



**РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ САМООБУЧАЮЩЕЙСЯ
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ОБОРУДОВАНИЕМ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО
ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ
В УСЛОВИЯХ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ВХОДНЫХ
ПАРАМЕТРОВ**



Зарубин М.Ю., Зарубина В.Р., Федосов Б.Т.,
Кузнецова А.Н., Штыкова И.В., Брановец Н.Е.

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ САМООБУЧАЮЩЕЙСЯ
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ОБОРУДОВАНИЕМ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО
ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ В
УСЛОВИЯХ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ВХОДНЫХ
ПАРАМЕТРОВ

Монография

Рудный, 2018

УДК 004(075.8)
ББК 32.973-018.2я73
335

Рецензенты: Цеховой А.Ф. – д.т.н., профессор, вице-президент
Международной Академии
Информатизации
Баймухамедов М.Ф. – д.т.н., профессор, проректор
Костанайского социально-
технического университета имени
академика З. Алдамжар
Баяк О.В. – к.т.н., доцент кафедры
автоматизации, информационных
систем и безопасности Рудненского
индустриального института

Зарубин М.Ю., Зарубина В.Р., **Федосов Б.Т.**, Кузнецова А.Н., Штыкова И.В.,
Брановец Н.Е.

Разработка адаптивной самообучающейся системы автоматического управления оборудованием горно-обогатительного производства для оптимизации процессов в условиях нестабильности входных параметров. Монография /М.Ю. Зарубин, В.Р. Зарубина, **Б.Т. Федосов**, А.Н. Кузнецова, И.В. Штыкова, Н.Е. Брановец. – Рудный.: РИИ, 2018. – 188 с.

335
ISBN 978-601-75-54-92-7

В работе рассматривается процесс разработки адаптивной самообучающейся системы автоматического управления оборудованием горно-обогатительного производства для оптимизации процессов в условиях нестабильности входных параметров на основе нейросети радиально-базисной функции с аппаратной реализацией на контроллере SIMATIC S7-300.

УДК 004(075.8)
ББК 32.973-018.2я73

ISBN 978-601-75-54-92-7

©Рудненский индустриальный институт, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Анализ состояния технологических процессов железорудных горно-обогатительных предприятий северного Казахстана	7
1.1 Анализ железорудных месторождений Северного Казахстана	7
1.2 Анализ технологических процессов на обогатительных комплексах Северного Казахстана	14
1.2.1 Анализ структуры железообогатительных комплексов АО «ССГПО» и ТОО «Оркен»	14
1.2.2 Анализ технологической схемы комплекса дробления и сухой магнитной сепарации	16
1.2.3 Анализ технологической схемы комплекса мокрого магнитного обогащения	22
1.2.4 Анализ технологической схемы сушки	33
1.3 Выводы по разделу	35
2 Анализ систем управления технологическими процессами железообогатительной промышленности Республики Казахстан	38
2.1 Системы управления технологическими процессами как объект исследования	38
2.2 Анализ систем управления технологическими процессами АО «ССГПО» и ТОО «Оркен»	43
2.3 Анализ технологического процесса измельчения руд в стержневых мельницах	49
2.4 Выводы по разделу	59
3 Разработка математических моделей технологических процессов обогащения железной руды	60
3.1 Общие положения по моделированию объектов управления	60
3.2 Разработка математических моделей процесса дробления	62
3.3 Разработка математических моделей процесса магнитной сепарации	73
3.4 Разработка математических моделей процесса сушки	95
3.5 Выводы по разделу	99
4 Анализ применения аппарата нейроинформатики для решения задач в системах автоматического управления	101
4.1 Анализ опыта применения искусственных нейроразобных сетей для управления технологическими процессами предприятий	101

4.2	Тонкое управление технологическим динамическим объектом в условиях воздействия детерминированных и стохастических не учитываемых факторов	103
4.3	Разработка структуры нейросетевой системы адаптивного управления	108
4.4	Выводы по разделу	118
5	Разработка модели системы управления технологическими процессами, построенной на основе искусственных нейроподобных сетей	120
5.1	Разработка программной модели существующего технологического процесса как эталонной системы	120
5.2	Разработка оптимизирующей САУ на основе нейрорегулятора	129
5.3	Исследование качества управления адаптивной САУ на основе нейрорегулятора по сравнению с эталонным процессом	132
5.4	Выводы по разделу	137
6	Аппаратная реализация прототипа системы управления на основе ИНС	138
6.1	Анализ методов реализации систем управления	138
6.2	Анализ типовых контроллеров для разработки надстройки адаптивной системы управления с нейросетью	144
6.2.1	Классификация типовых контроллеров систем автоматики	144
6.2.2	Анализ рынка типовых контроллеров для реализации адаптивной системы автоматического управления с нейросетью	147
6.3	Разработка кода программы адаптивной системы автоматического управления с нейросетью	159
6.3.1	Описание алгоритма работы системы	159
6.3.2	Выбор языка реализации системы	163
6.3.3	Разработка кода системы	166
6.4	Выводы по разделу	167
	Заключение	169
	Определения	172
	Обозначения и сокращения	176
	Список использованных источников	179

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности производства и снижение себестоимости получаемой продукции является одной из основных задач для Республики Казахстан, которую выделил в Стратегии индустриально-инновационного развития РК и в своем Послании Президент Республики Казахстан Н. Назарбаев.

Инновационное развитие предприятий производства на современном этапе немислимо без формирования эффективной системы управления. Причем главное внимание на всех уровнях управления и руководства должно быть сосредоточено на наиболее рациональном использовании материальных, трудовых и финансовых ресурсов, природных богатств, устранении излишних издержек и потерь. Именно эти вопросы являются стержневыми при решении задач управления современного предприятия [1].

Основой теоретико-методологической базы в вопросах, посвященных управлению процессами при обогащении полезных ископаемых, являются фундаментальные работы М. Джелали, С. Квина, К. Вонга и МакГриви, Р. Изермана, В.А. Бесекерского, Е.П. Попова, В.В. Солодовникова, А.В. Нетушила, В.А. Лукаса. Вопросы автоматизации обогатительных фабрик рассматривались в работах Г.А. Хака, Б.Д. Кошарского, А.Н. Марюты, В.В. Стальского, А.Е. Козина, В. З. Тропа, Дж. Форрестера и многих других.

Несмотря на предысторию исследований в области систем автоматического управления, данные вопросы остаются актуальными и важными для современного производства. Основными ограничениями применения для железорудных комбинатов имеющихся классических адаптивных систем управления являются:

- отсутствие или недостаточная точность контрольно-измерительной аппаратуры;
- усложнение условий работы обогатительного оборудования в связи с истощением минерально-сырьевой базы и работой на разнорудных рудах;
- необходимость многопараметрической оптимизации и проведения исследований для предварительной настройки оборудования;
- значительное влияние, а точнее взаимовлияние, технологических процессов и линий друг на друга;
- постоянный «дрейф» зоны оптимальной работы в связи с нестабильностью входного рудопотока и износом оборудования.

Вместе с тем, развитие раздела систем искусственного интеллекта – искусственных нейроподобных сетей – дает основание предположить, что такие системы управления могут быть разработаны и эффективны именно на искусственных нейроподобных сетях, поскольку

нейросети, ориентированные на обработку больших массивов информации, в том числе и слабоструктурированной, способны к обучению и адаптации.

Применение аппарата систем искусственного интеллекта в управлении современным производством является одним из потенциально перспективных направлений развития систем автоматического управления многими компаниями, занимающимися вопросами автоматизации производства и изготовления аппаратуры систем управления.

Однако, на сегодняшний день, и для применения искусственных нейрорподобных сетей есть свои нерешенные вопросы. В частности, не разработано систематизированной методики по применению аппарата искусственных нейрорподобных сетей (ИНС) для решения конкретных прикладных задач, в том числе и задач повышения эффективности горно-перерабатывающего комплекса, не выявлены закономерности по выбору необходимой структуры нейрорподобной сети и достаточного количества нейрорподобных элементов для конкретной производственной задачи, нет ответов по вопросам обеспечения устойчивости систем построенных на нейросетевых технологиях, и типовых решений подавления возникающих при работе сети шумов.

В рамках выполняемого исследования проведен анализ состояния технологических процессов крупнейших железообогатительных комбинатов Республики Казахстан – АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение» и ТОО «Оркен». По результатам в качестве предмета исследования выбран технологический процесс, имеющий приоритетность с точки зрения автоматизации над другими технологическими процессами и проведена разработка нейросетевой системы адаптивного оптимального управления.

1 Анализ состояния технологических процессов железорудных горно-обогатительных предприятий северного Казахстана

1.1 Анализ железорудных месторождений Северного Казахстана

В настоящее время большинство месторождений богатых руд уже выработано. Сейчас только незначительная часть добываемых руд пригодна для непосредственной переработки на металлургических заводах. К тому же предварительное обогащение рудного сырья значительно дешевле, чем непосредственно металлургическая переработка.

Костанайская область – основной железорудный район Казахстана, на ее территории сосредоточено 93% всех запасов железных руд республики. Соколовское, Сарбайское, Качарское и Куржункульское месторождения скарново-магнетитовых руд входят в состав Главного железорудного пояса Тургайского прогиба. Эта наиболее крупная в Казахстане металлогеническая провинция приурочена к Валерьяновской структурно-формационной зоне, имеющей протяженность более 600 км и ширину 50-90 км. Железорудный пояс состоит из многочисленных месторождений и рудопроявлений магнетитовых руд. Среди месторождений выделяются три крупных: Качарское, Соколовское, Сарбайское (с запасами более 1 млрд. т. руды в каждом), около десятка средних (сотни миллионов тонн), несколько десятков мелких (десятки миллионов тонн). Кроме того, имеются многочисленные рудопроявления и гравимагнитные аномалии [2, 3, 4].

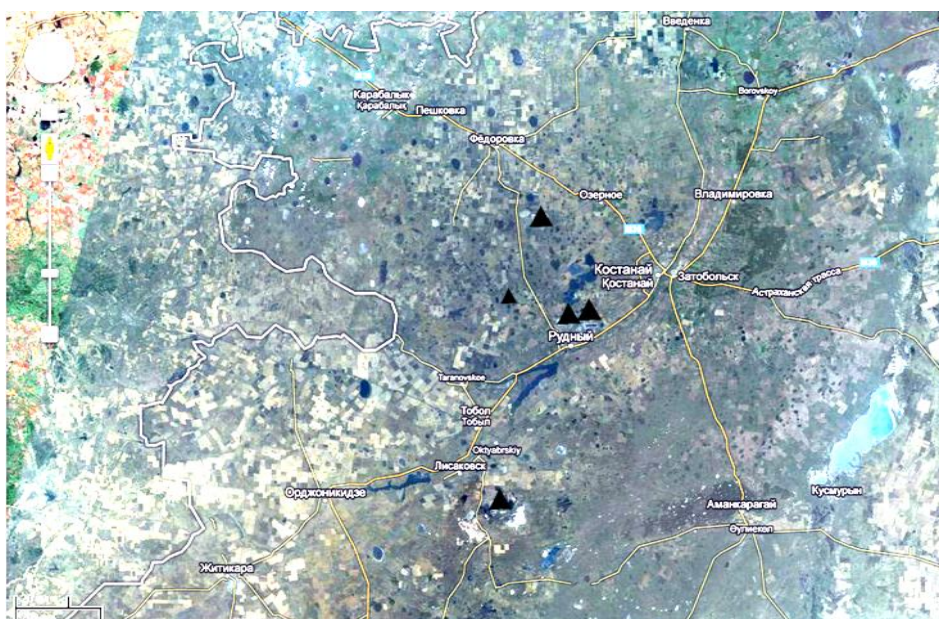


Рисунок 1.1 – Железорудные месторождения Костанайской области

Добычу и переработку железных руд в Костанайской области осуществляют АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение» (АО «ССГПО»), входящее в состав Евразийской корпорации природных ресурсов (ENRC), и Лисаковский ГОК, являющийся филиалом ТОО «Оркен» группы АО «Миттал-Стил Темиртау».

Фабрика рудоподготовки и обогащения (ФРПО) АО «ССГПО» работает на рудах Соколовского, Сарбайского, Качарского и Куржункульского месторождений.

Сарбайское железорудное месторождение открыто в 1949 г. Рудные тела Сарбайского месторождения на 96% сложены магнетитовыми рудами. Структура магнетитовых руд варьирует от тонко- до крупнозернистой. Тонко- и мелкозернистые руды составляют 80%, крупнозернистые – 5%. К главным рудным минералам относятся магнетит, пирит, пироксен, гранат, актинолит, эпидот, кальцит, альбит.

Балансовые запасы железной руды Сарбайского месторождения категорий А+В+С₁+С₂ были утверждены ГКЗ в 1957 г. в количестве 889,2 млн. т. при среднем содержании железа 45,9%, серы – 4,05%, фосфора – 0,14%. Диапазон колебания содержания железа в руде от 19 до 55%, серы от 0,5 до 10%. Забалансовые запасы руды составляли 100,3 млн. т. с содержанием железа 28,2% [3].

С 1975 г. начались работы по оценке запасов глубоких горизонтов месторождения, и к 1990 г. предварительная разведка всех залежей была в основном завершена. В 1985-1987 гг. были проведены предварительная и детальная разведка участка прожилково-вкрапленных руд на южном борту Сарбайского карьера с целью определения возможности отработки для поддержания мощности карьера. К балансовым отнесены запасы в контуре карьера. Запасы подсчитаны до 500 м по глубине. Балансовые запасы магнетитовых категорий С₁ и С₂ составили 86,8 млн. т. при содержании железа 33,52%, в том числе категории С₁ – 85,6 млн. т. с содержанием железа 33,59%. За контуром карьера подсчитаны забалансовые запасы категорий С₁+С₂ в объеме 61,1 млн. т. с содержанием железа 33,76%, в том числе категории С₁ – 45,9 млн. т. с содержанием 35,65% железа. За время проведения поисковых и разведочных работ на глубоких горизонтах и в пределах участка прожилково-вкрапленных руд Сарбайского месторождения были утверждены оперативные приросты запасов категорий С₁ и С₂ в количестве 260450 тыс. т. В результате эксплуатационной разведки за весь период и Сарбайского месторождения получен прирост запасов в количестве 72778 тыс. т. По состоянию на 01.01.10 г. общие запасы по месторождению составляют 635992 тыс. т., в том числе в контуре карьера 117665 тыс. т. В настоящее время в объединении прорабатывается вопрос о вовлечении в открытую разработку Южного участка прожилково-вкрапленных руд, который представляет собой продолжение на юг эксплуатируемого

Сарбайского месторождения. Разработка этого участка может осуществляться карьером путем постепенного продвижения в южном направлении действующего Сарбайского карьера. В дальнейшем в разработку могут быть вовлечены и руды Южно-Сарбайского месторождения. Запасы руд Южного участка и Южно-Сарбайского месторождения в контурах открытой разработки составят 266,1 млн. т.

При вовлечении в разработку Южного и Южно-Сарбайского месторождения запасы для открытой разработки по Сарбайскому месторождению превысят 382 млн. т, что обеспечит работу карьеров с годовой производительностью 10 млн. т. руды на ближайшие 38 лет.

Соколовское железорудное месторождение открыто в 1949 г. В 1955 г. на месторождении начато строительство карьера. С 1975 г. Северный участок месторождения разрабатывается подземным способом.

Интрузивные породы представлены небольшим Соколовским массивом кварцосодержащих диоритов на юго-западном фланге месторождения, многочисленными дайками гранит-порфиров и диабазов, субвулканическими межпластовыми телами диоритовых порфиров и диабазовых порфиров непосредственно в контуре рудной зоны.

Мощность рудной зоны месторождения колеблется от 150 м в центральной части до 250 м в южной и 650 м в северной. Руда прослежена буровыми скважинами на глубину 1000 м и более. На Северном участке основные рудные тела залегают на 40-50 м глубже, чем на остальной части месторождения, поэтому этот участок отрабатывается подземным способом.

Наиболее мощные и выдержанные рудные тела отмечаются в южной части месторождения. Форма тел здесь пластообразная, их мощность 200-250 м. В центральной части рудные тела не выдержаны по падению и простиранию, часто содержат межпластовые интрузии диоритовых порфиров. Мощность рудных тел здесь, как правило, не превышает 40 м. На Северном участке мощность рудных тел колеблется от 40 до 200 м. В пределах рудной зоны выделено 5 крупных рудных залежей (пачек).

