация мельницы».

В решении этой задачи применим методику нейросетевого моделирования – частный случай построения математической модели объекта методом нейронных сетей [98], [99]. Подход заключается в синтезе оптимальной структуры нейронной сети (НС) объекта управления, обучении НС на данных, снятых с реального оборудования в текущей рабочей точке, и тестировании полученной НС на тестовых выборках – данных, не участвующих в обучении.

Все операции с НС будем проводить, используя инструментарий Matlab Neural Network Toolbox 8.4 и расширение Time Series Tool для синтеза пользовательских нелинейных авторегрессионных нейронных сетей с внешним входом и линиями задержки для входных и выходных сигналов (NARX). Наличие линий задержки обеспечивает динамику модели, т. е. выходной параметр модели прогнозируется как взвешенная сумма текущего и прошлых входных значений, а также прошлых выходных значений:

$$y(t+1) = f(x(t), x(t-1), \dots, x(t-d_x), y(t), y(t-1), \dots, y(t-d_y)). \quad (2.21)$$

Уравнение (2.21) называется уравнением регрессии, где d_x и d_y – число задержек на вход и выход соответственно. Одним из важных аспектов идентификации таким способом является выбор правильных временных задержек

для каждой из входных переменных и выбор количества регрессоров, то есть количества предыдущих выборок каждой переменной, которые будут учитываться в нейросетевой модели [100]. Анализируя литературные источники [101], [102] для построения модели авторегрессии нейронной сети, примем параметры d_x , d_y и количество нейронов в скрытом слое как варьируемые и будем изменять в пределах:

- количество обратных связей входа нейронной сети (d_x) в диапазоне от 1 до 7 с интервалом 1;
- количество обратных связей вывода нейронной сети (d_y) в пределах от 1 до 3 с интервалом 1;
- количество нейронов в скрытом слое от 7 до 12 с интервалом 1.

В то же время, для всех тестируемых нейронных сетей зафиксируем следующие факторы:

- тип: рекуррентная нейронная сеть (RNN);
- слои: один входной слой, один скрытый слой, один выходной слой;
- функция активации нейронов в скрытом слое: сигмоидная функция в виде гиперболического тангенса (tansig);
- функция активации нейронов в выходном слое: линейная (purelin);
- количество нейронов в выходном слое: 1.
- обучающие данные – вход - производительность мельницы по сырой руде (т/ч) и выход - вибрация мельницы (%), сняты с действующей апатито-нефелиновой секции измельчения с мельницей типа МШЦ 4500х5000. Были получены 4 обучающие выборки данных вход/выход с количеством элементов – 33555 шт. каждая (см. Рисунок 2.15). Каждая выборка содержит данные снятые в течении 10 часов работы мельницы и интервалом дискретизации – 1 с.

Обучение нейронных сетей проведено по алгоритму Левенберга-Марквардта (функция «trainlm» в Matlab) с тестированием и валидацией. В результате, были получены 42 обученные нейронные сети с $1 < d_x < 7$ и числом нейронов в скрытом слое от 7 до 12. Все нейронные сети построены с одной обратной связью для

выходного сигнала $d_y = 1$, поскольку было замечено, что увеличение d_y на 1 уменьшает подгонку к обучающим данным в 2-3 раза.

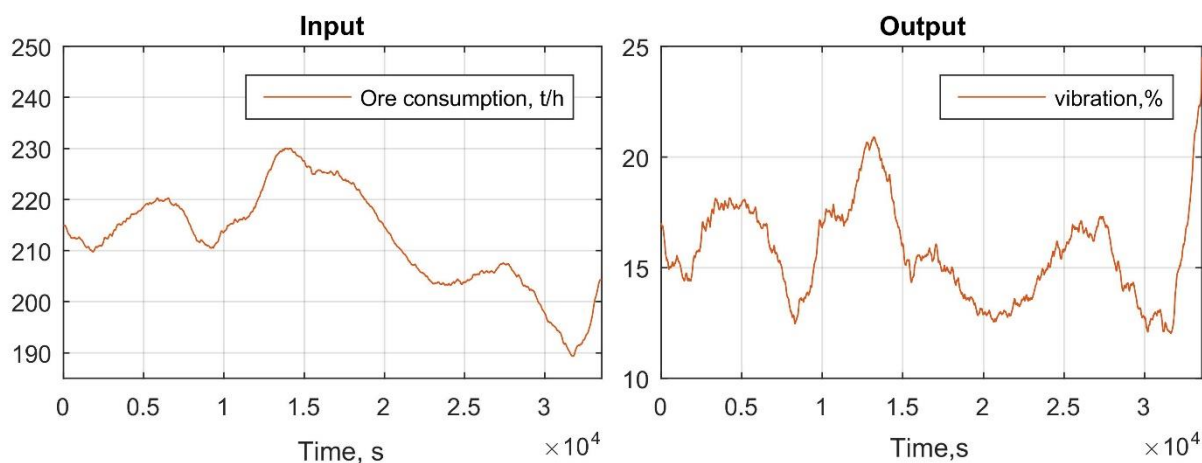


Рисунок 2.15 – Выборка обучающих данных «производительность – вибрация»

Обученные НС проверены на тестовых данных и «онлайн» данных процесса измельчения в режиме реального времени. Для онлайн-тестирования используем OPC-сервер Modbus, для установления связи Matlab Simulink и SCADA сервером базы данных. Состоятельность каждой тестовой НС расчина с использованием среднеквадратичной ошибки (MSE) и функции подгонки fit , которая использует критерий нормализованной среднеквадратичной ошибки (NRMSE):

$$fit = (1 - NRMSE) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{\sqrt{\sum_k^n (y_k - \hat{y}_k)^2}}{\sqrt{\sum_k^n (y_k - \bar{y})^2}} \right) \cdot 100\%, \quad (2.22)$$

$$MSE = \frac{\sum_k^n (y_k - \hat{y}_k)^2}{n}, \quad (2.23)$$

где n – количество обучающих образцов в выборке; k – номер элемента в выборке; y_k – выход объекта для k -го элемента выборки; \hat{y}_k – выход модели RNN для k -го элемента выборки; \bar{y} – среднее значение выхода объекта для всей выборки данных.

Результаты моделирования лучших синтезированных нейронных сетей (см. Рисунок 2.16) отсортированы в порядке убывания соответствия модели фактическим данным процесса (см. Таблица 2.4).

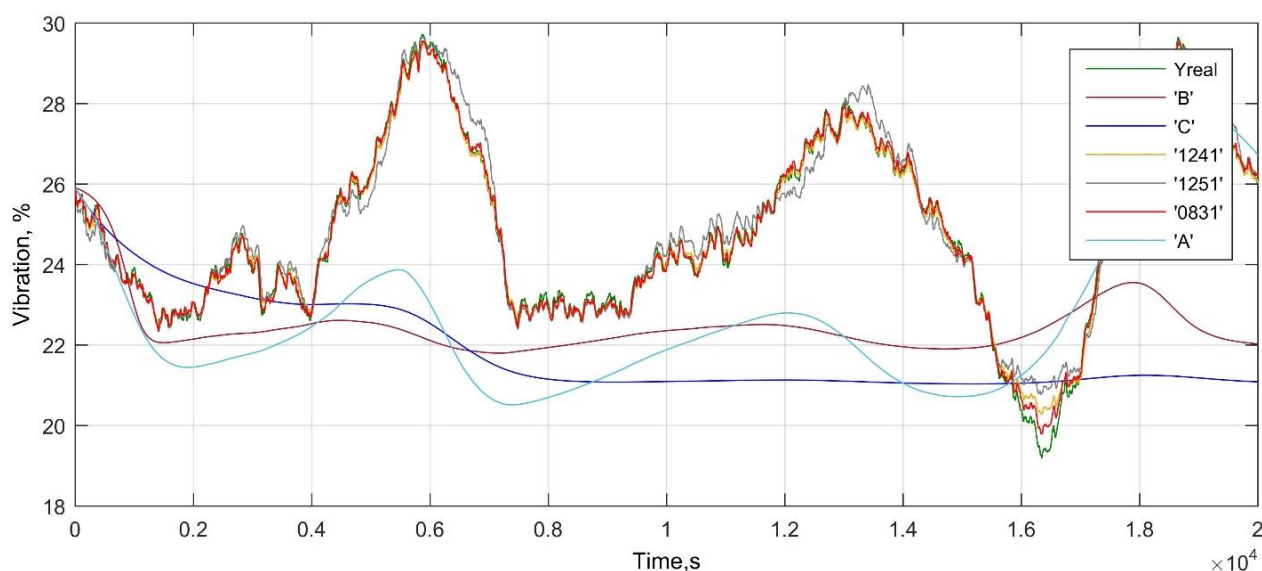


Рисунок 2.16 - Вибрация мельницы Y_{real} и результаты симуляции полученных моделей

Таблица 2.4 - Результаты синтеза оптимальной модели технологического процесса измельчения по каналу «производительность мельницы по сырой руде – вибрация мельницы»

Модель	Обучающие данные		Тестовые данные		«Онлайн» данные	
	fit, %	MSE	fit, %	MSE	fit, %	MSE
'0831'	92,889	0,0104	65,863	0,2546	72,132	0,2501
'1241'	93,118	0,0098	65,217	0,2643	68,482	0,3200
'1221'	93,770	0,0080	63,107	0,2973	66,428	0,3630
'1271'	94,313	0,0067	61,666	0,3210	64,797	0,3991
'1261'	93,189	0,0096	64,025	0,2827	64,050	0,4163
'1131'	93,244	0,0094	63,856	0,2854	64,027	0,4168
'0941'	95,097	0,0050	64,773	0,2711	63,916	0,4194
'0751'	84,292	0,0508	61,409	0,3253	62,931	0,4426
'0851'	84,292	0,0508	61,407	0,3254	62,643	0,4495
'1251'	84,282	0,0509	61,405	0,3254	62,640	0,4496
'A'	95,473	0,0050	52,848	0,4857	45,429	0,9592
'B'	97,733	0,0039	70,251	0,1933	8,55	2,0971
'C'	97,544	0,0043	67,616	0,2291	5,73	3,2791

Модели называются по значениям варьируемых параметров, например, название модели '0831' означает, что в скрытом слое 8 нейронов, $d_x = 3$, $d_y = 1$. Для сравнения представлены результаты нелинейной идентификации другими методами Matlab System Identification Toolbox: «А» – модель Хаммерштейна-

Винера с 1 выходом и 1 входом, линейная передаточная функция $n_b = 2$, $n_f = 3$, $n_k = 1$, входная нелинейность: $pw_{linear}=10$, выходная нелинейность: $pw_{linear}=10$; «В» – вейвлет-преобразование с 25 единицами, стандартные регрессоры: $n_a = 1$, $n_b = 5$, $n_k = 1$; «С» – алгоритм разбиения дерева (treepartition).

Увеличение количества нейронов в скрытом слое улучшает адекватность модели реальному физическому объекту. Также модели с количеством сигналов задержки управляющего сигнала более 3-х имеют преимущество перед остальными. По сравнению с другими методами нелинейной идентификации, результат повторения объекта на обучающей выборке (33555 образцов) и на тестовой выборке (30000 образцов) в нелинейных моделях был выше, чем в нейронных моделях. Но на реальных данных процесса эти модели показали плохие результаты относительно НС. Весовые коэффициенты и смещения для скрытого слоя оптимальной нейронной сети "0831" (см. Рисунок 2.17):

$$w_{hidden} = \begin{bmatrix} w_{1x0} & w_{1x1} & w_{1x2} & w_{1y} & b_1 \\ w_{2x0} & w_{2x1} & w_{2x2} & w_{2y} & b_2 \\ w_{3x0} & w_{3x1} & w_{3x2} & w_{3y} & b_3 \\ w_{4x0} & w_{4x1} & w_{4x2} & w_{4y} & b_4 \\ w_{5x0} & w_{5x1} & w_{5x2} & w_{5y} & b_5 \\ w_{6x0} & w_{6x1} & w_{6x2} & w_{6y} & b_6 \\ w_{7x0} & w_{7x1} & w_{7x2} & w_{7y} & b_7 \\ w_{8x0} & w_{8x1} & w_{8x2} & w_{8y} & b_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2189 & 0,1181 & 0,1113 & 2,9277 & 22,5779 \\ -0,0122 & -0,0297 & 0,0460 & 0,4335 & 26,6599 \\ -0,2558 & 0,4663 & -0,2103 & -4,5690 & -0,9303 \\ 0,0916 & 0,0995 & 0,1035 & 3,6185 & -32,4337 \\ -0,1458 & -0,0604 & -0,0386 & -2,2258 & 32,4675 \\ 0,0398 & 0,0932 & 0,1566 & 1,9836 & -23,2386 \\ -0,1249 & -0,1389 & -0,0293 & -2,2115 & 20,6883 \\ 0,0035 & -0,0198 & 0,0163 & -62,7261 & 0,3475 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

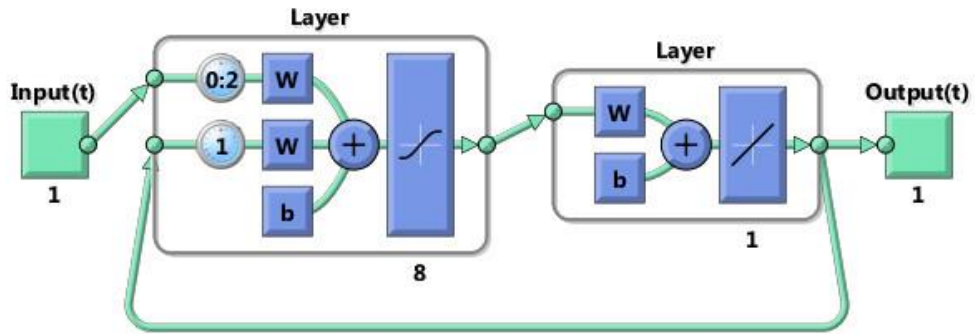


Рисунок 2.17 - Структурная схема оптимальной нейронной сети "0831"

Весовые коэффициенты и смещения для выходного слоя нейронной сети "0831":

$$\begin{aligned}
 w_{output} &= [w_{11} \quad w_{12} \quad w_{13} \quad w_{14} \quad w_{15} \quad w_{16} \quad w_{17} \quad w_{18} \quad b_1] = \\
 &= [-0,5739 \quad 0,2819 \quad -0,0882 \quad -0,5142 \quad 0,2982 \quad \dots \quad (2.25) \\
 &\quad \dots \quad -0,7147 \quad -0,4983 \quad -0,0158 \quad 4,0286].
 \end{aligned}$$

Полученная нейросетевая модель параметра вибрации мельницы по производительности мельницы по сырой руде характерна для реального физического объекта с точностью $\sim 72\%$ по оценкам (2.22), при этом стоит учитывать, что возмущения, влияющие на процесс, в модели не учитываются. Таким образом, компромисс между точностью и сложностью модели в данном случае был найден. Аналогичный метод идентификации был применен в [103] для прогноза распределения фракционного состава измельченного продукта, где нейросетевое моделирование также показало высокую точность.

Синтезированная нейронная сеть для относительной оценки (прогноза) заполнения мельницей материалом далее будет интегрирована в системную модель цикла измельчения в среде Matlab в виде отдельной подсистемы основного блока шаровой мельницы.

2.3.5 Износ футеровки и шаров

С увеличением пробега мельниц после капитального ремонта увеличивается рабочий объем мельницы в результате износа футеровки. В случае оптимального режима эксплуатации шаровой мельницы зависимость может быть описана линейным уравнением:

$$V_{\text{раб}} = k_1 \cdot R_{\text{hour}} + V_{\text{раб0}}, \quad (2.26)$$

где k_1 – коэффициент износа футеровки, м³/моточас;

R_{hour} – пробег мельницы, маш-час;

$V_{\text{раб0}}$ – рабочий объем мельницы при новой футеровке, м³.

Поскольку большему износу подвержены футеровочные плиты по длине мельницы, пренебрежем износом торцевых футеровок. Тогда, выразив из (2.26) рабочий диаметр, получим выражение:

$$D_{\text{раб}} = 2 \sqrt{\frac{k_1 \cdot R_{\text{hour}} + V_{\text{раб0}}}{\pi l}}. \quad (2.27)$$

где l – внутренняя длина цилиндрической части мельницы по футеровке, м.

Увеличение рабочего объема ведет к увеличению массы шаровой загрузки мельницы. При заполнении мельницы шарами $\varphi_{\text{ш}}$ и объемной доли шаров в шаровой загрузке ε масса шаровой загрузки:

$$G_{\text{ш}} = \rho_{\text{ш}} \cdot \varepsilon \cdot \varphi_{\text{ш}} \cdot V_{\text{раб}}. \quad (2.28)$$

Учитывая износ шаров:

$$G_{\text{ш}} = \rho_{\text{ш}} \cdot \varepsilon \cdot \varphi_{\text{ш}} \cdot V_{\text{раб}} - k_b \cdot Q_{\text{1cp}} \cdot R_{\text{hour}}, \quad (2.29)$$

где k_b – коэффициент износа шаров на тонну измельченной руды, кг/т;

Q_{1cp} – средняя производительность мельницы, т/ч.

2.3.6 Зумпф

Измельченный продукт из мельницы попадает в зумпф – технологическую емкость для аккумуляции пульпы и разбавления ее водой до требуемой плотности. Расход пульпы из зумпфа обеспечивается центробежным насосом с частотно-регулируемым приводом (ЧРП), что характеризует зумпф как объект без самовыравнивания. Уравнение материального баланса для зумпфа будет иметь вид:

$$V_z(t) \frac{d\rho}{dt} = Q_{3'}(t) \rho_{3'}(t) + Q_{W3}(t) \rho_{W3} - Q_{3''}(t) \rho_{3''}(t), \quad (2.30)$$

где $Q_{3'}$, Q_{W3} , $\rho_{3'}$, ρ_{W3} – расходы и плотности потоков пульпы и воды соответственно, поступающих в зумпф;

$Q_{3''}, \rho_{3''}$ – расход и плотность пульпы, выкачиваемой насосом;

$V_z(t) = S_z \times h(t)$ – объем пульпы в зумпфе; S – площадь сечения зумпфа;

$h(t)$ – уровень пульпы в зумпфе:

$$S_z \frac{dh}{dt} = Q_{3'}(t) + Q_{W3}(t) - Q_{3''}(t). \quad (2.31)$$

Из (2.30) и (2.31) находим $\rho_{3''}(t), h(t)$.

Расход воды в зумпф Q_{W3} стабилизируется в автоматическом режиме ПИ-регулированием плотности пульпы, перекачиваемой насосом на классификацию, поэтому динамика изменения расхода воды зависит от характеристик подающего трубопровода и степени открытия регулирующего клапана, а также задания по требуемой плотности.

Уровень пульпы в зумпфе $h(t)$ стабилизируется в автоматическом режиме ПИ-регулированием угловой скорости вращения рабочего колеса насоса.

2.3.7 Трубопроводы

Целесообразно в модели учесть временные интервалы, требуемые для транспортировки пульпы или воды, для этого трубопровод смоделируем как звено транспортного запаздывания с постоянной времени:

$$\tau = \frac{l}{v} = \frac{l\pi d^2}{4Q_{cp}}, \quad (2.32)$$

где l – длина трубопровода, м;

v – скорость потока в трубе, м/с;

d – диаметр трубы, м;

Q_{cp} – усредненный расход, м³/ч.

2.3.8 Регулирующий клапан

Выражение, связывающее характеристики клапана с потоком жидкости через клапан, имеет вид [104]:

$$Q = N_1 F_p(x_{ref}) C_v(x_{ref}) \sqrt{\frac{\Delta p}{G_f}} \quad (2.33)$$

где $N_1 = 0,865$ – числовая константа при использовании единиц измерения:
расход – м³/ч, давление – бар;

$F_p(x_{ref})$ – коэффициент геометрии трубопровода;

$C_v(x_{ref})$ – коэффициент истечения клапана;

x_{ref} – степень открытия клапана, %;

Δp – разность давлений на входе и выходе клапана, бар;

G_f – удельный вес жидкости.

Следовательно, для реализации математической модели конкретного клапана достаточно аппроксимировать полиномом его заводские характеристики $F_p(x_{ref})$, $C_v(x_{ref})$. Динамику привода регулирующего клапана представим апериодическим звеном 1-го порядка.

2.3.9 Центробежный насос

Располагая номинальными характеристиками центробежного насоса и применив законы подобия, объемный расход насоса [105]:

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{\omega(x_{vfd})}{\omega_n} \quad (2.34)$$

где Q_n – номинальный расход насоса, м³/ч;

ω_n – номинальная угловая скорость вращения рабочего колеса насоса, с⁻¹;

Q – расход на выходе насоса при скорости ω , м³/ч;

x_{vfd} – задание преобразователю частоты (ПЧ) привода, %.

ПЧ настраивается с учетом нижнего ограничения по частоте, а именно диапазон регулирования угловой скорости ограничивается в пределах $\omega_0 \dots \omega_n$, где $\omega_0 \approx 0,4\omega_n$. Таким образом, задание $x_{vfd} = 0 \dots 100$ % масштабируется в диапазоне $\omega_0 \dots \omega_n$ угловой скорости. Динамику привода насоса представим апериодическим звеном 1-го порядка.

2.3.10 Вибрационные грохоты

В конструкцию устройства грохочения входят просеивающие поверхности – сита, на которые подается рудная пульпа Q_3 и вода W_4 . Сито имеет размер ячейки, подобранный в соответствии с технологией обогащения той или иной руды.

Фракции, своим размером превышающие размер ячейки, смываются обратно в мельницу с потоком Q_5 , а подрешетный продукт Q_4 идет на следующую стадию обогащения. Таким образом, идеальный аппарат грохочения отсеивает все фракции более мелкие, чем размер ячейки сит. Гранулометрический состав продукта Q_3 , поступающего на грохочение из зумпфа аналогичен составу Q_3 , полученному из выражений (2.17) - (2.20). Тогда в модели грохотов необходимо учесть возможность задания КПД установки $\eta_{screens}$ и размера ячеек сит d_{cell} . Тем самым, пересчитывая по выражениям (2.26) - (2.29) параметры потоков на выходе грохотов, получим упрощенную модель грохочения:

$$Q = Q_4 + Q_5, \quad (2.35)$$

$$Q = \frac{dM}{dt} = \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^n m_i, \quad (2.36)$$

$$Q_4 = \frac{dM}{dt} \sum_{i=1}^k (P_i \cdot \eta_{screens}), \quad d_k < d_{cell}, \quad (2.37)$$

$$Q_5 = \frac{dM}{dt} \left[\sum_{i=1}^k (P_i (1 - \eta_{screens})) + \sum_{i=k+1}^n P_i \right]. \quad (2.38)$$

2.3.11 Моделирование схемы измельчения

Имитационная модель цикла измельчения (см. Рисунок 2.18) собрана, в соответствии со схемой цепей аппаратов исследуемой апатито-нефелиновой секции измельчения.

Поток **Flow** продукта в любой точке схемы измельчения имитационной модели определяется как:

$$\mathbf{Flow} = (\rho, F_m, R, Q_m, W_m, Q_v, W_v, \mathbf{PSD}), \quad (2.39)$$

где ρ – плотность продукта, т/м³;

F_m, Q_m, W_m – массовые расходы продукта, твердой и жидкой фаз соответственно, т/ч;

R – разжижение по массе;

Q_v, W_v – объемные расходы твердой и жидкой фаз соответственно, м³/ч;

PSD – вектор распределения относительного содержания фракций со средним размером зерна $d_j, j=\overline{1, n}$ в твердой фазе по массе:

$$\mathbf{PSD} = (P_1, \dots, P_n). \quad (2.40)$$

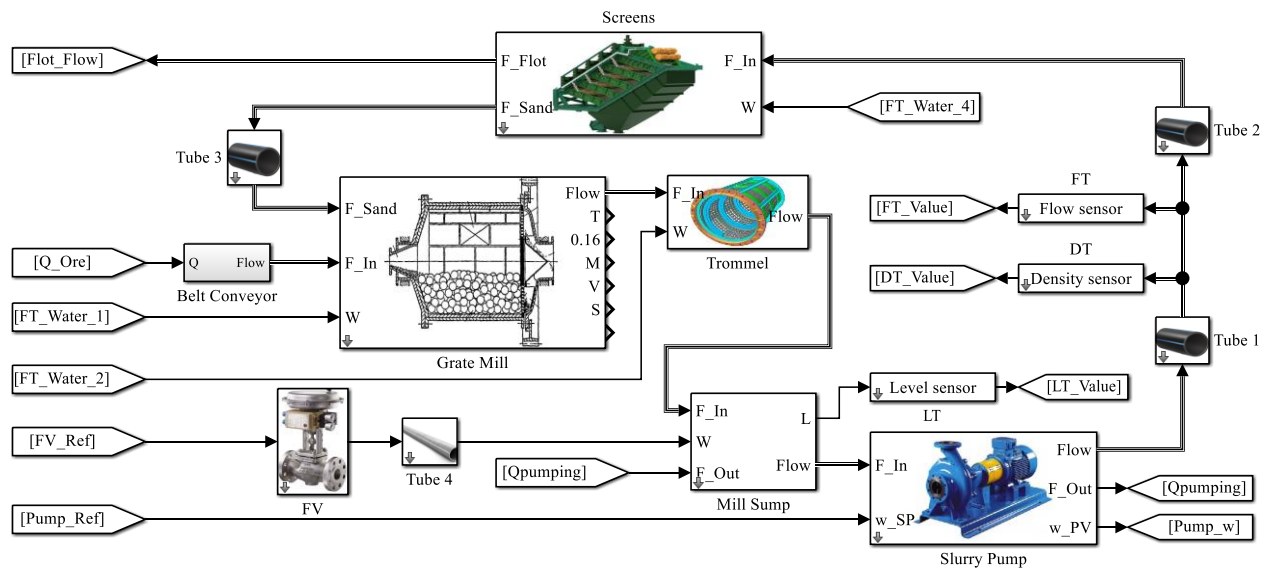


Рисунок 2.18 - Имитационная модель замкнутого цикла мокрого измельчения, включающая следующие узлы: шаровая барабанная мельница с решеткой (Grate Mill) и бутара (Trommel), зумпф слива мельницы (Mill Sump), шламочный центробежный насос (Slurry Pump), вибрационные грохоты (Screens), ленточный конвейер (Belt Conveyor), регулирующий клапан (FV), датчики (DT, FT, LT) и трубопроводы

Об относительной производительности мельницы и эффективности цикла измельчения в целом можно судить по циркулирующей нагрузке:

$$c = \frac{Q_5}{Q_1} \cdot 100\%. \quad (2.41)$$

2.4 Валидация модели измельчения в шаровой мельнице с решеткой

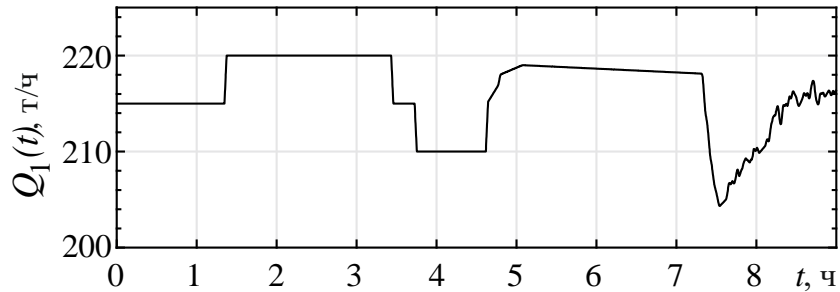
Для проверки адекватности имитационной модели реальному объекту управления необходимо провести процедуру валидации, а именно провести сравнительный анализ результатов расчета по модели с результатами физического эксперимента.

Результаты эксперимента Y_R сняты с комплекса измельчения апатито-нефелиновой руды с мельницей типа МШР 4,5х5,0 при задающем воздействии X постоянных (см. Таблица 2.5) и переменных в ходе эксперимента (см. Рисунок 2.19).

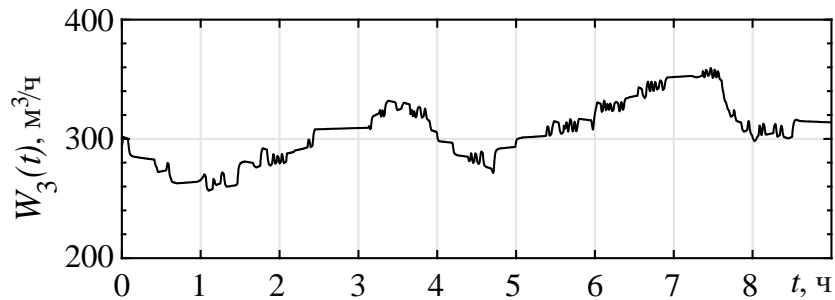
Результаты расчета Y_M получены моделированием в симуляторе при исходных данных и параметрах оборудования E (см. Таблица 2.6, Таблица 2.7, Таблица 2.8) и тех же задающих воздействиях X .

$$Y_M = f(X, E), \quad (2.42)$$

$$X = (Q_1, W_1, W_2, W_4, \rho_{3''SP}, L_{SP}). \quad (2.43)$$



а



б

Рисунок 2.19 - Задание производительности по исходной руде (а) и расход воды в зумпф (б) в ходе эксперимента

Таблица 2.5 - Постоянные задающие воздействия в ходе эксперимента

Параметр	Значение
Расход воды в загрузку мельницы W_1	14 м ³ /ч
Расход воды в бутару мельницы W_2	25 м ³ /ч
Расход воды на грохоты W_4	25 м ³ /ч
Плотность на классификацию $\rho_{3''SP}$	1525 кг/м ³
Уровень в зумпфе L_{SP}	1,7 м

Таблица 2.6 - Исходные данные моделирования

Параметр	Значение
Плотность рудных зерен ρ_z	2900 кг/м ³
Плотность материала шаров $\rho_{ш}$	7874 кг/м ³
Влажность исходной руды w_1	3 %
Молекулярная масса руды M	0,081 кг/моль
Энергетический барьер разрушения зерна $E_б$	9170 Дж/моль
Рабочий объем мельницы с новой футеровкой $V_{раб0}$	71 м ³
Радиус загрузочной цапфы a	0,5 м
Внутренняя длина цилиндрической части мельницы по футеровке l	5 м
Угловая скорость вращения мельницы ω	0,267 рад/с
Средний диаметр шара $d_{ш}$	0,09 м
Шаровое заполнение мельницы $\varphi_{ш}$	42 %
Объемная доля шаров в шаровой загрузке ϵ	0,6
Доля площади живого сечения разгрузочной решетки δ	0,2
Пробег мельницы R_{hour}	10000 маш-часов
Коэффициент износа футеровки k_1	0,0005 м ³ / маш-час
Коэффициент износа шаров на тонну измельченной руды k_b	5 кг/т
КПД грохотов $\eta_{screens}$	85 %
Размер ячейки грохотов d_{cells}	0,29 мм
Время измельчения в мельнице	2000 с
Объем зумпфа V_{zumpf}	24 м ³
Высота зумпфа h_{zumpf}	2,6 м
Номинальный расход насоса Q_n	1500 м ³ /ч
Номинальная частота насоса ω_n	900
Давление воды ВЗ	2 бар
Длина трубопровода 1, 2	15 м
Диаметр трубопровода 1, 2	0,5 м
Средний расход по трубопроводу 1, 2	600 м ³ /ч
Длина трубопровода 3	50 м
Диаметр трубопровода 3	0,5 м
Средний расход по трубопроводу 3	300 м ³ /ч
Длина трубопровода 4	10 м
Диаметр трубопровода 4	0,377 м
Средний расход по трубопроводу 4	300 м ³ /ч

Таблица 2.7 - Гранулометрический состав исходной руды

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
d_i , мм	25	10	5	1,6	1,1	0,58	0,45	0,32	0,2	0,16	0,1	0,071	0,040
P_i , %	1	17	30	30	10	10	2	0	0	0	0	0	0

Таблица 2.8 - Характеристики клапана FV (SOMAS VSS DN350)

x_{ref} , %	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$C_v(x_{ref})$	279	602	934	1427	2111	3230	4341	5020	4362
$F_p(x_{ref})$	1	1	0,99	0,99	0,99	0,97	0,95	0,93	0,95

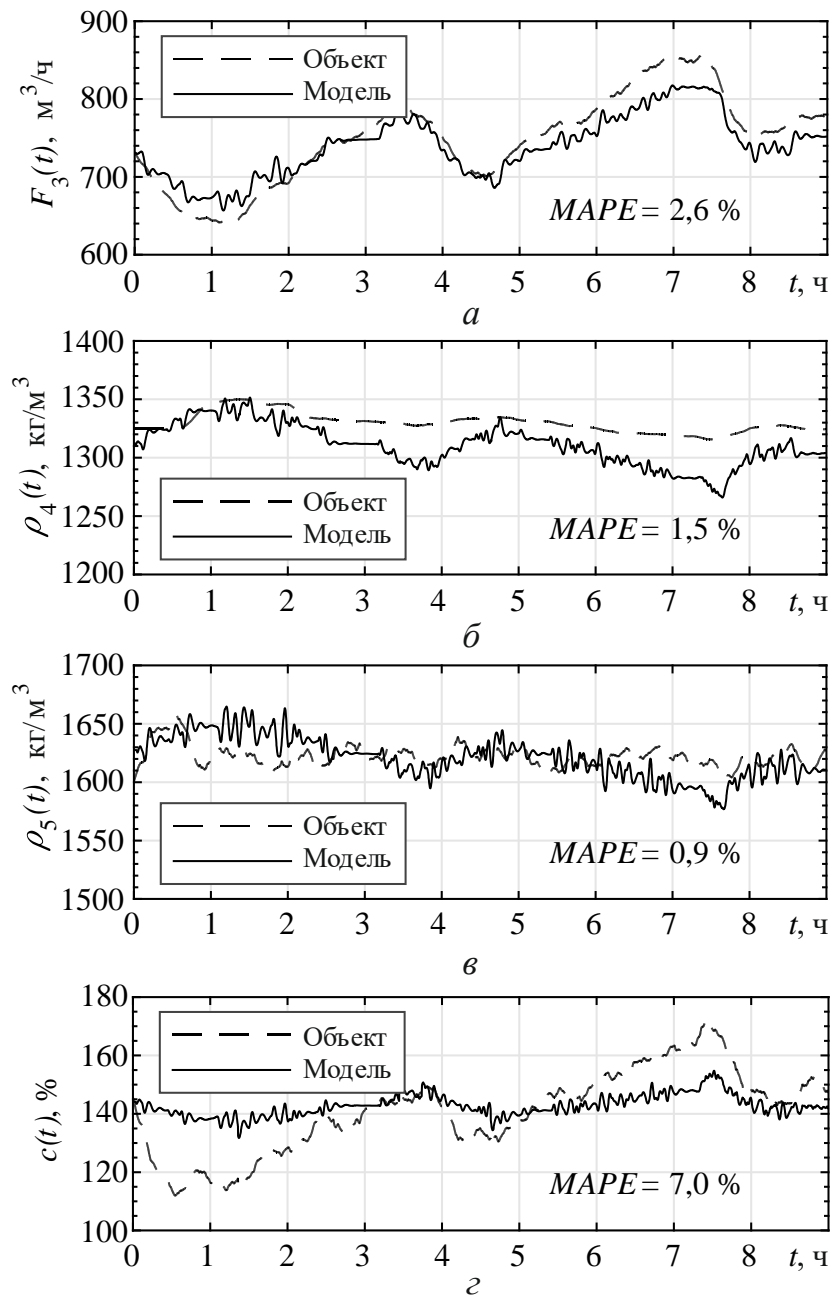


Рисунок 2.20 - Смоделированные и экспериментальные зависимости параметров ТП от времени: *a* – расход продукта на грохочение; *б* – плотность подрешетного продукта грохочения; *в* – плотность надрешетного продукта грохочения; *г* – циркулирующая нагрузка

Для определения насколько расчетная имитационная модель адекватна объекту исследования, характеристику качества моделирования оцениваем по величине средней абсолютной ошибки (mean absolute percent error) результатов Y_R и Y_M :

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \left(\frac{|y_{Ri} - y_{Mi}|}{y_{Ri}} \right) \cdot 100\%, \quad (2.44)$$

где n – число экспериментальных точек.

Поскольку расход продукта 3 и плотность продукта 4 контролируется средствами КИП, и так как процесс измельчения замкнутый, то сходимость модели по этим параметрам позволяет сделать вывод о точности моделирования материального баланса реального ТП (см. Рисунок 2.20, а, б).

По параметрам процесса, полученным промежуточными расчетами, а именно циркуляции и плотности продукта 4 состоятельность модели подтверждается (см. Рисунок 2.20, в, г).

Предложенная математическая модель проверена на адекватность в реальных условиях эксплуатации шаровой мельницы с разгрузкой через торцевую решетку на апатито-нефелиновой обогатительной фабрике. При этом максимальная средняя ошибка модели составляет $\approx 7\%$ от фактических значений (см. Рисунок 2.20, г), а точность полученной модели составила:

$$Accuracy = 100\% - MAPE_{MAX} = 93\% \quad (2.45)$$

Разработанная в Simulink библиотека блоков моделей динамических объектов имеет большой потенциал для динамического моделирования, оптимизации и управления схемами измельчения. Подробный анализ модели, собранной из блоков библиотеки, позволяет сделать ряд дальнейших выводов. Поскольку в режиме симуляции все переменные процесса легко доступны, то модель полезна для полного понимания динамического взаимодействия внутренних и внешних переменных контура измельчения. Так как в реальном процессе измерение некоторых переменных невозможно, очевидно, что динамическое моделирование может использоваться для ответа на многие гипотетические вопросы типа «что, если?» для схем промышленного измельчения.

2.5 Выводы по второй главе

Во второй главе рассмотрены особенности технологического процесса измельчения апатито-нефелиновых руд и математическое моделирование процесса в целом и структурных элементов по отдельности.

Разработана математическая модель параметра механической вибрации мельницы на нейронной сети, отличающаяся тем, что она адекватно отображает поведение объекта после ее обучения на данных, снятых при различных сценариях реальной эксплуатации мельницы. При этом точность модели составляет $\approx 72\%$. Предложенная математическая модель была проверена на адекватность в реальных условиях эксплуатации шаровой мельницы с разгрузкой через торцевую решетку на апатито-нефелиновой обогатительной фабрике.

Разработана математическая модель для внутримельничного заполнения шаровой мельницы с разгрузкой через торцевую решетку и контроля за перегрузом по расчетному параметру полной массы мельницы. Модель позволяет оценивать текущую массу пульпы внутри мельницы, учитывая нестационарность технических параметров агрегата измельчения.

Разработана имитационная модель 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.

Глава 3. Построение усовершенствованной системы управления процессом измельчения в шаровой мельнице с решеткой в замкнутом цикле

3.1 Используемые методы

3.1.1 Методы моделирования

В работе используется метод, предложенный компанией MathWorks, для решения комплекса задач проектирования системы управления на базе MATLAB и Simulink [106] – модельно-ориентированное проектирование (МОП). Метод имеет ряд преимуществ, во-первых, разработка модели, оптимизация системы управления и другие этапы проектирования происходят в единой среде, что позволяет значительно сократить время на разработку и повысить эффективность проектирования. Во-вторых, пакеты MATLAB и Simulink обеспечивают системный подход и возможность моделирования с различным уровнем детализации. Системное моделирование подразумевает в терминологии метода исполняемую спецификацию, а именно однозначные требования к системе. Удовлетворение спецификации является одной из главных задач модельно-ориентированного проектирования, а именно выполнение требований с учетом ограничений. В модельно-ориентированном проектировании процесс разработки сосредоточен вокруг системной модели – от фиксации и разработки технических требований до внедрения и тестирования [107]. Системная модель объекта управления уже разработана и оптимизирована ранее в MATLAB, теперь для построения системы управления необходимо разработать ее математическое описание и реализовать его средствами MATLAB.

3.1.2 Математическое описание подхода управления с прогнозирующей моделью

Прогнозирующая модель – модель объекта управления (ОУ) с дискретным временем формулируется в пространстве состояний при отсутствии возмущений $D_m = 0$, где нижний индекс m обозначает модель:

$$\begin{aligned}x_m(k+1) &= A_m x_m(k) + B_m u(k), \\y(k) &= C_m x_m(k),\end{aligned}\tag{3.1}$$

где $u(k)$ – вектор управляемых (входных) переменных, размерностью $p \times 1$; $y(k)$ – вектор выходных переменных, размерностью $q \times 1$; $x_m(k)$ – вектор переменных состояния, размерностью $n \times 1$. Здесь и далее под вектором понимается вектор-столбец. Выражая модель (3.1) в приращениях $\Delta x_m(k)$ и $\Delta u(k)$, получим расширенную модель для МИМО ОУ в пространстве состояний [108]:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + B\Delta u(k), \\y(k) &= Cx(k),\end{aligned}\tag{3.2}$$

$$A = \begin{bmatrix} A_m & o_{q \times n}^T \\ C_m A_m & I_{q \times q} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}, \quad C = [o_{q \times n} \quad 1],\tag{3.3}$$

где $I_{q \times q}$ – единичная матрица; $o_{q \times n}$ – нулевая матрица.

Далее в рассматриваемых алгоритмах прогнозирующего управления используется только расширенная модель ОУ (3.3).

Прогноз параметров ОУ рассчитывается в соответствии с заранее выбранным горизонтом прогнозирования N_p . При этом горизонт управления N_c выбирается меньше горизонта прогнозирования. Принимая k в качестве текущего момента времени, вектор будущей траектории управления определяется как:

$$\Delta U = [\Delta u(k) \quad \Delta u(k+1) \quad \dots \quad \Delta u(k+N_c-1)]^T,\tag{3.4}$$

переменные будущего состояния:

$$x(k+1), \quad x(k+2), \quad \dots, \quad x(k+N_p),\tag{3.5}$$

вектор будущих выходов, спрогнозированных в момент времени k :

$$Y = [y(k+1) \quad y(k+2) \quad \dots \quad y(k+N_p)]^T.\tag{3.6}$$

Преобразуя выражения (3.3–3.6), вектор будущих выходов компактно выражается следующим образом [109]:

$$Y = Px(k) + H\Delta U,\tag{3.7}$$

$$P = [CA \quad CA^2 \quad CA^3 \quad \dots \quad CA^{N_p}]^T,\tag{3.8}$$

$$H = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Цель прогнозирующего управления состоит в том, чтобы довести прогнозируемые выходные данные до желаемых значений (уставок). Эта цель достигается за счет решения задачи оптимизации: минимизации целевой функции J , которая состоит из ошибки между прогнозируемыми выходными данными и уставками R_s . Результатом оптимизации является управляющая последовательность ΔU .

Вектор уставок определяется как:

$$R_s = [I \ I \ \dots \ I]^T r(k) = \bar{R}_s r(k), \quad (3.10)$$

где I – единичная матрица размерностью $q \times q$, количество которых эквивалентно размеру горизонта прогноза N_p .

Целевая функция определяется как:

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T W \Delta U, \quad (3.11)$$

где $W = r_w I_{N_c \times N_c}$ – диагональная матрица весов для управляющих переменных размера $N_c \times N_c$, $r_w \geq 0$ – подстроечный коэффициент производительности управления. Матрица весов с низкими значениями подразумевает более быстрое управление, с высокими – более медленное управление.

Подставляя (3.7) в (3.11), получается выражение для J в виде квадратичной функции [110]:

$$\begin{aligned} J = & (R_s - Px(k_i))^T (R_s - Px(k_i)) - \\ & - 2\Delta U^T H^T (R_s - Px(k_i)) + \\ & + \Delta U^T (H^T H + W) \Delta U. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Задача оптимизации усложняется, так как необходимо учитывать операционные ограничения в формулировке алгоритма решения. В рамках поставленной задачи используются ограничения на управляющие переменные и

скорость их изменения. Для управления ОУ с двумя MV, то ограничения выражаются как:

$$u_1^{\min} \leq u_1(k) \leq u_1^{\max}, \quad (3.13)$$

$$u_2^{\min} \leq u_2(k) \leq u_2^{\max},$$

$$\Delta u_1^{\min} \leq \Delta u_1(k) \leq \Delta u_1^{\max}, \quad (3.14)$$

$$\Delta u_2^{\min} \leq \Delta u_2(k) \leq \Delta u_2^{\max},$$

или в матричном виде:

$$U(k)^{\min} \leq U(k) \leq U(k)^{\max}, \quad (3.15)$$

$$\Delta U(k)^{\min} \leq \Delta U(k) \leq \Delta U(k)^{\max}. \quad (3.16)$$

Для привязки ограничений к задаче прогнозирующего управления группируем (3.15) и (3.16), тогда выражение для линейных ограничений на управление может быть выражено как [111]:

$$M \Delta U \leq d, \quad (3.17)$$

где

$$M = \begin{bmatrix} -I_{p \times N_c} & I & -C_2 & C_2 \end{bmatrix}^T, \quad (3.18)$$

$$d = \begin{bmatrix} -\Delta U^{\min} \\ \Delta U^{\min} \\ -U^{\min} + C_1 u(k-1) \\ U^{\min} - C_1 u(k-1) \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} I_{p \times N_c} & I & \dots & I \end{bmatrix}_{1 \times N_c}^T, \quad (3.20)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} I_{p \times N_c} & 0 & \dots & 0 \\ I & I & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I & I & \dots & I \end{bmatrix}_{N_c \times N_c}. \quad (3.21)$$

В результате, функция цели (3.12) является квадратичной, а ограничения (3.17) являются линейными неравенствами, поэтому задача поиска оптимального прогнозирующего управления становится стандартной задачей квадратичного программирования (QP) [112]. Одним из наиболее простых методов решения

задачи QR, который приведет к простым процедурам при программировании [110], является первично-двойственным метод внутренней точки:

$$\min_{\lambda \geq 0} \left[\frac{1}{2} \lambda^T T \lambda + \lambda^T K + \frac{1}{2} d^T E^{-1} d \right], \quad (3.22)$$

где

$$T = ME^{-1}M^T, \quad (3.23)$$

$$K = d + ME^{-1}F. \quad (3.24)$$

Численное решение (3.22) вычисляется с помощью алгоритма квадратичного программирования Хилдрета основанного на поэлементном поиске оптимального решения, где вектор множителей Лагранжа λ определяется как:

$$\lambda_i^{m+1} = \max(0, w_i^{m+1}), \quad (3.25)$$

$$w_i^{m+1} = -\frac{1}{h_{ii}} \left[k_i + \sum_{j=1}^{i-1} h_{ij} \lambda_j^{m+1} + \sum_{j=i+1}^n h_{ij} \lambda_j^m \right]. \quad (3.26)$$

Оптимальное управление находится в виде

$$\Delta U = -E^{-1}(F + M^T \lambda), \quad (3.27)$$

где $E = 2(H^T H + W), \quad (3.28)$

$$F = -2H^T(R_s - Px(k)). \quad (3.29)$$

Таким образом, используемый MPC имеет следующую структуру (см. Рисунок 3.1), где $R(k)$ – задающее воздействие; $E(k)$ – ошибка регулирования; $U(k)$ – регулирующее воздействие; $Y(k)$ – регулируемая величина; $\hat{Y}(k)$ – прогнозируемая величина; $\hat{Y}(k + \eta | k)$ – прогнозируемая величина к моменту $k + \eta$, когда прогноз сделан в момент времени k ; $z^{-\eta}$ – задержка на время η ; k – итерация; N_c – горизонт управления; N_p – горизонт прогнозирования.

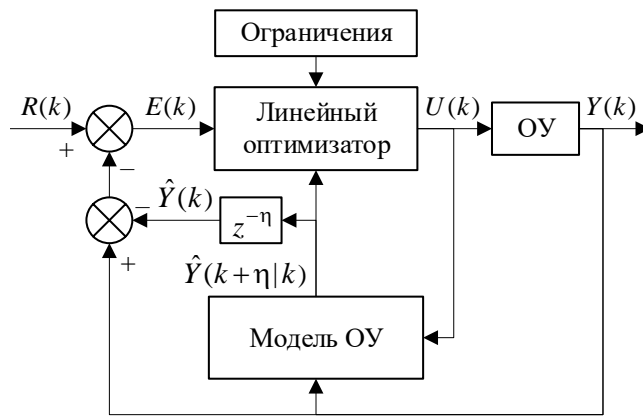


Рисунок 3.1 - Структурная схема MPC

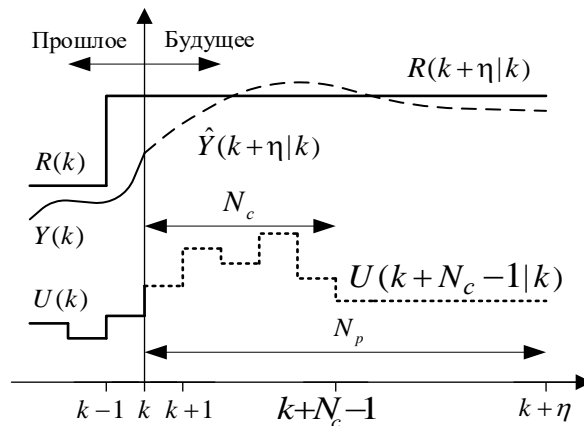


Рисунок 3.2 – Стратегия управления MPC

Стратегия подхода MPC (см. Рисунок 3.2) заключается в использовании математической модели объекта управления для получения прогноза $\hat{Y}(k)$ регулируемой величины $Y(k)$ на количество итераций, соответствующих горизонту прогнозирования N_p . Прогнозируемые значения $\hat{Y}(k)$ используются для расчета будущих регулирующих воздействий $U(k)$ (управляющей последовательности) путем минимизации целевой функции (3.12) с учетом ограничений на управляемые переменные. Управляющая последовательность рассчитывается таким образом, чтобы прогноз регулируемой величины приближался к задающему воздействию оптимальным образом в течение горизонта прогнозирования. Управляющая последовательность рассчитывается на всем интервале горизонта управления N_c , но только первое управляющее воздействие $U(k)=U(k|k)$ применяется для управления процессом. Остальные управляющие сигналы не применяются, потому что в следующий момент $k=k+1$ новый выход $Y(k+1)$ известен на основании новых

измерений. С началом нового цикла оптимизации остальные сигналы $U(N_c - 1 | k)$ управления используются для инициализации оптимизатора [108].

3.1.3 Оценки качества

Для оценки эффективности разработанных систем управления в замкнутом контуре с объектом управления по отношению к типовым системам управления использовались применяемые в мировой практике критерии [113], [114]:

- квадратичный интеграл от ошибки в замкнутой системе (Integral Squared Error, ISE):

$$ISE = \int_{t_1}^{t_2} (y_i(t) - y_{SP}(t))^2 dt, \quad (3.30)$$

где $y_i(t)$ – значение стабилизируемого параметра, $y_{SP}(t)$ – уставка стабилизируемого параметра, t_1, t_2 – время начала и конца расчета;

- относительное среднеквадратическое отклонение (Relative Standard Deviation, RSD):

$$RSD = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i(t) - y_{SP}(t))^2}{n-1}} \cdot \frac{100}{y_{SP}(t)}, \quad (3.31)$$

где n – общее количество точек данных;

- перерегулирование σ :

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100\%, \quad (3.32)$$

где y_{\max} – максимальное значение стабилизируемого параметра, $y(\infty)$ – установившееся значение стабилизируемого параметра.

3.2 Построение системы автоматического регулирования с прогнозирующей моделью для стабилизации плотности и уровня в зумпфе слива мельницы

3.2.1 Структура САР

Типовая схема автоматизации зумпфа слива мельницы в замкнутом цикле измельчения апатит-нефелиновой руды (см. Рисунок 3.3) включает в себя, технологическое оборудование – зумпф с трубной обвязкой, шламовый насос (P1),

электротехническое оборудование - преобразователь плотности (DT), преобразователь расхода воды (FT), преобразователь уровня (LT), регулирующий клапан (FV).

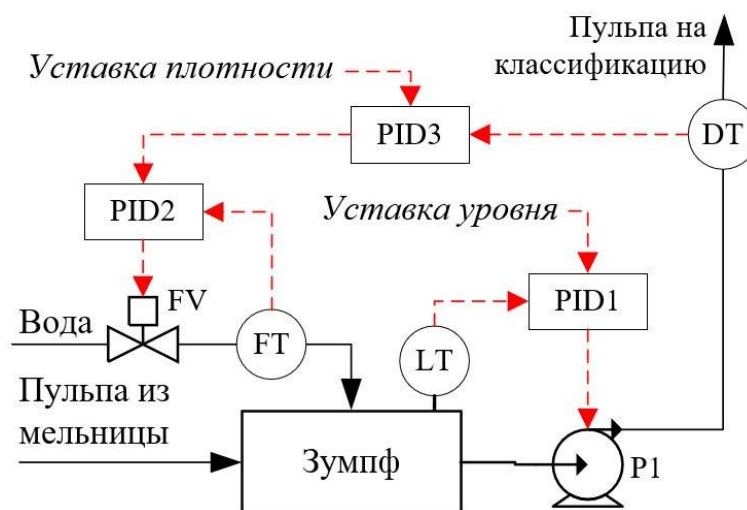


Рисунок 3.3 – Типовая схема автоматизации зумпфа слива мельницы

Плотность пульпы, подаваемой на классификацию, измеряется преобразователем плотности DT в диапазоне $1,0 - 1,7 \text{ т/м}^3$ и стабилизируется каскадным ПИД-регулированием PID2-PID3 в диапазоне $1,4 - 1,6 \text{ т/м}^3$, подачей воды в зумпф. Расход воды FT регулируется в диапазоне $100 - 500 \text{ м}^3/\text{ч}$ путем изменения степени открытия регулирующего клапана FV, установленного на линии подачи. Уровень пульпы в зумпфе LT стабилизируется ПИД-регулятором PID1 в диапазоне $1,5 - 2 \text{ м}$ путем изменения числа оборотов двигателя центробежного насоса P1 с частотно-регулируемым приводом в пределах $10 - 100 \%$.

На основании мировых практик применения MPC [42], [115], [27], [22], [23], [24], [25] выбраны перспективные схемы автоматизации [116] для рассматриваемой в работе системы управления (см. Таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Стратегии управления уровнем и плотностью

№	САР уровня	САР плотности
1	ПИД	ПИД
2	ПИД	MPC
3	ПИД	Адаптивный MPC
4	MIMO MPC	
5	MIMO адаптивный MPC	

Схема автоматизации стратегии управления №1 является типовой (см. Рисунок 3.1). Стратегии №2 и №3 с применением MPC являются схемами с одним входом и одним выходом – SISO (см. Рисунок 3.4), стратегии MPC №4, 5 являются схемами с несколькими входами и выходами – MIMO (см. Рисунок 3.5).