подавляющая часть руд представлена магнетитовыми рудами. По текстурным особенностям среди магнетитовых руд выделяются массивные, полосчатые, вкрапленные, прожилковые. Преобладают вкрапленные и массивные разновидности руд. Структура руд преимущественно тонкомелкозернистая. Лишь прожилковые руды имеют более крупнозернистое строение с размерами зерен магнетита от 2-3 мм до нескольких сантиметров. Прожилковые руды вместе с другими разновидностями входят в состав всех рудных залежей и образуют самостоятельные крупные рудные тела в висячем боку основной рудной зоны месторождения (восточный борт карьера). Главными рудными минералами являются магнетит и пирит, нерудными – пироксен, гранат, скаполит, актинолит, эпидот, альбит,

хлорит, кальцит. Руды Соколовского месторождения легкообогатимы. В последнее время объем прожилковых руд в добыче постепенно увеличивается и в 2010 г. составил около 70%.

Балансовые запасы железных руд Соколовского месторождения категорий В+С₁+С₂ утвержденные ГКЗ СССР в 1966 г., составляли 1102,1 млн т при среднем содержании железа 41 %, серы – 2,5 %, фосфора – 0,1 %. Забалансовые запасы категории С₁ составляли 140,3 млн. т. с содержанием железа 29,34 %.

За время, прошедшее после утверждения запасов в ГКЗ СССР, в результате проведенных геологоразведочных работ был получен значительный прирост запасов категорий С₁ и С₂. В 1982 г. и 1986 г. в пределах глубоких горизонтов месторождения (600-1200 м) получен прирост запасов категории С₁ и С₂ в количестве 194322,1 и 173757,2 тыс. т соответственно. В 1990 г. в пределах восточного борта карьера между линиями 11-19 получен прирост запасов прожилково-вкрапленных руд по категории С₂ в количестве 32944 тыс. т. В 1992-1994 гг. была проведена доразведка Южного участка Соколовского месторождения. По результатам доразведки были подсчитаны балансовые запасы для подземной отработки по категориям С₁ и С₂ в количестве 34580,9 тыс. т. с содержанием железа общего 40,39%. Запасы забалансовых руд составили 7409,2 тыс. т. с содержанием железа общего 22,1%. За время отработки Соколовского месторождения в результате эксплуатационной разведки прирост запасов составил 41090 тыс. т.

Общие балансовые запасы по месторождению на 01.01.10 г. составляют 1200,4 млн. т., при этом их большая часть планируется к отработке подземным способом [1, 2, 3].

Качарское месторождение железных руд, открытое в 1949 г., находится в 55 км от г. Рудного. Месторождение расположено в Качарско-Давыдовском рудном районе и приурочено к Качарской вулкано-тектонической впадине. В геологическом строении месторождения принимают участие сложнодислоцированные вулканогенные, осадочно-вулканогенные, осадочные породы палеозойского фундамента и рыхлые осадки платформенного чехла мощностью 140-200 м.

Рудная зона месторождения имеет сложное многоэтажное строение, состоит из пластообразных и линзообразных рудных тел. В целом залегание рудных тел согласное с вмещающими породами. Всего на месторождении выделено 39 рудных тел, залегающих на глубине от 140 до 1800 м. Их длина изменяется от 120 до 2000 м, ширина – от 50 до 1000 м, мощность – от 8 до 171 м. Рудные тела группируются в трех рудных участках месторождения – Северном, Южном и Северо-Восточном, причем рудные тела последнего залегают на значительных глубинах. В настоящее время вовлечен в разработку карьером первой очереди только Северный участок.

Рудные тела Качарского месторождения сложены практически полностью

первичными магнетитовыми. Среди магнетитовых руд выделяются сплошные, вкрапленные, прожилковые. Сплошные руды составляют 40 % от общего объема руд. По минеральному составу среди разновидностей доминируют скаполит-полевошпат-магнетитовые руды. Главными минералами руд являются магнетит, альбит, скаполит, пироксен. К второстепенным относятся гематит, пирит, кальцит, хлорит, ангидрит, кварц, шабазит, апатит. Среднее содержание железа общего в рудах Северного и Южного участков составляет 39,04 %, серы 0,53 %, фосфора 0,22 %. Колебания содержания железа в рудных телах в диапазоне от 16 до 55 %, серы от 0,2 до 8 % [3, 4, 5].

Запасы руд Качарского месторождения утверждены ГКЗ СССР в 1985 г. Общие геологические запасы (балансовые + забалансовые) по всем трем участкам составили 3957,4 млн. т. Обеспеченность запасами в границах открытой разработки составляет более 50 лет. При переходе к подземной разработке имеются перспективы увеличения запасов Северного участка не менее чем на 540 млн. т. и Северо-Восточного – на 3060 млн. т.

Куржункульское месторождение железных руд находится в 80 км от г. Рудного. Месторождение открыто в 1948 г., с 1983 г. разрабатывается карьером. Месторождение входит в состав Елтайско-Куржункульского рудного район. В строении месторождения участвуют андезиты, их туфы с прослоями известняков, алевролитов (сарбайская свита); известняки с прослоями андезитов (соколовская свита); экструзивно-покровные образования кварцевых порфиров; субвулканические образования, представленные диоритовыми порфиритами. Широко развиты дайки, сложенные диабазовыми порфиритами, реже спессартитами, диоритовыми порфиритами, гранит-порфирами. Все породы, за исключением пострудных, подвержены метасоматическим и гидротермальным изменениям, несут магнетитовое и сульфидное оруденение.

Особенность Куржункульского месторождения – размещение рудной зоны внутри субвулканического массива диоритовых порфиров. Строение рудной зоны очень сложное. В ее составе выделяются 4 этажа, 9 рудных участков, 292 рудных тела. Рудные тела залегают в интервале глубин 30-1100 м. Месторождение до глубины 380 м предполагается отработать открытым способом, ниже этой глубины – подземным.

Рудные тела имеют линзовидную, столбообразную, неправильную изометрическую форму. По размерам тела делятся на 7 классов – от крайне мелких (площадь до 50 м²). По количеству резко преобладают рудные тела от крайне мелких до средних (1350 м²). Мощность рудных тел изменяется от первых метров до 60 м.

Руды представлены почти полностью магнетитовыми разностями. По текстуре среди магнетитовых руд выделяются сплошные однородные и полосчатые, полосчато-вкрапленные, прожилково-брекчиевидные. Структура руд преимущественно

мелкозернистая. Главные рудные минералы – магнетит и пирит, нерудные – пироксен, хлорит, кальцит. К второстепенным относятся гематит, пирротин, халькопирит, актинолит, гранат и ряд других минералов. Содержание железа общего в рудах – от 20 до 64,7 %, среднее 42,53 %. Доля магнетитового железа в вещественном составе высокая – 86,5 % от железа общего, что является весьма благоприятным фактором при переработке руд магнитной сепарацией. Содержание серы в руде колеблется от 0,5 до 5,3 %, среднее – 2,2 %. Среднее содержание фосфора – 0,04 %. Содержание железа общего в концентрате составляет 64,1-68,4 %.

Запасы руд месторождения утверждены в ГКЗ СССР в 1972 г. Балансовые запасы руд категорий C_1+C_2 составили 202,4 млн. т., забалансовые – 7,8 млн. т. По состоянию на 01.01.12 г. остаток запасов в контуре карьера составляет 58,9 млн. т. со средним содержанием железа 41,42% [2, 3].

Обогатительная фабрика Лисаковского ГОКа работает на рудах лисаковского железорудного месторождения. Лисаковское железорудное месторождение открыто в 1949 г. на правом берегу р. Тобол (северная часть Тургайского прогиба) К. И. Дворцовой, Д. Д. Топорковым, Н. М. Беляшовым. Месторождение находится в 110 км от г. Костанай.

Породы рудоносной Лисаковской формации слагают в основном нижнюю часть континентальной глинисто-песчаной тургайской серии. Морфологически рудоносная формация приурочивается к древним погребенным долинам и озерным котловинам и состоит из часто и закономерно чередующихся прослоев и крупных линз ожелезненных песков, железистых песчаников и оолитовых руд с подчиненными прослоями алевролитов и глин. По составу различаются две разновидности руд: закисные – преимущественно сидерит-лептохлоритовые, залегающие обычно в нижней части разреза, и окисные – существенно гидрогетитовые. Мощность рудного пласта месторождений юго-восточного обрамления Мугодзар изменяется от 1 до 12 м., глубина его залегания до 15 м. Содержание железа в бурых железняках составляет 24-53 %, иногда до 69 %.

Запасы руд 1,7 млрд. т со средним содержанием Fe 35,2 %. Качество руд ухудшает наличие в них фосфора (0,45-0,55 %). Месторождение разрабатывается карьерным способом.

Анализ результатов геологических исследований, проведенный в рамках гранта показал, что железорудные месторождения имеют одинаковый генезис. Основные эксплуатируемые месторождения, а именно: Сарбайское, Соколовское, Качарское, Куржункульское, являются скарновыми, т.е. образованными в результате метосаматоза во вмещающих породах. В качестве вмещающих пород выступали в основном известняки. Для таких месторождений характерна сложная форма контактов полезного ископаемого и вмещающих пород, значительное число отдельных массивных тел полезного ископаемого,

большой диапазон колебаний содержания полезного компонента, наличие вредных примесей. В качестве вредных примесей в рудах присутствуют сера и фосфор. Рудные минералы представлены магнетитом, пиритом, пироксеном, гранатом, актинолитом, эпидотом, кальцитом, альбитом. Железо в минералах магнитное и немагнитное. В качестве вредной примеси, требующей контроля за содержанием, принята сера и фосфор.

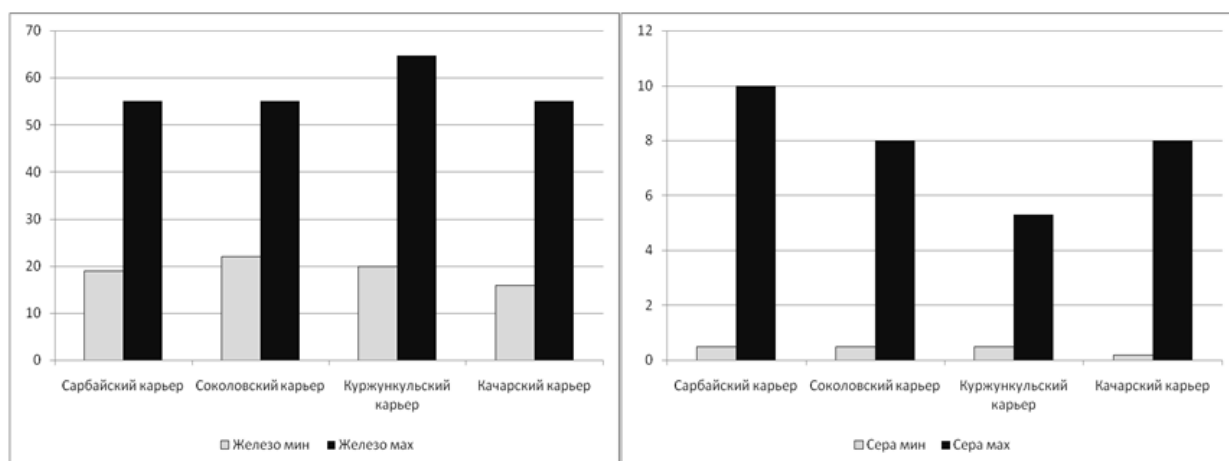


Рисунок 1.2 – Колебания процентного содержания полезного ископаемого (железа) и вредных примесей (серы) по карьерам северного региона Казахстана

Параметры сырой руды, поступающей на обогатительный передел, даже после внутрикарьерного усреднения, имеют значительные колебания по физико-механическому составу, что значительно усложняет процесс ее переработки и накладывает дополнительные требования по адаптации к аппаратуре управления технологическим оборудованием.

Также, следует отметить, что в Республике Казахстан добыча и обогащение железной руды осуществляется Атасуйским рудоуправлением. Атасуйское рудоплавление (г. Атасу, Жезказганская область) добывает и перерабатывает богатые магнетитовые и гематитовые руды из железомарганцевых месторождений Жезказганской области. Горно-обогатительный комбинат (ГОК) ориентирован на переработку руд шахты на месторождении Западный Каражал.

Черная металлургия в Республике Казахстан представлена также обогатительными комплексами и ферросплавными заводами в Актюбинске и Аксу. Первый из них – Донской ГОК работает на хромитах Хромтау и выпускает феррохром, второй – на привозных кварцитах с Урала и выпускает ферросилиций. Оба предприятия относятся к транснациональной компании (ТНК) «Казхром».

1.2 Анализ технологических процессов на обогатительных комплексах Северного Казахстана

1.2.1 Анализ структуры железорудных комплексов АО «ССГПО» и ТОО «Оркен»

Как и на АО «ССГПО», так и на ТОО «Оркен» применяют обогатительные комплексы, состоящие из трех фабрик: фабрики дробления, фабрики обогащения и, в зимний период, комплекса сушки концентрата.

Содержание железа в исходной руде для УРПО АО «ССГПО» колеблется от 26,6 до 52,6%. Основной рудный минерал – магнетит, в незначительных количествах присутствуют мушкетовит, гематит, титаномагнетит.

План поступающего сырья на обогатительный передел приведен на рисунке 1.3.

Руды Соколовского месторождения представлены следующими разновидностями: пироксен-скаполит-магнетит-титаномагнетитовая (27-34% Fe_{общ}, 0,6-0,8% TiO₂, основность 0,2); пироксен-скаполит-магнетитовая, грубополосчатая (29-37% Fe_{общ}, основность 0,5-0,6); эпидот-актинолит-магнетитовая прожилковкрапленная (27-32% Fe_{общ}, основность 0,4-0,5); эпидот-пироксен-магнетитовая (26-39% Fe_{общ}, основность 0,5-0,7).

Руды Сарбайского месторождения представлены следующими разновидностями: пироксен-скаполит-магнетитовая (37,1-46% Fe_{общ}, основность 0,3-0,5); пироксен-гранат-магнетитовая (36-47% Fe_{общ}, основность 0,4-0,7); пироксен-магнетитовая (38-46% Fe_{общ}, основность 0,4-0,5); эпидот-антимонит-магнетитовая (36-47% Fe_{общ}, основность 0,3-0,4).

Размер включений магнетита в рудах Соколовского месторождения 0,01-10 мм, преобладающий 0,08-2 мм; в рудах Сарбайского месторождения 0,002-10 мм, преобладающий 0,02-2,4 мм. Руды Сарбайского месторождения относятся к сернистым. Основные сульфидные минералы пирит, редко пирротин, в которых в изоморфной примеси содержится кобальт. Физико-механические свойства руд: плотность истинная (2,9-3,96)10³ кг/м³, плотность средняя (2,8-3,87)10³ кг/м³; пористость 0,3-5%; предел прочности при одноосном сжатии (870-2740)10⁵ Па; естественная влажность до 3%.

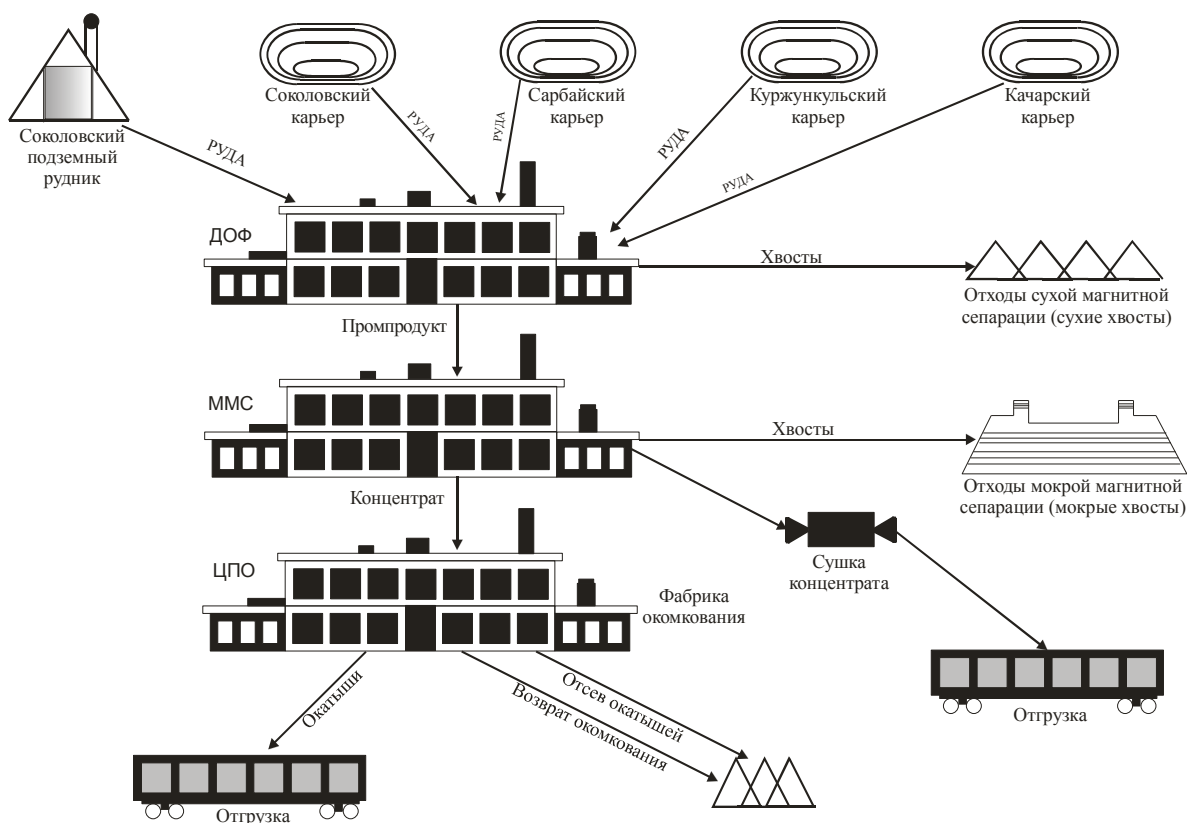


Рисунок 1.3 – Схема производства

Соколовское месторождение разрабатывается открытым и подземным способами, Сарбайское – открытым. Максимальная крупность кусков руды, поступающей на обогатительные фабрики из карьеров, 1200 мм, из подземного рудника – 400 мм.

Руды Соколовско-Сарбайского месторождения также содержат 1-3% серы и 0,12-0,14% фосфора.

В настоящее время на УРПО АО «ССГПО» также перерабатываются скарные магнетитовые руды Качарского и Куржункульского месторождений.

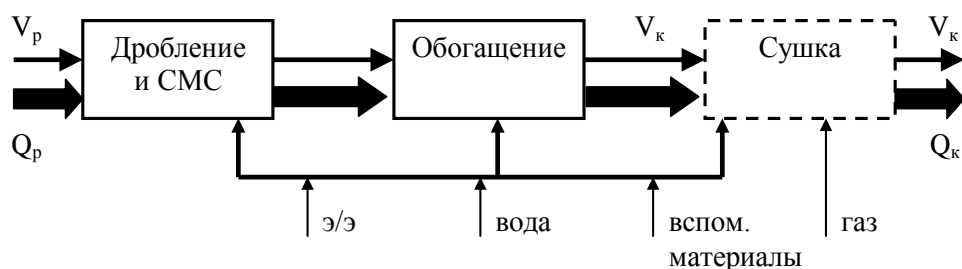
Руды всех четырех месторождений отличаются как по физическим, так и по химическим свойствам. Крепость по шкале проф. М.М. Протодьяконова различается в широких пределах. Так в Соколовском месторождении крепость образцов руды меняется от 0,76 до 7,58. В Сарбайском месторождении – от 1,4 до 11,65. Руды Качарского месторождения имеют крепость от 3,19 до 6,97. Куржункульское месторождение имеет крепость 32.

Как правило, вовлекаемые в переработку в настоящее время руды относятся к труднообогатимым, имеющие мелко и тонковкрапленные включения магнетита.

Качество получаемого концентрата из Качарского сырья ниже, чем в среднем по АО «ССГПО» за счет ограниченного количества благоприятных текстур в испытываемой пробе. Хвосты всех стадий обогащения Качарской руды имеют низкое содержание железа из-за

основного нерудного минерала – скаполита.

Функционально схему переработки руды на железо-обогатительном комбинате (ЖОК) можно представить в виде (рисунок 1.4) [4-6, 38, с. 6]:



- V_p, V_k – объем руды (концентрата);
- Q_p – параметры руды (содержание Fe, %; влажность, %; кусковатость);
- Q_k – параметры концентрата (содержание Fe, %; влажность, %; тонина помола).

Рисунок 1.4 – Функциональная схема переработки руды

В связи однотипностью обогатительных комплексов АО «ССГПО» и ТОО «Оркен» дальнейший анализ целесообразно производить только по структуре УРПО АО «ССГПО», как наиболее крупного из них.

1.2.2 Анализ технологической схемы комплекса дробления и сухой магнитной сепарации

Комплекс дробления УРПО АО «ССГПО» включает в себя четыре стадии дробления и сухую магнитную сепарацию. Исходная руда с максимальной крупностью кусков не более 1200 мм железнодорожным транспортом подается в приемные бункера корпуса крупного дробления. С целью усреднения руды по качеству, разгрузка производится с 2-х путей, с поочередной раскантовкой думпкаров.

Технологическая схема дробления и сухой магнитной сепарации (СМС) представлена на рисунке 1.5.

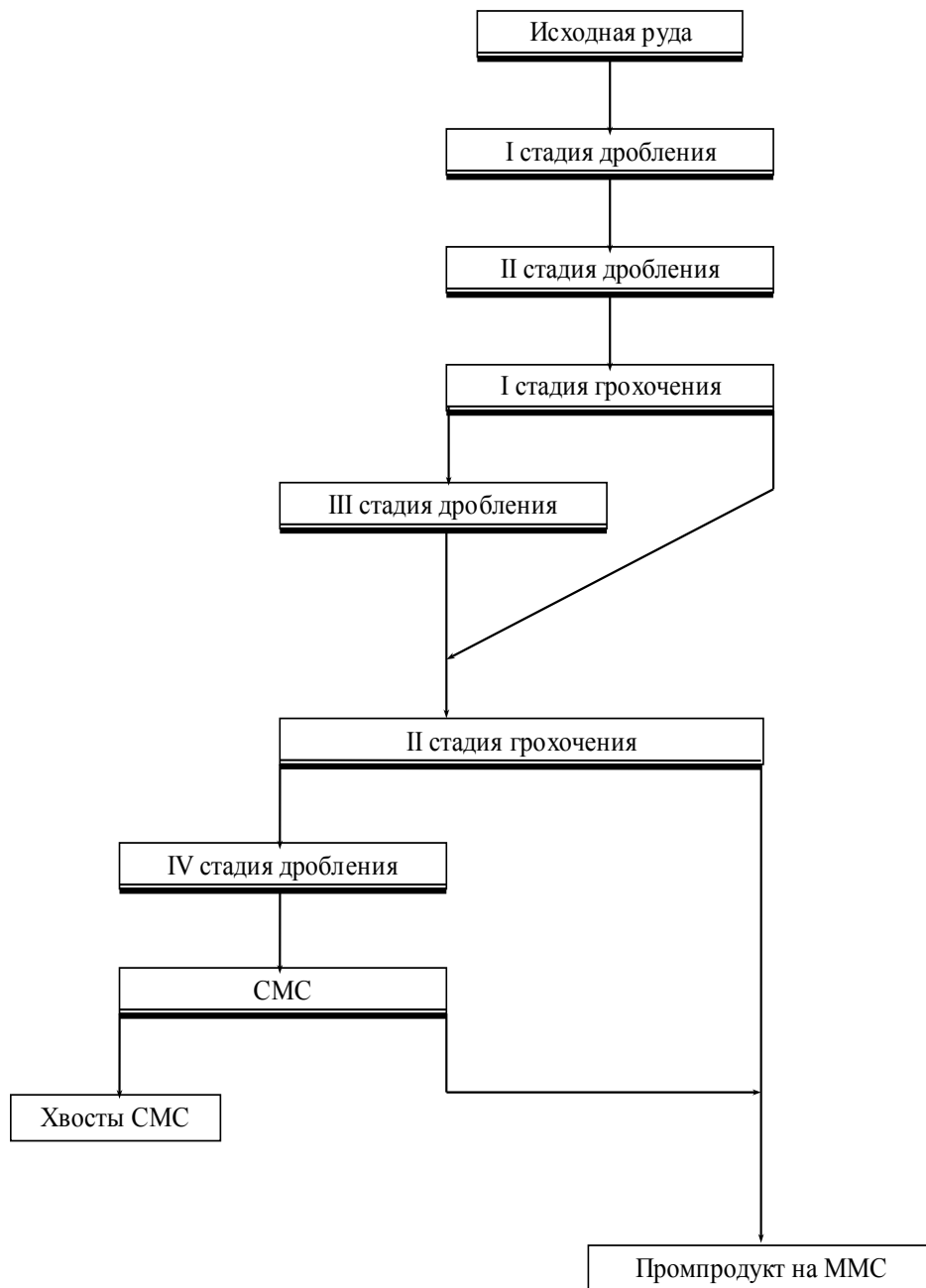


Рисунок 1.5 – Технологическая схема дробления и СМС

В первой стадии дробления установлены конусные дробилки крупного дробления ККД-1500/180 в количестве 2 штук, работающие под завалом. Производительность каждой из дробилок 2500 т/час, крупность дробленого продукта 350-400 мм.

Из-под дробилок ККД-1500/180 дробленая руда четырьмя пластинчатыми питателями 1800×15000 мм подается на вторую стадию дробления, где установлены четыре конусные редуцирующие дробилки КРД-700/100. Производительность дробилок 1000 т/час, крупность дробленого продукта не более 220 мм.

Продукт второй стадии дробления конвейерами №№4, 6 (I очередь) и №№3, 5 (II

очередь) подается в бункера корпуса среднего и мелкого дробления (КСМД). Разгрузочные тележки конвейеров № 5, № 6 работают в автоматическом (челночно-точечном) режиме.

Бункера КСМД емкостью по 6000 тонн на каждую очередь разделены на 6 секций по количеству каскадов (в каскад входят пластинчатый питатель, колосниковый грохот, дробилки среднего и мелкого дробления, вибрационный грохот).

Из промежуточных бункеров КСМД пластинчатыми питателями 1500×6000 мм руда подается на первую стадию грохочения, где установлены колосниковые грохоты 1750×3500 мм с шириной щели между колосниками 50-70 мм.

Надрешетный продукт первой стадии грохочения поступает на третью стадию дробления, где установлены конусные дробилки среднего дробления КСД-2200Т (шесть дробилок на каждой очереди). Производительность одной дробилки 350-400 т/час, ширина разгрузочной щели 17-19 мм, крупность дробленого продукта не более 40 мм.

Подрешетный продукт первой стадии грохочения и продукт третьей стадии дробления поступают на вторую стадию грохочения, где происходит разделение на классы крупности плюс 16 мм и минус 16 мм. Во второй стадии грохочения установлены инерционные грохота ГИТ-51М, с размером просеивающей поверхности 1750×3500 мм. На грохоте установлены резиновые сита толщиной 40 мм с размером ячейки сита 25 мм.

Надрешетный продукт второй стадии грохочения поступает на четвертую стадию дробления, где установлены конусные дробилки мелкого дробления КМД-2200Т (шесть на каждую очередь), производительность дробилок 250-300 т/час, ширина разгрузочной щели 8-9 мм.

Подрешетный продукт второй стадии грохочения конвейерами №№ 10, 34, 36, 36^I, 36^{II} (I очередь) и конвейерами №№ 9, 33, 35, 35^I, 35^{II} (II очередь) подается в бункера корпуса мокрой магнитной сепарации (ММС).

Продукт четвертой стадии дробления конвейерами №№ 12, 14, 16 (I очередь) и №№ 11, 13, 15, 17 (II очередь) подается в бункера корпуса сухой магнитной сепарации (СМС). Разгрузочные тележки конвейеров №№ 16 и 17 работают в автоматическом (челночно-точечном) режиме.

Емкость бункеров в корпусе КСМС 1000 тонн на каждую очередь. Из бункеров ленточными питателями руда подается на третью стадию грохочения. В операции третьей стадии грохочения установлены инерционные двухситные грохота BSk 8,0×2S в количестве 10 штук (5 грохотов на одну очередь). Производительность одного грохота 500 т/час. Размер ячеек верхнего сита – 25×25 мм, нижнего сита – 13×13 мм. Надрешетный продукт III стадии грохочения (класс плюс 10 мм) поступает в операцию сухой магнитной сепарации на

сепараторы SDM 0,9/2,1 (5 штук на каждую очередь). Производительность одного сепаратора 230 т/час. Подрешетный продукт третьей стадии грохочения (класс минус 10 мм) поступает в операцию сухой магнитной сепарации на сепараторы SDM 0,9/1,5 (5 штук на каждую очередь). Производительность одного сепаратора 160 т/час. Положение делительных шиберов сепараторов регулируется в зависимости от качественных показателей продуктов сухой магнитной сепарации (промпродукт и хвосты).

Хвосты сухой магнитной сепарации сепараторов SDM 0,9/2,1 и SDM 0,9/1,5 объединяются и конвейерами №№ 20, 28, 30, 102, 103, 104 (I очередь) и №№ 21, 29, 101, 103, 104 (II очередь) подаются на склад отвальных хвостов. В случае необходимости, хвосты сухой магнитной сепарации первой очереди, конвейерами №№ 20, 22^а, 23^а, 24, 25 могут подаваться на склад хвостов под конвейером № 25.

Промпродукт сухой магнитной сепарации с сепараторов SDM 0,9/1,5 (класс минус 10 мм) конвейерами №№ 18, 32, 34, 36, 36^I, 36^{II} (I очередь) и №№ 19, 22, 31, 33, 35, 35^I, 35^{II} (II очередь) подается в бункера участка мокрого магнитного обогащения (ММО).

Промпродукт сухой магнитной сепарации сепараторов SDM 0,9/2,1 (класс плюс 10 мм) конвейерами №№ 18^а, 18^б, 18^в, 16^а (I очередь) и №№ 19^а, 19^б, 19^в, 17^а (II очередь) подается в бункера V стадии дробления. Разгрузочные тележки конвейеров №№ 16^а, 17^а работают в автоматическом (челночно-точечном) режиме.

Из бункеров ленточными питателями промпродукт поступает на V стадию дробления в роторные дробилки ударного действия Merlin VSI RP 109 (5 штук на одну очередь).

Дробленый продукт V стадии дробления поступает на поверочное грохочение на грохота BSk 8,0×2S с размером ячеек верхнего сита – 25×25 мм, нижнего – 13×13 мм.

Подрешетный продукт поверочного грохочения (класс минус 10 мм) поступает на конвейер №18 (I очередь) и №19 (II очередь) и совместно с промпродуктом сепараторов SDM 0,9/1,5 системой конвейеров подается в бункера участка мокрого магнитного обогащения.

Надрешетный продукт (класс плюс 10 мм) системой конвейеров №№ 18^а, 18^б, 18^в, 16^а (I очередь) и №№ 19^а, 19^б, 19^в, 17^а (II очередь) возвращается на додраблывание в дробилки Merlin VSI RP 109.

Схема цепи аппаратов дробильного отделения и качественно-количественная схема представлены на рисунке 1.6 и рисунке 1.7.