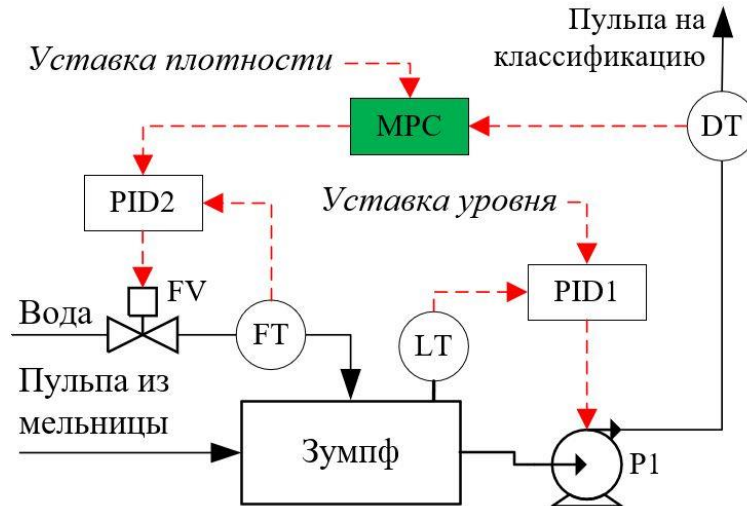


Рисунок 3.4 – Схемы автоматизации зумпфа слива мельницы – тип SISO

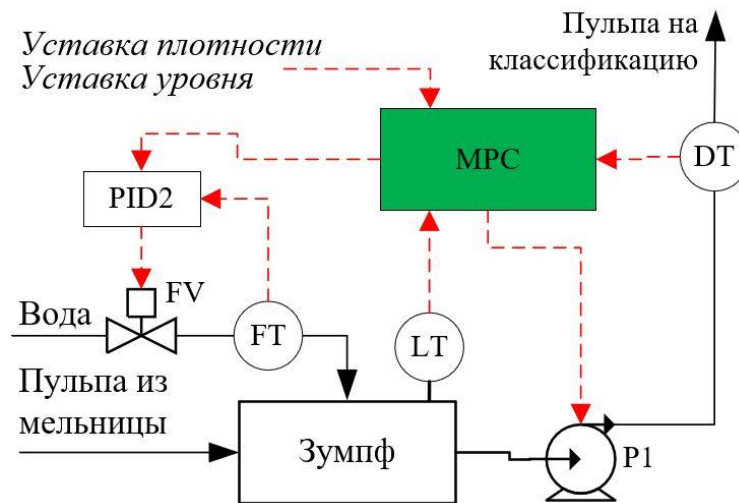


Рисунок 3.5 – Схемы автоматизации зумпфа слива мельницы – тип MIMO

Стратегии №3, 5 отличаются от №2, 4 наличием алгоритма адаптации, в котором соответствующая модель объекта управления линеаризуется в каждом контрольном интервале при текущих параметрах и обновляет прогнозную модель АМРС регулятора, тем самым учитывая изменения параметров объекта.

3.2.2 Прогнозирующая модель для САР

В зумпфе происходит смешение рудной пульпы и воды. Примем гидродинамический режим смешения за идеальный, а именно, что концентрации всех размерных фракций в пульпе равномерно распределены, соответственно, плотность пульпы одинакова по всему объему зумпфа. Уравнение материального баланса в таком случае имеет вид:

$$V \frac{d\rho_{out}}{dt} = Q_{in}\rho_{in} + Q_W\rho_W - Q_{out}\rho_{out}, \quad (3.33)$$

где Q_{in}, ρ_{in} – расход ($\text{м}^3/\text{ч}$) и плотность ($\text{т}/\text{м}^3$) пульпы из мельницы;

Q_W, ρ_W – расход ($\text{м}^3/\text{ч}$) и плотность ($\text{т}/\text{м}^3$) воды в зумпф;

Q_{out}, ρ_{out} – расход ($\text{м}^3/\text{ч}$) и плотность ($\text{т}/\text{м}^3$) пульпы на классификацию:

$$Q_{out} = Q_n \frac{\omega(u)}{\omega_n}, \quad (3.34)$$

Q_n, ω_n – номинальные расход ($\text{м}^3/\text{ч}$) и угловая скорость ($\text{рад}/\text{с}$) насоса;

u – задание преобразователю частоты привода насоса, %;

$V=Sh$ – объем пульпы в зумпфе, м^3 ;

S – площадь дна зумпфа, м^2 ;

h – уровень пульпы в зумпфе, м:

$$S \frac{dh}{dt} = Q_{in} + Q_W - Q_{out}. \quad (3.35)$$

На основе уравнений (3.33) $V \frac{d\rho_{out}}{dt} = Q_{in}\rho_{in} + Q_W\rho_W - Q_{out}\rho_{out}$, (3.33–3.35)

в Simulink построена имитационная модель со входами $Q_{in}, \rho_{in}, Q_W, \omega$ и выходами h, ρ_{out} (см. Рисунок 3.6).

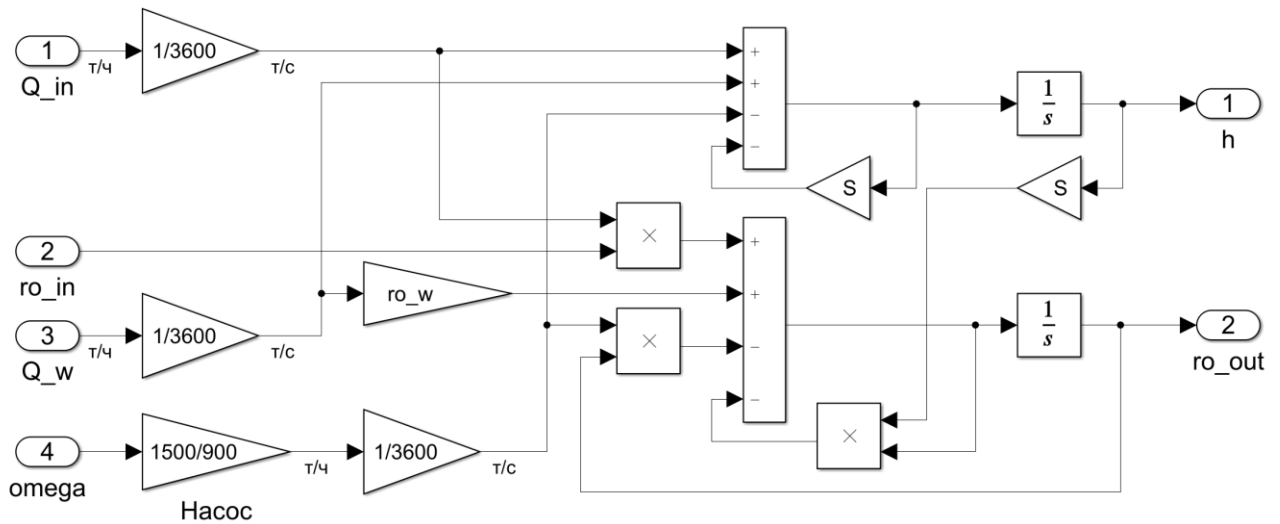


Рисунок 3.6 – Модель процесса перемешивания пульпы и воды в зумпфе слива мельницы в Simulink

3.2.3 Синтез САР в Matlab

Подход MPC подразумевает запись прогнозной модели объекта линейными дифференциальными уравнениями в форме переменных (пространстве) состояния. Тогда для использования модели объекта в качестве прогнозирующей модели необходимо найти матрицы A, B, C, D пространства состояний.

Для синтеза регуляторов SISO MPC примем, что в устойчивом состоянии уровень в зумпфе постоянен $V=const$, тогда:

$$Q_{in} + Q_w = Q_{out} \tag{3.36}$$

Уравнение материального баланса $(3.33V \frac{d\rho_{out}}{dt} = Q_{in}\rho_{in} + Q_w\rho_w - Q_{out}\rho_{out}$,

(3.33) с учетом (3.36):

$$V \frac{d\rho_{out}}{dt} = Q_{in}\rho_{in} + Q_w\rho_w - (Q_{in} + Q_w)\rho_{out} \tag{3.37}$$

Линеаризуем в рабочей точке при $V = 8 \text{ м}^3$ и начальных условиях:

$$Q_{in0} = 300 \text{ м/ч}, \rho_{in0} = 1,8 \text{ м/м}^3, Q_{w0} = 250 \text{ м/ч} \tag{3.38}$$

Тогда $\rho_{out} = 1,44 \text{ т/м}^3$, а матрицы для записи модели объекта управления с входами Q_{in}, ρ_{in}, Q_w и выходом ρ_{out} в пространстве состояний:

$$A = \frac{-(Q_{in} + Q_W)}{3600 \cdot V} = -0,0191,$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\rho_{in} - \rho_{out}}{3600 \cdot V} & \frac{Q_{in}}{3600 \cdot V} & \frac{\rho_W - \rho_{out}}{3600 \cdot V} \end{bmatrix} = [1,263e-05 \quad 0,01042 \quad -1,515e-05],$$

$$C = 1, D = [0 \quad 0 \quad 0]. \quad (3.39)$$

Для синтеза регуляторов МИМО МРС преобразуем (3.33)

$$V \frac{d\rho_{out}}{dt} = Q_{in}\rho_{in} + Q_W\rho_W - Q_{out}\rho_{out}, \quad (3.33) \text{ с учетом } Q_{in} = Q_{out} - Q_W \text{ и (3.34):}$$

$$V \frac{d\rho_{out}}{dt} = \left(\frac{Q_H}{\omega_H} \omega - Q_W \right) \rho_{in} + Q_W \rho_W - \frac{Q_H}{\omega_H} \omega \rho_{out}. \quad (3.40)$$

Преобразуем (3.35) с учетом (3.34):

$$S \frac{dh}{dt} = Q_{in} + Q_W - \frac{Q_H}{\omega_H} \omega. \quad (3.41)$$

Линеаризуем модель с входами Q_{in} , ρ_{in} , Q_W , ω и выходами ρ_{out} , h в начальной рабочей точке при условиях (3.38), $S = 4 \text{ м}^2$, $\omega = 330 \text{ рад/с}$ и параметрами насоса $Q_H = 1500 \text{ т/ч}$, $\omega_H = 900 \text{ рад/с}$, тогда $\rho_{out} = 1,44 \text{ т/м}^3$, $h = 1 \text{ м}$, а матрицы A, B, C, D:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{Q_H \omega}{3600 \cdot \omega_H S h} & -\frac{\frac{Q_H}{\omega_H} \omega (\rho_{in} - \rho_{out}) - Q_W (\rho_{in} - \rho_W)}{3600 \cdot S h^2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0382 & -1,39e-04 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{(\frac{Q_H}{\omega_H} \omega - Q_W)}{3600 \cdot S h} & \frac{\rho_W - \rho_{in}}{3600 \cdot S h} & \frac{Q_H (\rho_{in} - \rho_{out})}{3600 \cdot \omega_H S h} \\ \frac{1}{3600 \cdot S} & 0 & \frac{1}{3600 \cdot S} & -\frac{Q_H}{3600 \cdot \omega_H S} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0,0208 & -5,556e-05 & 4,167e-05 \\ 6,944e-05 & 0 & 6,944e-05 & -1,157e-04 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.42)$$

Полученные модели объекта в пространстве состояний с матрицами (3.39, 3.42) дискретизированы с шагом $T_s = 0,5 \text{ с}$ для их использования в качестве прогнозирующих моделей в соответствующих алгоритмах стратегий с МРС. Для

стратегий управления с адаптивным MPC, алгоритм адаптации модели в Simulink разработан отдельной функцией (см. Рисунок 3.7), (см. Приложение 1).

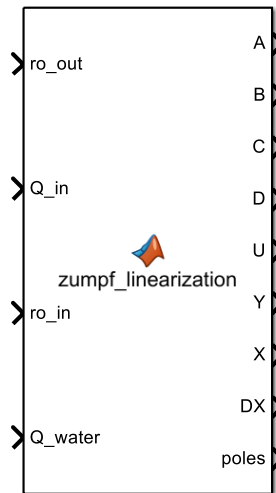


Рисунок 3.7 – Блок в Simulink для функции линейаризации и дискретизации модели объекта управления

Функция выполняет процедуру линейаризации и дискретизации модели объекта на каждом временном шаге. Выходом блока, выполняющего данную функцию, являются матрицы A, B, C, D.

Регуляторы MPC и AMPC реализованы в среде Simulink в виде библиотечных блоков «MPC Controller» и «Adaptive MPC Controller». Блок «Adaptive MPC Controller» отличается только наличием входа с параметрами прогнозной модели. Для стратегий с SISO MPC на вход MO (measurement output) подается измеренный сигнала плотности пульпы, выходящей из зумпфа, на вход Ref (reference) – задание плотности, на выходе MV (manipulated value) – управляющий сигнал расхода воды в зумпф. Для стратегий с MIMO MPC: MO – выходная плотность и уровень, Ref – задание плотности и уровня, MV – расход воды в зумпф (MV1) и угловая скорость насоса (MV2).

Входные/выходные сигналы MO и MV блоков преобразуются в безразмерные величины путем ввода масштабных коэффициентов в соответствии с диапазонами измерения. В настройках MPC учтены ограничения выходных переменных, связанные с технологией процесса: расход воды в зумпф не должен быть ниже $100 \text{ м}^3/\text{ч}$, а угловая скорость насоса не ниже 150 рад/с . Также введены ограничения

на скорость изменения выходных сигналов: расход воды в зумпф $\pm 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ в секунду, угловая скорость насоса $\pm 100 \text{ рад/с}$ в секунду.

Дальнейший синтез оптимального МРС заключается в определении управляющего горизонта, горизонта прогноза и весовых коэффициентов управляемых переменных. Matlab располагает пользовательским интерфейсом приложения «MPC Designer» для эффективной настройки МРС. Уменьшение весов выходных переменных способствует более высокой робастности и устойчивости контроллера, но меньшей агрессивности и скорости. Для большей эффективности горизонт прогноза должен быть больше времени установления процесса [117]. Горизонт управления не должен быть больше горизонта прогнозирования. Оптимальные настройки МРС определялись путем построения графиков отклика модели, варьируя веса, горизонты управления и прогнозирования.

Чтобы приблизить тестирование САР к реальным условиям, коэффициенты ПИД-регуляторов уровня и плотности выбраны так, как они настраиваются на аналогичном реальном объекте при эксплуатации АСУТП секции измельчения апатит-нефелиновой фабрики АНОФ-2 КФ АО «Апатит» (см. Таблица 3.2).. На реальном объекте применяется ПИ-регуляторы с параллельной структурой и обратным действием, передаточная функция которых:

$$W_p(s) = K_p + \frac{1}{T_i s} \quad (3.43)$$

Таблица 3.2 – Настройки регуляторов для САР

Стратегия	Регулятор	K_p	$T_i, \text{с}$	$T_d, \text{с}$	$N_u, \text{с}$	$N_p, \text{с}$	Вес MV1	Вес MV2
PID-PID	ПИД уровня	0,6	40	0	-	-	-	-
	ПИД плотности	0,3	180	0	-	-	-	-
PID-MPC, PID-AMPC	ПИД уровня	0,6	40	0	-	-	-	-
	MPC плотности	-	-	-	10	100	0,01	-
MIMO MPC, MIMO AMPC	MPC уровня и плотности	-	-	-	2,5	100	0,01	0,05

В Simulink моделях САР учтена ожидаемая нестабильность датчиков, поэтому добавлены шум измерений параметров уровня и плотности, а также динамика программной обработки сигналов. Модель шума аналоговых датчиков – случайный сигнал, имеющий нормальное распределение с дисперсией 0,0005, со временем

дискретизации 20 с. Программная фильтрация зачастую осуществлена с помощью стандартных блоков библиотеки ПЛК, описываемых передаточной функцией апериодического звена первого порядка. Передаточные функции для фильтров аналогового сигнала уровня (W_1) и плотности (W_2) (данные АНОФ-2 КФ АО «Апатит»):

$$W_1(s) = \frac{1}{10s + 1}, \quad W_2(s) = \frac{1}{20s + 1}. \quad (13)$$

Также учтены возможные колебания входных переменных Q_{in}, ρ_{in} . Для расхода амплитуда гармонических колебаний $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ с периодом 100 с, для плотности $0,05 \text{ т}/\text{м}^3$ и периодом 200 с.

3.2.4 Тестирование САР

Общий сравнительный анализ рассматриваемых стратегий управления был сосредоточен на трех основных областях. В первую очередь, это динамический отклик каждой САР при изменениях уставки плотности выходного продукта. Во-вторых, это отклик на изменение уставки по второму управляемому параметру – уровню, и, в-третьих, возможности подавления стационарных помех каждой стратегией и возмущений по параметру входной плотности. Сводная статистика была рассчитана по каждому из этих экспериментов с разработанными моделями.

Рассматриваемые САР в замкнутом контуре с моделью объекта управления смоделированы при изменении уставки плотности представлены (см. Рисунок 3.8). В установившемся режиме изменялась уставка плотности с $1,4 \text{ т}/\text{м}^3$ до $1,5 \text{ т}/\text{м}^3$ в момент времени 100 с, при этом учитывались возмущения и случайные шумы по контролируемым и неконтролируемым величинам на протяжении всего времени моделирования – 600 с.

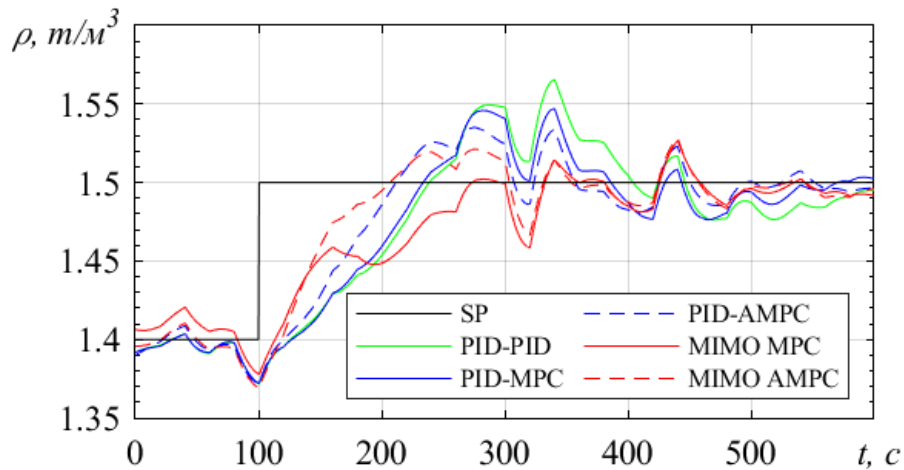


Рисунок 3.8 – Реакция системы на изменение задания плотности

Таблица 3.3 - Статистическая эффективность различных стратегий управления на изменение задания плотности (на основе моделирования)

Стратегия	Критерии оценки		
	ISE	RSD, %	σ , %
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

Сравнивая оценки качества регулирования (см. Таблица 3.3), отмечаем, что, во-первых, наилучший результат по всем критериям показала стратегия многофакторного адаптивного управления с прогнозирующей моделью (MIMO AMPC). Во-вторых, становится очевидным, что ПИД-регулирование менее точное ($ISE = 1,059 \%$), чем стратегии с применением MPC ($ISE = 0,520 \%$). Также видно, что стратегии адаптивного MPC имеет незначительное преимущество над MPC с не обновляемой прогнозирующей моделью, а MIMO стратегии имеют преимущество над SISO.

Результаты первого опыта подтверждают результаты моделирования при изменении уставки уровня в установившемся состоянии с 2 м до 2,2 м в момент времени 100 с (см. Рисунок 3.9).

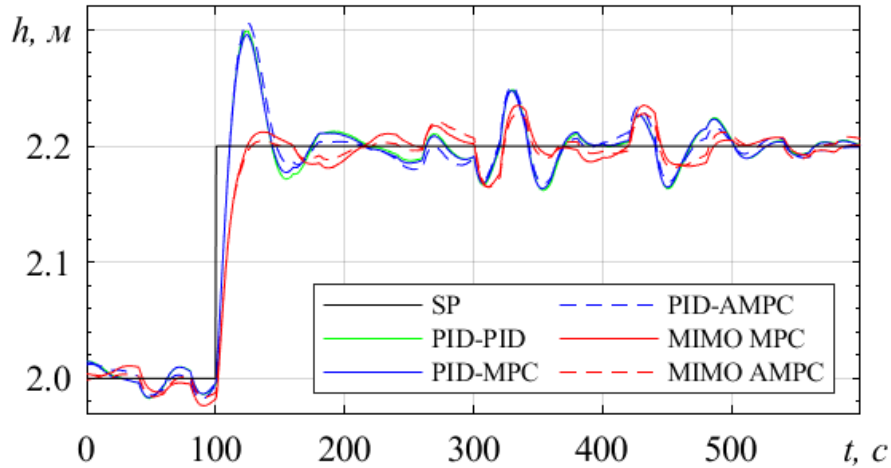


Рисунок 3.9 – Реакция системы на изменение задания уровня

Таблица 3.4 - Статистическая эффективность различных стратегий управления на изменение задания уровня (на основе моделирования)

Стратегия	Критерии оценки		
	ISE	RSD, %	σ , %
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

Отметим, что первые три стратегии имеют в своем составе ПИД-регулятор уровня поэтому динамика и их оценки качества (см. Таблица 3.4) близки ($ISE = 0,625\%$; $0,511\%$; $0,466\%$). MIMO управление по критериям ISE и RSD соразмерны с остальными стратегиями, но учитывая показатели перерегулирования, системы с ПИД регуляторами ($\sigma = 4,513\%$; $4,352\%$; $4,828\%$) значительно уступают MIMO управлению ($\sigma = 1,598\%$; $1,272\%$).

Третий эксперимент заключался в моделировании САР при возмущениях в виде скачка плотности продукта на входе в зумпф, что зачастую является причиной вывода процесса из установившегося режима на реальном объекте. В данном опыте в момент времени 100 с изменялась плотность входного продукта с $1,8 \text{ т/м}^3$ до $1,65 \text{ т/м}^3$ (см. Рисунок 3.10).

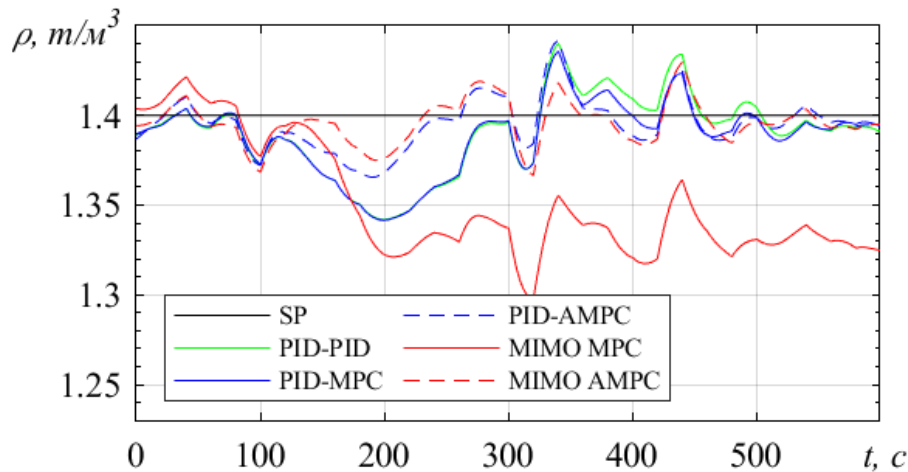


Рисунок 3.10 – Реакция системы на возмущающее воздействие – изменение плотности пульпы на входе в зумпф

Таблица 3.5– Статистическая эффективность различных стратегий управления на возмущение по входной плотности (на основе моделирования)

Стратегия	Критерии оценки		
	ISE	RSD, %	σ , %
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

В данном опыте адаптивные MPC имеют наилучшие показатели $ISE = 0,206\%$; $0,158\%$ для SISO и MIMO соответственно (см. Таблица 3.5). Как и ожидалось ПИД-регулирование менее точно, чем MPC. Выяснилось, что MIMO MPC без адаптации модели в данном случае имеет статическую ошибку и не удовлетворяет своим качеством управления для использования. Возможно такое поведение MPC характерно, когда прогнозирующая модель регулятора настроена в определенной рабочей точке при соответствующих возмущениях, и в данном случае для MIMO регулятора отклонение от рабочей точки способствует эффективному решению оптимизационной задачи MPC только для параметра уровня, что касается второго параметра – плотности, то наблюдается ощутимое статическое отклонение от уставки.

Результаты моделирования (см. Рисунок 3.8, Рисунок 3.9, Рисунок 3.10) представляют собой компиляцию индивидуальных характеристик для каждой из

рассмотренных стратегий управления с использованием максимально приближенной модели типичного производственного процесса. 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 3.3); 2) $0,361 < 0,625$ (см. Таблица 3.4); 3) $0,158 < 0,468$ (см. Таблица 3.5). 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. Каждая из этих стратегий MPC за исключением MIMO MPC без адаптации будет приемлемой для стабилизации плотности и уровня в зумпфах и аналогичных аппаратах обогащения минерального сырья.

3.3 Построение системы автоматического управления объемным заполнением шаровой мельницы материалом

3.3.1 Структура САУ

Разработанный блок САУ объемным заполнением шаровой мельницы материалом включает в себя (см. Рисунок 3.11):

- регулятор с прогнозирующей моделью и наблюдателем возмущений;
- алгоритм контроля за перегрузом – алгоритм сравнивает рассчитанный моделью текущий параметр массы внутримельничного заполнения со значением, установленным во время наладки уставками, в случае превышения алгоритм ограничивает выход MPC;
- задание производительности для САУ;
- виртуальный анализатор – модель объекта управления, учитывающая показатели процесса измельчения в текущей рабочей точке и учитывающая возмущающие воздействия для формирования параметров качества измельчения, контроля за перегрузом мельницы;
- САУ может работать как в автоматическом, так и в ручном режимах, когда работает только САУ производительности подающего конвейера-питателя.

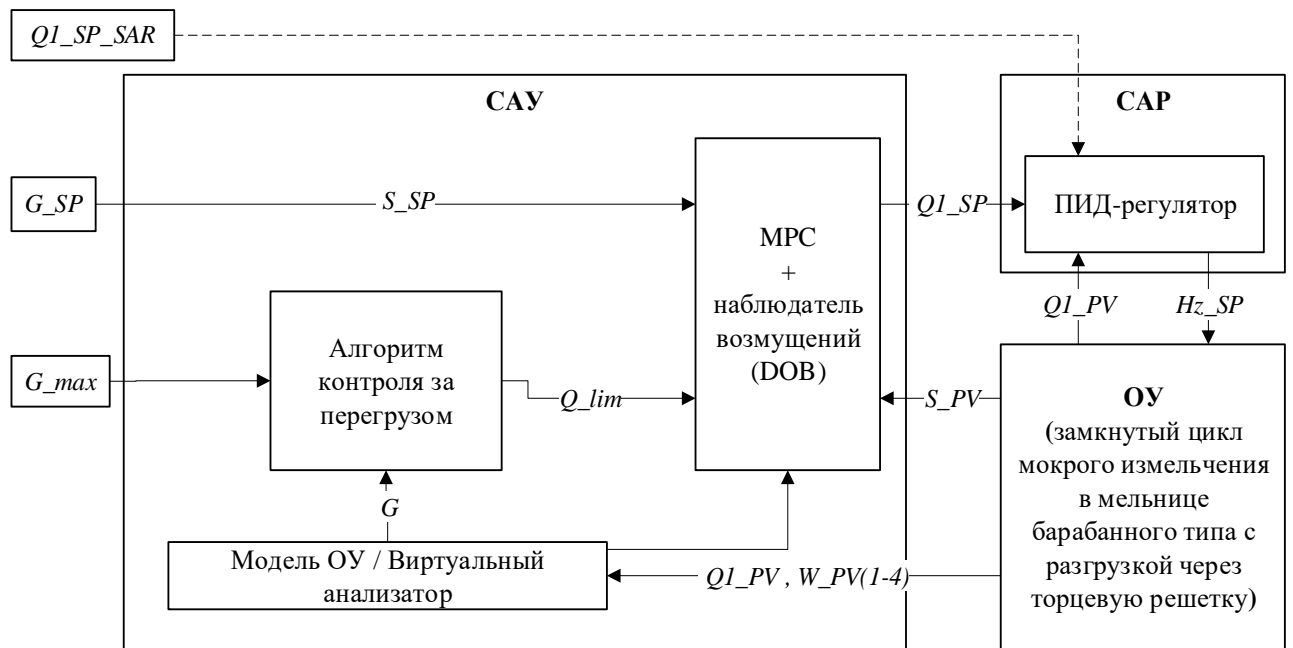


Рисунок 3.11 - Структурная схема разработанной системы управления электроприводом подачи сырья в мельницу

Стабилизация параметра объемного заполнения мельницы измельчаемым материалом реализуется путем обеспечения соответствующего соотношения жидкого и твердого, управляя приводом конвейера подачи руды в мельницу. Приводом управляет САР, которая формирует управляющее воздействие Hz_SP на частотный преобразователь привода и обрабатывает сигнал производительности конвейера QI_PV . САР может работать обособлено (ручной режим работы САУ) по жесткому заданию производительности и в контуре САУ, когда задание формируется регулятором МРС (см. Рисунок 3.11).

3.3.2 Виртуальный анализатор перегруза

Управление объемным заполнением мельницы по параметрам вибрации, мощности имеет достаточно противоречивый характер из-за возможного перегруза мельницы при высоких производительностях [118]. Это связано с тем, что перегруз наступает раньше, чем система по данным параметрам определит перегруз. Используя датчики вибрации, очень важно на аппаратном уровне настроить их на верный полезный частотный диапазон, который имеет тенденцию изменяться в ходе эксплуатации [119], [120]. Также из-за сильной зашумленности аналоговый сигнал вибрации поддается сильной программной фильтрации – фильтрами с

большим временем фильтрации. Выделение полезного сигнала активной мощности привода мельницы также может стать проблемой при эксплуатации. Изменение мощности за контрольный временной промежуток при работе с высокой производительностью выявит перегруз только, когда мельница уже находится в центрифужном режиме. В связи с этими недостатками контроля перегруза по параметрам вибрации и мощности, предлагается использовать виртуальный анализатор (VA, ВА) перегруза – модель для прогнозирования массы измельчаемого материала внутри мельницы для оперативного формирования ограничений регулятору системы управления объемным заполнением.

Для синтеза оптимального корректирующего динамического элемента сложно предложить обобщенную универсальную методику [121], поэтому предложена модель ВА, основанная на системе уравнений из [91], сформулированной по физическим принципам измельчения. Учитывая, принятые в модели измельчения допущения, решение уравнения материального баланса позволит определить плотность пульпы в мельнице и рассчитать ее массу G . 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 :

$$f(Q_1, W_1, W_2, W_3, W_4, R, t) = G \rightarrow Q_{\max}. \quad (3.44)$$

В данной работе ВА дополняет структуру САУ и формирует ограничения производительности Q_{\max} для MPC в момент достижения заранее заданного критического значения массы материала в мельницы G_{\max} , установленного на основании опытно-промышленной эксплуатации.

3.3.3 Регулятор объемного заполнения

Для управления параметром объемного заполнения мельницы разработан регулятор с прогнозирующей моделью (MPC) и наблюдателем возмущений (см. Рисунок 3.12).

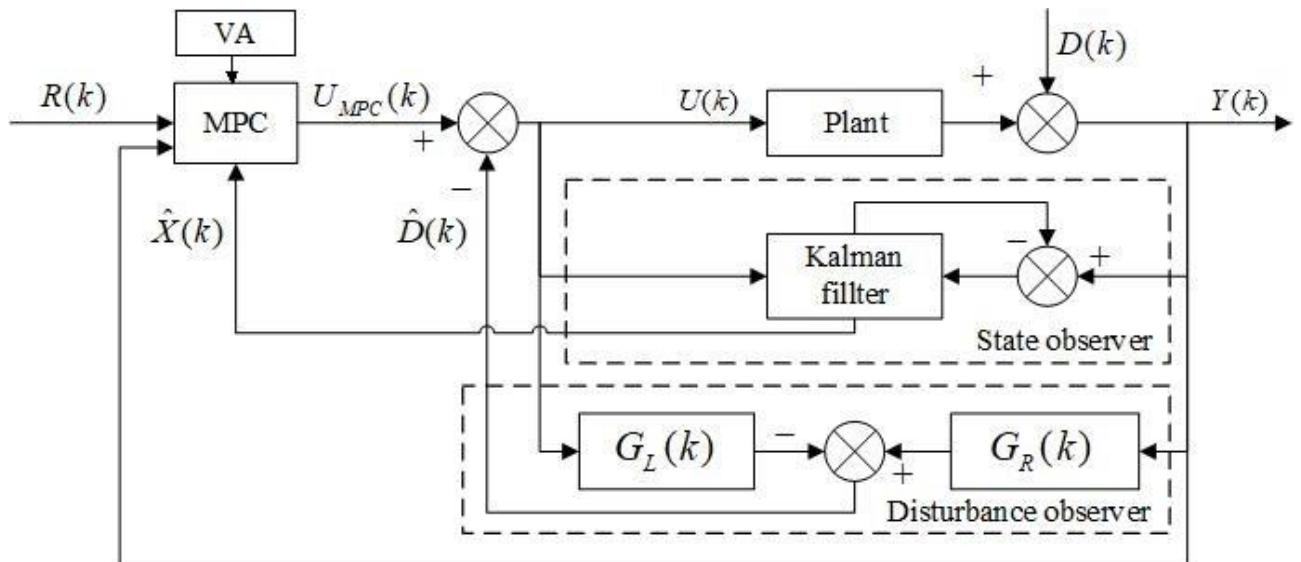


Рисунок 3.12 – Структурная схема регулятора

В качестве прогнозирующей модели используется линейная модель объекта управления (ОУ) с временной задержкой τ :

$$G_n(s) = g_n(s)e^{-\tau s}, \quad (3.45)$$

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

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B\Delta u(k - \tau_k), \\ y(k) &= Cx(k), \end{aligned} \quad (3.46)$$

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, τ_k – целая часть от τ/T_s .

Оптимизационная задача квадратичного программирования для поиска оптимальной управляющей последовательности решается численным методом Хилдрета (см. раздел 3.4.1), в которой учитываются линейные ограничения на входные переменные:

$$u^{\min} \leq u(k) \leq u^{\max}, \quad (3.47)$$

$$\Delta u^{\min} \leq \Delta u(k) \leq \Delta u^{\max}, \quad (3.48)$$

где u^{\min} , u^{\max} , Δu^{\min} , Δu^{\max} – минимум, максимум, минимальное и максимально приращение входной переменной. Учитывая рекомендации [122], 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:

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + K_{ob}(y(k) - C\hat{x}(k)). \quad (3.49)$$

Весовая матрица K_{ob} наблюдателя находится методом размещения полюсов [122].

Особенность алгоритма управления заключается в применении наблюдателя возмущений (DOB) [11], [12] в качестве компенсации как внешних возмущений, так и связанных с несоответствием модели. Для этого действующие внешние возмущения оцениваются следующим образом:

$$\hat{D}(s) = G_R(s) - G_L(s) = H(s)g_n^{-1}(s)Y(s) - H(s)e^{-\tau s}U(s), \quad (3.50)$$

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

Регулятор со структурой (см. Рисунок 3.12) реализован в виде программного кода для ПЛК на языках стандарта МЭК 613168-3 (см. раздел 3.3). Программа требует до 120 Кбайт памяти для хранения переменных, 150 Кбайт для кода и поддерживает модели до 4 входов (MV) и 4 выходов (CV) при максимальных горизонтах прогнозирования и управления – 200 и 4 соответственно.

3.3.4 Тестирование САУ

Для тестирования предлагаемой САУ используется ранее разработанная имитационная модель комплекса измельчения в разделе 2.

Экспериментальная часть проведена с использованием ПЛК Schneider Electric Modicon M580, программируемого в среде Unity Pro XL. Тестирование САУ на ПЛК было проведено в реальном времени в контуре с Simulink-моделью мельницы посредством Modbus OPC сервера для обмена данными между PC и PLC (см. Рисунок 3.13).

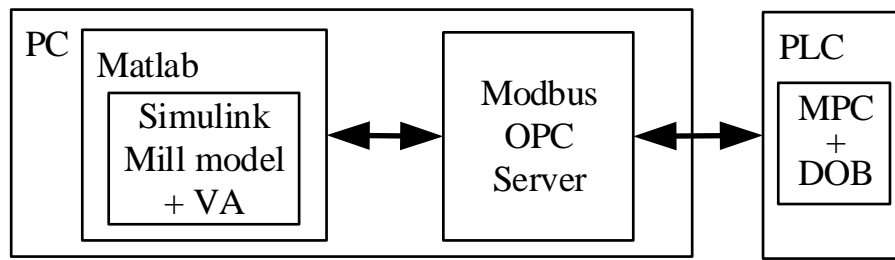


Рисунок 3.13 – Структура экспериментальной установки

Для оценки эффективности САУ использовались квадратичный интеграл от ошибки в замкнутой системе ISE (3.30), относительное среднеквадратическое отклонение RSD (3.31), и перерегулирование σ (3.32).

Эксперименты №1, 2, 3, 5 проводились с учетом случайных шумов по контролируемым величинам и их программной фильтрации на протяжении всего времени моделирования. Регулятор MPC используется максимально простой структуры SISO: CV – вибрация мельницы, %; MV – производительность мельницы, т/ч; горизонт прогнозирования $N_p = 200$; горизонт управления $N_c = 3$; вес для MV = 0,005; ограничение $Q_{max} = 250$ т/ч. В ПЛК блок MPC вызывается один раз в секунду. Прогнозирующая модель требуемого качества получена методами линейной теории управления, а именно аппроксимацией ОУ линеаризованной моделью более низкого порядка [123]. Время задержки по каналу производительность-вибрация для модели составляет 10 мин. Передаточная функция для фильтра наблюдателя возмущений:

$$H(s) = \frac{1,1}{100s^2 + 5s + 1}. \quad (3.51)$$

Непосредственное описание реализации подхода прогнозирующего управления с наблюдателем возмущений на ПЛК рассмотрены в разделе 3.4 и Приложении 2.

Исходные данные для симуляции модели примем из Таблица 2.5, Таблица 2.6, Таблица 2.7, Таблица 2.8.

а) Эксперимент №1 – стабилизация шума при изменении уставки (SP) с 16 % до 11 % в момент $t = 500$ с, без внешних возмущений. Результаты и эффективность

моделирования всех САУ представлены соответственно на Рисунок 3.14 и в Таблица 3.6.

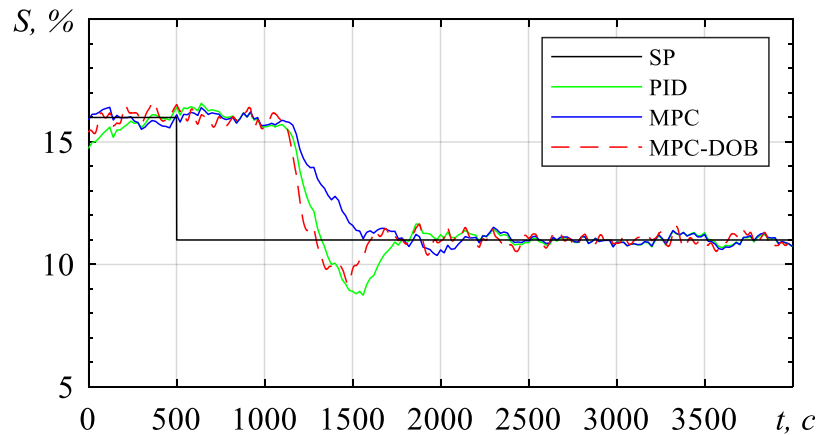


Рисунок 3.14 – Эксперимент №1: результаты моделирования

Таблица 3.6 - Статистическая эффективность стратегий управления на изменение уставки (на основе моделирования)

Подход управления	Критерии качества		
	ISE	RSD, %	σ , %
PID	5154,3	11,925	20,460
MPC	6026,3	12,894	5,748
MPC-DOB	4432,4	11,062	16,209

PID регулирование имеет нежелательное перерегулирование ($\sigma = 20,460\%$) в момент $t = 1500$ с, 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. Как видно из результатов, DOB не дает решающее преимущество при отсутствии возмущений.

б) Эксперимент №2 – стабилизация шума при изменении уставки (SP) с 16 % до 11 % в момент времени 500 с, при воздействии синусоидальных возмущений с амплитудой 0,8 %, периодом 900 с на протяжении всего времени моделирования – 4000 с. Результаты и эффективность моделирования всех САУ представлены соответственно на Рисунок 3.15, Таблица 3.7.

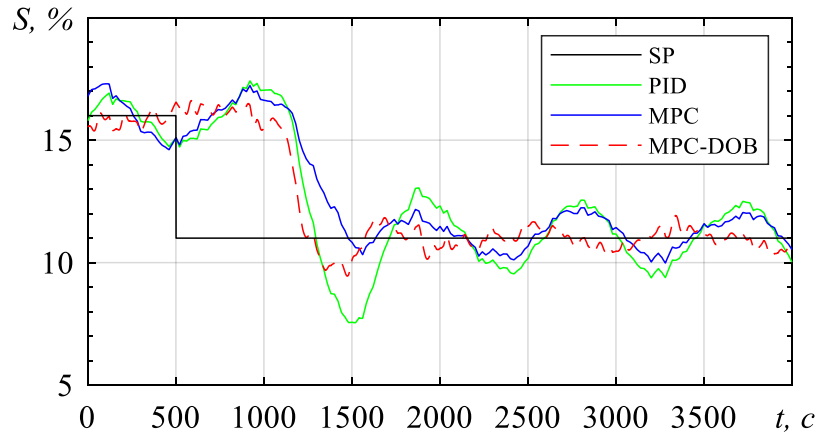


Рисунок 3.15 – Эксперимент №2: результаты моделирования

Таблица 3.7 – Статистическая эффективность стратегий управления на изменение уставки при синусоидальных возмущениях (на основе моделирования)

Подход управления	Критерии качества		
	ISE	RSD, %	σ , %
PID	10994,3	17,415	31,377
MPC	8016,51	14,872	11,234
MPC-DOB	4005,4	10,515	14,092

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 PID и MPC, что также видно на Рисунок 3.15.

в) Эксперимент №3 – стабилизация шума при воздействии постоянного возмущения 3 % в интервале времени 1700-3000 с. Результаты и эффективность моделирования всех САУ представлены соответственно на Рисунок 3.16, Таблица 3.8.

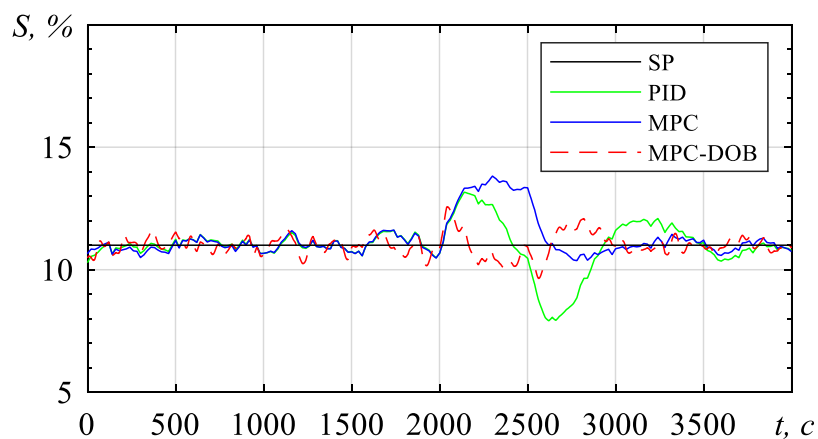


Рисунок 3.16 – Эксперимент №3: результаты моделирования

Таблица 3.8 - Статистическая эффективность стратегий управления на постоянное возмущающее воздействие (на основе моделирования)

Подход управления	Критерии качества		
	ISE	RSD, %	σ , %
PID	3348,7	9,603	28,036
MPC	2814,1	8,803	25,644
MPC-DOB	673,7	4,308	14,249

Результаты эксперимента №3 в условиях ступенчатого возмущения, которое на практике может быть результатом изменения влажности исходной руды, похожи на результаты с синусоидальным возмущением. 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.

г) Эксперимент №4 – проверка адекватности ВА массы объемного заполнения по данным расходов воды, производительности (см. Рисунок 3.17) и шума (Рисунок 3.18), полученных с комплекса измельчения апатито-нефелиновой руды с мельницей типа МШР 4,5х5,0.

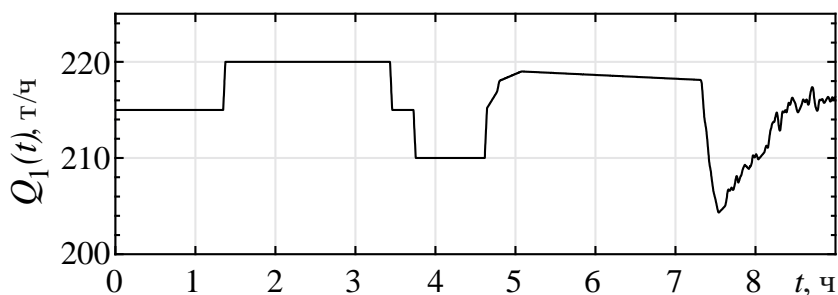


Рисунок 3.17 – Эксперимент №4: производительность (реальные данные)

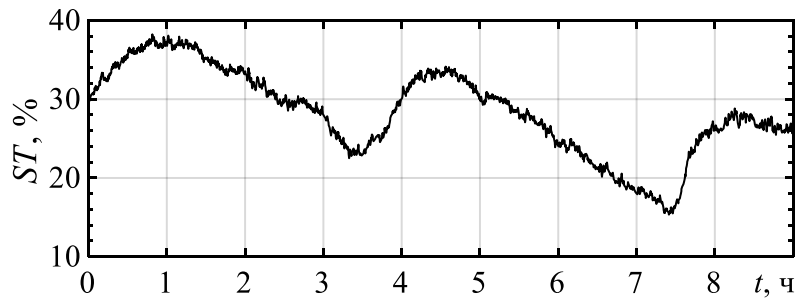


Рисунок 3.18 – Эксперимент №4: вибрация мельницы (реальные данные)

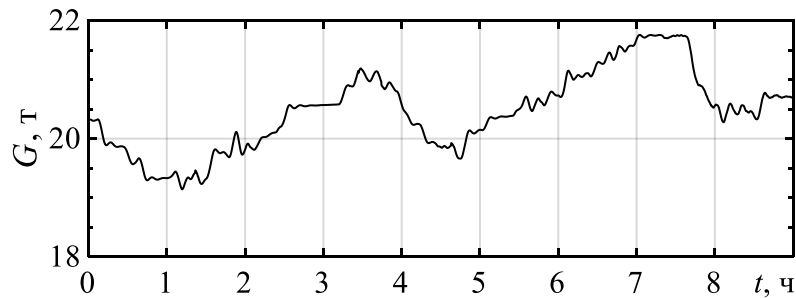


Рисунок 3.19 – Эксперимент №4: вес материала в мельнице (данные моделирования)

Рост графика ST приводит к падению графика G и наоборот (см. Рисунок 3.18, Рисунок 3.19), что говорит о сильной зависимости между переменными – отрицательной корреляции. С точки зрения технологии процесса измельчения, при наполнении мельницы материалом, а именно росте массы материала в мельнице, должна снижаться вибрация, что видно по полученным графикам и подтверждает адекватность модели и возможности оценки перегруза по параметру G .

д) Эксперимент №5 – моделирование работы САУ в режиме близком к перегрузу – из установившегося режима при ручном управлении производительностью мельницы $Q = 225 \text{ т/ч}$, включается САУ с уставкой шума $ST = 7 \%$ в момент $t = 3,92 \text{ ч}$. В эксперименте рассмотрены САУ с ПИД, MPC и MPC-DOB+VA, На протяжении всего времени моделирования учитываются синусоидальные возмущения с амплитудой $0,3 \%$, периодом 1200 с . Данный эксперимент необходим для демонстрации преимущества предлагаемой стратегии САУ с MPC-DOB+VA и принятые в эксперименте настройки актуальны для конкретного рассмотренного случая. Критическая масса $G_{max} = 93 \%$ ($28,8 \text{ т}$) принята из оценки, что перегруз для мельницы с износом 30% при нормальной

руде (влажность 3 %, небедная по хим. составу) наступил бы при производительности $Q \approx 245-250$ т/ч, что соответствует $G = 100$ % (32 т). При достижении G_{max} , ВА обновляет действующее ограничение Q_{max} для MPC на величину текущей производительности. Результаты и эффективность САУ представлены соответственно на Рисунок 3.20, Рисунок 3.21.

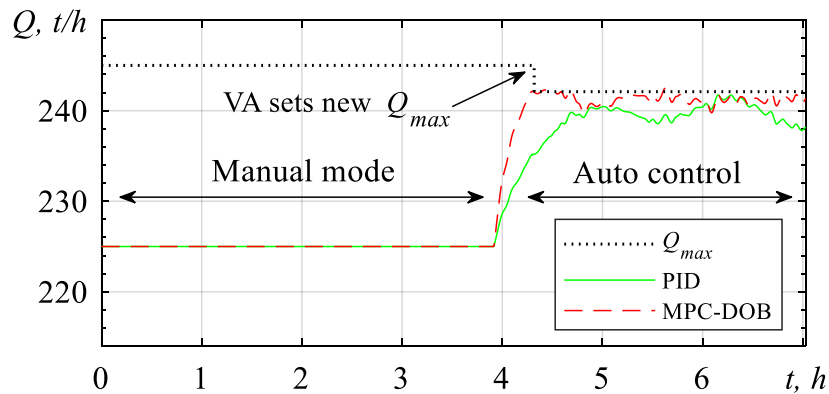


Рисунок 3.20 – Эксперимент №5: производительность при работе САУ в режиме близком к перегрузу

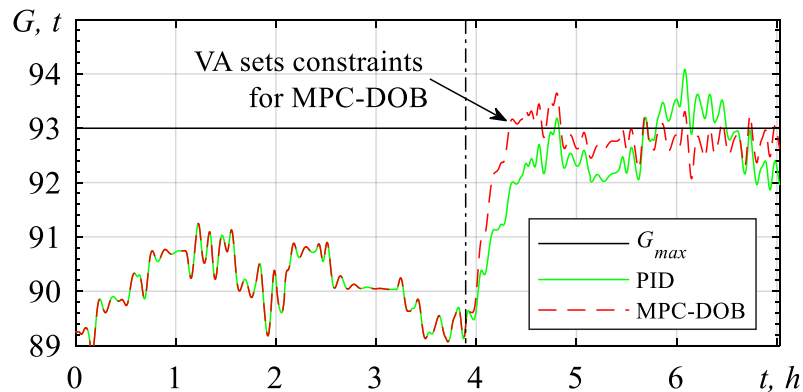


Рисунок 3.21 – Эксперимент №5: прогноз массы материала внутри мельницы виртуальным анализатором при работе САУ в режиме близком к перегрузу

На 1 % (см. Рисунок 3.20) увеличилась средняя производительность в автоматическом режиме с MPC-DOB+VA – 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 MPC (см. Рисунок 3.21).

3.4 Реализация алгоритмов модельно-прогнозирующего управления в аппаратно-программном комплексе АСУТП

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 [124], [125], [126], [127], [128], встраиваемых системах на базе микроконтроллеров [129] или ПЛИС [130], ограничивается их вычислительными ресурсами, поскольку требования к памяти растут квадратично с увеличением горизонта прогнозирования [127]. Несмотря на это проблема реализации MPC в подобных системах была широко исследуемой темой в последние годы. Основным направлением исследований была разработка простого, менее требовательного к памяти решателя оптимизационной задачи квадратичного программирования. Большинство работ было нацелено на встраиваемые системы, а не на ПЛК, и решатели разрабатывались под конкретную платформу, как правило, на языках программирования C/C++. Один из компромиссных вариантов реализации, рассмотренный в [124], [130] это явный (explicit) MPC без решения задачи оптимизации в реальном времени. В этом алгоритме оптимальные значения для всех возможных состояний системы вычислены заранее, а их поиск выполняется в режиме онлайн. Такая реализация актуальна для систем с высокой динамикой, где от MPC требуется быстрый отклик на каждом шаге (интервал менее 1 с). Однако требования к памяти при таком подходе становятся непомерно высокими для многомерных систем среднего и большого размера (MV более 5, CV более 5) или с множеством ограничений.

Однако, внедрение MPC в промышленные ПЛК [125], [113], [131] представляет большой интерес из-за их широкого распространения в отрасли по сравнению с ПЛИС или микроконтроллерами [48]. Несмотря на ограничения по памяти и производительности ПЛК метод реален и реализуем [124], [132], [133]. Реализация на уровне ПЛК во многих работах [126], [128] рассматривалась на базе ПЛК Modicon M340 фирмы Schneider Electric в среде разработки Unity Pro на

языках программирования ST и FBD по стандарту МЭК 61131-3. Такой подход упрощает интеграцию в любую АСУТП и повышает удобство эксплуатации и наладки. Учитывая то, что количество входов/выходов небольшое и ограничения накладываются только на управляемые переменные, предполагается, что разработанные САР и САУ могут быть адекватно адаптированы для ПЛК.

3.4.1 Блок-схема алгоритма для ПЛК

На основании математического описания алгоритма MPC в разделе 3.1.2 разработана функциональная блок-схема (см. Рисунок 3.22).



Рисунок 3.22 – Блок-схема алгоритма MPC

Исходными данными для выполнения алгоритма являются параметры ОУ A_m , B_m , C_m , D_m , текущее значение выходов процесса $y(k)$, уставка $r(k)$, настройки MPC

регулятора N_c , N_p , W , r_w , ограничения на управляющие переменные, задание для стабилизации $r(k)$, и обратная связь по управляемым переменным $y(k)$. При инициализации ПЛК или по вызову один раз выполняется расчет постоянных матриц необходимых в онлайн решении задачи оптимизации R_S , F , d . Далее происходит расчет матриц, зависящих от переменных процесса, и целевая функция с учетом ограничений минимизируется для поиска оптимального вектора приращений управления ΔU . Найденный вектор приращения добавляется к предыдущему вектору управления и применяется к процессу. Для получения прогнозируемых выходных данных для следующего цикла оптимизации найденное оптимальное управление подставляется в модель ОУ. Процедура продолжается до тех пор, пока не будет достигнута желаемая уставка.

В алгоритме процедуры оптимизации Хилдрета (см. Рисунок 3.23) перед выполнением цикла поиска максимального λ , проверяется есть ли необходимость в решении задачи QR. Текущие управляющие воздействия и скорость их изменений сравниваются с ограничениями и алгоритм в противном случае прекращается и на выходе получается решение без учета ограничений. В случае активных ограничений происходит поиск оптимального λ до тех пор, пока условие цикла по количеству итераций или точности поиска не станет истинным.

В алгоритме все операции выполняются с двумерными матрицами, что является основной проблемой при кодировании на языках МЭК. Для конкретного приложения, т.е. зная размерность модели ОУ, и для ранее синтезированного оптимального регулятора, т.е. настройки MPC известны, можно однозначно рассчитать размерность всех матричных переменных и отталкиваясь от этого написать программный код с привязкой к заранее известным размерам всех матриц. Назовем данный подход – жесткое кодирование. Такой метод исключает возможность изменения настроек MPC или использования кода для других приложений. Ведь всяческие изменения приведут к изменению размеров массивов, а это требует использования динамических массивов. ПЛК не поддерживает полный функционал с динамическими массивами, поскольку является системой

реального времени, а выделение и перераспределение памяти для массивов занимает много времени.