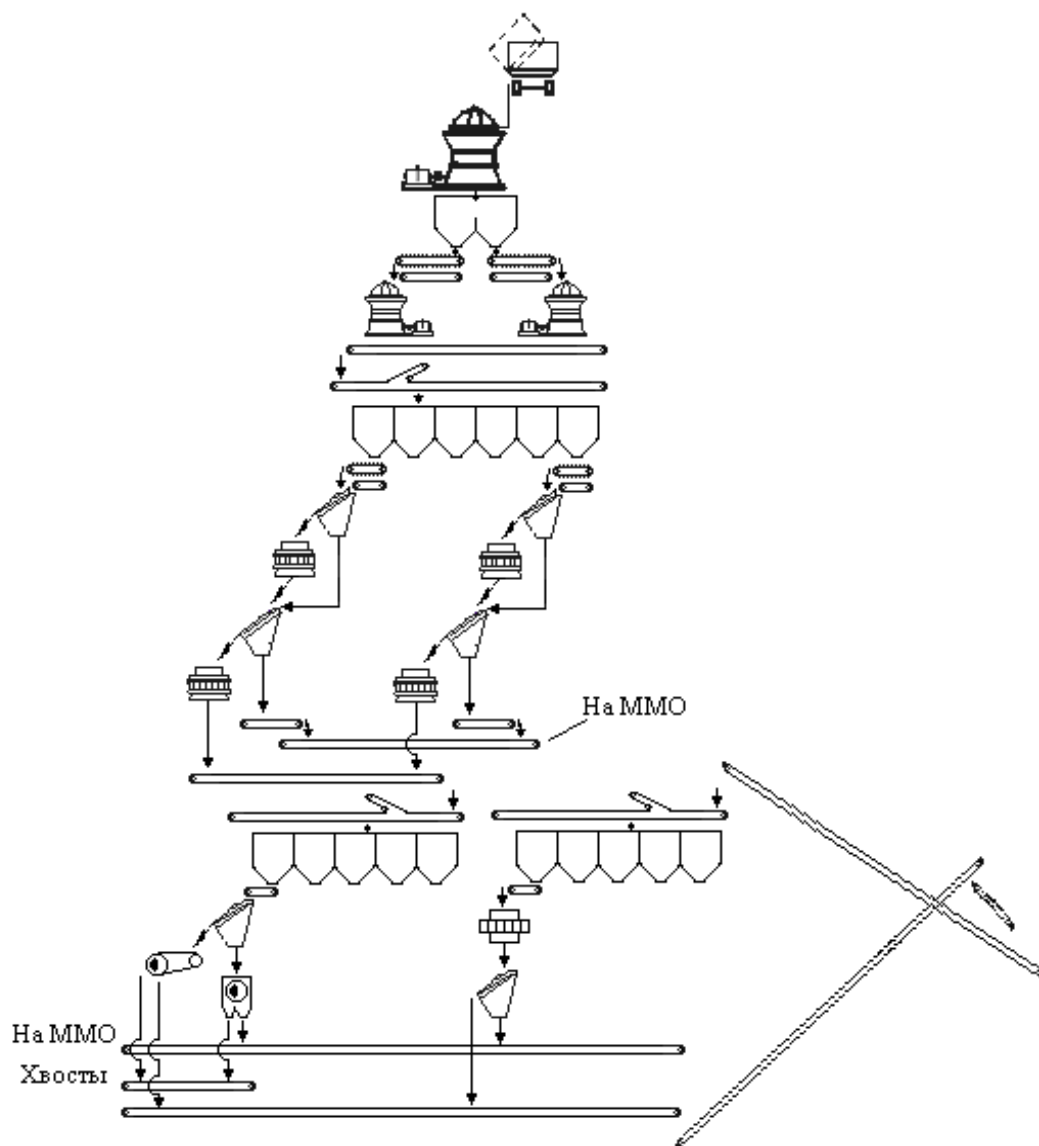


Рисунок 1.6 – Схема цепи аппаратов участка ДОФ (для одной очереди)

В случае отсутствия места в бункерах участка мокрого магнитного обогащения (ММО), промпродукт I очереди конвейерами №№ 18, 22^а, 23^а, 24, 25 подается на открытый склад промпродукта. При недостаточном количестве промпродукта в бункерах участка ММО, подача его осуществляется с открытых складов автомобильным транспортом через бункер, пластинчатый питатель, конвейера №№ 28^а, 29^а, 32, 34, 36, 36^I, 36^{II} (I очередь) и №№ 28^а, 29^а, 31, 33, 35, 35^I, 35^{II} (II очередь), а также железнодорожным транспортом через приемные бункера корпуса крупного дробления.

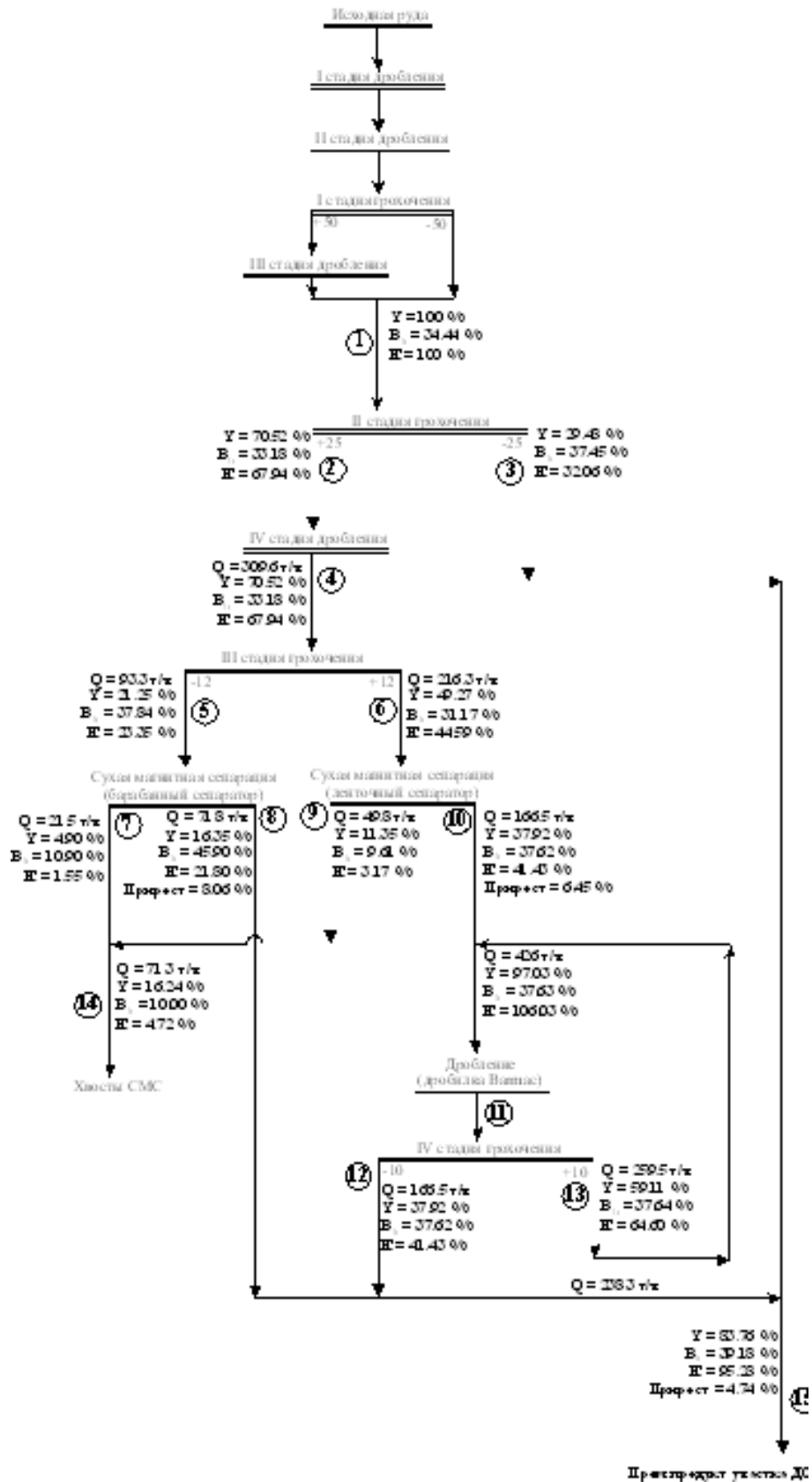


Рисунок 1.7 – Качественно-количественная схема дробильного отделения

Метрологическое обеспечение технологического процесса дробления и сухой магнитной сепарации в настоящий момент осуществляется следующим образом:

- 1) крупность исходной руды 1200 мм определяется визуально оператором корпуса крупного дробления (ККД) в каждом думпкаре, подаваемом на приемный бункер;
- 2) ширина разгрузочной щели дробилок ККД-1500/180 – 200 мм замеряется один раз в два месяца дробильщиком металлической линейкой;
- 3) крупность дробленого продукта первой стадии дробления (не более 350-400 мм) определяется дробильщиком визуально на пластинчатых питателях 1800×15000 мм;
- 4) ширина разгрузочной щели дробилок КРД-700/100 (90-100 мм) замеряется дробильщиком один раз в месяц металлической линейкой;
- 5) крупность дробленого продукта после второй стадии дробления (не более 220 мм) определяется дробильщиком визуально на конвейерах №№ 3, 4;
- 6) ширина щели на колосниковых грохотах (50-70 мм) контролируется грохотовщиками один раз в три месяца металлической линейкой;
- 7) ширина разгрузочных щелей дробилок среднего дробления (17-19 мм) и мелкого дробления (8-9 мм) контролируется дробильщиком один раз в неделю с помощью свинцового шарика и штангенциркуля;
- 8) взвешивание исходной руды производится после II стадии дробления весовыми комплексами типа 4561К, установленными на конвейерах №№3, 4 с выводом показаний на пульт управления оператора КСМД.

1.2.3 Анализ технологической схемы комплекса мокрого магнитного обогащения

Глубокое обогащение промпродукта участка дробления осуществляется на технологических секциях участка мокрого магнитного обогащения (ММО). В эксплуатации находятся 16 технологических секций и секция для утилизации гидросмывов участков по производству окатышей и сушки концентрата:

- с 1 по 10 (I-II очередь) – секции с двухстадиальной схемой измельчения, технологическая схема приведена на рисунке 1.5.
- с 11 по 16 (III очередь) – секции с трехстадиальной схемой измельчения, технологическая схема приведена на рисунке 1.6.

Технологические секции запускаются в работу при запасе промпродукта в бункерах не менее 900 тонн на одну секцию.

Железорудный концентрат, отгружаемый потребителям, должен соответствовать требованиям технических условий ТУ 39 00 РК 00186789 АО-35-2004 (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Требования к концентрату

Наименование показателя	Значение
Массовая доля железа, %	66.0
Допустимое отклонение от нормы, %	минус 1.0
Укладка в допустимое отклонение, %	85.0
Массовая доля двуокиси кремния, %, не более	4.3
Массовая доля влаги, %, не более	
– в летний период	10.0
– в зимний период	3.0

В случае повышения массовой доли серы в концентрате сверх 0,6 % ограничивается подача сульфидных разновидностей магнетитовых руд в бункера технологических секций II и III очереди участка ММО.

Как уже говорилось выше, в качестве схем обогащения на ЖОК обычно применяют схемы СМС и/или мокрой магнитной сепарации (ММС). Схема ММС с двухстадиальным измельчением представлена на рисунке 1.5, а с трехстадиальным измельчением на рисунке 1.6 [38, с.15; 42, с.22; 43].

При двухстадиальном измельчении промпродукт участка дробления конвейерами 35,35¹,36,36¹ подается в бункера технологических секций I-II очереди участка ММО. Максимальное количество промпродукта в бункерах 64 тысячи тонн.

Из бункеров конвейерами №37, 38 с регулируемыми приводами и конвейером №39 промпродукт подается на измельчение в стержневую мельницу МСЦ-32-45 (секция 5) или МСЦ-36-45 (секции №№ 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10). Производительность по промпродукту мельниц МСЦ-32-45 260÷280 т/час, МСЦ-36-45 270÷300 т/час для первой технологической очереди, для второй технологической очереди производительность по промпродукту мельниц МСЦ-36-45 240÷270 т/час.

Скорость вращения барабана мельниц 14,42 об/мин (62% от критической). В сливе стержневой мельницы массовая доля класса плюс 2 мм составляет не более 5%, класса минус 0,071 мм в среднем 35,0 % (28-37 %). Удельная производительность стержневой мельницы по вновь образованному классу минус 0,071 мм составляет в среднем 1,55 т/м³ час. Массовая доля твердого в сливе мельницы составляет порядка 78-85 %. Диаметр отверстий сита бутары стержневой мельницы 10 мм. Технологической инструкцией запрещается работа мельницы с порванным ситом бутары.

Вес руды, поступающей в стержневую мельницу, контролируется по показаниям

весов, установленных на конвейерах №39 технологических секций. Стабилизация режима работы стержневых мельниц, поддержание заданной массовой доли твердого в сливе мельниц осуществляется с помощью системы автоматического регулирования.

Измельченный материал крупностью 2-0 мм обогащается на магнитных сепараторах ПБМ-П-90/250 первой стадии обогащения. Немагнитный продукт сепарации удаляется в хвосты, а магнитный продукт сепараторов измельчается до крупности 0,5-0 мм в двух шаровых мельницах МШЦ-36-50.

Магнитные системы внутри всех барабанов сепараторов развернуты на 20° - 25° от вертикальной плоскости в сторону разгрузки магнитного продукта сепарации. Регулировка производится вручную. Напряженность магнитного поля на поверхности барабанов сепараторов направлена против геометрического центра полюсов и исключая периферийные ряды составляет:

- сепараторы ПБМ-90/250 – $88 \div 95$ кА/м;
- сепараторы ПБМ-120/300 – $105 \div 118$ кА/м.

Скорость вращения барабанов сепараторов составляет:

- сепараторы ПБМ-П-90/250, ПБМ-ПП-90/250 – 26 об/мин;
- сепараторы ПБМ-П-120/300, ПБМ-ПП-120/300 – 19 об/мин.

Зазор между днищем ванны сепаратора и поверхностью барабана составляет 40 мм и контролируется вручную при проведении планово-предупредительных работ (ППР).

Размер насадок для разгрузки хвостов сепараторов с противоточными ваннами: для первой стадии ММС – $40 \div 50$ мм, для второй стадии ММС – $35 \div 40$ мм.

Технологической инструкцией предприятий не допускается работа сепараторов: с заиленными приемными коробками, питающими патрубками, насадками для разгрузки хвостов, брызгалами; с изношенной футеровкой барабана.

Вода для смыва концентрата с поверхности барабанов сепараторов подается в минимальном количестве равномерно по всей длине барабана. Ванны сепараторов прочищаются и промываются на всех сепараторах во время проведения ППР секции.

Производительность одного сепаратора в первой стадии обогащения по исходному питанию 140-160 т/час. Массовая доля твердого в питании 30-40%. Управление и стабилизация массовой доли твердого осуществляется системой автоматического регулирования.

Массовая доля класса минус 0,071 мм в питании сепараторов составляет в среднем 35_% (28-37%).

Производительность по исходному питанию шаровых мельниц МШЦ-36-50

составляет 350 т/час (320÷400 т/час) каждой. Скорость вращения барабана мельницы 18 об/мин (80,7% от критической). Массовая доля класса минус 0,071 мм в измельченном продукте в среднем 55% (45-65%). Удельная производительность по вновь образованному классу минус 0,071 мм составляет в среднем 0,85 т/м³ час.

Загрузка шаров в мельнице составляет 96,5 тонн, уровень шаров выбран на 250 мм выше нижнего края горловины мельницы и определяется визуально. Загрузка шаров осуществляется шарозагрузочной машиной регулярно один раз в четверо суток, соотношение загружаемых шаров: диаметром 40 мм – 80%, диаметром 60 мм – 20% для первой технологической очереди; для второй технологической очереди диаметр загружаемых шаров 40 мм.

Массовая доля твердого в сливе шаровых мельниц составляет 62-70 %. Диаметр отверстия сита бутары шаровой мельницы 8 мм. Также как и для стержневой мельницы не допускается работа мельницы с порванным ситом бутары.

Разгрузка шаровых мельниц поступает на магнитные сепараторы ПБП-П-120/300 второй стадии обогащения. Немагнитный продукт сепараторов удаляется в хвосты, а магнитный продукт поступает в зумпф и насосом типа 1ГрТ1600/50 перекачивается на классификацию в гидроциклоны диаметром 500 мм.

Во второй стадии обогащения установлены сепараторы с противоточной ванной ПБМ-П-120/300 в количестве 5 штук на секцию. Производительность по исходному питанию одного сепаратора ПБМ-П-120/300 составляет в среднем 140-160 т/час.

Массовая доля твердого в питании сепараторов 30-40 %. Контроль за массовой долей твердого осуществляется ручным способом взвешиванием 1 литра пульпы. Регулирование массовой доли твердого производится изменением подачи свежей воды в пульподелители перед сепараторами. Массовая доля класса минус 0,071 мм в питании сепараторов в среднем 55%.

Количество гидроциклонов, установленных на секции – 20 штук (в работе – 10, в резерве – 10). Размеры питающего отверстия – 60×140 мм. Диаметр сливного патрубка – 130 мм. Диаметр песковой насадки – 75 мм. Давление пульпы на входе в гидроциклон составляет 1-1,1 кг/см². Массовая доля твердого в сливе гидроциклонов 15-24 %, в песках 70 %; массовая доля твердого в сливе гидроциклонов контролируется индукционным датчиком и регулируется подачей воды в зумпф насосов 1ГрТ1600/50. Массовая доля класса минус 0,071 мм в сливе гидроциклонов 94,5 %, в песках – в среднем 48 %.

Пески гидроциклонов возвращаются на доизмельчение в шаровые мельницы, сливы гидроциклонов направляются на третью стадию обогащения. В третьей стадии обогащения, осуществляемой на сепараторах ПБМ-ПП-120/300, выделяются отвальные хвосты и

магнитный продукт, поступающий на грохота тонкого грохочения Стек Сайзер 2SG48-60W-5STK, надрешётный продукт самотёком поступает в зумпф насосов 1ГрТ1600/50, а подрешетный – в концентратный зумпф.

Производительность по исходному питанию одного сепаратора третьей стадии обогащения составляет 40-50 т/час. Массовая доля твердого в питании сепараторов составляет 15-24 % и контролируется индукционными датчиками.

В операции тонкого грохочения установлены два грохота Стек Сайзер 2SG48-60W-5STK, производительность по исходному питанию одного грохота 75-80 т/час. Массовая доля твердого в питании грохотов составляет 50-52 %. На грохотах установлены полиуретановые панели ТН 48-30×0,1МТ.

Далее подрешетный продукт грохочения перекачивается насосом 1ГрТ400/40 на четвёртую стадию обогащения, где установлены сепараторы ПБМ-ПП-90/250. В четвертой стадии обогащения установлены три сепаратора с полупротивоточными ваннами ПБМ-ПП-90/250. Производительность одного сепаратора по исходному питанию составляет в среднем 35-45 т/час.

Массовая доля твердого в питании сепараторов 25-30 %. Контроль за массовой долей твердого осуществляется ручным способом взвешиванием 1 литра пульпы. Массовая доля класса минус 0,071 мм в питании сепараторов не менее 95 %.

В этой стадии обогащения выделяется промежуточный продукт (хвосты сепараторов), направляемый в зумпф насосов 1ГрТ1600/50, и концентрат, поступающий для обезвоживания на дисковые вакуум-фильтры ДОО-100×2,5 (ДТВО-100×2,64).

Кек с вакуум-фильтров (секций 1-5) конвейерами №№40, 41, 44, 48 транспортируется на склад влажного концентрата, откуда часть его может подаваться и отгружаться сторонним потребителям: летом во влажном состоянии, зимой предусмотрена сушка концентрата перед отгрузкой, по необходимости концентрат подается на окомкование.

Кек с вакуум-фильтров (секций 6-10) конвейерами №№42, 43, 46, 50 транспортируется на склад влажного концентрата, где совместно с концентратом III очереди усредняется в штабель конвейером № 50, работающим в челночном режиме.

Для фильтрования концентрата на технологических секциях установлены по три вакуум-фильтра ДОО-100×2,5 (ДТВО-100×2,64). Площадь фильтрования вакуум-фильтра 100 м². Производительность по исходному питанию составляет 34-52 т/час. Влажность кека вакуум-фильтров в среднем 9,6-9,8 %. Массовая доля твердого в питании вакуум-фильтров 40-50%, массовая доля класса минус 0,071 мм не менее 95 %.

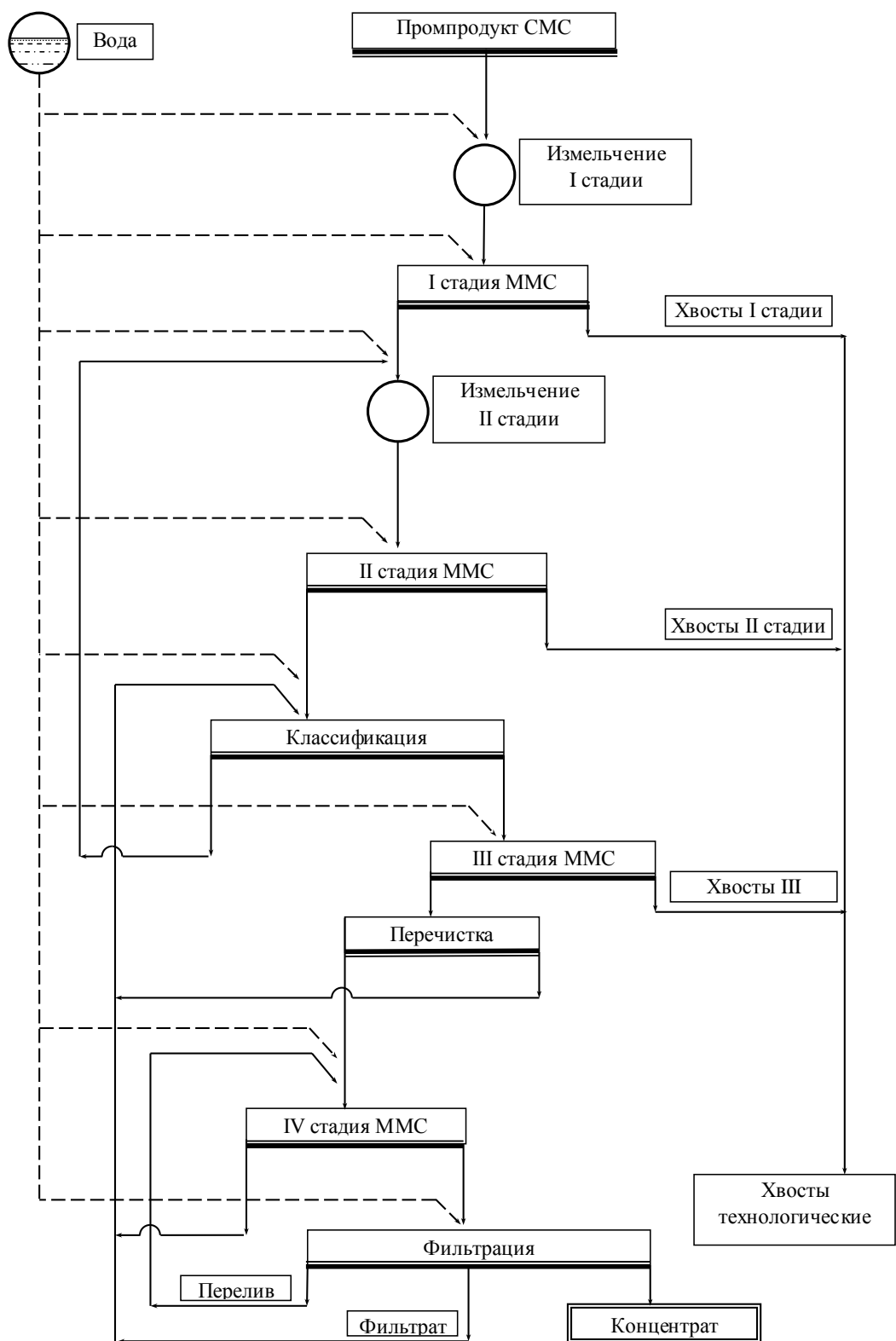


Рисунок 1.8 – Схема ММС с двухстадиальным измельчением

Вакуум в зоне набора кека составляет 0,4-0,6 атм., в зоне подсушки кека – 0,65-0,75 атм. Вакуум контролируется по приборам, установленным на вакуум-фильтрах и вакуум-проводах. Толщина кека на расстоянии 350 мм от края диска вакуум-фильтра выдерживается

8-10 мм. Также технологической инструкцией не допускается работа вакуум-филтра с порванной фильтровальной тканью и остановленной роторной мешалкой. Замена фильтровальной ткани производится после отработки нормативного времени.

При трехстадиальном измельчении, применяемом для более крепких руд, промпродукт участка дробления конвейерами 35" и 36" подается в бункера технологических секций III очереди емкостью 40 тысяч тонн.

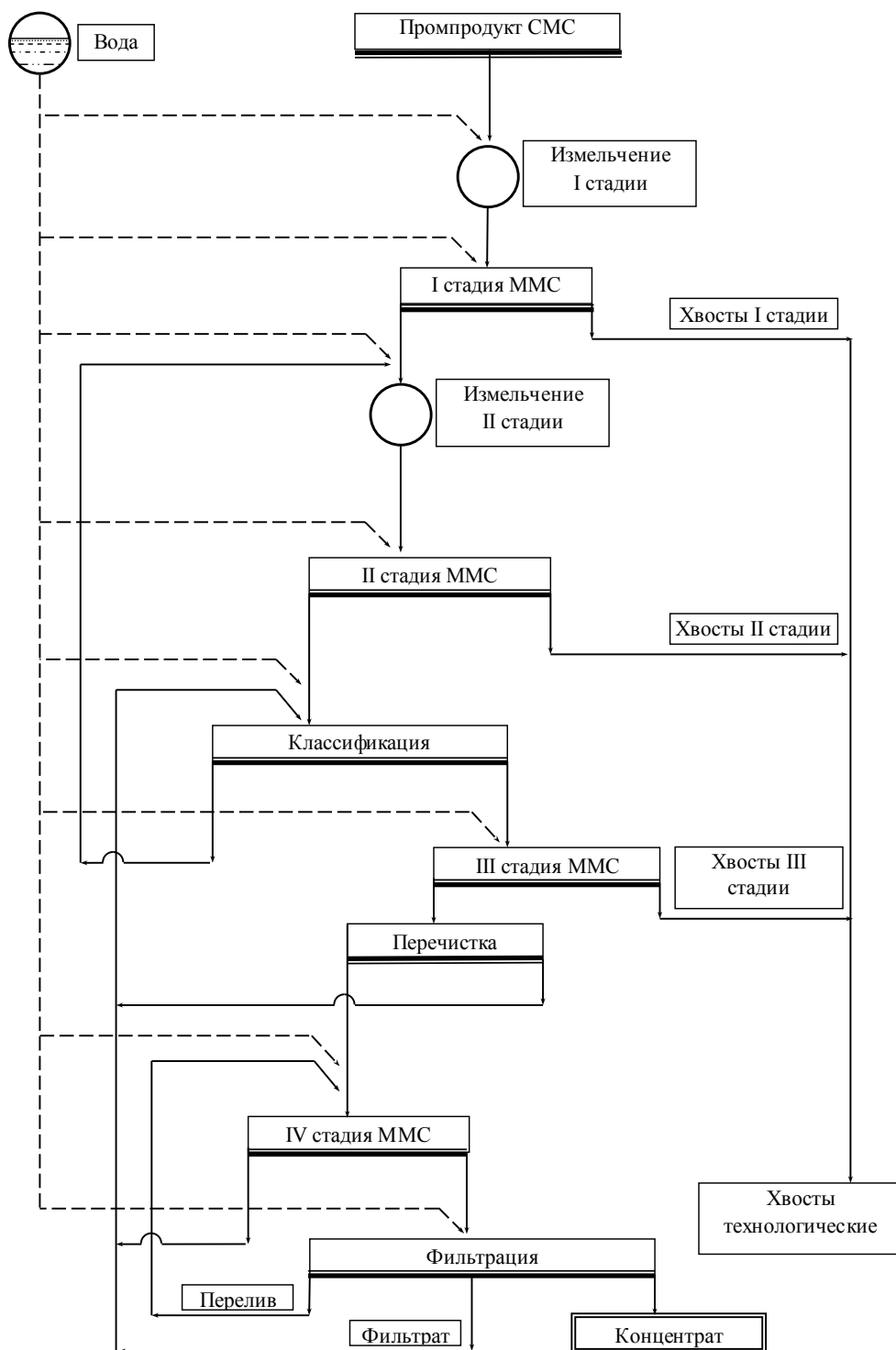


Рисунок 1.9 – Схема ММС с трехстадиальным измельчением

Из бункеров конвейерами №№37, 38 с регулируемыми приводами и конвейером №39 промпродукт подается на измельчение в стержневую мельницу МСЦ-36-45. Производительность по промпродукту мельниц МСЦ-36-45 составляет 260÷300 т/час (сырой вес). Вес руды, поступающей в стержневую мельницу, контролируется по показаниям весов, установленных на конвейерах №39 технологических секций. Регулировка производительности стержневых мельниц осуществляется при помощи системы автоматического регулирования.

Загрузка стержней диаметром 100 мм – 100 тонн в каждую мельницу осуществляется также как и на двухстадиальном измельчении вручную – стержнезагрузочной машиной – один раз в неделю.

Скорость вращения барабана мельницы составляет 14,42 об/мин (62% от критической). Удельная производительность стержневой мельницы по вновь образованному классу минус 0,071 мм составляет в среднем 1,55 т/м³ час. В сливе стержневой мельницы массовая доля класса плюс 2 мм не более 5 %, класса минус 0,071 мм в среднем 35 % (28-37 %). Массовая доля твердого в сливе мельницы согласно технологической инструкции составляет 78-85 %. Регулирование и поддержание массовой доли твердого в сливе мельницы осуществляется с помощью системы автоматического регулирования «руда-вода».

Измельченный материал крупностью 2-0 мм обогащается на магнитных сепараторах ПБМ-П-90/250 первой стадии обогащения. В первой стадии обогащения установлены три сепаратора с противоточной ванной ПБМ-П-90/250 на каждой секции. Производительность одного сепаратора по исходному питанию составляет 80-100 т/час. Массовая доля твердого в питании 30-40 %. Управление и стабилизация массовой доли твердого осуществляется системой автоматического регулирования. Массовая доля класса минус 0,071 мм в питании сепараторов в среднем 35% (28-37%).

Немагнитный продукт сепарации удаляется в хвосты, а магнитный продукт направляется в зумпф и далее насосами 8Гр-8 перекачивается на первую стадию классификации в гидроциклоны ГЦ-71, диаметром 710 мм.

Диаметр ГЦ-71 гидроциклонов составляет 710 мм. Количество гидроциклонов, установленных на секции – 4 штуки (в работе – 2, в резерве – 2). Размеры питающего отверстия 85×160 мм. Диаметр сливного патрубка – 190 мм. Диаметр песковой насадки – 100 мм. Размеры питающих отверстий сливных патрубков песковых насадок проверяются во время проведения ППР секций. Давление пульпы на входе в гидроциклон составляет 1,5-2 кг·с/см². Массовая доля твердого в сливе гидроциклонов 15-20%, в песках – 75%. Регулировка массовой доли твердого в сливе гидроциклонов осуществляется подачей воды в

зумпф насосов 8Гр-8 первой стадии классификации. Массовая доля класса минус 0,071 мм в сливе гидроциклонов в среднем 78 % (63-81 %), в песках в среднем 28 % (17,3-34,4 %).

Пески гидроциклонов ГЦ-71 измельчаются в шаровой мельнице МШЦ-36-50 второй стадии измельчения. Во второй стадии измельчения установлено по одной мельнице МШЦ-36-50 на каждой секции. Производительность мельницы по исходному питанию 350 т/час (320÷400 т/час). Скорость вращения барабана мельницы 18 об/мин (80,7% от критической). Массовая доля класса минус 0,071 мм в измельченном продукте в среднем 49% (42-51%). Удельная производительность по вновь образованному классу минус 0,071 мм составляет в среднем 1,02 т/м³ час. Массовая доля твердого в сливе шаровых мельниц составляет 63-75%.

Измельченный продукт шаровой мельницы поступает на вторую стадию обогащения, осуществляемую на сепараторах ПБМ-П-90/250. Во второй стадии обогащения установлены четыре сепаратора с противочными ваннами ПБМ-П-90/250 на каждой секции. Производительность по исходному питанию одного сепаратора в среднем 90-100 т/час. Массовая доля твердого в питании сепараторов 30-40 %. Контроль массовой доли твердого осуществляется ручным способом – взвешиванием 1 литра пульпы. Регулирование массовой доли твердого производится изменением подачи свежей воды в пульподелителе перед сепараторами. Массовая доля класса – 0,071 мм в питании сепараторов в среднем 49 % (47-51 %).

Немагнитный продукт сепараторов удаляется в хвосты, а магнитный продукт направляется в зумпф насосов первой стадии классификации. Слив гидроциклонов первой стадии классификации поступает на третью стадию обогащения, осуществляемую на сепараторах ПБМ-ПП-120/300. В этой стадии обогащения выделяются хвосты (немагнитный продукт) и магнитный продукт, поступающий в зумпф насосов 8Гр-8 второй стадии классификации.

Вторая стадия классификации осуществляется в гидроциклонах ГЦ-35, диаметром 350 мм. Количество гидроциклонов, установленных на секции 20 штук (в работе – 10, в резерве – 10). Размеры питающего отверстия 40×90 мм. Диаметр сливного патрубка – 78 мм. Диаметр песковой насадки – 48 мм. Давление пульпы на входе в гидроциклон составляет 1,5-2 кг·с/см². Массовая доля твердого в сливе гидроциклонов 18-24 %, в песках 75 %. Регулировка массовой доли твердого в сливе гидроциклонов осуществляется подачей воды в зумпф насосов 8Гр-8 второй стадии классификации. Массовая доля твердого в сливе гидроциклонов контролируется непрерывно автоматически индукционными датчиками.

Массовая доля класса минус 0,071 мм в сливе гидроциклонов составляет не менее 95%, в песках – 57 % (55-60 %).

Пески гидроциклонов ГЦ-35 доизмельчаются в шаровой мельнице МШЦ-36-50

третьей стадии измельчения и далее измельченный продукт поступает в зумпф насосов второй стадии классификации.

В третьей стадии измельчения установлено по одной мельнице МШЦ-36-50 на каждой секции. Производительность мельницы по исходному питанию 290 т/час (240÷320 т/час). Скорость вращения барабана мельницы 18 об/мин (80,7 % от критической). Массовая доля класса минус 0,071 мм в измельченном продукте в среднем 64 % (63-73 %). Удельная производительность мельницы по вновь образованному классу минус 0,071 мм составляет в среднем 0,43 т/м³ час. Массовая доля твердого в сливе мельницы 63-75 %.

Слив гидроциклонов ГЦ-35 сгущается и обесшламливается в дешламаторах МД-5. На каждой секции установлено 4 дешламатора. Производительность по исходному питанию одного дешламатора – 40 т/час. Массовая доля твердого в питании дешламаторов 18-24% (не более 28 %), в песках 50-55 %. Контроль за массовой долей твердого осуществляется ручным способом – взвешиванием 1 литра пульпы. Регулирование массовой доли твердого в питании дешламаторов осуществляется подачей воды в пульподелитель дешламаторов.