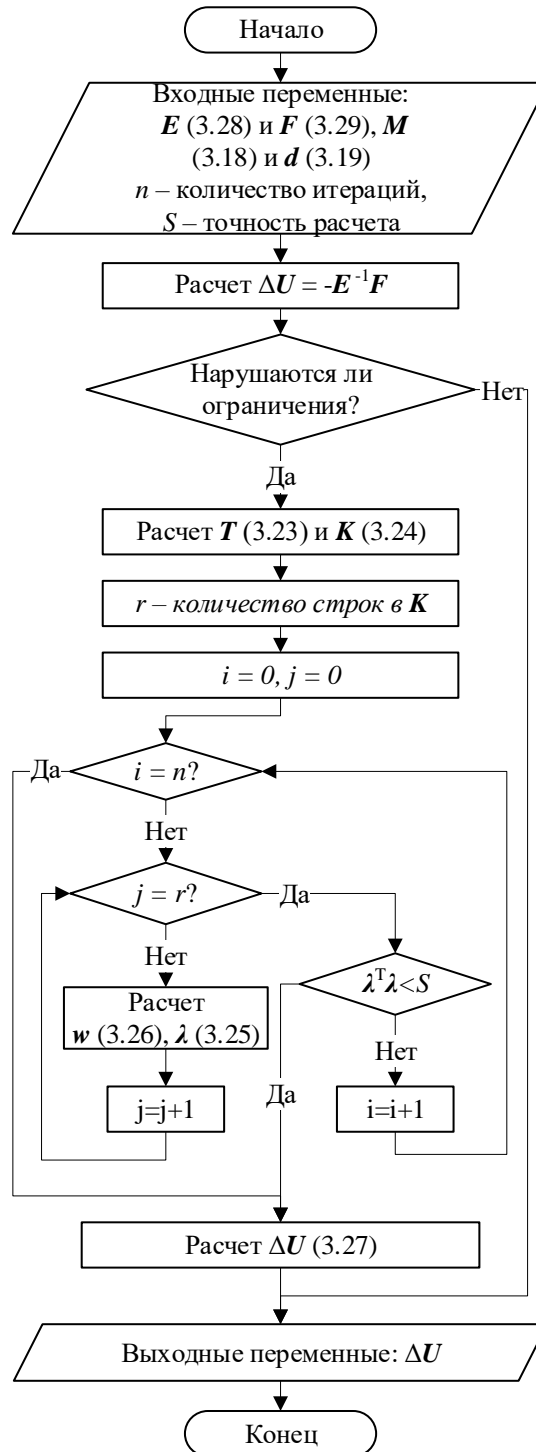


Рисунок 3.23 – Блок-схема алгоритма оптимизации Хилдрета

Unity Pro позволяет использовать массив изменяющегося размера только для входных данных в блоки DFB, но не позволяет динамически установить размер массива во время выполнения программы. Все массивы должны быть определены. Поэтому в компромисс жесткому кодированию мы определяем все переменные-

массивы жестко, но с запасом – максимальными размерностями, которые могут понадобиться. Вместе с этим для каждого массива сохраняем индекс последнего элемента.

3.4.2 Расчет системных требований к алгоритму

Одновременно с определением размерностей массивов имеет место проблема памяти, требуемой для всех необходимых переменных. Modicon M340 располагает внутренней RAM для программ, констант и системных символов – 3840 Кбайт и для данных – 256 Кбайт. Зона данных включает в себя экземпляры функциональных блоков, локализованные и нелокализованные данные. Таким образом, размер всех переменных-массивов для MPC должен быть менее 256 Кбайт, а с учетом того что в реальных условиях часть памяти уже занята данными основной прикладной программы завода – 30 %, и учета резерва в 20 %, для алгоритма MPC приняли ограничение по памяти в 128 Кбайт (50 %). Памяти для кода программы (150 Кбайт) достаточно с большим запасом (3840 Кбайт).

Один элемент массива типа REAL занимает 4 байт, тогда рассчитав размерности массивов определим память, требуемую на переменные MPC. Размерность зависит от количества входов u , выходов y , состояний x модели и настроек MPC – горизонтов управления N_c и прогнозирования N_p . (см. Рисунок 3.24)

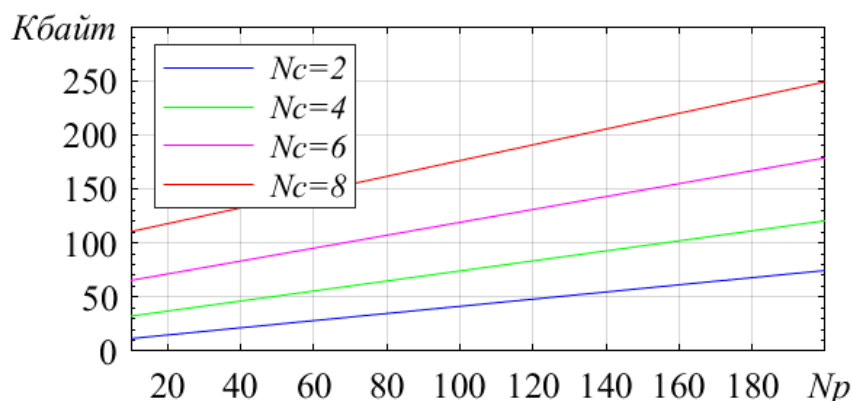


Рисунок 3.24 – Зависимость требований к памяти для алгоритма MPC при $u=4$, $y=4$, $x=4$ от горизонтов управления N_c и прогнозирования N_p

Для хранения переменных алгоритм 4×4 с максимальными горизонтами $N_c = 4$ и $N_p = 200$ требует 120,2 Кбайт, что составляет 46,95 % в памяти ПЛК Modicon

M340 из доступных 256 Кбайт. Все расчеты сведены к минимуму использования промежуточных переменных (см. Таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Требования к памяти для реализации алгоритма MPC с параметрами $u=4$, $y=4$, $x=4$, $N_c = 4$, $N_p = 200$

Данные	байт	Кбайт	%
Основные	116912	114,2	94,98
Промежуточные	6064	5,9	4,93
Исходные	112	0,1	0,09
Всего	123088	120,2	100,00

Переменная с максимальным размером – это матрица H (800x16), размер которой составляет 50 Кбайт (матрица H 800x16), что укладывается в ограничения среды разработки Unity Pro на максимальный размер массива, который не должен превышать 64 Кбайт.

3.4.3 Структура программы

Для реализации необходимых операций над матрицами в программе реализованы отдельные пользовательские функции, выполняющие: транспонирование матрицы, умножение матриц, сложение матриц, вычисление определителя и дополнений матрицы, инверсия матрицы. Функции вызываются в подпрограммах основной программы (см. Рисунок 3.25).

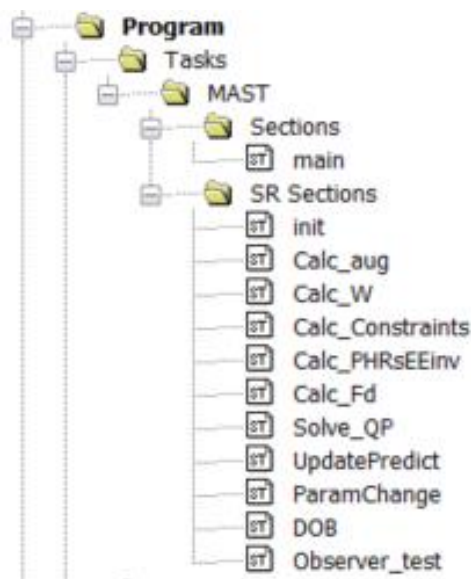


Рисунок 3.25 – Конфигурация разработанной программы в Unity Pro

Контроллер работает в однозадачном режиме – в циклическом режиме выполняется одна основная задача (MAST), которая состоит из частей, называемых секциями (Sections). Разработанная пользовательская программа состоит из одной секции Main, созданной в разделе основной задачи, в которой вызываются подпрограммы (SR Sections).

При первом сканировании после «холодного» рестарта ПЛК выполняются секции: Init, Calc_aug, Calc_PHRsEEinv, Calc_W, Calc_Constraints. Это необходимо для инициализации всех начальных значений переменных и настроек ОУ и MPC.

В секции Init определяются размерности модели x , u , y , настройки MPC – N_p , N_c , модель ОУ в пространстве состояний – матрицы **A**, **B**, **C**, веса для каждой переменной управления – w , ограничения, уставка по умолчанию, настройки QP. Расширенные матрицы и их размерности определяются в секции Calc_aug. Весовая матрица W для управляющих воздействий определяется в секции Calc_W. Матрицы ограничений определяются в секции Calc_Constraints. Расчет матриц **P**, **H**, **R_s**, **E**, **E_{inv}** в секции Calc_PHRsEEinv.

В main вызов алгоритма онлайн оптимизации MPC выполняется с заранее заданным интервалом. Алгоритм выполняет последовательно секции Calc_Fd, Solve_QP, расчет оптимальное управление, обновление прогноза по модели UpdatePredict и DOB. Также с заданным интервалом исполняется процедура ParamChange - пересчет матриц при изменении соответствующих настроек:

- пересчет расширенных матриц ОУ;
- пересчет весов;
- пересчет ограничений;

Для интеграции кода на реальном объекте рекомендуется дополнить функционал блока MPC дополнительными функциями:

- внешнее задание;
- контроль границ изменения уставки;
- в ручном режиме следить за ручным заданием / положением для безударного перехода;
- включение регулятора при переходе в автоматический режим;

– ошибка регулятора при ошибке датчика обратной связи.

Листинг разработанной программы и настройки конфигурации в среде разработки Unity Pro см. Приложение 2 [134].

3.5 Выводы по третьей главе

Предложено новое решение задач САР стабилизации параметров уровня и плотности на классификацию для задачи измельчения, которое также распространяется на аппараты с функцией перемешивания пульпы на горно-обогатительных фабриках. Анализ данных, полученных на основе компьютерного моделирования, обоснованно подтверждает, что предложенный подход многопараметрического и адаптивного управления с прогнозирующей моделью позволяет достичь уменьшения ISE ошибки при стабилизации плотности и уровня в зумпфе слива мельницы по сравнению с ПИД-регулированием.

Разработана новая система автоматического управления САУ объемным заполнением шаровой мельницы с разгрузкой через торцевую решетку в замкнутом цикле измельчения отличающаяся совместным использованием прогнозирующего управления MPC, наблюдателя возмущений DOB, виртуального анализатора VA веса материала в мельнице для контроля перегруза, повышения производительности, устойчивости к внешним возмущениям, устойчивости работы в режиме функциональной неустойчивости. Применение MPC-DOB при синусоидальных и ступенчатых возмущениях позволило сократить RSD на 4-7 % по отношению к ПИД и MPC. В сравнении с MPC без наблюдателя возмущений, который позволил сократить RSD на 1-2 %, применение MPC-DOB показывает свое преимущество. Применение MPC-DOB позволило повысить производительность мельницы на 1 % по сравнению с ПИД регулированием. Дополнительное применение VA для оперативного формирования ограничений производительности по спрогнозированному значению веса материала в мельнице позволяет эксплуатировать технологическое оборудование цикла измельчения в режимах высокой производительности, избегая перегрузки мельницы.

Несмотря на то, что результаты тестирования САР и САУ получены на основе моделирования, предложенные модели и алгоритмы могут являться основой для проведения пилотных испытаний и дальнейшего внедрения усовершенствованной САР и САУ в АСУТП обогатительных фабрик с возможностью повысить производительность и устойчивость передела измельчения.

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для интеграции и масштабирования программного кода регулятора MPC-DOB в действующие программно-аппаратные комплексы АСУТП измельчения. В качестве возможного варианта рассмотрена реализации технологии на ПЛК Modicon M340 фирмы Schneider Electric на языках программирования МЭК 61131-3. Стоимость интеграции технологии должна быть принята во внимание, так как данное решение достаточно бюджетное – если сравнивать с системами СУУТП, то как минимум в десятки раз; 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.

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. 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.

3. Разработана усовершенствованная САУ 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 MPC и адаптивного MPC 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 MPC 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 объемным 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 алгоритмическое и программное обеспечение для потенциальной интеграции разработанных САР 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 широкого 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.

Список условных обозначений

АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом.

ГОК – горно-обогатительный комбинат.

КИХ – конечно импульсная характеристика.

МОП – модельно-ориентированное проектирование.

МШР – мельница шаровая с разгрузкой через решетку.

МШЦ – мельница шаровая с центральной разгрузкой.

НС – нейронная сеть.

ОС – операционная система.

ОУ – объект управления.

ПИД – пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор.

ПК – персональный компьютер.

ПЛИС – программируемые логические интегральные схемы.

ПЛК – программируемый логический контроллер.

ПМ – прогнозирующая модель.

ПЧ – преобразователь частоты.

САР – система автоматического регулирования.

САУ – система автоматического управления.

ТП – технологический процесс.

ЧРП – частотно-регулируемый привод.

CV – controlled variable, управляемая переменная.

DDT - derived data types, переменные производных типов.

DOB – disturbance observer, наблюдателя возмущений.

MD – measured disturbance, измеряемое возмущение.

ММО – multiple input - multiple output, несколько входов, несколько выходов.

MPC – model predictive control, управление с прогнозирующей моделью.

MV – manipulated variable, управляемая переменная.

SP – setpoint, уставка.

QP – quadratic programming, задача квадратичного программирования.

Список литературы

1. Закамалдин А.А. Пути усовершенствования системы автоматического управления процессом измельчения // Современные научные исследования и разработки, Т. 10, № 27, 2018. С. 359-362.
2. Пивняк Г. Г. и др. О путях повышения конкурентоспособности предприятий горно-металлургического комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – Т. 14. – №. 12.
3. Бапова Р. Ж. Автоматическое управление каскадно-водопадным режимом измельчения в барабанных мельницах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2004. – Т. 307. – №. 5.
4. Topalov A. V., Kaynak O. Neural network modeling and control of cement mills using a variable structure systems theory based on-line learning mechanism // Journal of Process Control. – 2004. – Т. 14. – №. 5. – С. 581-589.
5. Улитенко К. Я. и др. Автоматизация процессов измельчения в обогащении и металлургии // Цветные металлы. Специальный. – 2005. – №. 2005. – С. 54-60.
6. ANDRITZ AUTOMATION S. Streamlining the Steps to Optimized Production: Project Process Modelling, Advanced Control, and Simulator Based Training for Optimized Operation–Case Studies.
7. Гурьев А.А. Устойчивое развитие рудно-сырьевой базы и обогатительных мощностей АО «Апатит» на основе лучших инженерных решений // Записки Горного института. 2017
8. 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.

9. Meng Q. et al. Control strategy of cement mill based on bang-bang and fuzzy PID self-tuning //2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). – IEEE, 2015. – С. 1977-1981.
10. Chen X. et al. Expert system based adaptive dynamic matrix control for ball mill grinding circuit //Expert systems with Applications. – 2009. – Т. 36. – №. 1. – С. 716-723.
11. Niu D. et al. Composite control for raymond mill based on model predictive control and disturbance observer //Advances in Mechanical Engineering. – 2016. – Т. 8. – №. 3. – С. 1–10.
12. Chen X. et al. Process Control of Ball Mill Based on MPC-DO //Mathematical Problems in Engineering. – 2021. – Т. 2021.
13. Gavrilin A. N., Moyzes B. B., Cherkasov A. I. Research methods of milling technology elements //Applied Mechanics and Materials. – Trans Tech Publications Ltd, 2015. – Т. 756. – С. 35-40..
14. McClure K. S., Gopaluni R. B. Overload detection in semi-autogenous grinding: a nonlinear process monitoring approach //IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Т. 48. – №. 8. – С. 960-965.
15. Hermosilla R. et al. Semi-Autogenous (SAG) Mill Overload Forecasting //Iberoamerican Congress on Pattern Recognition. – Springer, Cham, 2021. – С. 392-401.
16. PLC VS DCS. ОПТИМАЛЬНЫЙ ВЫБОР ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ / Ш. Яхия // Control Engineering Россия.— 2016.— №3.— С. 30-33
17. Le Roux J. D., Craig I. K. Requirements for estimating the volume of rocks and balls in a grinding mill //IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Т. 50. – №. 1. – С. 1169-1174.

18. de Oliveira A. L. R., Tavares L. M. Modeling and simulation of continuous open circuit dry grinding in a pilot-scale ball mill using Austin's and Nomura's models //Powder technology. – 2018. – Т. 340. – С. 77-87.
19. Faria P., Rajamani R. K., Tavares L. M. Optimization of Solids Concentration in Iron Ore Ball Milling through Modeling and Simulation //Minerals. – 2019. – Т. 9. – №. 6. – С. 366.
20. Балинов С.Ю., Дмитриев А.И., Златорунская Г.Е., Манькута Л.А., Матвеев В.Н., Пекшуев Л.А. Способ автоматического управления агрегатом мокрого измельчения с замкнутым циклом, RU 2320417 С2, Март 27, 2008.
21. Сотникова М. В. Вопросы устойчивости движений в системах управления с прогнозирующими моделями //Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – №. 1.
22. Tisza J., Chauca M. Characterization of Predictive Control Based on Model (MPC) in Multivariable Process of Milling in a Mineral Concentrator Plant // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. V. 852. № 1. P. 012082.
23. Чохонелидзе А. Н., Лемпого Ф., Браун-Аквей В. Разработка системы автоматизированного управления для замкнутой цепью измельчения с использованием метода управления с прогнозирующими моделями //Интернет-журнал Науковедение. – 2014. – №. 6 (25).
24. Ai L., Xiong Y. Ball Mill Automatic Control System Design Based on Particle Swarm Optimization Algorithm //2016 6th International Conference on Management, Education, Information and Control (MEICI 2016). – Atlantis Press, 2016.
25. Feng L. et al. Model Predictive Control of Duplex Inlet and Outlet Ball Mill System Based on Parameter Adaptive Particle Swarm Optimization //Mathematical Problems in Engineering. – 2019. – Т. 2019.

26. Subbaraj P., Anand P. S. G. Evolutionary design of intelligent controller for a cement mill process //International Journal of Computer Applications. – 2010. – Т. 1. – №. 10. – С. 111-120.
27. Gough W. A. B. BrainWave: Model Predictive Control //Advanced Model Predictive Control. – 2011. – С. 393-421.
28. Туз А. А. и др. Управление технологическими процессами измельчения и основные направления их автоматизации //Интернет-журнал Науковедение. – 2016. – Т. 8. – №. 2 (33).
29. Туз А. А., Богатиков В. Н. Построение системы адаптивного управления процессом измельчения апатито-бадделеитового концентрата участка подготовки питания флотации ОАО «Ковдорский ГОК» //Труды Кольского научного центра РАН. – 2014. – №. 5 (24).
30. Forbes M. G., Gough B. Model predictive control of sag mills and flotation circuits. – 2003.
31. Прядко Н. С., Саксонов Г. М., Терновая Е. В. Имитационная модель замкнутого цикла измельчения минерального сырья //Системні технології. – 2014. – №. 3. – С. 19-25.
32. Пожарский Ю. М., Полешенко Д. А., Подковыров И. Ю. Определение степени заполнения мельницы мокрого самоизмельчения с применением беспроводных технологий //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – №. 2.
33. Еременко Ю. И. и др. О возможности определения уровня загрузки шаровой мельницы в результате нейросетевого анализа спектра сигнала виброускорения ее цапфы //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – №. 1.
34. Алексеев М. О. КОНТРОЛЬ ПЕРЕГРУЗКИ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ РУДОЙ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ХЕРСТА ЗВУКОМЕТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА. – 2011.

35. Улитенко К. Я., Соколов И. В., Маркин Р. П. Применение виброакустического анализа для контроля объемного заполнения мельниц //Цветные металлы. – 2005. – №. 10. – С. 63..
36. Еременко Ю. И., Полещенко Д. А., Глущенко А. И. Разработка и исследование метода нейросетевого анализа спектра сигнала виброускорения цапфы шаровой мельницы //SYSTEM IDENTIFICATION AND CONTROL PROBLEMS. SICPRO'15. – 2015. – С. 668-679.
37. Рябчиков М. Ю. и др. Достижение максимальной производительности оптимизируемого процесса измельчения руды при использовании принципов нечеткого экстремального управления //Вестник МГТУ им. ГИ Носова. – 2011. – №. 2.
38. Осипова Н. В., Пипия Д. В. Модель системы автоматического управления процессом перемешивания пульпы перед флотацией // Горные науки и технологии. 2018. № 1. С. 108-112. doi.org/10.17073/2500-0632-2018-1-108-112.
39. Николаев А.Н. Влияние стабилизации выходной плотности сгущения на выходной продукт. / А.Н. Николаев, Ю.В. Шариков, А.А. Кравчук // Научно-технический журнал «Металлург». 2016. № 2. С. 85-87.
40. Фелькер М. Н., Бахтерева К. Д. Разработка системы автоматического управления флотационным процессом хлористого калия // Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2021. Т. 21. № 1. С. 147-158. doi.org/10.14529/ctcr210113.
41. Gao Y. et al. The critical role of pulp density on flotation separation of nickel-copper sulfide from fine serpentine // Minerals. 2018. V. 8. P. 317. doi.org/10.3390/min8080317.
42. Куликов В.Н. Решения и подходы компании «Эмерсон» к усовершенствованному управлению ТП // Автоматизация в промышленности. 2016. № 3. С. 7-12.

43. Латухин А. Г., Брейдо И. В. Разработка системы автоматического управления "руда-вода" для стабилизации и повышения показателей обогащения медной руды Карагайлинской ОФ // Автоматика. Информатика. 2018. № 2. С. 49-52.
44. Qin S. J., Badgwell T. A. A survey of industrial model predictive control technology //Control engineering practice. – 2003. – Т. 11. – №. 7. – С. 733-764.
45. Ruchika N. R. Model predictive control: History and development //International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). – 2013. – Т. 4. – №. 6. – С. 2600-2602.
46. Yu-Geng X., De-Wei L., Shu L. Model predictive control—status and challenges //Acta Automatica Sinica. – 2013. – Т. 39. – №. 3. – С. 222-236..
47. Mayne D. Q. Model predictive control: Recent developments and future promise //Automatica. – 2014. – Т. 50. – №. 12. – С. 2967-2986..
48. Lahiri S. K. Multivariable predictive control: Applications in industry. – John Wiley & Sons, 2017..
49. Перельман И.И. Идентификация моделей для прогнозирования выходной реакции объекта // 4 Симп. ИФАК по идентификации и оценке параметров систем. Тбилиси, 1975. Т.3. 112-121.
50. Торгашов А. Ю. Синтез систем управления для массообменных технологических процессов в условиях неопределенности : дис. – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, 2010.
51. Celik I., Polat M. A Survey on MPC Widely Used Many Areas of the Industry. ICENS International Conference on Engineering and Natural Science. – 2016.
52. Garcia C. E., Morshedi A. M. Quadratic programming solution of dynamic matrix control (QDMC) //Chemical Engineering Communications. – 1986. – Т. 46. – №. 1-3. – С. 73-87.
53. Grosdidier P., Froisy B., Hammann M. The Idocom–M controller //IFAC Proceedings Volumes. – 1988. – Т. 21. – №. 4. – С. 31-36.

54. Marquis P., Broustail J. P. SMOC, a bridge between state space and model predictive controllers: application to the automation of a hydrotreating unit //IFAC Proceedings Volumes. – 1988. – Т. 21. – №. 4. – С. 37-45.
55. Richalet J., O'Donovan D. Predictive functional control: principles and industrial applications. – Springer Science & Business Media, 2009.
56. Дозорцев В. М. Динамическое моделирование в оптимальном управлении и автоматизированном обучении операторов технологических процессов. Ч. 2. Компьютерные тренажеры реального времени //Приборы и системы управления. – 1996. – Т. 8. – С. 41-50.
57. Tyagunov A. A. High-performance model predictive control for process industry //Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Netherlands. – 2004..
58. Henriks G. Study of early termination of MPC Algorithms. – 2016.
59. Forbes M. G. et al. Model predictive control in industry: Challenges and opportunities //IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Т. 48. – №. 8. – С. 531-538.
60. Rockwell Automation Library of Process Objects: MPC Integration - Application Technique – 2019.
61. DeltaV Distributed Control System - Product Data Sheet – 2017.
62. Wheat P. Multivariable model predictive control of a pilot plant using Honeywell profit suite : дис. – Murdoch University, 2018.
63. Amrit R. et al. Platform for Advanced Control and Estimation (PACE): Shell's and Yokogawa's Next Generation Advanced Process Control Technology //IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Т. 48. – №. 8. – С. 1-5.
64. Golightly R. The Aspen DMC3 difference //AspenTech Industry White Paper. – 2014.
65. Coetzee L. C. Stabilising and optimising a primary closed-loop milling circuit feeding a flotation circuit using StarCS RN MPC //IFAC Proceedings Volumes. – 2014. – Т. 47. – №. 3. – С. 9786-9791.

66. Silva D A, McGarry M F, Rojas AP Gracia R A 2014 Streamlining the Steps to Optimized Production: Project Process Modelling Advanced Control and Simulator Based Training for Optimized Operation—Case Studies (Vancouver: CIM Conference).
67. Дозорцев В. М., Кнеллер Д. В. APC-усовершенствованное управление технологическими процессами //Датчики и системы. – 2005. – №. 10. – С. 56-62.
68. Захаркин М.А., Кнеллер Д.В. Применение методов и средств усовершенствованного управления технологическими процессами (APC) // Датчики и системы. – 2010. – № 10. – С. 57–71.
69. Черешко А. А., Шундерюк М. М. Границы применимости алгоритмов усовершенствованного управления с прогнозирующей моделью в условиях неопределенности объекта управления //Проблемы управления. – 2020. – Т. 1. – №. 0. – С. 17-23.
70. Работников М. А., Тихомиров А. В., Вялых И. А. Модернизация системы усовершенствованного управления установки ректификации стирола //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. –
71. Фарунцев С. Д. Применение усовершенствованных систем управления для повышения эффективности процессов нефтедобычи //Инсист Автоматика. – 2016.
72. Недельченко С. И. и др. Система глобальной динамической оптимизации и система оптимизации в реальном времени: критерии выбора системы управления технологическими процессами //Территория Нефтегаз. – 2019. – №. 12. – С. 12-17.
73. Sbárbaro D., Del Villar R. (ed.). Advanced control and supervision of mineral processing plants. – Springer Science & Business Media, 2010.

74. Geampalia G. et al. Communication Technologies for Complex Industrial Systems //2017 21st International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS). – IEEE, 2017. – С. 401-405.
75. Гилева Т. А. Цифровая зрелость предприятия: методы оценки и управления //Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: экономика. – 2019. – №. 1 (27).
76. Кисляков А. С., Ищенко А. Д. Влияние IV промышленной революции на экономику экосистем и ее воздействие на потребительские тенденции //Власть. – 2019. – №. 4.
77. Чижик Е. Ф., Соколов В. И. Концепция измельчения руд в шаровых барабанных мельницах //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2005. – №. 4.
78. Туголуков А. В. и др. Исследование технологических свойств разновидностей апатит-штаффелитовых руд Ковдорского месторождения //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – №. 12.
79. Богданов О. С., Олевский В. А. (ред.). Справочник по обогащению руд: подготовительные процессы. – Недра, 1982.
80. Терещенко С. В. и др. Комплексная рудоподготовка в технологии обогащения бедных апатит-нефелиновых руд //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №. 1.
81. Иванова В. А., Митрофанова Г. В. Особенности флотации апатита из складированных отходов обогащения апатит-нефелиновой руды //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – №. 5.
82. Калугин А. И. и др. Опыт внедрения технологии тонкого грохочения в цикле измельчения апатит-нефелиновой руды //Горный журнал. – 2014. – №. 10. – С. 52-57

83. Кузнецов Н. М., Морозов И. Н. Моделирование потребляемой мощности шаровой мельницы // Горные науки и технологии. – 2017. – №. 4. – С. 50-61.
84. Калганков Е. В. Расчёт долговечности резиновых футеровок шаровых рудоразмольных мельниц с учётом старения резины // Геотехнічна механіка. – 2013. – №. 113. – С. 181-202.
85. Чижик Е. Ф., Соколов В. И. Концепция измельчения руд в шаровых барабанных мельницах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2005. – №. 4.
86. Коклянов Е. Б., Карначёв И. П. Основные физико-химические составляющие вредных производственных факторов в технологии добычи и переработки апатито-нефелиновых руд Кольского Заполярья // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле, No. 1, 2011.
87. Алексеев А. И. Комплексная переработка апатит-нефелиновых руд на основе создания замкнутых технологических схем // Записки горного института. – 2015. – Т. 215
88. le Roux J. D., Craig I. K. State and parameter identifiability of a non-linear grinding mill circuit model // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Т. 49. – №. 20. – С. 1-6.
89. Outotec. Улучшенное управление мельницей на зо-лотом руднике Lihir в Папуа – Новой Гвинее // Minerva - Бюллетень по технологиям обогащения полезных ископаемых. – 2019. – №. 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.outotec.ru/products-and-s>
90. Алексеев М. А. Автоматизированный контроль степени заполнения барабанных мельниц рудой / Алексеев М. А., Фарис С. Р. А. // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – №. 4. – С. 13–19.
91. Закамалдин А. А., Шилин А.А. Моделирование замкнутого цикла измельчения в шаровой барабанной мельнице с разгрузкой через торцевую решетку // Технология машиностроения. – 2021. – №. 8. – С. 12-20.