В третьей стадии обогащения установлены сепараторы с полупротивоточными ваннами ПБМ-ПП-120/300 в количестве 3 штук на секцию. Производительность по исходному питанию одного сепаратора ПБМ-ПП-120/300 – 50-60 т/час. Массовая доля твердого в питании сепараторов составляет 15-20%. Контроль массовой доли твердого осуществляется ручным способом – взвешиванием 1 литра пульпы. Массовая доля класса минус 0,071 мм в питании сепараторов 78% (75-81%).

Слив дешламаторов удаляется в хвосты, а сгущенный продукт направляется в зумпф и далее насосами №№47, 48 перекачивается на грохота тонкого грохочения «Стек Сайзер 2SG48-60W-5STK», производительность по исходному питанию одного грохота 75-80 т/час. Массовая доля твердого в питании грохотов составляет 48-52 %. На грохотах установлены полиуретановые панели ТН 48-30×0,1МТ.

Надрешётный продукт грохочения направляется на доизмельчение в шаровую мельницу МШЦ-36-50 второй стадии измельчения, а подрешётный продукт поступает в концентратный зумпф и перекачивается на четвертую стадию обогащения, осуществляемую в два приема (с перечисткой концентрата) на магнитных сепараторах ПБМ-ПП-120/300.

В четвертой стадии обогащения установлены три пары сепараторов с полупротивоточными ваннами ПБМ-ПП-120/300 (сепарация осуществляется в два приема с перечисткой концентрата). Производительность одного сепаратора по исходному питанию до 50 т/час. Массовая доля твердого в питании сепараторов 25-30 %. Массовая доля класса минус 0,071 мм в питании сепараторов не менее 95%.

Немагнитный продукт сепараторов удаляется в хвосты, а концентрат направляется

для обезвоживания на дисковые вакуум-фильтры ДОО-100×2,5(ДТВО – 100×2,64).

Кек с вакуум-фильтров секций III очереди конвейерами № №73, 74, 47, 51 транспортируется на склад влажного концентрата, где совместно с концентратом II очереди усредняется в штабель конвейером №51.

Для фильтрования концентрата на технологических секциях установлены по четыре вакуум-фильтра ДОО-100×2,5 (ДТВО-100×2,64). Площадь фильтрования вакуум-фильтра 100 м². Производительность по исходному питанию составляет 34-52 т/час. Влажность кека вакуум-фильтров в среднем 9,6-9,8 %. Массовая доля твердого в питании вакуум-фильтров 40-50 %, массовая доля класса минус 0,071 мм не менее 95%.

Вакуум в зоне набора кека составляет – 0,4-0,6 атм., в зоне подсушки кека – 0,65-0,75 атм. Вакуум контролируется по приборам, установленным на вакуум-фильтрах и вакуум-проводах. Толщина кека на расстоянии 350 мм от края диска вакуум-фильтра выдерживается 8-10 мм.

Мнемосхема управления трехстадиальным измельчением для АО «ССГПО» приведена на рисунке 1.10.

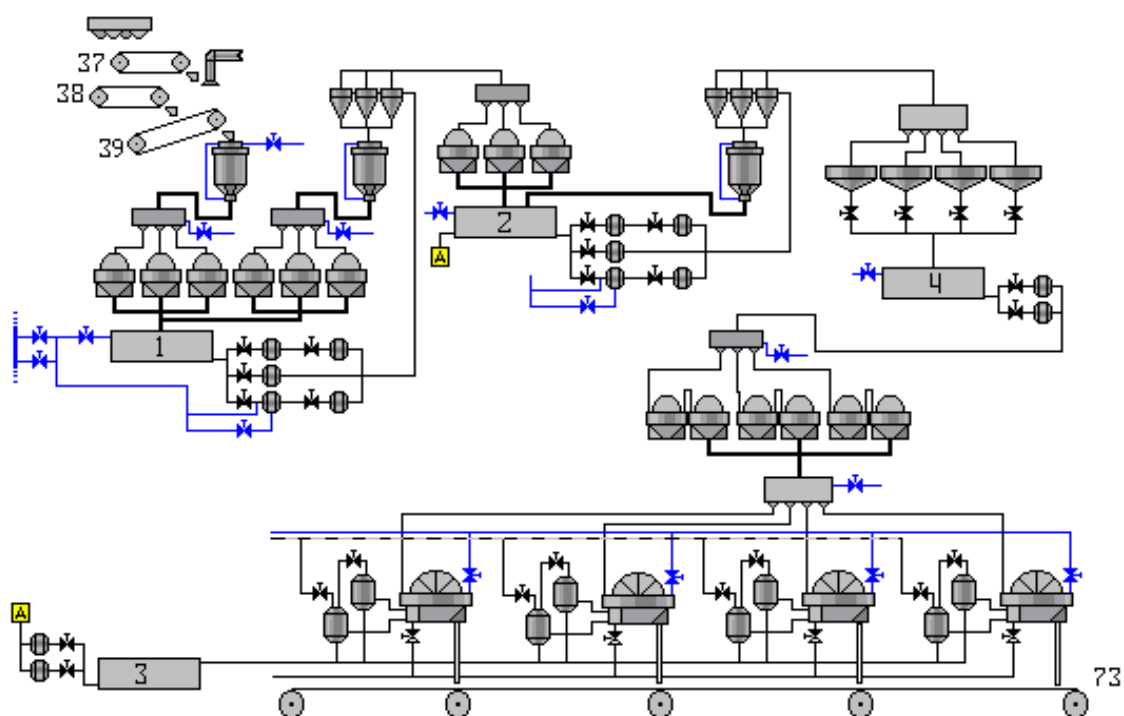


Рисунок 1.10 – Мнемосхема схема фабрики ММС

Усредненный концентрат роторными экскаваторами и системой конвейеров подается в расходные бункера участка сушки или окомкования.

1.2.4 Анализ технологической схемы сушки

Сушка концентрата в зимний период производится с целью предотвращения смерзания железорудного концентрата при транспортировке потребителям.

Отгрузка железорудного концентрата влажностью 9,8% производится с I очереди склада влажного концентрата роторными экскаваторами SR_S-240-9,5/0,5 и ШРС-160-7,5/0,5, производительностью соответственно 1000 и 800 т/час. Концентрат транспортируется системой ленточных конвейеров №№52, 54, 63 в бункера корпуса сушки. В случае аварийной остановки конвейера №52 или роторного экскаватора, работающего с I очереди склада, предусмотрена транспортировка концентрата со II очереди системой конвейеров №№53, 40, 54, 63.

Заполнение бункеров емкостью 1500 тонн, производится с помощью 12-ти плужковых сбрасывателей, установленных на конвейере №63, по два на бункер каждого сушильного барабана.

Концентрат из бункеров подается ленточными дозаторами 4488-ДН-У в загрузочные точки сушильных барабанов типа БС-3,5×27. Производительность сушильного барабана составляет 160 т/час, число оборотов барабана – 6 об/мин. Время нахождения материала в барабане – 10-15 минут. Угол наклона сушильного барабана составляет 3°. Загрузка сушильного барабана регулируется автоматически ленточными дозаторами.

Для предотвращения зависания концентрата на стенках бункеров, на конусные части бункеров установлены электровибраторы, включающиеся в работу автоматически при отсутствии концентрата на ленте дозатора.

Внутри сушильных барабанов установлены винтовая и лопастная насадки, предназначенные для перемешивания концентрата при его сушке. Сушка концентрата осуществляется сушильным агентом при сжигании природного газа в газовоздушных калориферах ГВК-10.

Газовоздушный калорифер предназначен для получения смеси топочных газов с воздухом. Производительность газовоздушного калорифера ГВК-10 – 1200 м³/час, теплопроизводительность – 10 Гкал/ч, температура смеси топочных газов на входе в барабан – 500°С.

Подача первичного воздуха на горение и вторичного для смешивания осуществляется отдельно на каждый сушильный барабан дутьевым вентилятором ВДН-12,5 производительностью 12,5 тыс. м³/час.

Регулирование количества первичного и вторичного воздуха, поступающего на

горение, производится дистанционно с автоматизированного рабочего места (АРМ) сушильщика.

Разрежение в ГВК-10 создается дымососом ДН-22, установленным в разгрузочной части каждого сушильного барабана, и поддерживается в пределах 6 мм водного столба путем регулирования положения шиберов дымососа дистанционно или автоматически с АРМ сушильщика.

Температура отходящих газов на выходе из барабана составляет не менее 70 С°. Для предотвращения пылевыноса в атмосферу, в разгрузочной части каждого сушильного барабана установлена система пылегазоочистки отходящих газов, состоящая из двух ступеней очистки. Первая ступень очистки (сухая очистка) предназначена для улавливания взвешенных частиц железорудного концентрата из дымовых газов и осуществляется в осадительной камере объемом 220 м³. Вторая ступень очистки (мокрая очистка) предназначена для очистки наиболее мелких частиц, содержащихся в дымовых газах, и осуществляется в мокром прутковом золоуловителе МП-ВТИ диаметром 3300 мм. В мокром прутковом золоуловителе установлена система распылительных форсунок.

Поток дымовых газов, проходя через систему орошения, смачивается водой и мелкодисперсные частицы пыли вместе с водой поступают в зумпфы насосов 8Гр-8 №№1, 2. Далее шламы откачиваются по пульпопроводу в шламовую насосную станцию участка по производству окатышей.

Подсушенный концентрат с влагой не более 3,0% через разгрузочные тчки сушильных барабанов поступает на конвейер №61 и транспортируется на склад сушеного концентрата конвейером №64.

В горизонтальной части конвейера №61 установлен плужковый сбрасыватель. При погрузке вагонов сушеным концентратом, плужок опускается, и концентрат через тчки поступает на конвейер №56. Одновременно со склада сушеного концентрата конвейерами №№58, 59 сушеный концентрат транспортируется на конвейер №56 и далее конвейером №66 подается в бункера корпуса погрузбункеров емкостью 60 м³.

Погрузка сушеного концентрата в вагоны производится двумя ленточными конвейерами №№67, 68 производительностью 1000 т/час каждый.

Заполнение и отработка склада сушеного концентрата производится согласно «Паспорта отработки склада сушеного концентрата с помощью бульдозера».

Отгрузка влажного концентрата в летний период осуществляется с I очереди влажного концентрата системой конвейеров №№ 52, 54, 56, 66, 67, 68 или со II очереди склада системой конвейеров №№ 53, 40, 54, 56, 66, 67, 68.

Схема сушки представлена на рисунке 1.8 [38].

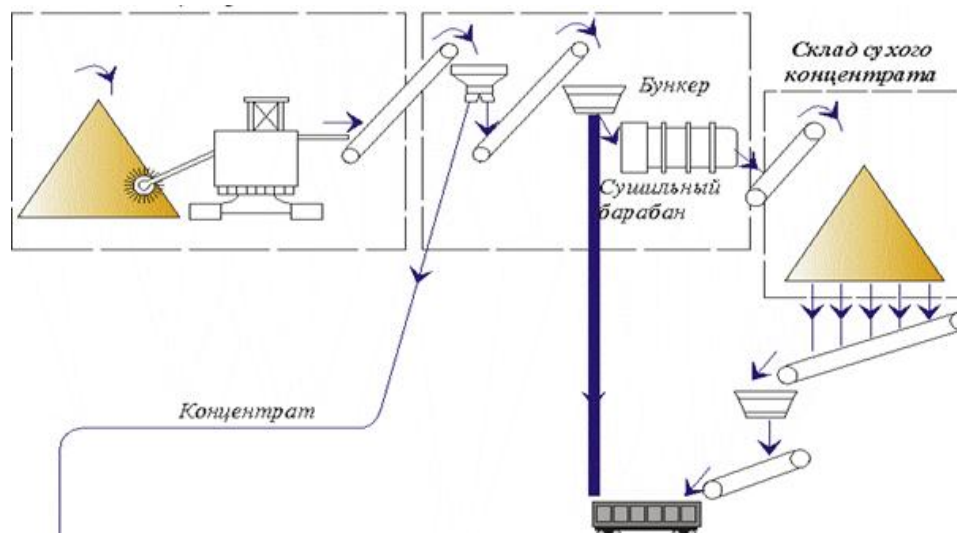


Рисунок 1.11 – Схема сушилки

1.3 Выводы по разделу

Основными производителями сырой железной руды и железорудного концентрата в северном Казахстане, да и во всей Республике Казахстан являются ГОКи АО «ССГПО» и ТОО «Оркен». На их долю приходится производство до 93 % всей добываемой железной руды Казахстана. АО «ССГПО» работает на рудах Соколовского, Сарбайского, Качарского и Куржункульского месторождений, ТОО «Оркен» – на рудах Лисаковского месторождения. Руды данных месторождений различаются как по генезису, так и значительно отличаются по физико-механическим свойствам.

Для обоих предприятий характерны однотипные схемы обогатительных комплексов, поэтому более детальный анализ произведен по УРПО АО «ССГПО». Для обогащения руд применяют фабрику рудоподготовки и обогащения, состоящую из фабрик дробления и СМС, мокрого магнитного обогащения и, в зимний период времени, сушилки концентрата.

Фабрика дробления и СМС обеспечивает измельчение руды до класса плюс 2 мм первую ступень обогащения железной руды. Фабрика ММС построена по двух и трехстадиальным схемам измельчения до класса минус 0,0074 мм в зависимости от крепости руд. Сушка используется только в зимний период времени для предотвращения смерзания концентрата при складировании на складах готовой продукции и транспортировании потребителю.

По результатам анализа следует отметить, что более 90 % оборудования произведено в период существования СССР и значительно выработало свой ресурс, хотя предприятия и прилагают определенные усилия по модернизации основных средств производства.

Автоматизация технологических процессов обогатительных комплексов как АО «ССГПО», так и ТО «Оркен» представлена в первую очередь системами нижней ступени. Как правило, в качестве систем управления ими используют САУ. На данном уровне САУ показали себя достаточно эффективными системами и эксплуатируются уже более 40 лет без значительных изменений.

В настоящее время на средней и верхней ступенях управления используются комплексы, такие как АСОДУ (автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления) для УРПО АО «ССГПО». Данные системы позволяют операторам контролировать протекание технологических процессов и удаленно управлять ими.

Эффективность производства в современной промышленности, как и во многих других отраслях, сегодня неразрывно связана с техническим перевооружением существующих систем контроля и управления. Использование же технологических линий с морально устаревшим ручным или автоматизированным управлением в условиях высокой сложности технологических линий, огромного числа взаимовлияющих параметров, высокой себестоимости продукции не способствует как экономической устойчивости предприятия, так и соответствию предприятий постоянно изменяющимся требованиям к качеству и себестоимости продукции.

Создание современных систем управления требует дальнейшего повышения качества управления за счет использования высокоэффективных алгоритмов управления. Особенно это важно для создания систем управления верхних уровней.

Разработка и внедрение современных алгоритмов для ПМО управления сдерживается их сложностью и аналоговой элементной базой систем управления. Но даже широкомасштабный процесс перехода на цифровую элементную базу не обеспечил соответствующего повышения качества управления из-за трудностей при реализации режима жесткого реального времени последовательными ЭВМ. Вторым сдерживающим фактором являлась высокая трудоемкость разработки программного обеспечения (ПО) для систем управления.

Дальнейшее развитие систем управления и повышения их эффективности в рамках применяемых комплексов технических средств (КТС) и программно-математического обеспечения (ПМО) требует значительных затрат ресурсов для выявления зависимостей параметров большого числа процессов. Кроме того, как правило, сами эти параметры не являются абсолютно стабильными, а имеет место дрейф параметров в результате износа оборудования и колебаний свойств промпродукта.

Поэтому решение задач управления системами среднего и верхнего уровня на основе задания «жестких» алгоритмов считаем малоэффективным. Решение задачи наиболее

эффективно возможно на адаптивных самонастраивающихся системах управления. При этом, развитие раздела систем искусственного интеллекта – искусственных нейроподобных сетей – дает основание предположить, что такие алгоритмы могут быть разработаны и эффективны именно на искусственных нейроподобных сетях. Поскольку они не требуют детального изучения взаимосвязей входных и выходных параметров, а строятся по схеме «черный ящик».

В этой связи дальнейшие исследования в работе по системам автоматического управления технологическими процессами железо-обогатительного комплекса, работающих в условиях нестабильности входных параметров, планируется осуществлять с применением нейрорегуляторов.

2.1 Системы управления технологическими процессами как объект исследования

Ускоренное развитие предприятий производства на современном этапе немыслимо без формирования эффективной системы управления. Причем главное внимание на всех уровнях управления и руководства должно быть сосредоточено на наиболее рациональном использовании материальных, трудовых и финансовых ресурсов, природных богатств, устранении излишних издержек и потерь. Именно эти вопросы являются стержневыми при решении задач управления [5, 7, 41, 59].

Управление – это осуществление на объект управления совокупности управляющих воздействий. Воздействия выбираются из множества возможных решений на основании имеющейся информации о состоянии объекта управления, окружающей среды и др. Они направлены на поддержание или улучшение функционирование этого объекта в соответствии с целью управления.

Совокупность объекта управления (ОУ) и управляющего устройства – регулятора (Р), взаимодействующих между собой, называют системой управления (СУ) [4, С. 10, 7, 8].

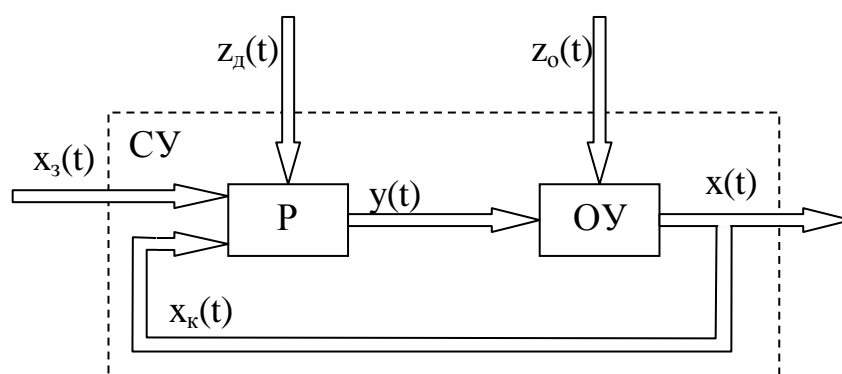


Рисунок 2.1 – Обобщенная структура СУ

Физическая величина $x(t)$ – управляемая величина – характеризует состояние объекта, и ее преднамеренно изменяют или поддерживают в процессе управления. Часто состояние управляемого объекта определяется несколькими величинами $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$. В этом случае принято говорить об n -мерном векторе состояния объекта $x(t)$.

Управляемая величина является выходной величиной объекта и зависит от двух входных воздействий: возмущающего $z(t)$ и управляющего $y(t)$. В общем случае обе эти

величины могут быть векторными величинами. Кроме основного возмущения $z_o(t)$, действующего на сам объект, на функционирование системы может влиять дополнительное возмущение $z_d(t)$, приложенное к управляющему устройству.

Зависимость управляемой величины от входных воздействий для одномерного объекта можно выразить при помощи некоторого оператора A_o , характеризующего объект как преобразователь сигналов.

$$x(t) = A_o[y(t), z(t)] \quad (2.1)$$

Для n -мерного объекта будет n зависимостей вида (2.1), связывающих n управляемых величин с несколькими управляющими и возмущающими величинами.

Любой процесс управления включает в себя следующие основные этапы:

- сбор и обработка информации о положении объекта управления в целях оценки сложившейся ситуации;
- принятие решения о наиболее целесообразных действиях;
- исполнение принятого решения.

Алгоритм управления в самом общем случае выражает зависимость управляющего воздействия от задающего воздействия $x_3(t)$, управляемой величины и возмущающих воздействий.

$$y(t) = A_y[x_3(t), x(t), z_o(t), z_d(t)] \quad (2.2)$$

Для поддержания требуемых режимов работы современного технологического оборудования используют три схемы управления: ручное и две схемы с использованием технических устройств – автоматизированное и автоматическое.

Ручное управление – это управление объектом управления посредством корректирующих заданий оператором установки.

При построении современных технических систем, как правило, не используются системы ручного управления. Данные системы не эффективны и не позволяют быстро и адекватно компенсировать изменения входных и возмущающих параметров ОУ. Поэтому в дальнейшем будут рассматриваться только системы с использованием технических устройств.

Автоматизированное управление основывается на использовании автоматизированных систем управления (АСУ) – систем с участием человека. В таких

системах человек на основании полученной информации о процессе принимает решения по управлению. В результате появляется возможность решения технико-экономических задач, задач оперативного планирования и др.

При автоматическом управлении с использованием систем автоматического управления (САУ) воздействие на объект осуществляется без участия человека. При этом, однако, (на современном этапе) возможно решение ограниченного количества задач: стабилизация выходных координат процесса, автоматическое слежение, максимизация (минимизация), каких-либо параметров процесса, их техническая оптимизация.

В теории автоматического управления классификация технических систем управления осуществляется по характеру изменения величин, математическим признакам, способу настройки, типу ошибки, алгоритмам функционирования и другим признакам.

Классификация систем управления (СУ) по характеру изменения величин:

- непрерывного действия;
- импульсного действия;
- дискретного действия;
- релейного действия.

Классификация СУ по математическим признакам:

- линейные системы;
- нелинейные системы;
- существенно нелинейные.

Классификация по способу настройки:

- не адаптивные системы;
- адаптивные системы:
 - a) системы с переменной структурой;
 - b) системы с самонастройкой программы;
 - c) системы с самонастройкой параметров;
 - d) системы с самонастройкой структуры.

Классификация по типу ошибки в статике:

- статические СУ;
- астатические СУ.

Классификация по алгоритмам функционирования (по назначению):

- системы стабилизации;
- системы слежения;
- системы программного управления;

- системы телеуправления;
- системы самонаведения, сопровождения, автопилотирования;
- системы компенсационных измерений.

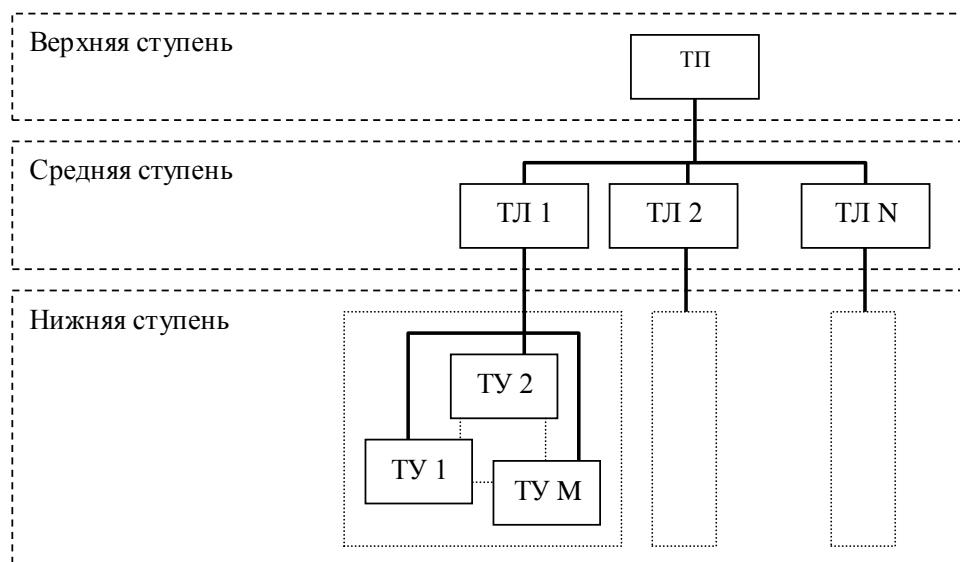
Современная техническая система и даже отдельно взятый крупный технологический процесс представляют собой сложную систему. Такая система содержит сотни технологических агрегатов, мощные транспортные потоки, образующие целые сети с прямыми и обратными связями, энергетические соединительные линии и установки. Управление подобной сложной системой можно проводить эффективно только на основе науки об управлении, на базе современных средств автоматического управления и вычислительной техники.

Сложность анализа технологического процесса как объекта управления делает естественным и необходимым при его исследовании соблюдение определенной иерархической структуры. Особенностью такой структуры является последовательное расчленение технической системы на подсистемы, между которыми устанавливают отношения подчиненности. Иерархическую структуру с позиций задач управления можно представить в виде трех ступеней (рисунок 2.2):

- нижняя ступень – типовые процессы технологии;
- средняя ступень – группы процессов или аппаратов, выполняющие самостоятельную технологическую задачу;
- верхняя ступень – техническая линия, рассматриваемая в целом [9, С.5, 44, 45].

Для каждой иерархии характерны свои задачи управления, которым соответствуют свои целевые функции.

Процессы нижней ступени достаточно глубоко изучены. Как правило, в качестве систем управления ими используются САУ. Научно-техническая революция привела к резкому возрастанию мощностей технологических установок, взаимной связи многих агрегатов и технологических процессов, росту скоростей работы механизмов и установок. В этих условиях человек уже не может осуществлять управление, тем более не может обеспечить оптимальное функционирование систем машин и процессов. Поэтому на данном уровне САУ показали себя достаточно эффективными системами и эксплуатируются уже более 40 лет без значительных изменений.



- где ТП – технический процесс в целом;
 ТЛ – группа взаимосвязанных агрегатов или технологическая линия;
 ТУ – отдельно взятая технологическая установка либо агрегат.

Рисунок 2.2 – Иерархическая структура технического процесса

Сложность современных технологических процессов (большое количество параметров получаемого продукта, регулируемые и изменяющиеся в результате износа параметры оборудования, а также взаимовлияние контуров регулирования нижней ступени друг на друга) делает комплексное автоматическое управление процессами средней, а тем более, и верхней ступени в настоящее время сложной, а, зачастую, не решаемой задачей.

В настоящее время на средней и верхней ступенях управления наиболее широко применимы АСУ, учитывающие эмпирические знания операторов, хотя встречаются и полностью автоматические линии.

Эффективность производства в современной промышленности, как и во многих других отраслях, сегодня неразрывно связана с техническим перевооружением существующих систем контроля и управления. Использование же технологических линий с морально устаревшим ручным управлением в условиях высокой сложности технологических линий, огромного числа взаимовлияющих параметров, высокой себестоимости продукции не способствует как экономической устойчивости предприятия, так и соответствию предприятий постоянно изменяющимся требованиям к качеству и себестоимости продукции.

Создание современных систем управления требует дальнейшего повышения качества управления за счет использования высокоэффективных алгоритмов управления. Особенно

это важно для создания систем управления верхних уровней.

Разработка и внедрение современных алгоритмов для ПМО управления сдерживается их сложностью и аналоговой элементной базой систем управления. Но даже широкомасштабный процесс перехода на цифровую элементную базу не обеспечил соответствующего повышения качества управления из-за трудностей при реализации режима жесткого реального времени последовательными ЭВМ. Вторым сдерживающим фактором являлась высокая трудоемкость разработки программного обеспечения (ПО) для систем управления.

Дальнейшее же развитие систем управления и повышения их эффективности в рамках применяемых комплексов технических средств (КТС) и программно-математического обеспечения (ПМО) требует значительных затрат ресурсов для выявления зависимостей параметров большого числа процессов. Кроме того, как правило, сами эти параметры не являются абсолютно стабильными, а имеет место дрейф параметров в результате износа оборудования и колебаний свойств промпродукта.

Вместе с тем, развитие раздела систем искусственного интеллекта – искусственных нейроразподобных сетей – дает основание предположить, что такие алгоритмы могут быть разработаны и эффективны именно на искусственных нейроразподобных сетях. Поскольку они не требуют детального изучения взаимосвязей входных и выходных параметров, а строятся по схеме «черный ящик».

В этой связи представляется целесообразным исследование возможности применения аппарата искусственных нейроразподобных сетей (ИНС) вместо традиционных КТС и ПМО.

2.2 Анализ систем управления технологическими процессами АО «ССПО» и ТОО «Оркен»

Существует несколько схем классификации задач ЖОКа [39, 40]. Для выбора объекта исследования необходимо произвести анализ технологических процессов по ресурсоемкости, вооруженности средствами автоматизации, их месте в технологическом цикле.

Для этого в качестве задач управления верхней ступенью ЖОКа можно выделить следующие:

- поддержание требуемых параметров качества промпродукта;
- поддержание требуемых объемов производства промпродукта;
- минимизация себестоимости [37, с. 55]:

На средней ступени технологический процесс разбит на дробление, обогащение,

сушку (в зимнее время года) и складирование. Соответственно и задачи управления разделяются на задачи управления дроблением, обогащением, сушкой и складированием.

К основным задачам управления процессом дробления относятся:

- поддержание требуемых параметров дробления;
- поддержание требуемых объемов производства;
- минимизация себестоимости:
 - а) минимизация расхода электроэнергии, вспомогательных материалов, воды;
 - б) минимизация времени технологического цикла;
 - в) минимизация транспортных расходов;
 - г) максимизация загрузки оборудования.

К задачам управления обогащением относятся:

- поддержание требуемых параметров процесса обогащения;
- поддержание требуемых объемов производства;
- минимизация себестоимости:
 - а) минимизация расхода электроэнергии, вспомогательных материалов, воды;
 - б) минимизация времени технологического цикла;
 - в) минимизация транспортных расходов;
 - г) максимизация загрузки оборудования.

Соответственно, к задачам управления процессами сушки можно отнести:

- поддержание требуемых параметров сушки;
- поддержание требуемых объемов производства;
- минимизация себестоимости;
- минимизация расхода электроэнергии, вспомогательных материалов, газа;
- минимизация времени технологического цикла;
- минимизация транспортных расходов;
- максимизация загрузки оборудования.

Анализ ряда исследований в области горного дела, начиная с 80-х годов, т.е. активной математизации горной науки, свидетельствует о том, что в современной горнотехнической литературе не выявлена специфика существующих классов задач и не определены области их пересечения, как с позиции классов решаемых задач, так и методов их решения [44, 45].

В данном разделе представлен подход к систематизации задач управления железо-обогатительным комплексом по уровням (комплекс, фабрики, технологические процессы), а также вариант стандартизации описания самих задач управления по этим уровням.

Одним из итогов работы по систематизации задач управления ЖОКом по уровням

является таблица 2.1 [38, 42].

Таблица 2.1 – Совокупность задач железо-обогажительного комплекса по уровням

Объект	Задача управления	Применяемый КТС	Применяемое ПМО
1	2	3	4
Комплекс	Поддержание требуемых параметров качества промпродукта	Серверные станции	АСУП «АСОДУ»
	Поддержание требуемых объемов производства промпродукта	Серверные станции	АСУП «АСОДУ»
	Минимизация себестоимости промпродукта	-	-
ДОФ	Стабилизация мощности, потребляемой электроприводом дробилки	Ваттметровый преобразователь СВПА – 2 преобразователя частоты Midimaster Vector Регулятор РС29 Электродвигатель питателя 4А250М 6УЗ Промышленная рабочая станция AWS – 842 (ADVANTECH)	AWS – 842 (ADVANTECH)
	Стабилизация производительности дробилки по исходной руде	Ваттметровый преобразователь СВПА – 2 преобразователя частоты Midimaster Vector Электродвигатель питателя 4А250М 6УЗ	

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4
		Промышленная рабочая станция AWS – 842 (ADVANTECH)	
	Стабилизация уровня руды в пасти дробилки	ЭХО – импульсивная измерительная система VEGASON 71 – 1 ... 75 – 1 устройство контроля скорости DDZ001 промышленная рабочая станция AWS – 842 (ADVANTECH)	
	Минимизация себестоимости промпродукта	-	
Фабрика ММС	Поддержание требуемых параметров процесса обогащения	Станции Contronic-S и Contronic-R	OS Unix ПМО Contronics -
	Поддержание требуемых объемов производства		
	Минимизация себестоимости промпродукта	-	
	Стабилизация расхода руды в стержневую мельницу за счет регулирования скорости конвейера	Конвейерные весы BER-10 Станция Contronic-R	
	Поддержание соотношения руда/вода путем регулирования расхода воды в стержневую мельницу	Расходомер PROMAG-30 Станция Contronic-R	

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4
	Стабилизация расхода добавочной воды в зумпфы	Расходомер PROMAG-30 Станция Contronic-R	
	Стабилизация уровня пульпы за счет добавочной воды и воды на взмучивание	Расходомер PROMAG-30 Ультразвуковой измеритель уровня FDD80 (Ультразвуковой датчик Prosonic FDU 80 и измерительный преобразователь Prosonic FDU 860) Станция Contronic-R	
	Стабилизация расхода воды в пульподелитель	Расходомер PROMAG-30, Станция Contronic-R	OS Unix
	Стабилизация расходы воды в П/Д вакуум-фильтров	Расходомер PROMAG-30, Станция Contronic-R	ПМО Contronics
	Стабилизация вакуума в ресивере набора кека вакуум-фильтра	Станция Contronic-R	
	Стабилизация плотности песков дешламаторов	Станция Contronic-R	
	Стабилизация скорости дисков вакуум-фильтров	Дискретный датчик скорости ПДФ-3 Устройства управления однофазные неперверсивные серии БУ3509 Станция Contronic-R	
	Стабилизация плотности пульпы в пульподелителе	Станция Contronic-R	
	Стабилизация плотности питания вакуум-фильтров	Станция Contronic-R	
	Стабилизация уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра	Ультразвуковой измеритель уровня FDD80 (Ультразвуковой датчик Prosonic FDU 80 и	

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4
		измерительный преобразователь Prosonic FDU 860) Станция Contronic-R	
Сушка	Стабилизация соотношения газ-воздух	Датчик Метран-100ДД Контроллер SIMATIC S7-315 Исполнительный механизм МЭО – 87 Расходомер-счетчик ультразвуковой ДНЕПР-7 Станция Contronic-R	ПМО Contronic-R
,	Стабилизация температуры газа на входе в сушильный барабан	Термопреобразователь ТСП-5071 Термопреобразователь термоэлектрический ТХА-280М Станция Contronic-R	
	Стабилизация влажности высушенного продукта	Влагомер «Нейтрон-3М» Дифманометр ДКО-3702 Регулятор РС. 29.0.42 Станция Contronic-R	
	Минимизация себестоимости промпродукта	-	
Обжиг	Поддержание требуемых параметров сушки	Ультразвуковые бесконтактные датчики (SONAR BERO ф.Siemens) Термопреобразователи ТПР МЕТРАН-212 Станция Contronic-R	Станция Contronic-R
	Поддержание требуемых объемов производства	Ультразвуковые бесконтактные датчики (SONAR BERO ф.Siemens) Термопреобразователи ТПР МЕТРАН-212 Станция Contronic-R	
	Минимизация себестоимости промпродукта	-	

По данным этой таблицы можно сделать вывод о том, что современные, применяемые на предприятиях автоматические системы, в основном, решают задачи поддержания требуемых технологией параметров. Задачи же связанные с минимизацией себестоимости продукции, как правило, возложены на операторов технологических циклов (или не решаются вообще).