92. Khoshnam F. Development of a Dynamic Population Balance Plant Simulator for Mineral Processing Circuits / Khoshnam, F., Khalesi, M. R., Khodadadi Darban, A., & Zarei, M. J. // *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. – 2015. – Т. 49. – №. 1. –
93. Liu Y. Dynamic simulation of grinding circuits / Liu Y., Spencer S. // *Minerals Engineering*. – 2004. – Т. 17. – №. 11–12. – С. 1189–1198
94. МАЛЫШЕВ В. П. и др. ЛОГАРИФМИЧЕСКИ НОРМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАКЦИЙ ПРИ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ МАТЕРИАЛОВ КАК АТТРАКТОР В ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА //ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ. – Т. 2224. – С. 46.
95. Малышев В. П. Вероятностная модель измельчения материалов как оператор самоорганизации и аттрактор процесса / Малышев, В. П., Бектурганов, Н. С., Макашева, А. М., Зубрина, Ю. С. // *Цветные металлы*. – 2016. – №. 2. – С. 33–39
96. Monov V., Sokolov B., Stoenchev S. Grinding in ball mills: modeling and process control // *Cybernetics and information technologies*. – 2012. – Т. 12. – №. 2. – С. 51-68.
97. Чохонелидзе А. Н., Браун А. В., Лемпого Ф. Разработка матричной модели замкнутой схемы измельчения цемента // *Интернет-журнал Науковедение*. – 2014. – №. 5 (24).
98. 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..
99. 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.

100. Bina L, Davidovikj D, Stojanovski G and Stankovski M 2012 JMEA 2 203-207
101. Khalid M, Yusof R, Joshani M, Selamat H and Joshani M 2014 Comput-Aided Civ Inf 293 221
102. Eliseev V L 2012 Razrabotka i issledovanie nejrosetevyh algoritmov upravleniya stacionarnymi i nestacionarnymi ob"ektami [Development and research of neural network control algorithms for stationary and non-stationary objects PhD thesis] (Moscow: MPEI)
103. Singh V. et al. Artificial neural network modeling of ball mill grinding process //Journal of Powder Metallurgy and Mining. – 2013. – Т. 2. – С. 2-5.
104. Liptak B. G. Instrument Engineers' Handbook, Volume Two: Process Control and Optimization. – CRC press, 2018
105. Кожухова А. В. Моделирование и исследование САУ насосной станции / Кожухова А. В., Рамазанов К. Н., Савельев И. Е. // Символ науки. – 2016. – №. 3–3
106. Деменков Н. П. Модельно-ориентированное проектирование систем управления //Промышленные АСУ и контроллеры. – 2008. – №. 11. – С. 66-69.
107. 212 Ефремов А. А., Сорокин С. С., Зенков С. М. МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ–МЕЖДУНАРОДНЫЙ СТАНДАРТ ИНЖЕНЕРНЫХ РАЗРАБОТОК //URL: [https://matlab.ru/upload/resources/EDU% 20Conf/pp](https://matlab.ru/upload/resources/EDU%20Conf/pp). – 2011. – С. 2040-43.
108. Wang L. Model predictive control system design and implementation using MATLAB®. – Springer Science & Business Media, 2009.
109. Borrelli F., Bemporad A., Morari M. Predictive control for linear and hybrid systems. – Cambridge University Press, 2017.
110. Amadi C. A. et al. Design and implementation of a model predictive control on a pixhawk flight controller : дис. – Stellenbosch: Stellenbosch University, 2018.

111. Горелик В. А., Золотова Т. В. ЗАДАЧА ЛИНЕЙНО-КВАДРАТИЧНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ // Моделирование, декомпозиция и оптимизация сложных динамических процессов. – 2018. – Т. 33. – №. 1. – С. 104-120.
112. Жиленков А. А. Моделирование систем и комплексов. Дискретные системы прогностического управления в теории, задачах и примерах в MATLAB // СПб: ИТМО. – 2019.
113. Singh R. et al. Implementation of an advanced hybrid MPC–PID control system using PAT tools into a direct compaction continuous pharmaceutical tablet manufacturing pilot plant // International journal of pharmaceutics. – 2014. – Т. 473. – №. 1-2. – С. 38-5.
114. Oshnoei A., Khezri R., Muyeen S. M. Model predictive-based secondary frequency control considering heat pump water heaters // Energies. 2019. V. 12. №. 3. P. 411-429. doi.org/10.3390/en12030411.
115. Сотникова М. В. Синтез цифрового управления с прогнозом для удержания контролируемых переменных в заданном диапазоне // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2019. Т. 15. № 3. С. 397-409.
116. Закамалдин А. А., Шилин А. А. Построение системы автоматического управления с прогнозирующей моделью для стабилизации плотности и уровня при перемешивании пульпы в горно-обоганительном оборудовании // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2021. – № 58. – С. 77-83.
117. Жукова Н. В., Быкова А. М. Определение коэффициентов обратной связи непрерывного регулятора с прогнозирующими моделями для объектов с транспортным запаздыванием в условиях управления темпом загрузки шихты в доменную печь // Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике. 2018. Т. 4. № 1. С. 61-69.

118. Zakamaldin A. A., Shilin A. A. Neural simulation of ball mill grinding process // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Т. 795. № 012010. P. 1—7.
119. Байзакова Г. А., Томилин А. К. Электромагнитный способ подстройки частоты виброметра // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55. – №. 6-2. – С. 244-247..
120. Величкович И. Б., Цой А. И., Мойзес Б. Б. Применение вибродиагностики для контроля параметров технического состояния технологического оборудования, 11-13 ноября 2020 г., г. Томск. – Томский политехнический университет, 2021. – С. 35-39. С. Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасности: сборник научных трудов IX Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых" Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее".
121. Прохоров С. В. и др. Методика постановки эксперимента в среде CoDeSys на примере системы управления вентиляцией // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2019. – Т. 22. – №. 4. – С. 109-115.
122. Zhang Z. et al. A low-cost pole-placement MPC algorithm for controlling complex dynamic systems // Journal of Process Control. – 2022.
123. Букреев В. Г., Шандарова Е. Б., Рулевский В. М. Многомерная модель системы электропитания погружного технологического оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – №. 4. – С. 119-131..
124. Valencia-Palomo G., Hilton K. R., Rossiter J. A. Predictive control implementation in a PLC using the IEC 1131.3 programming standard // 2009 European Control Conference (ECC). – IEEE, 2009. – С. 1317-1322.
125. Velagić J., Šabić B. Design, implementation and experimental validation of explicit MPC in programmable logic controller // 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). – IEEE, 2014. – С. 93-98.

126. Aslam S. et al. PLC based model predictive control for industrial process control //INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED AND APPLIED SCIENCES. – 2017. – Т. 4. – №. 6. – С. 63-71.
127. Krupa P., Limon D., Alamo T. Implementation of model predictive controllers in programmable logic controllers using IEC 61131-3 standard //2018 European Control Conference (ECC). – IEEE, 2018. – С. 1-6.
128. Krupa P. et al. PLC implementation of a real-time embedded MPC algorithm based on linear input/output models //IFAC-PapersOnLine. – 2020. – Т. 53. – №. 2. – С. 6987-6992.
129. Krupa P. et al. Real-time implementation of MPC for tracking in embedded systems: Application to a two-wheeled inverted pendulum //arXiv preprint arXiv:2103.14571. – 2021.
130. Mynar Z., Vesely L., Vaclavek P. PMSM model predictive control with field-weakening implementation //IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2016. – Т. 63. – №. 8. – С. 5156-5166.
131. Браун-Аквей В., Чохонелидзе А. Н., Лемпого Ф. Разработка программного обеспечения для управления контуром помола //Науковедение: интернет-журнал. – 2014. – №. 3.
132. Rauová I. et al. Real-time model predictive control of a fan heater via PLC //Proceedings of the 18th International Conference on Process Control. – 2011. – С. 388-393.
133. Huyck B. et al. Implementation and experimental validation of classic MPC on programmable logic controllers //2012 20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED). – IEEE, 2012. – С. 679-684.
134. Закамалдин А. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613395. Регулятор многопараметрический с прогнозирующей моделью и наблюдателем возмущений / Закамалдин А. А. Заявка № 2022613395. Дата поступления 03 марта 2022 г. Зар.

Приложение 1. Функция Matlab для линеаризации прогнозирующей модели объекта управления для MPC регулятора

```

function [A, B, C, D, U, Y, X, DX, poles] =
zumpf_linearization(ro_out, Q_in, ro_in, Q_water)

Ts = 0.5;
C = eye(1);
D = zeros(1,1);
U = [Q_water];
Y = [ro_out];
X = [ro_out];
[A, Bo] = getContinuous(ro_out, Q_in, ro_in, Q_water);
[A, Bo] = getDiscrete(A, Bo, Ts);
DX = Bo(:,4);
B = Bo(:,3);
poles = abs(eig(A));

function [a, b] = getContinuous(ro_out, Q_in, ro_in, Q_water)
ro_water = 1;
V = 6;
Q_in=Q_in/3600;
Q_water=Q_water/3600;
dxdt = (Q_in*ro_in + Q_water*ro_water - (Q_in+Q_water)*ro_out)/V;
a = -(Q_in+Q_water)/V;
b = [(ro_in-ro_out)/V/3600    Q_in/V    (ro_water-ro_out)/V/3600
dxdt];

function [A, B] = getDiscrete(a, b, Ts)
A = expm(a*Ts);
nx = size(b,1);
n = 4;
h = Ts/n;
Ai = eye(nx) + A;
Coef = 2;
for i = 1:n-1
    if Coef == 2
        Coef = 4;
    else
        Coef = 2;
    end
    Ai = Ai + Coef*expm(a*i*h);
end
B = (h/3)*Ai*b;

```

Приложение 2. Проект программного обеспечения регулятора MPC с наблюдателем возмущений для ПЛК на языках стандарта МЭК 61131-3

Содержание

Таблица П2. 1 – Данные проекта

Таблица П2. 2 – Переменные ПЛК

Таблица П2. 3 – Переменные производных типов (DDT)

Таблица П2. 4 – Секции программы

Рисунок П2. 1 – Структура программы

Таблица П2. 5 – Настройки основной задачи MAST

П2. 1 Листинг основной программы - main: [MAST]

П2. 2 Листинг подпрограммы - init <SR>: [MAST]

П2. 3 Листинг подпрограммы - Calc_aug <SR>: [MAST]

П2. 4 Листинг подпрограммы - Calc_W <SR>: [MAST]

П2. 5 Листинг подпрограммы - Calc_Constraints <SR>: [MAST]

П2. 6 Листинг подпрограммы - Calc_PHRsEEinv <SR>: [MAST]

П2. 7 Листинг подпрограммы - Calc_Fd <SR>: [MAST]

П2. 8 Листинг подпрограммы - Solve_QP <SR>: [MAST]

П2. 9 Листинг подпрограммы - UpdatePredict <SR>: [MAST]

П2. 10 Листинг подпрограммы - ParamChange <SR>: [MAST]

П2. 11 Листинг подпрограммы - DOB <SR>: [MAST]

П2. 12 Листинг подпрограммы - Observer_test <SR>: [MAST]

Таблица П2. 1 – Данные проекта

Project	MPC-DOB
Designer	Zakamaldin A.A.
Application	MPCDOB_019.stu
Software Version	Unity Pro XL V13.0
Creation Date	21.12.2021 13:31:59
Last Modification Date	01.03.2022 00:55:59
Target PLC	BMX P34 2020 02.70CPU 340-20 Modbus Ethernet

Таблица П2. 2 – Переменные ПЛК

Name	Type	Address
Data_MPC	T_MPC	%MW2000
delay_halt	BOOL	
Delay_init	BOOL	
delay_man	BOOL	
delay_ready	BOOL	
delay_t_delay	REAL	
delay_Ts	REAL	
delay_X	REAL	
delay_Y	REAL	
delay_y_man	REAL	
DOB_Buff	ARRAY[1..4] OF REAL	
DOB_L_OUT	ARRAY[1..4] OF REAL	
DOB_L_OUTd	ARRAY[1..4] OF REAL	
DOB_L_U	INT	
DOB_L_X	INT	
DOB_L_Y	INT	
DOB_LA	ARRAY[1..4,1..4] OF REAL	
DOB_LB	ARRAY[1..4,1..4] OF REAL	
DOB_LC	ARRAY[1..4,1..4] OF REAL	
DOB_LD	ARRAY[1..4,1..4] OF REAL	
DOB_LX_prev	ARRAY[1..4] OF REAL	
DOB_OUT	ARRAY[1..4] OF REAL	
DOB_R_OUT	ARRAY[1..4] OF REAL	
DOB_R_U	INT	
DOB_R_X	INT	
DOB_R_Y	INT	
DOB_RA	ARRAY[1..4,1..4] OF REAL	
DOB_RB	ARRAY[1..4,1..4] OF REAL	
DOB_RC	ARRAY[1..4,1..4] OF REAL	
DOB_RD	ARRAY[1..4,1..4] OF REAL	
DOB_RX_prev	ARRAY[1..4] OF REAL	
i_level	REAL	%MW1002
i_ro	REAL	%MW1000

Продолжение Таблица П2. 2 – Переменные ПЛК

Name	Type	Address
i_U	INT	
i_X	INT	
i_Y	INT	
M_A	ARRAY[1..4,1..4] OF REAL	
M_A_aug	ARRAY[1..8,1..8] OF REAL	
M_A_aug_c	INT	
M_A_aug_r	INT	
M_A_c	INT	
M_A_r	INT	
M_B	ARRAY[1..4,1..4] OF REAL	
M_B_aug	ARRAY[1..8,1..4] OF REAL	
M_B_aug_c	INT	
M_B_aug_r	INT	
M_B_c	INT	
M_B_r	INT	
M_C	ARRAY[1..4,1..4] OF REAL	
M_C_aug	ARRAY[1..4,1..8] OF REAL	
M_C_aug_c	INT	
M_C_aug_r	INT	
M_C_c	INT	
M_C_r	INT	
M_CC	ARRAY[1..64,1..16] OF REAL	
M_CC_c	INT	
M_CC_r	INT	
M_Constr	ARRAY[1..64] OF REAL	
M_d	ARRAY[1..64] OF REAL	
M_d_r	INT	
M_dd	ARRAY[1..64] OF REAL	
M_dd_r	INT	
M_DeltaU	ARRAY[1..16] OF REAL	
M_DeltaU_r	INT	
M_dupast	ARRAY[1..64,1..4] OF REAL	
M_dupast_c	INT	
M_dupast_r	INT	
M_E	ARRAY[1..16,1..16] OF REAL	
M_E_c	INT	
M_E_inv	ARRAY[1..16,1..16] OF REAL	
M_E_proverka	ARRAY[1..16,1..16] OF REAL	
M_E_r	INT	
M_F	ARRAY[1..8] OF REAL	
M_F_r	INT	
M_H	ARRAY[1..800,1..16] OF REAL	
M_H_c	INT	
M_H_r	INT	
M_K	ARRAY[1..64] OF REAL	
M_K_r	INT	
M_Kob	ARRAY[1..4,1..4] OF REAL	
M_Kob_c	INT	
M_Kob_r	INT	
M_lambda	ARRAY[1..64] OF REAL	
M_lambda_prev	ARRAY[1..64] OF REAL	
M_lambda_r	INT	
M_P	ARRAY[1..800,1..4] OF REAL	
M_P_c	INT	
M_P_r	INT	
M_Rs	ARRAY[1..800,1..4] OF REAL	
M_Rs_c	INT	

Продолжение Таблица П2. 2 – Переменные ПЛК

Name	Type	Address
M_Rs_r	INT	
M_st_F1	ARRAY[1..16,1..4] OF REAL	
M_st_F1_c	INT	
M_st_F1_r	INT	
M_st_F2	ARRAY[1..16,1..4] OF REAL	
M_st_F2_c	INT	
M_st_F2_r	INT	
M_st_F3	ARRAY[1..16] OF REAL	
M_st_F3_r	INT	
M_st_F4	ARRAY[1..16] OF REAL	
M_st_F4_r	INT	
M_T	ARRAY[1..64,1..64] OF REAL	
M_T_c	INT	
M_T_r	INT	
M_Uncons	ARRAY[1..16] OF REAL	
M_Uncons_r	INT	
M_W	ARRAY[1..16,1..16] OF REAL	
M_W_c	INT	
M_W_r	INT	
Model_Tau	REAL	
r	ARRAY[1..4] OF REAL	
r_r	INT	
REFERENCE1	REAL	%MW1004
REFERENCE2	REAL	%MW1006
Set_dumax	ARRAY[1..4] OF REAL	
Set_Int	REAL	
Set_Nc	INT	
Set_Np	INT	
Set_QP_accur	REAL	
Set_QP_iter	INT	
Set_umax	ARRAY[1..4] OF REAL	
Set_umin	ARRAY[1..4] OF REAL	
Set_w_u1	REAL	
Set_w_u2	REAL	
Set_w_u3	REAL	
Set_w_u4	REAL	
SP1	REAL	%MW1008
SP2	REAL	%MW1010
st_al	REAL	
st_c	ARRAY[1..16,1..16] OF REAL	
st_ch_constr	BOOL	
st_ch_i_u	BOOL	
st_ch_Nc	BOOL	
st_ch_Np	BOOL	
st_ch_Object	BOOL	
st_ch_w	BOOL	
st_d	ARRAY[1..16,1..16] OF REAL	
st_det	REAL	
st_det1	REAL	
st_DettaU1	ARRAY[1..16] OF REAL	
st_DettaU2	ARRAY[1..16] OF REAL	
st_e	ARRAY[1..16,1..16] OF REAL	
st_f	BOOL	
st_g	ARRAY[1..16,1..16] OF REAL	
st_i	INT	
st_i_U	INT	
st_i_X	INT	

Продолжение Таблица П2. 2 – Переменные ПЛК

Name	Type	Address
st_i_Y	INT	
st_ii	INT	
st_interval	TIME	
st_j	INT	
st_k	INT	
st_la	REAL	
st_m	INT	
st_M_A	ARRAY[1..4,1..4] OF REAL	
st_M_B	ARRAY[1..4,1..4] OF REAL	
st_M_C	ARRAY[1..4,1..4] OF REAL	
st_M_K	ARRAY[1..16] OF REAL	
st_M_T	ARRAY[1..64,1..16] OF REAL	
st_Model_Tau	TIME	
st_nn	INT	
st_nnn	INT	
st_p	INT	
st_r	REAL	
st_Set_dumax	ARRAY[1..4] OF REAL	
st_set_Nc	INT	
st_set_Np	INT	
st_Set_umax	ARRAY[1..4] OF REAL	
st_Set_umin	ARRAY[1..4] OF REAL	
st_Set_w_u1	REAL	
st_Set_w_u2	REAL	
st_Set_w_u3	REAL	
st_Set_w_u4	REAL	
st_w	REAL	
st_w1	REAL	
st_z	REAL	
st_znak	REAL	
st_znak1	REAL	
u	ARRAY[1..4] OF REAL	
u_r	INT	
u_test	ARRAY[1..4] OF REAL	
x	ARRAY[1..4] OF REAL	
x_obt	ARRAY[1..4] OF REAL	
x_obt_prev	ARRAY[1..4] OF REAL	
x_ot	ARRAY[1..4] OF REAL	
x_ot_prev	ARRAY[1..4] OF REAL	
x_prev	ARRAY[1..4] OF REAL	
x_r	INT	
Xf	ARRAY[1..8] OF REAL	
Xf_r	INT	
y	ARRAY[1..4] OF REAL	
y_d	ARRAY[1..4] OF REAL	
y_obt	ARRAY[1..4] OF REAL	
y_ot	ARRAY[1..4] OF REAL	
y_predict	ARRAY[1..4] OF REAL	%MW1100
y_r	INT	

Таблица П2. 3 – Переменные производных типов (DDT)

Name	Type	Comment
T_MPC	<Struct>	
PV1	REAL	
PV2	REAL	
PV3	REAL	

Продолжение Таблица П2. 3 – Переменные производных типов (DDT)

Name	Type	Comment
PV4	REAL	
SP1	REAL	
SP2	REAL	
SP3	REAL	
SP4	REAL	
OV1	REAL	
OV2	REAL	
OV3	REAL	
OV4	REAL	
Num_Inputs	INT	
Num_States	INT	
Num_Outputs	INT	
Np	INT	
Nc	INT	
QP_iter	INT	
QP_accur	REAL	
Sample_Time	REAL	
W_OV1	REAL	
W_OV2	REAL	
W_OV3	REAL	
W_OV4	REAL	
Dmax_OV1	REAL	
Dmax_OV2	REAL	
Dmax_OV3	REAL	
Dmax_OV4	REAL	
Max_OV1	REAL	
Max_OV2	REAL	
Max_OV3	REAL	
Max_OV4	REAL	
Min_OV1	REAL	
Min_OV2	REAL	
Min_OV3	REAL	
Min_OV4	REAL	
CMD	WORD	
Clear	BOOL	Очистка матриц, участвующих в онлайн расчетах MPC
Init	BOOL	Инициализация входных данных
Constr_ON	BOOL	Включить учет ограничений (=1)
MPC_ON	BOOL	Включить регулятор (=1)
Observer_ON	BOOL	Включить наблюдатель (=1)
Observer_Test	BOOL	
DOB_ON	BOOL	Включить DOB (=1)
CMD_b7	BOOL	
CMD_b8	BOOL	
CMD_b9	BOOL	
CMD_b10	BOOL	
CMD_b11	BOOL	
CMD_b12	BOOL	
CMD_b13	BOOL	
CMD_b14	BOOL	
CMD_b15	BOOL	
STA	WORD	
Mode_Constr	BOOL	
STA_b1	BOOL	
STA_b2	BOOL	
STA_b3	BOOL	
STA_b4	BOOL	

Продолжение Таблица П2. 3 – Переменные производных типов (DDT)

Name	Type	Comment
STA_b5	BOOL	
STA_b6	BOOL	
STA_b7	BOOL	
STA_b8	BOOL	
STA_b9	BOOL	
STA_b10	BOOL	
STA_b11	BOOL	
STA_b12	BOOL	
STA_b13	BOOL	
STA_b14	BOOL	
STA_b15	BOOL	

Таблица П2. 4 – Секции программы

SECTION	VALIDATION CONDITION	SECTION COMMENT	MODULE	LANGUA G E
main				ST
init				ST
Calc_aug				ST
Calc_W				ST
Calc_Constraints				ST
Calc_PHRsEEinv				ST
Calc_Fd				ST
Solve_QP				ST
UpdatePredict				ST
ParamChange				ST
DOB				ST
Observer_test				ST

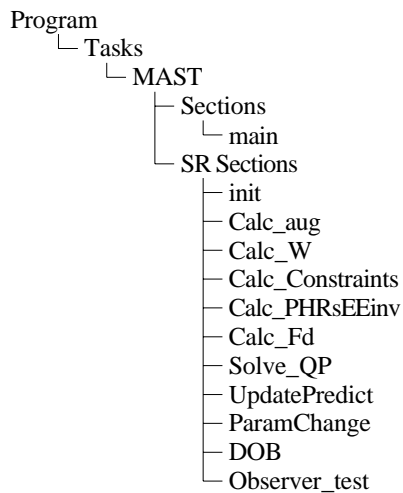
CALL TREE

Рисунок П2. 1 – Структура программы

Таблица П2. 5 – Настройки основной задачи MAST

Configuration	Cyclic
Task period configuration	0
Watchdog time configuration	250

П2. 1 Листинг основной программы - main: [MAST]

```

1  (* Инициализация по запросу*)
2  st_r_reinit (CLK := Data_MPC.Init);
3  (* Инициализация *)
4  if not %SW10.0 or st_r_reinit.q then
5  Init();
6  Calc_aug();
7  Calc_PHRsEEinv();
8  Calc_W();
9  Calc_Constraints();
10 Delay_init:=true;
11 Reset(Data_MPC.Init);
12 else
13 Delay_init:=false;
14 end_if; 15
16 (* Передача данных *)
17 i_X :=Data_MPC.Num_States;
18 i_U :=Data_MPC.Num_Inputs;
19 i_Y :=Data_MPC.Num_Outputs;
20 Set_Np :=Data_MPC.Np;
21 Set_Nc :=Data_MPC.Nc;
22 Set_w_u1 :=Data_MPC.W_OV1;
23 Set_w_u2 :=Data_MPC.W_OV2;
24 Set_w_u3 :=Data_MPC.W_OV3;
25 Set_w_u4 :=Data_MPC.W_OV4;
26 Set_dumax[1] :=Data_MPC.Dmax_OV1;
27 Set_dumax[2] :=Data_MPC.Dmax_OV2;
28 Set_dumax[3] :=Data_MPC.Dmax_OV3;
29 Set_dumax[4] :=Data_MPC.Dmax_OV4;
30 Set_umax[1] :=Data_MPC.Max_OV1;
31 Set_umax[2] :=Data_MPC.Max_OV2;
32 Set_umax[3] :=Data_MPC.Max_OV3;
33 Set_umax[4] :=Data_MPC.Max_OV4;
34 Set_umin[1] :=Data_MPC.Min_OV1;
35 Set_umin[2] :=Data_MPC.Min_OV2;
36 Set_umin[3] :=Data_MPC.Min_OV3;
37 Set_umin[4] :=Data_MPC.Min_OV4;
38 Set_QP_iter :=Data_MPC.QP_iter;
39 Set_QP_accur :=Data_MPC.QP_accur;
40 Set_Int :=Data_MPC.Sample_Time;
41 r[1] :=Data_MPC.SP1;
42 r[2] :=Data_MPC.SP2;
43 r[3] :=Data_MPC.SP3;
44 r[4] :=Data_MPC.SP4;
45 Data_MPC.OV1 :=u[1];
46 Data_MPC.OV2 :=u[2];
47 Data_MPC.OV3 :=u[3];
48 Data_MPC.OV4 :=u[4];
49 Data_MPC.PV1 :=i_ro;
50 Data_MPC.PV2 :=i_level;
51 Data_MPC.PV3 :=0.0;
52 Data_MPC.PV4 :=0.0;
53 st_Model_Tau := REAL_TO_TIME (IN := Model_Tau*1000.0);
54 st_interval := REAL_TO_TIME (IN := Set_Int*1000.0); 55
56 (* Размерности основных матриц *)
57 x_r:=i_X;

```

```

58 u_r:=i_U;
59 y_r:=i_Y;
60 r_r:=i_Y;
61   Xf_r:=i_X+i_Y;
62   M_Kob_r:=i_X;
63   M_Kob_c:=i_Y;
64
65   (* интервал выполнения программы MPC *)
66   SAMPLETM (INTERVAL := st_interval, DELSCANS := 100);
67
68   (* регулятор MPC *)
69   if SAMPLETM.q then
70     (* управляемые величины - обратная связь (PV)*)
71     if Data_MPC.MPC_ON then
72
73       Calc_Fd(); (* расчет F, d *)
74       Solve_QP(); (* решение задачи QP *)
75       DOB(); (* подавление возмущений *)
76
77       (* u=u+deltau - оптимальное управление*)
78       for st_ii:=1 to u_r do
79         u[st_ii]:=u[st_ii]+M_Deltau[1+Set_Nc*(st_ii-1)];
80       end_for;
81
82       UpdatePredict();(* обновление прогноза по модели *)
83
84       if Data_MPC.DOB_ON then
85         for st_ii:=1 to u_r do
86           u[st_ii]:=u[st_ii]-DOB_OUT[st_ii] ;
87         end_for;
88       end_if;
89
90       else
91         FOR st_i:= 1 TO x_r DO
92           x_prev[st_i] := 0.0;
93           x[st_i] := 0.0;
94         end_for;
95       end_if;
96     end_if;
97
98     (* пересчет матриц при изменении настроек *)
99     (* поиск изменений с интервалом *)
100    if SAMPLETM.q then
101      ParamChange();
102    end_if;
103
104    (* пересчет матриц расширенных *)
105    if st_ch_Object then
106      Calc_aug();
107    end_if;
108
109    (* пересчет весов *)
110    if st_ch_w or st_ch_Nc or st_ch_i_u then
111      Calc_W();
112    end_if;
113
114    (* пересчет матриц *)

```

```

115 if st_ch_Object or st_ch_Nc or st_ch_Np or st_ch_w then
116 Calc_PHRsEEinv();
117 end_if;
118
119 (* пересчет ограничений *)
120 if st_ch_constr or st_ch_Nc or st_ch_i_u then
121 Calc_Constraints();
122 end_if;
123
124 (* обнуление результатов расчетов MPC (для наладки) *)
125 if Data_MPC.Clear then
126 FOR st_i:= 1 TO Xf_r DO
127 Xf[st_i] := 0.0;
128 end_for;
129 FOR st_i:= 1 TO u_r DO 130 u[st_i] := 000.0;
131 end_for;
132 FOR st_i:= 1 TO x_r DO
133 x_prev[st_i] := 0.0;
134 end_for;
135 Reset(Data_MPC.Clear);
136 end_if;
137
138 (* тестирование сходимости модели наблюдателя состояний*)
139 if SAMPLETM.q and Data_MPC.Observer_test then
140 Observer_test();
141 end_if;

```

П2. 2 Листинг подпрограммы - init <SR>: [MAST]

```

1 (* Настройки/исходные данные *)
2
3 (* размерности модели*)
4 Data_MPC.Num_States:=2;
5 Data_MPC.Num_Inputs:=1;
6 Data_MPC.Num_Outputs:=1; 7
8 (* MPC settings*)
9 Data_MPC.Np:=100;
10 Data_MPC.Nc:=2;
11
12 (* веса управления*)
13 Data_MPC.W_OV1:=0.1;
14 Data_MPC.W_OV2:=0.0;
15 Data_MPC.W_OV3:=0.0;
16 Data_MPC.W_OV4:=0.0;
17
18 (* Set_dumax *)
19 Data_MPC.Dmax_OV1:=10.0;
20 Data_MPC.Dmax_OV2:=100.0;
21 Data_MPC.Dmax_OV3:=0.0;
22 Data_MPC.Dmax_OV4:=0.0;
23
24 (* Set_umax *)
25 Data_MPC.Max_OV1:=600.0;
26 Data_MPC.Max_OV2:=1500.0;
27 Data_MPC.Max_OV3:=0.0;
28 Data_MPC.Max_OV4:=0.0;
29

```

```

30 (* Set_umin *)
31 Data_MPC.Min_OV1:=100.0;
32 Data_MPC.Min_OV2:=100.0;
33 Data_MPC.Min_OV3:=0.0;
34 Data_MPC.Min_OV4:=0.0;
35
36 (* уставка по умолчанию*)
37 Data_MPC.SP1:=1.0;
38 Data_MPC.SP2:=1000.0;
39 Data_MPC.SP3:=0.0;
40 Data_MPC.SP4:=0.0;
41
42 (* настройки QP *)
43 Data_MPC.QP_iter:= 10;
44 Data_MPC.QP_accur:=0.00001;
45
46 (* интервал дискретизации *)
47 Data_MPC.Sample_Time:=0.1; (* с *)
48
49
50 (* Матрицы ОУ *)
51 for st_i:=1 to 4 do
52 for st_j:=1 to 4 do
53 M_A[st_i][st_j]:=0.0;
54 M_B[st_i][st_j]:=0.0;
55 M_C[st_i][st_j]:=0.0;
56 end_for;
57 end_for;
58
59 (* A *)
60 M_A[1][1]:=1.0; M_A[1][2]:=0.0;
61 M_A[2][1]:=0.1; M_A[2][2]:=1.0;
62
63 (* B *)
64 M_B[1][1]:=0.1;
65 M_B[2][1]:=0.005;
66
67 (* C *)
68 M_C[1][1]:=0.0; M_C[1][2]:=1.0;
69
70 (* Kob *)
71 M_Kob[1][1]:=0.9705; M_Kob[1][2]:=-0.0009;
72 M_Kob[2][1]:=0.0; M_Kob[2][2]:=0.9895;

```

П2.3 Листинг подпрограммы - Calc_aug <SR>: [MAST]

```

1 (* очистка матриц *)
2 for st_i:=1 to 8 do
3 for st_j:=1 to 8 do
4 M_A_aug[st_i][st_j]:=0.0;
5 end_for;
6 end_for;
7 for st_i:=1 to 8 do
8 for st_j:=1 to 4 do
9 M_B_aug[st_i][st_j]:=0.0;
10 end_for;
11 end_for;

```

```

12   for st_i:=1 to 4 do
13   for st_j:=1 to 8 do
14   M_C_aug[st_i][st_j]:=0.0;
15   end_for;
16   end_for;
17
18 (* матрицы A, B, C пространства состояния модели ОУ*)
19 (* A *)
20   M_A_r:=i_X; (* количество строк *)
21   M_A_c:=i_X; (* количество колонок *)
22 (* B *)
23 M_B_r:=i_X;
24 M_B_c:=i_U;
25 (* C *)
26 M_C_r:=i_Y;
27 M_C_c:=i_X; 28
29 (* A_aug++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++ *)
30   (* размерность матрицы A_aug *)
31   M_A_aug_r:=M_A_r+M_C_r; (* количество строк *)
32   M_A_aug_c:=M_A_c+i_Y; (* количество столбцов *) 33
34   (* расчет матрицы A_aug *)
35   for st_i:=1 to M_A_r do
36   for st_j:=1 to M_A_c do
37   M_A_aug[st_i][st_j]:=M_A[st_i][st_j];
38   end_for;
39   for st_j:=M_A_c+1 to M_A_c+1+i_Y do
40   M_A_aug[st_i][st_j]:=0.0;
41   end_for;
42   end_for;
43
44   (* умножение C на A *)
45   FOR st_i:= 1 TO M_C_r DO
46   FOR st_j:= 1 TO M_A_c DO
47   FOR st_k:= 1 TO M_C_c DO
48   M_A_aug[st_i+M_A_r][st_j]      :=      M_A_aug[st_i+M_A_r][st_j]+(M_C[st_i][st_k])*(M_A[st
48>>_k][st_j]);
49   END_FOR;
50   END_FOR;
51   END_FOR;
52
53   for st_i:=1 to i_Y do
54   M_A_aug[st_i+M_A_r][st_i+M_A_c]:=1.0;
55   end_for;
56
57   (* B_aug++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++ *)
58   (* размерность матрицы B_aug *)
59   M_B_aug_r:=M_B_r+M_C_r; (* количество строк *)
60   M_B_aug_c:=M_B_c; (* количество столбцов *)
61
62   (* расчет матрицы B_aug *)
63   for st_i:=1 to M_B_r do
64   for st_j:=1 to M_B_c do
65   M_B_aug[st_i][st_j]:=M_B[st_i][st_j];
66   end_for;
67   end_for;
68
69   (* умножение C на B *)

```

```

70   FOR st_i:= 1 TO M_C_r DO
71   FOR st_j:= 1 TO M_B_c DO
72   FOR st_k:= 1 TO M_C_c DO
73   M_B_aug[st_i+M_B_r][st_j]      :=      M_B_aug[st_i+M_A_r][st_j]+(M_C[st_i][st_k])*(M_B[st
73>>_k][st_j]);
74   END_FOR;
75   END_FOR;
76   END_FOR;
77
78 (* C_aug++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++ *)
79 (* размерность матрицы C_aug *)
80   M_C_aug_r:=i_Y;      (* количество строк *)
81   M_C_aug_c:=i_X+i_Y;(* количество столбцов *)
82
83   (* расчет матрицы C_aug *)
84   for st_i:=1 to M_C_aug_r do
85   for st_j:=1 to i_X do
86   M_C_aug[st_i][st_j]:=0.0;
87   end_for;
88   end_for;
89
90 for st_i:=1 to i_U do
91   M_C_aug[st_i][st_i+i_X]:=1.0;
92 end_for;

```

П2. 4 Листинг подпрограммы - Calc_W <SR>: [MAST]

```

1 (* Весовая матрица для u*) 2
3   for st_i:=1 to 16 do
4   for st_j:=1 to 16 do
5   M_W[st_i][st_j]:=0.0;
6   end_for;
7   end_for; 8
9   M_W_r:=i_U*Set_Nc;
10  M_W_c:=i_U*Set_Nc; 11
12
13  for st_i:=1 to i_U do
14  if st_i=1 then
15  M_W[st_i][1]:=Set_w_u1;
16  end_if;
17  if st_i=2 then
18  M_W[st_i][2]:=Set_w_u2;
19  end_if;
20  if st_i=3 then
21  M_W[st_i][3]:=Set_w_u3;
22  end_if;
23  if st_i=4 then
24  M_W[st_i][4]:=Set_w_u4;
25  end_if;
26  end_for;
27
28 for st_i:=i_U+1 to M_W_r do
29   M_W[st_i][st_i]:=M_W[st_i-i_U][st_i-i_U];
30 end_for;

```

П2. 5 Листинг подпрограммы - Calc_Constraints <SR>: [MAST]

```

2   for st_i:=1 to 64 do
3   for st_j:=1 to 16 do
4   M_CC[st_i][st_j]:=0.0;
5   end_for;
6   end_for;
7
8   (* расчет матрицы CC *)
9   M_CC_r:=Set_Nc*i_U*4;
10  M_CC_c:=Set_Nc*i_U; 11
12 (* 1 *)
13 for st_i:=1 to Set_Nc*i_U do
14   M_CC[st_i][st_i]:=1.0;
15 end_for; 16
17 (* 2 *)
18 for st_i:=1 to Set_Nc*i_U do
19   M_CC[st_i+Set_Nc*i_U][st_i]:=-1.0;
20 end_for;
21
22 (* 3 *)
23   for st_nn:=0 to Set_Nc-1 do
24   for st_i:=1 to i_U do
25   M_CC[st_i+Set_Nc*i_U*2+st_nn*i_U][st_i]:=1.0;
26   end_for;
27   end_for;
28
29   fOR st_m:= 1 TO Set_Nc-1 DO
30   fOR st_nn:= 1 TO Set_Nc-1 DO
31   FOR st_i:= 1 TO i_U DO
32   FOR st_j:= 1 TO i_U DO
33   M_CC[st_i+Set_Nc*i_U*2+i_U*st_m][st_j+i_U*st_nn]   :=   M_CC[st_i+Set_Nc*i_U*2+i_U*(
33>>st_m-1)][st_j+i_U*(st_nn-1)];
34   end_for;
35   end_for;
36   end_for;
37   end_for;
38
39 (* 4 *)
40   for st_nn:=0 to Set_Nc-1 do
41   for st_i:=1 to i_U do
42   M_CC[st_i+Set_Nc*i_U*3+st_nn*i_U][st_i]:=-1.0;
43   end_for;
44   end_for;
45
46   fOR st_m:= 1 TO Set_Nc-1 DO
47   fOR st_nn:= 1 TO Set_Nc-1 DO
48   FOR st_i:= 1 TO i_U DO
49   FOR st_j:= 1 TO i_U DO
50   M_CC[st_i+Set_Nc*i_U*3+i_U*st_m][st_j+i_U*st_nn]   :=   M_CC[st_i+Set_Nc*i_U*3+i_U*(
50>>st_m-1)][st_j+i_U*(st_nn-1)];
51   end_for;
52   end_for;
53   end_for;
54   end_for;
55
56
57 for st_i:=1 to 64 do
58   M_dd[st_i]:=0.0;

```

```

59 end_for;
60
61
62
63
64 (* расчет матрицы dd *)
65 M_dd_r:=Set_Nc*i_U*4;
66
67 (* 1-2 *)
68 for st_nn:=0 to 2*Set_Nc-1 do
69 for st_i:=1 to i_U do
70 M_dd[st_i+st_nn*i_U]:=Set_dumax[st_i];
71 end_for;
72 end_for;
73
74 (* 3-4 *)
75 for st_nn:=0 to Set_Nc-1 do
76 for st_i:=1 to i_U do
77 M_dd[st_i+Set_Nc*i_U*2+st_nn*i_U]:=Set_umax[st_i];
78 M_dd[st_i+Set_Nc*i_U*3+st_nn*i_U]:=-Set_umin[st_i];
79 end_for;
80 end_for;
81
82
83 (* расчет матрицы dupast *)
84 M_dupast_r:=Set_Nc*i_U*4;
85 M_dupast_c:=i_U;
86
87 (* 1-2 *)
88 for st_i:=1 to Set_Nc*i_U*2 do
89 for st_j:=1 to M_dupast_c do
90 M_dupast[st_i][st_j]:=0.0;
91 end_for;
92 end_for;
93
94 (* 3-4 *)
95 for st_nn:=0 to Set_Nc-1 do
96 for st_i:=1 to M_dupast_c do
97 M_dupast[st_i+Set_Nc*i_U*2+st_nn*i_U][st_i]:=-1.0;
98 M_dupast[st_i+Set_Nc*i_U*3+st_nn*i_U][st_i]:=1.0;
99 end_for;
100 end_for;

```

П2. 6 Листинг подпрограммы - Calc_PHRsEEinv <SR>: [MAST]

```

1 (* секция выполняется при первом цикле и изменении настроек Nc, Nr или весовой матрицы *)
2 for st_i:=1 to 800 do
3 for st_j:=1 to 16 do
4 M_H[st_i][st_j]:=0.0;
5 end_for;
6 end_for;
7 for st_i:=1 to 800 do
8 for st_j:=1 to 4 do
9 M_P[st_i][st_j]:=0.0;
10 end_for;
11 end_for;
12

```



```

13 (* P+++++ *)
14 (* расчет матрицы P *)
15 M_P_r:=M_C_aug_r*Set_Np;
16 M_P_c:=M_A_aug_c;
17
18 FOR st_nn:= 0 TO Set_Np-1 DO
19   if st_nn=0 then
20     FOR st_i:= 1 TO M_C_aug_r DO
21       FOR st_j:= 1 TO M_A_aug_c DO
22         FOR st_k:= 1 TO M_C_aug_c DO
23           M_P[st_i][st_j] := M_P[st_i][st_j]+(M_C_aug[st_i][st_k])*(M_A_aug[st_k][st_j]);
24         end_for;
25       end_for;
26     end_for;
27   else
28     FOR st_i:= 1 TO M_C_aug_r DO
29       FOR st_j:= 1 TO M_A_aug_c DO
30         FOR st_k:= 1 TO M_P_c DO
31           M_P[st_i+st_nn*M_C_aug_r][st_j] := M_P[st_i+st_nn*M_C_aug_r][st_j]+(M_P[st_i+(st 31>>_nn-
1)M_C_aug_r][st_k])*(M_A_aug[st_k][st_j]);
32         end_for;
33       end_for;
34     end_for;
35   end_if;
36 end_for;
37
38 (* H+++++ *)
39 (* расчет матрицы H *)
40 M_H_r:=M_C_aug_r*Set_Np;
41 M_H_c:=M_B_aug_c*Set_Nc;
42
43 FOR st_nn:= 0 TO Set_Np-1 DO
44   if st_nn=0 then
45     FOR st_i:= 1 TO M_C_aug_r DO
46       FOR st_j:= 1 TO M_B_aug_c DO
47         FOR st_k:= 1 TO M_C_aug_c DO
48           M_H[st_i][st_j] := M_H[st_i][st_j]+(M_C_aug[st_i][st_k])*(M_B_aug[st_k][st_j]);
49         end_for;
50       end_for;
51     end_for;
52   else
53     FOR st_i:= 1 TO M_C_aug_r DO
54       FOR st_j:= 1 TO M_B_aug_c DO
55         FOR st_k:= 1 TO M_P_c DO
56           M_H[st_i+st_nn*M_C_aug_r][st_j] := M_H[st_i+st_nn*M_C_aug_r][st_j]+(M_P[st_i+(st 56>>_nn-
1)M_C_aug_r][st_k])*(M_B_aug[st_k][st_j]);
57         end_for;
58       end_for;
59     end_for;
60   end_if;
61 end_for;
62
63 FOR st_nn:= 1 TO Set_Nc-1 DO
64   FOR st_i:= 1 TO (Set_Np-1)*M_C_aug_r DO
65     FOR st_j:= 1 TO M_B_aug_c DO
66       M_H[st_i+M_C_aug_r][st_j+M_B_aug_c*st_nn] := M_H[st_i][st_j+M_B_aug_c*(st_nn-1)] 66>>;
67     end_for;

```

```

68   end_for;
69   end_for;
70
71  (* Rs+++++ *)
72  (* расчет матрицы Rs *)
73  M_Rs_r:=i_Y*Set_Np;
74  M_Rs_c:=i_Y;
75
76  for st_i:=1 to 800 do
77  for st_j:=1 to 4 do
78  M_Rs[st_i][st_j]:=0.0;
79  end_for;
80  end_for;
81
82  FOR st_nn:= 0 TO Set_Np-1 DO
83  for st_i:=1 to i_Y do
84  M_Rs[st_i+st_nn*i_Y][st_i]:=1.0;
85  end_for;
86  end_for;
87
88
89  (* E+++++ *)
90  for st_i:=1 to 16 do
91  for st_j:=1 to 16 do
92  M_E[st_i][st_j]:=0.0;
93  end_for;
94  end_for; 95
96  (* расчет матрицы E *)
97  M_E_r:=i_U*Set_Nc;
98  M_E_c:=i_U*Set_Nc;
99
100  (* умножение транспонированной H' на H *)
101  FOR st_i:= 1 TO M_H_c DO
102  FOR st_j:= 1 TO M_H_c DO
103  FOR st_k:= 1 TO M_H_r DO
104  M_E[st_i][st_j] := M_E[st_i][st_j]+(M_H[st_k][st_i])*(M_H[st_k][st_j]);
105  end_for;
106  end_for;
107  end_for;
108
109  (* сложение с W и умножение на 2*)
110  FOR st_i:= 1 TO M_E_r DO
111  FOR st_j:= 1 TO M_E_c DO
112  M_E[st_i][st_j] := M_E[st_i][st_j]+M_W[st_i][st_j];
113  end_for;
114  end_for;
115
116  FOR st_i:= 1 TO M_E_r DO
117  FOR st_j:= 1 TO M_E_c DO
118  M_E[st_i][st_j] := M_E[st_i][st_j]*2.0;
119  end_for;
120  end_for;
121
122  (* ===== *)
123  (* Einv+++++ *)
124
125  for st_i:=1 to 16 do

```

```

126   for st_j:=1 to 16 do
127     st_c[st_i][st_j]:=0.0;
128     st_d[st_i][st_j]:=0.0;
129     st_e[st_i][st_j]:=0.0;
130
131   end_for;
132 end_for;
133
134   M_E_inv:=M_E;
135   (* поиск определителя матрицы E *)
136 st_det:=1.0;
137   for st_k:=1 to M_E_r do
138     if M_E_inv[st_k][st_k]=0.0 then
139       (* перестановка *)
140       st_i:=st_k;
141       st_p:=0;
142       st_z:=abs(M_E_inv[st_k][st_k]);
143       FOR st_j:= st_k+1 TO M_E_r DO
144         if abs(M_E_inv[st_j][st_k])>st_z then
145           st_z:=abs(M_E_inv[st_j][st_k]);
146           st_i:=st_j;
147           st_p:=st_p+1;
148         END_IF;
149       END_FOR;
150       IF st_i>st_k then
151         FOR st_j:=st_k TO M_E_r DO
152           st_z:=M_E_inv[st_i][st_j];
153           M_E_inv[st_i][st_j]:=M_E_inv[st_k][st_j];
154           M_E_inv[st_k][st_j]:=st_z;
155         END_FOR;
156       END_IF;
157       end_if; (* конец перестановки *)
158       if mod(st_p,2)=0 then
159         st_znak:=1.0;
160       else st_znak:=-1.0;
161       END_IF;
162       st_det:=st_znak*st_det*M_E_inv[st_k][st_k];
163       if abs(st_det)<0.0000001 then
164         st_f:=1;
165         (* Обратной матрицы нет! *)
166         exit;
167       else
168         st_f:=0;
169       end_if;
170       for st_j:=st_k+1 to M_E_r do
171         st_r:=M_E_inv[st_j][st_k]/M_E_inv[st_k][st_k];
172         for st_i:=st_k to M_E_r do
173           M_E_inv[st_j][st_i]:=M_E_inv[st_j][st_i]-st_r*M_E_inv[st_k][st_i];
174         end_for;
175       end_for;
176     end_for;
177
178   M_E_inv:=M_E;
179   (* st_f=0 - признак существования обратной матрицы *)
180   if st_f=0 then 181
181     (* транспонируем *)
182     FOR st_i:= 1 TO M_E_r DO

```

```

184 FOR st_j:= 1 TO M_E_r DO
185 st_g[st_i][st_j] := M_E_inv[st_j][st_i];
186 END_FOR;
187 END_FOR;
188
189
190 (* расчет дополнений *)
191 for st_i:=1 to M_E_r do
192 for st_m:=1 to M_E_r do
193 (* перестановки===== *)
194 for st_j:= 1 to M_E_r do (* перестановка строк *)
195 st_z:=st_g[st_i][st_j];
196
197 for st_k:=st_i to 2 by -1 do
198 st_d[st_k][st_j]:=st_g[st_k-1][st_j];
199 end_for;
200
201 for st_k:=st_i+1 to M_E_r do
202 st_d[st_k][st_j]:=st_g[st_k][st_j];
203 end_for;
204
205 st_d[1][st_j]:=st_z;
206 end_for;
207
208 for st_k:=1 to M_E_r do (* перестановка столбцов *)
209 st_z:=st_d[st_k][st_m];
210
211 for st_j:=st_m to 2 by -1 do
212 st_c[st_k][st_j]:=st_d[st_k][st_j-1];
213 end_for;
214
215 for st_j:=st_m+1 to M_E_r do
216 st_c[st_k][st_j]:=st_d[st_k][st_j];
217 end_for;
218
219 st_c[st_k][1]:=st_z;
220 end_for;
221
222 (* определитель===== *)
223 st_det1:=1.0;
224 for st_k:=2 to M_E_r do
225 (* начало перестановки-> *)
226 if st_c[st_k][st_k]=0.0 then
227 st_ii:=st_k;
228 st_p:=0;
229 st_z:=abs(st_c[st_k][st_k]);
230 FOR st_j:= st_k+1 TO M_E_r DO
231 if abs(st_c[st_j][st_k])>st_z then
232 st_z:=abs(st_c[st_j][st_k]);
233 st_ii:=st_j;
234 st_p:=st_p+1;
235 END_IF;
236 END_FOR;
237 IF st_ii>st_k then
238 FOR st_j:=st_k TO M_E_r DO
239 st_z:=st_c[st_ii][st_j];
240 st_c[st_ii][st_j]:=st_c[st_k][st_j];

```

```

241 st_c[st_k][st_j]:=st_z;
242 END_FOR;
243     END_IF;
244     end_if;
245     (* -> конец перестановки *)
246     if mod(st_p,2)=0 then
247         st_znak:=1.0;
248     else st_znak:=-1.0;
249     END_IF;
250     st_det1:=st_znak*st_det1*st_c[st_k][st_k];
251     for st_j:=st_k+1 to M_E_r do
252         st_r:=st_c[st_j][st_k]/st_c[st_k][st_k];
253         for st_ii:=st_k to M_E_r do
254             st_c[st_j][st_ii]:=st_c[st_j][st_ii]-st_r*st_c[st_k][st_ii];
255         end_for;
256     end_for;
257     end_for;
258
259     (* вычисление дополнений =====*)
260     if mod((st_i+st_m),2)=0 then
261         st_znak1:=1.0;
262     else st_znak1:=-1.0;
263     END_IF;
264     st_e[st_i][st_m]:=st_det1*st_znak1;
265 end_for;
266 end_for;
267
268     (* создаем обратную матрицу *)
269     for st_k:=1 to M_E_r do
270         for st_j:=1 to M_E_r do
271             M_E_inv[st_k][st_j]:=st_e[st_k][st_j]/st_det;
272         end_for;
273     end_for;
274
275     for st_k:=1 to M_E_r do
276         for st_j:=1 to M_E_r do
277             ChkREAL (IN := M_E_inv[st_k][st_j],
278             Subst := 0.0,
279             OUT => M_E_inv[st_k][st_j]);
280         end_for;
281     end_for;
282
283     else
284         M_E_inv:=M_E;
285     end_if;
286
287 (* проверка *)
288
289     for st_i:=1 to 16 do
290         for st_j:=1 to 16 do
291             M_E_proverka[st_i][st_j]:=0.0;
292         end_for;
293     end_for;
294
295     FOR st_i:= 1 TO M_E_r DO
296     FOR st_j:= 1 TO M_E_r DO
297     FOR st_k:= 1 TO M_E_r DO

```

```

298 M_E_proverka[st_i][st_j] := M_E_proverka[st_i][st_j]+(M_E[st_i][st_k])*(M_E_inv[st_k][st_j]);
299 end_for;
300 end_for;
301 end_for;

```

П2. 7 Листинг подпрограммы - Calc_Fd <SR>: [MAST]

```

1 (* расчет F *)
2   M_F_r:=M_H_c;
3   M_st_F1_r:=M_H_c;
4   M_st_F1_c:=M_Rs_c;
5   M_st_F2_r:=M_H_c;
6   M_st_F2_c:=M_P_c;
7   M_st_F3_r:=M_H_c;
8   M_st_F4_r:=M_H_c;
9
10
11  (* M_st_F1 - обнуление *)
12  FOR st_i:= 1 TO M_st_F1_r DO
13  FOR st_j:= 1 TO M_st_F1_c DO
14  M_st_F1[st_i][st_j] := 0.0;
15  end_for;
16  end_for;
17  (* M_st_F2 - обнуление *)
18  FOR st_i:= 1 TO M_st_F2_r DO
19  FOR st_j:= 1 TO M_st_F2_c DO
20  M_st_F2[st_i][st_j] := 0.0;
21  end_for;
22  end_for;
23  (* M_st_F3, M_st_F4, M_F - обнуление *)
24  FOR st_i:= 1 TO M_st_F3_r DO
25  M_st_F3[st_i] := 0.0;
26  M_st_F4[st_i] := 0.0;
27  M_F[st_i] := 0.0;
28  end_for;
29
30  (* умножение транспонированной H' на Rs *)
31  FOR st_i:= 1 TO M_H_c DO
32  FOR st_j:= 1 TO M_Rs_c DO
33  FOR st_k:= 1 TO M_H_r DO
34  M_st_F1[st_i][st_j] := M_st_F1[st_i][st_j]+M_H[st_k][st_i]*M_Rs[st_k][st_j];
35  end_for;
36  end_for;
37  end_for;
38  (* умножение H'Rs на r *)
39  FOR st_i:= 1 TO M_st_F1_r DO
40  FOR st_k:= 1 TO r_r DO
41  M_st_F3[st_i] := M_st_F3[st_i]+M_st_F1[st_i][st_k]*r[st_k];
42  end_for;
43  end_for;
44  (* умножение транспонированной H' на P *)
45  FOR st_i:= 1 TO M_H_c DO
46  FOR st_j:= 1 TO M_P_c DO
47  FOR st_k:= 1 TO M_H_r DO
48  M_st_F2[st_i][st_j] := M_st_F2[st_i][st_j]+M_H[st_k][st_i]*M_P[st_k][st_j];
49  end_for;
50  end_for;

```

```

51 end_for;
52 (* умножение H'P на Xf *)
53 FOR st_i:= 1 TO M_st_F1_r DO
54 FOR st_k:= 1 TO Xf_r DO
55 M_st_F4[st_i] := M_st_F4[st_i]+M_st_F2[st_i][st_k]*Xf[st_k];
56 end_for;
57 end_for;
58
59 FOR st_i:= 1 TO M_F_r DO
60 M_F[st_i] := (-2.0)*M_st_F3[st_i]-(-2.0)*M_st_F4[st_i];
61 end_for;
62
63 (* расчет d *)
64 M_d_r:=Set_Nc*i_U*4; 65
66 FOR st_i:= 1 TO M_d_r DO
67 M_d[st_i] := 0.0;
68 end_for;
69
70 (* умножение dupast на u *)
71 FOR st_i:= 1 TO M_dupast_r DO
72 FOR st_k:= 1 TO M_dupast_c DO
73 M_d[st_i] := M_d[st_i]+M_dupast[st_i][st_k]*u[st_k];
74 end_for;
75 end_for;
76 (* сложение с dd *)
77 FOR st_i:= 1 TO M_d_r DO
78 M_d[st_i] := M_d[st_i]+M_dd[st_i];
79 end_for;

```

П2. 8 Листинг подпрограммы - Solve_QP <SR>: [MAST]

```

1 (* M_DeltaU *)
2 (* M_Uncons *)
3 (* M_Constr *)
4 (* M_T *)
5 (* M_K *)
6 (* st_M_K *)
7 (* M_lambda *)
8 (* st_DeltaU1 *)
9 (* st_al st_w st_w1 st_la *)
10
11 (* unconstrained solution *)
12 M_DeltaU_r:=M_E_r;
13 M_Uncons_r:=M_E_r;
14
15 FOR st_i:= 1 TO M_Uncons_r DO
16 M_Uncons[st_i] := 0.0;
17 end_for;
18
19 (* DeltaU = -E\F *)
20 FOR st_i:= 1 TO M_Uncons_r DO
21 FOR st_k:= 1 TO M_F_r DO
22 M_Uncons[st_i] := M_Uncons[st_i]+M_E_inv[st_i][st_k]*M_F[st_k];
23 end_for;
24 end_for;
25
26 FOR st_i:= 1 TO M_Uncons_r DO

```

```

27   M_Uncons[st_i] := M_Uncons[st_i]*(-1.0);
28   end_for;
29
30 M_DeltaU:=M_Uncons;
31
32   (* проверка, активны ли ограничения *)
33   if Data_MPC.Constr_ON then
34
35
36   FOR st_i:= 1 TO M_CC_r DO
37   M_Constr[st_i] := 0.0;
38   end_for;
39
40   FOR st_i:= 1 TO M_CC_r DO
41   FOR st_k:= 1 TO M_CC_c DO
42   M_Constr[st_i] := M_Constr[st_i]+M_CC[st_i][st_k]*M_DeltaU[st_k];
43   end_for;
44   end_for;
45
46   st_nn:=0;
47   for st_i:=1 to M_CC_r do
48   if M_Constr[st_i] > M_d[st_i] then
49   st_nn:= st_nn + 1;
50   else
51   st_nn:= st_nn + 0;
52   end_if;
53   end_for;
54
55
56   (* если ограничения активны, то решается задача QP *)
57   if st_nn<>0 then
58   Data_MPC.MODE_Constr:=true;
59   (* расчет матрицы T *)
60   M_T_r:=M_CC_r;
61   M_T_c:=M_CC_c;
62   FOR st_i:= 1 TO M_T_r DO
63   FOR st_j:= 1 TO M_T_c DO
64   M_T[st_i][st_j] := 0.0;
65   end_for;
66   end_for;
67   FOR st_i:= 1 TO M_CC_r DO
68   FOR st_j:= 1 TO M_E_c DO
69   st_M_T[st_i][st_j] := 0.0;
70   end_for;
71   end_for;
72   (* умножение CC на обратную матрицу E-1 *)
73   FOR st_i:= 1 TO M_CC_r DO
74   FOR st_j:= 1 TO M_E_c DO
75   FOR st_k:= 1 TO M_CC_c DO
76   st_M_T[st_i][st_j] := st_M_T[st_i][st_j]+M_CC[st_i][st_k]*M_E_inv[st_k][st_j];
77   end_for;
78   end_for;
79   end_for;
80   (* умножение на транспонированную матрицу CC' *)
81   FOR st_i:= 1 TO M_T_r DO
82   FOR st_j:= 1 TO M_CC_r DO
83   FOR st_k:= 1 TO M_E_c DO

```



```

84     M_T[st_i][st_j] := M_T[st_i][st_j]+st_M_T[st_i][st_k]*M_CC[st_j][st_k];
85     end_for;
86     end_for;
87     end_for;
88
89     (* расчет матрицы K *)
90     M_K_r:=M_dd_r;
91     FOR st_i:= 1 TO M_K_r DO
92     M_K[st_i] := 0.0;
93     end_for;
94     FOR st_i:= 1 TO M_E_r DO
95     st_M_K[st_i] := 0.0;
96     end_for;
97
98     (* умножение обратной матрицы E-1 на F *)
99     FOR st_i:= 1 TO M_E_r DO
100    FOR st_k:= 1 TO M_E_c DO
101    st_M_K[st_i] := st_M_K[st_i]+M_E_inv[st_i][st_k]*M_F[st_k];
102    end_for;
103    end_for;
104    (* умножение CC на произведение обратной матрицы E-1 на F *)
105    FOR st_i:= 1 TO M_CC_r DO
106    FOR st_k:= 1 TO M_CC_c DO
107    M_K[st_i] := M_K[st_i]+M_CC[st_i][st_k]*st_M_K[st_k];
108    end_for;
109    end_for;
110    (* сумма с матрицей d *)
111    FOR st_i:= 1 TO M_K_r DO
112    M_K[st_i] := M_K[st_i]+M_d[st_i];
113    end_for;
114
115    (* матрица M_lambda *)
116    M_lambda_r:=M_K_r;
117
118    FOR st_i:= 1 TO M_lambda_r DO
119    M_lambda[st_i] := 0.0;
120    end_for;
121
122    (* st_al:=3.0; *)
123
124    (* решение QP *)
125    for st_nnn:= 1 to Set_QP_iter do
126
127    M_lambda_prev:= M_lambda;
128    st_w:=0.0;
129    st_la:=0.0;
130
131    for st_i:=1 to M_K_r do
132
133    st_w1:=0.0;
134
135    (* M_T[st_i][,])*lambda *)
136    FOR st_k:= 1 TO M_T_c DO
137    st_w1 := st_w1+M_T[st_i][st_k]*M_lambda[st_k];
138    end_for;
139
140    (* w = T(i,)*lambda - T(i,i)*lambda(i,1); *)

```

```

141      st_w:= st_w1 - M_T[st_i][st_i]*M_lambda[st_i];
142
143      (* w = w + K(i,1); *)
144      st_w:=st_w+M_K[st_i];
145
146      (* la = -w/T(i,i); *)
147      if M_T[st_i][st_i]<>0.0 then
148      st_la:=(-st_w)/M_T[st_i][st_i];
149      else
150      st_la:=0.0;
151      end_if;
152      (* lambda(i,1) = max(0,la); *)
153      if st_la<0.0 then
154      st_la:=0.0;
155      end_if;
156
157      ChkREAL_0 (IN := st_la,
158      Subst := 0.0,
159      OUT => st_la );
160
161      M_lambda[st_i]:= st_la;
162
163  end_for;
164
165  st_al:=0.0;
166  (* al = (lambda-lambda_p)*(lambda-lambda_p); *)
167  FOR st_j:= 1 TO M_lambda_r DO
168      st_al := st_al+(M_lambda[st_j]-M_lambda_prev[st_j])*(M_lambda[st_j]-M_lambda_pre
168>>v[st_j]);
169  end_for;
170
171  if st_al < Set_QP_accur then
172  exit;
173  end_if;
174  end_for;
175
176      (* расчет deltaU      *)
177
178      FOR st_i:= 1 TO M_CC_c DO
179      st_DeltaU1[st_i] := 0.0;
180      end_for;
181      FOR st_i:= 1 TO M_E_c DO
182      st_DeltaU2[st_i] := 0.0;
183      end_for;
184
185      (* M_CC*M_lambda *)
186      FOR st_i:= 1 TO M_CC_c DO
187      FOR st_k:= 1 TO M_CC_r DO
188      st_DeltaU1[st_i] := st_DeltaU1[st_i]+M_CC[st_k][st_i]*M_lambda[st_k];
189      end_for;
190      end_for;
191
192      (* M_E_inv*M_CC*M_lambda *)
193      FOR st_i:= 1 TO M_E_c DO
194      FOR st_k:= 1 TO M_E_r DO
195      st_DeltaU2[st_i] := st_DeltaU2[st_i]+M_E_inv[st_i][st_k]*st_DeltaU1[st_k];
196      end_for;

```

```

197         end_for;
198
199         (* DeltaU = DeltaU - M_E_inv*M_CC*M_lambda; *)
200         FOR st_i:= 1 TO M_DeltaU_r DO
201             M_DeltaU[st_i] := M_DeltaU[st_i]-st_DeltaU2[st_i];
202         end_for;
203     else
204         Data_MPC.MODE_Constr:=false;
205     end_if;
206     else
207         Data_MPC.MODE_Constr:=false;
208     end_if;

```

П2. 9 Листинг подпрограммы - UpdatePredict <SR>: [MAST]

```

1     (* обновление прогноза по модели *)
2     y[1]:=Data_MPC.PV1;
3     y[2]:=Data_MPC.PV2;
4     y[3]:=Data_MPC.PV3;
5     y[4]:=Data_MPC.PV4;
6     x_prev:=x;
7
8     (* задержка *)
9     if Delay_init or %SW10.0 then
10        if i_U>=1 then
11            Model_Delay1 (X := y[1], T_DELAY := st_Model_Tau, Y => y_d[1]);
12        end_if;
13        if i_U>=2 then
14            Model_Delay2 (X := y[2], T_DELAY := st_Model_Tau, Y => y_d[2]);
15        end_if;
16        if i_U>=3 then
17            Model_Delay3 (X := y[3], T_DELAY := st_Model_Tau, Y => y_d[3]);
18        end_if;
19        if i_U>=4 then
20            Model_Delay4 (X := y[4], T_DELAY := st_Model_Tau, Y => y_d[4]);
21        end_if;
22    end_if;
23
24    (* Обнуление *)
25    FOR st_i:= 1 TO x_r DO
26        x[st_i] := 0.0;
27    end_for;
28    FOR st_i:= 1 TO y_r DO
29        y_predict[st_i] := 0.0;
30    end_for;
31    FOR st_i:= 1 TO Xf_r DO
32        Xf[st_i] := 0.0;
33    end_for;
34
35    (* y(:,i) = C*x(:,i+1) *)
36    FOR st_i:= 1 TO M_C_r DO
37        FOR st_k:= 1 TO M_C_c DO
38            y_predict[st_i] := y_predict[st_i]+M_C[st_i][st_k]*x_prev[st_k];
39        end_for;
40    end_for;
41
42    (* xh(:,i+1) = A_aug*xh(:,i) + B_aug*deltau' + kob*(y-yobs) *)

```

```

43 (* A*x *)
44   FOR st_i:= 1 TO M_A_r DO
45     FOR st_k:= 1 TO M_A_c DO
46       x[st_i] := x[st_i]+M_A[st_i][st_k]*x_prev[st_k];
47     end_for;
48   end_for;
49 (* + B*u *)
50   FOR st_i:= 1 TO M_B_r DO
51     FOR st_k:= 1 TO M_B_c DO
52       x[st_i] := x[st_i]+M_B[st_i][st_k]*u[st_k];
53     end_for;
54   end_for;
55
56   (* Если включен наблюдатель *)
57   if Data_MPC.Observer_ON then
58   (* +kob*(y-yobs) *)
59     FOR st_i:= 1 TO M_B_r DO
60       FOR st_k:= 1 TO M_Kob_c DO
61         x[st_i] := x[st_i]+M_Kob[st_i][st_k]*(y[st_k]-y_predict[st_k]);
62       end_for;
63     end_for;
64   end_if;
65
66 (* Xf = [x(:,kk+1) - x(:,kk); y(:,kk)] *)
67   FOR st_i:= 1 TO i_X DO
68     Xf[st_i] := x[st_i]-x_prev[st_i];
69   end_for;
70
71   FOR st_i:= 1+i_X TO Xf_r DO
72     Xf[st_i] := y_predict[st_i-i_X];
73   end_for;

```

П2. 10 Листинг подпрограммы - ParamChange <SR>: [MAST]

```

1   (* -изменение ограничений - st_ch_constr   *)
2   for st_i:=1 to i_U do
3     if st_Set_umax[st_i]<>Set_umax[st_i] then
4       st_ch_constr:=true; exit;
5     else   st_ch_constr:=false;
6     end_if;
7     if st_Set_umin[st_i]<>Set_umin[st_i] then
8       st_ch_constr:=true; exit;
9     else   st_ch_constr:=false;
10    end_if;
11    if st_Set_dumax[st_i]<>Set_dumax[st_i] then
12      st_ch_constr:=true; exit;
13    else   st_ch_constr:=false;
14    end_if;
15  end_for;
16
17  (* -изменение Nc - st_ch_Np   *)
18  if st_Set_Nc<>set_Nc then
19    st_ch_Nc:=true;
20  else
21    st_ch_Nc:=false;
22  end_if;
23

```

```

24  (* -изменение Np - st_ch_Nc *)
25  if st_Set_Np<>set_Np then
26  st_ch_Np:=true;
27  else
28  st_ch_Np:=false;
29  end_if;
30
31  (* -изменение весов - st_ch_w *)
32  if st_Set_w_u1<>Set_w_u1 or st_Set_w_u2<>Set_w_u2 or
33  st_Set_w_u3<>Set_w_u3 or st_Set_w_u4<>Set_w_u4 then
34  st_ch_w:=true;
35  else
36  st_ch_w:=false;
37  end_if;
38
39  (* -изменение i_U - st_ch_i_U*      )
40  if st_i_U<>i_U then
41  st_ch_i_u:=true;
42  else
43  st_ch_i_u:=false;
44  end_if;
45
46  (* изменение параметров OY - st_ch_Object *)
47  if st_ch_Object=true then
48  st_ch_Object:=false;
49  end_if;
50
51  for st_i:=1 to M_A_r do
52  for st_j:=1 to M_A_c do
53  if st_M_A[st_i][st_j]<>M_A[st_i][st_j] then
54  st_ch_Object:=true; exit;
55  end_if;
56  end_for;
57  end_for;
58
59  for st_i:=1 to M_B_r do
60  for st_j:=1 to M_B_c do
61  if st_M_B[st_i][st_j]<>M_B[st_i][st_j] then
62  st_ch_Object:=true; exit;
63  end_if;
64  end_for;
65  end_for;
66
67  for st_i:=1 to M_C_r do
68  for st_j:=1 to M_C_c do
69  if st_M_C[st_i][st_j]<>M_C[st_i][st_j] then
70  st_ch_Object:=true; exit;
71  end_if;
72  end_for;
73  end_for;
74
75  if st_i_U<>i_U then
76  st_ch_Object:=true;
77  end_if;
78
79  if st_i_X<>i_X then
80  st_ch_Object:=true;

```

```

81   end_if;
82
83   if st_i_Y<>i_Y then
84     st_ch_Object:=true;
85   end_if;
86
87   (* сохранение параметров *)
88   st_Set_umax:=Set_umax;
89   st_Set_umin:=Set_umin;
90   st_Set_dumax:=Set_dumax;
91   st_Set_Nc:=set_Nc;
92   st_Set_Np:=set_Np;
93   st_Set_w_u1:=Set_w_u1;
94   st_Set_w_u2:=Set_w_u2;
95   st_Set_w_u3:=Set_w_u3;
96   st_Set_w_u4:=Set_w_u4;
97   st_M_A:=M_A;
98   st_M_B:=M_B;
99   st_M_C:=M_C;
100  st_i_X:=i_X;
101  st_i_U:=i_U;

```

П2. 11 Листинг подпрограммы - DOB <SR>: [MAST]

```

1   (* левая часть DOB *)
2   (* Обнуление *)
3   FOR st_i:= 1 TO DOB_L_X DO
4     DOB_Buff[st_i] := 0.0;
5   end_for;
6   FOR st_i:= 1 TO DOB_L_X DO
7     DOB_L_OUT[st_i] := 0.0;
8   end_for;
9   (* xh(:,i+1) = A_aug*xh(:,i) + B_aug*deltau' + kob*(y-yobs) *)
10  (* A*x *)
11  FOR st_i:= 1 TO DOB_L_X DO
12    FOR st_k:= 1 TO DOB_L_X DO
13      DOB_Buff[st_i] := DOB_Buff[st_i]+DOB_LA[st_i][st_k]*DOB_LX_prev[st_k];
14    end_for;
15  end_for;
16  (* + B*u *)
17  FOR st_i:= 1 TO DOB_L_X DO
18    FOR st_k:= 1 TO DOB_L_U DO
19      DOB_Buff[st_i] := DOB_Buff[st_i]+DOB_LB[st_i][st_k]*u[st_k];
20    end_for;
21  end_for;
22  (* y(:,i) = C*x(:,i+1) *)
23  FOR st_i:= 1 TO DOB_L_Y DO
24    FOR st_k:= 1 TO DOB_L_X DO
25      DOB_L_OUT[st_i] := DOB_L_OUT[st_i]+DOB_LC[st_i][st_k]*DOB_Buff[st_k];
26    end_for;
27  end_for;
28  (* + D *)
29  FOR st_i:= 1 TO DOB_L_Y DO
30    FOR st_k:= 1 TO DOB_L_U DO
31      DOB_L_OUT[st_i] := DOB_L_OUT[st_i]+DOB_LD[st_i][st_k]*u[st_k];
32    end_for;
33  end_for;

```

```

34
35   DOB_LX_prev:=DOB_Buff;
36
37   (* задержка по модели объекта управления *)
38   if Delay_init or %SW10.0 then
39     if i_U>=1 then
40       DOB_L_Delay1 (X := DOB_L_OUT[1], T_DELAY := st_Model_Tau, Y => DOB_L_OUTd[1]);
41     end_if;
42     if i_U>=2 then
43       DOB_L_Delay2 (X := DOB_L_OUT[2], T_DELAY := st_Model_Tau, Y => DOB_L_OUTd[2]);
44     end_if;
45     if i_U>=3 then
46       DOB_L_Delay3 (X := DOB_L_OUT[3], T_DELAY := st_Model_Tau, Y => DOB_L_OUTd[3]);
47     end_if;
48     if i_U>=4 then
49       DOB_L_Delay4 (X := DOB_L_OUT[4], T_DELAY := st_Model_Tau, Y => DOB_L_OUTd[4]);
50     end_if;
51   end_if;
52
53   (* правая часть DOB *)
54   (* Обнуление *)
55   FOR st_i:= 1 TO DOB_L_X DO
56     DOB_Buff[st_i] := 0.0;
57   end_for;
58   FOR st_i:= 1 TO DOB_L_X DO
59     DOB_R_OUT[st_i] := 0.0;
60   end_for;
61   (* xh(:,i+1) = A_aug*xh(:,i) + B_aug*deltau' + kob*(y-yobs) *)
62 (* A*x *)
63   FOR st_i:= 1 TO DOB_R_X DO
64     FOR st_k:= 1 TO DOB_R_X DO
65       DOB_Buff[st_i] := DOB_Buff[st_i]+DOB_RA[st_i][st_k]*DOB_RX_prev[st_k];
66     end_for;
67   end_for;
68 (* + B*u *)
69   FOR st_i:= 1 TO DOB_R_X DO
70     FOR st_k:= 1 TO DOB_R_U DO
71       DOB_Buff[st_i] := DOB_Buff[st_i]+DOB_RB[st_i][st_k]*y[st_k];
72     end_for;
73   end_for;
74 (* y(:,i) = C*x(:,i+1) *)
75   FOR st_i:= 1 TO DOB_R_Y DO
76     FOR st_k:= 1 TO DOB_R_X DO
77       DOB_R_OUT[st_i] := DOB_R_OUT[st_i]+DOB_RC[st_i][st_k]*DOB_Buff[st_k];
78     end_for;
79   end_for;
80 (* + D *)
81   FOR st_i:= 1 TO DOB_R_Y DO
82     FOR st_k:= 1 TO DOB_R_U DO
83       DOB_R_OUT[st_i] := DOB_R_OUT[st_i]+DOB_RD[st_i][st_k]*y[st_k];
84     end_for;
85   end_for;
86
87   DOB_RX_prev:=DOB_Buff;
88
89
90   (* Выход DOB *)

```

```

91   FOR st_i:= 1 TO i_U DO
92   DOB_OUT[st_i]:=DOB_R_OUT[st_i]-DOB_L_OUT[st_i];
93   end_for;

```

П2. 12 Листинг подпрограммы - Observer_test <SR>: [MAST]

```

1  x_ot_prev:=x_ot;
2
3   (* МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА *)
4   FOR st_i:= 1 TO x_r DO
5   x_ot[st_i] := 0.0;
6   end_for;
7   FOR st_i:= 1 TO y_r DO
8   y_ot[st_i] := 0.0;
9 end_for;
10
11 (* ----- *)
12 (*  $x(k+1) = Ad*x_{prev} + Bd*u$ ; *)
13   FOR st_i:= 1 TO M_A_r DO
14   FOR st_k:= 1 TO M_A_c DO
15   x_ot[st_i] := x_ot[st_i]+M_A[st_i][st_k]*x_ot_prev[st_k];
16   end_for;
17   end_for;
18   FOR st_i:= 1 TO M_B_r DO
19   FOR st_k:= 1 TO M_B_c DO
20   x_ot[st_i] := x_ot[st_i]+M_B[st_i][st_k]*u_test[st_k];
21   end_for;
22   end_for;
23
24 (*  $y(k) = Cd*x(k+1)$  *)
25   FOR st_i:= 1 TO M_C_r DO
26   FOR st_k:= 1 TO M_C_c DO
27   y_ot[st_i] := y_ot[st_i]+M_C[st_i][st_k]*x_ot[st_k];
28   end_for;
29   end_for;
30
31 (* НАБЛЮДАТЕЛЬ *)
32
33 x_obt_prev:=x_obt;
34
35 (* Граница массивов *)
36 M_Kob_r:=i_X;
37 M_Kob_c:=i_Y;
38
39 (* Обнуление *)
40 FOR st_i:= 1 TO M_A_r DO
41 x_obt[st_i] := 0.0;
42 end_for;
43 FOR st_i:= 1 TO y_r DO
44 y_obt[st_i] := 0.0;
45 end_for;
46
47 (*  $y(:,i) = C*x(:,i+1)$  *)
48 FOR st_i:= 1 TO M_C_r DO
49 FOR st_k:= 1 TO M_C_c DO
50 y_obt[st_i] := y_obt[st_i]+M_C[st_i][st_k]*x_obt_prev[st_k];
51 end_for;

```



```
52     end_for;
53
54 (* xh(:,i+1) = A_aug*xh(:,i) + B_aug*deltau' + kob*(y-yobs) *)
55 (* A*x *)
56     FOR st_i:= 1 TO M_A_r DO
57         FOR st_k:= 1 TO M_A_c DO
58             x_obt[st_i] := x_obt[st_i]+M_A[st_i][st_k]*x_obt_prev[st_k];
59         end_for;
60     end_for;
61 (* + B*u *)
62     FOR st_i:= 1 TO M_B_r DO
63         FOR st_k:= 1 TO M_B_c DO
64             x_obt[st_i] := x_obt[st_i]+M_B[st_i][st_k]*u_test[st_k];
65         end_for;
66     end_for;
67 (* +kob*(y-yobs) *)
68     FOR st_i:= 1 TO M_B_r DO
69         FOR st_k:= 1 TO M_Kob_c DO
70             x_obt[st_i] := x_obt[st_i]+M_Kob[st_i][st_k]*(y_ot[st_k]-y_obt[st_k]);
71         end_for;
72     end_for;
```

Приложение 3. Акт внедрения научной работы на ООО «НПО ВЭСТ»



Общество с ограниченной ответственностью
«НПО ВЭСТ»

ООО «НПО ВЭСТ», 634009, Томская область,
г. Томск, ул. Мельничная, дом 45А, пом. Ц001
тел.: (3822) 400-733
факс: (3822) 400-887
e-mail: info@npowest.tom.ru, www.npowest.ru

ИНН/КПП 7020032645/701701001
Р/сч. 40702810600000010775
Филиал Банка ГПБ (АО) в г. Томске
К/сч. 30101810800000000758
БИК 046902758

Директор ООО «НПО ВЭСТ»

Кривошеин Ю.О.

« 30 » мая 2022 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы аспиранта Национального
исследовательского Томского политехнического университета

Закамалдина А.А.

Комиссия в составе:

председатель Кривошеин Юрий Олегович, директор ООО «НПО ВЭСТ».

Члены комиссии: Столяров Андрей Викторович, инж программист, Прохоров Сергей Валерьевич, нач. конструкторского отдела.

составили настоящий акт о том, что результаты научно исследовательской квалификационной работы представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, использованы в программном обеспечении программируемого логического контроллера (ПЛК) ВЭСТ-03, выпускаемого нашим предприятием серийно.

1. Операционная система ПЛК реализована на ядре микропроцессора GD32F207VKT6, которая обладает минимальными требованиями к микропроцессору, что позволяет включить разработанный соискателем функциональный блок регулятора с прогнозирующей моделью для управления шаровыми мельницами.
2. В состав функционального блока для ПЛК включены алгоритмы многопараметрического управления с прогнозирующей моделью максимальной размерностью 4 входа и 4 выхода, наблюдателя состояний объекта управления, наблюдателя внешних возмущений.
3. Разработанные аспирантом функциональный блок и математические модели, занимают 150 Кб кода и 120 Кб оперативной памяти, что позволяет использовать их в ПЛК ВЭСТ-03 на базе микропроцессора GD32F207VKT6.

Реализация вышеуказанных научных решений и разработанного программного обеспечения позволило:

- выполнять задачи импортозамещения ПЛК и снизить себестоимость внедрения системы управления шаровой мельницей примерно в 10 раз по сравнению с зарубежными аналогичными системами на основе подхода управления с прогнозирующей моделью;
- участвовать в проектах сложных систем автоматического управления в рамках технологического процесса измельчения щебня Туганского горно-обогатительного комбината "Ильменит";
- значительно снизить затраты на настройку и обслуживание систем автоматики технологического процесса измельчения в шаровой мельнице, без снижения качества обслуживания.

Председатель комиссии: Кривошеин Ю.О.

Члены комиссии: Столяров А.В. Прохоров С.В.



**Приложение 4. Акт внедрения научной работы в учебный процесс
Национального исследовательского Томского политехнического
университета**



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИШЭ ТПУ, к. т. н., доцент

_____ А.С. Матвеев

«_____» _____ 2022 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Закамалдина Андрея Андреевича

Комиссия в составе:

председатель: руководитель отделения электроэнергетики и электротехники, к.т.н., доцент, Ивашутенко А.С. Члены комиссии: начальник организационного отдела инженерной школы энергетики ТПУ, Шевченко Д.С., доцент отделения электроэнергетики и электротехники, к.т.н., Кладиев С.Н. Составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Закамалдина А.А. «Оптимальное управление процессом измельчения в шаровой мельнице с применением прогнозирующей модели», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, используются в учебном процессе Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики в методических материалах дисциплин: «Электрический привод», «Системы автоматического управления» студентами направления ООП 13.03.02. «Электроэнергетика и электротехника», а также при подготовке магистерских диссертаций студентами ТПУ.

Председатель комиссии:

Руководитель ОЭЭ ИШЭ

_____ А.С. Ивашутенко

Члены комиссии:

Начальник организационного отдела ИШЭ

_____ Д.С. Шевченко

Доцент ОЭЭ ИШЭ

_____ С.Н. Кладиев