При этом давно доказано, что человек не может оперативно обрабатывать большой объем информации, связанный с взаимовлияющими параметрами технологических циклов [4, с. 5]. Как правило, в таких ситуациях применяют либо специальные системы поддержки принятия решения оператором, либо вообще исключают оператора из системы принятия таких решений и используют системы экстремального управления. В тех ситуациях, где принятое решение не влечет за собой последствий для человеческих жизней, в системах автоматики наибольшее распространение получило второе направление, как требующее меньших капитальных затрат на создание и внедрение, а так же обладающее большим быстродействием.

В условиях постоянного повышения стоимости ресурсов и использования для обогащения все более и более бедных руд применимость систем управления технологическими циклами операторами становится недопустимым анахронизмом, тем более при тотальной компьютеризации всех технологических процессов и борьбе за снижение себестоимости продукции [48, 49, 50].

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод о наличии дополнительных возможностей повышения эффективности технологических процессов ЖОК за счет применения систем управления первого и второго уровня – систем экстремального управления.

В этой связи представляется целесообразным исследование возможности применения аппарата ИНС вместо традиционных КТС и ПМО на примере управления наиболее энергоемкими процессами, а именно управления процессами измельчения руд на фабриках мокрой магнитной сепарации. В связи с планированием применения типизированных схем автоматического управления предполагается, что при выборе необходимых управляющих и управляемых параметров, будет возможен «перенос» разработанной структуры САУ на другие технологические процессы.

2.3 Анализ технологического процесса измельчения руд в стержневых мельницах

Для выбора основных управляющих параметров процесса необходим анализ состояния используемых схем автоматизации и технологической инструкции в комплексе.

Обогащение руд черных металлов, как самостоятельная отрасль горно-металлургического производства, осуществляется методами механической обработки, не связанной с химическими превращениями минералов. Химический состав минералов при этом остается неизменным. Изменяется лишь количественное соотношение между содержанием ценных минералов и пустой породы в исходном сырье и продуктах обогащения.

Механическое обогащение основано на использовании различия в физических свойствах минералов: плотности, крупности, формы, цвета и блеска, магнитной восприимчивости и других.

Перед обогащением руду приводят в такое состояние, при котором содержащиеся в ней минералы будут, как можно полнее освобождены от сростков друг с другом. Это достигается при дроблении и измельчении руды и сортировкой измельченного материала по крупности.

Для измельчения кусков материалов до крупности частиц менее 1-2 мм используют стержневые, шаровые мельницы или мельницы самоизмельчения [51, 52].

На фабриках обогащения руд черных металлов, как уже говорилось выше, наиболее распространены двухстадиальные (для легкоизмельчаемых руд) и трехстадиальные (для трудноизмельчаемых руд) циклы измельчения.

В первой стадии установлена стержневая мельница, работающая в открытом цикле, а во второй и третьей стадиях – шаровые мельницы, работающие в замкнутом цикле [38, с. 15].

В стержневых мельницах работа дробящей среды (стержней) происходит по прямой линии во многих точках. Крупные куски руды отделяют стержни друг от друга и заставляют их у загрузочного конца мельницы подниматься выше, чем концы стержней у разгрузочного конца. Поднимающаяся масса стержней образует промежутки клинообразной формы, через которые проходят, как через отверстия грохота, мелкие частицы руды. То есть в стержневой мельнице происходит и классификация руды по крупности, что позволяет получать более равномерный по крупности зернистый продукт. При измельчении кинетическая энергия падающих стержней должна быть достаточной для разрушения максимальных кусков исходной руды.

При постоянном коэффициенте заполнения мельницы с изменением размера стержней число соударений в мельнице увеличивается. Поэтому необходимо применять измельчающие тела минимально допустимых размеров. При заполнении мельницы стержнями одного размера измельчение протекает менее эффективно, чем при использовании стержней разных размеров. В процессе измельчения происходит истирание и разрушение стержней, поэтому в процессе работы мельницы через определенный интервал

времени производят удаление стержней меньших определенного диаметра и дозагрузку новых стержней [53].

Большинство технических операций обогатительной технологии проводят в водной среде. Механическая смесь твердого материала с жидкостью называется пульпой. Основной характеристикой пульпы является масса твердого материала.

Количество воды, подаваемое на мельницу, влияет на измельчение. При измельчении крупного материала (от 10 мм и более) достаточно 65-76% твердого материала в пульпе, для более мелкого материала – 50-70%.

Руды по крепости делятся на три типа

- 1 – руды с повышенной крепостью;
- 2 – руды средней крепости;
- 3 – руды низкой крепости.

В зависимости от крепости руд изменяется процент твердого в сливе и производительность мельницы [38, 53].

Плотность пульпы, находящейся в мельнице, существенно влияет как на производительность по исходному сырью, так и по вновь образовавшемуся готовому продукту. Водный режим измельчения регулируется подачей воды в барабан мельницы. Установлено, что с увеличением подачи воды в мельницу ее производительность сначала быстро возрастает, а затем медленно падает, а производительность по питанию возрастает. В стержневых мельницах содержание твердого в пульпе до предела, при котором она остается подвижной, повышает производительность процесса. Это объясняется увеличением числа зерен, попадающих в зону ударных воздействий стержней.

При содержании твердого более 85% возможно слипание стержней и резкое снижение производительности. При избыточной подаче воды в мельницу налипание зерен руды на мелющие тела резко уменьшается, и интенсивность измельчения падает. Этим объясняется снижение производительности по готовому продукту при разжижении пульпы.

Рыхлые разновидности руд с большим содержанием глинистых примесей создают в мельнице вязкую пульпу, увлекающую недоизмельченную фракцию в слив мельницы. Эффективность измельчения этих руд повышается при более низкой плотности.

В связи с этим интерес представляет управление процесса по параметру соотношения «руда-вода» в питании мельницы.

Производительность мельницы будет также зависеть от ряда таких факторов, как:

- размер мельницы;
- конструкция;

- условия измельчения;
- характер руды.

Однако первые два фактора являются константами и не могут меняться в течение технологического цикла.

Условия измельчения зависят от большого числа влияющих параметров (влажности воздуха, вибрация, напряженности магнитных полей и многого другого), однако, их коэффициенты корреляции с энергозатратами процесса измельчения менее 0,3. Поэтому их влияние решено не учитывать.

Измельчение является одним из самых ресурсо- и энергоемких процессов в обогащении железорудного сырья. Задачи оптимального управления этим процессом: минимизация себестоимости получаемого продукта и максимизация производительности агрегатов. Они являются приоритетными при решении задач оптимального управления обогатительной фабрикой.

Основная задача процесса измельчения – обеспечение подготовки пульпы к обогащению (крупность, раскрытие минералов и т.д.). В то же время в цикле измельчения должно перерабатываться плановое количество руды.

В связи с этим при управлении процессом измельчения обеспечивают стабилизацию гранулометрического состава продукта измельчения при постоянной производительности по исходной руде, обеспечение максимального выхода готового класса, стабилизацию гранулометрического состава продукта измельчения при максимальной производительности цикла по исходной руде.

При управлении процессом измельчения для достижения этих целей компенсируют изменение физико-механических свойств руды, изменение количественных характеристик входных потоков руды и воды. Для достижения целей управления решают задачи стабилизации (оптимизации) входных потоков руды и воды, стабилизации условий измельчения, стабилизации гранулометрического состава выходного потока пульпы.

Для их решения было предложено множество принципов управления процессом измельчения, которые можно объединить в группы [4, 6, 58]:

- регулирование воздействием на подачу исходной руды в цикл измельчения;
- регулирование воздействием на подачу исходной воды в барабан мельницы;
- регулирование гранулометрического состава пульпы на выходе цикла;
- регулирование воздействием на подачу измельчающих тел в барабан мельницы.

К первой группе, которая объединяет принципы управления, использующие в качестве управляющего воздействия изменение производительности цикла по исходной

руде, относятся следующие:

- стабилизация производительности цикла по исходной руде путем изменения подачи исходной руды;
- стабилизация уровня загрузки барабана мельницы путем изменения подачи исходной руды;
- стабилизация суммарного сигнала производительности и уровня загрузки барабана мельницы рудой;
- стабилизация суммарного сигнала с воздействием на изменение подачи исходной руды.

Стабилизация производительности цикла по исходной руде путем изменения подачи исходной руды ($Q=\text{const}$ $n_0=\text{var}$) широко применяется на отечественных и зарубежных обогатительных фабриках. Этот принцип оправдывает себя, когда гранулометрический состав и физико-механические свойства руды сравнительно постоянны. Но даже если свойства руды изменяются, этот принцип применим с корректировкой задания. Основное его преимущество – простота технической реализации.

Применение систем этой группы дает прирост производительности измельчающих агрегатов на 5% и выше при незначительных колебаниях физико-механического состава руды.

При стабилизации уровня загрузки барабана мельницы путем изменения подачи исходной руды позволяет отражать изменение физико-механических свойств руды.

Этот принцип управления наиболее известен и апробирован. Использование его при управлении дает увеличение производительности измельчительного агрегата до 10%.

Стабилизация суммарного сигнала производительности и уровня загрузки барабана мельницы рудой ($Q+A_m=\text{const}$) с воздействием на изменение подачи исходной руды. Преимущество этого принципа состоит в том, что косвенным образом учитывается изменение физико-механических свойств исходной руды по изменению уровня загрузки барабана мельницы и циркулирующей нагрузки.

Вторая группа объединяет принципы управления процессом измельчения, использующие в качестве управляющего воздействия изменение расхода воды в барабан мельницы.

Ко второй группе принципов относится два метода. Первый из них – стабилизация расхода воды в барабан мельницы ($W_m=\text{const}$) с воздействием на положение регулирующего клапана трубопровода, подающего воду в мельницу. Этот принцип применим при условии стабилизации расхода руды в барабан мельницы.

Второй – стабилизация соотношения твердого продукта и жидкого ($T:Ж=\text{const}$) путем

изменения расхода воды в барабан мельницы ($W_m = \text{var}$). Применение этого принципа позволяет стабилизировать плотность пульпы в барабане мельницы, чем стабилизируются условия измельчения. Это позволяет избежать переизмельчения или недоизмельчения руды. Этот принцип управления имеет преимущественное распространение на отечественных и российских обогатительных фабриках.

Третья группа принципов управления процессом измельчения основана на использовании прямой или косвенной информации о гранулометрическом составе пульпы на выходе цикла измельчения.

Регулирование подачи измельчающих тел реализовано только для шаровых мельниц. Для стержневых мельниц загрузка стержней производится через определенный интервал работы мельницы вручную с использованием стержнезагрузочных машин [37, 53]. Поэтому данный фактор может рассматриваться как возмущающий, его реализация в качестве управляющего фактора затруднительна.

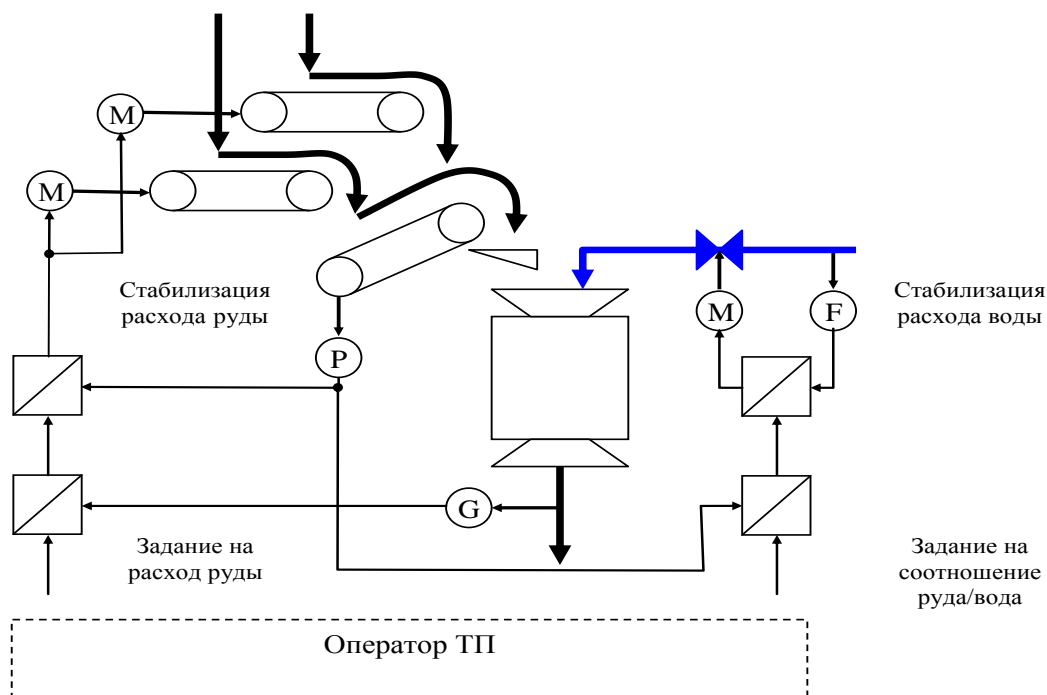
Анализ представленных подходов нижнего уровня автоматизации процесса измельчения позволяет говорить, что цели этих систем, как правило, взаимоисключающие. Достижение одной цели приводит к ухудшению другого параметра. Это позволяет говорить о необходимости многомерной (многопараметрической) оптимизации процесса.

На рисунке 2.3 изображена схема автоматизации процесса измельчения в стержневой мельнице, используемая на фабрике ММС АО «ССГПО» [38]. Как видно из рисунка в данной схеме используются два контура:

- контур стабилизации производительности цикла по исходной руде путем изменения подачи исходной руды (изменение скорости движения питающих конвейеров);
- контур стабилизации соотношения твердого продукта и жидкого путем изменения расхода воды в барабан мельницы.

Но задания по производительности цикла по исходной руде и на соотношение «руда-вода» задает с пульта управления оператор в зависимости от физико-механических свойств руды.

Исходным сырьем для обогатительного комплекса АО «ССГПО» являются магнетитовые руды Сарбайского, Качарского, Соколовского, Куржункульского карьеров и Соколовского подземного рудника. Физико-механические свойства руд этих месторождений значительно отличаются друг от друга.



- P – конвейерные весы,
- G – гранулометр,
- F – расходомер,
- M – электромоторы.

Рисунок 2.3 – Мнемосхема первой стадии измельчения на фабрике MMC АО «ССГПО»

В магнетитовых рудах Сарбайского, Соколовского, Качарского и Куржункульского месторождений основным рудным минералом является магнетит, в качестве примесей содержатся пирит, халькопирит пирротин, из нерудных – пироксен, скаполит, актинолит, гранат, эпидот [24, 38, 42].

Руды Сарбайского месторождения это – пироксен-скаполит-магнетитовая, пироксен-магнетитовая, пироксен-гранат-магнетитовая, прожилково-вкрапленная, эпидот-актинолит-магнетитовая. Руды Соколовского месторождения – скаполит-титаномагнетитовая, прожилково-магнетитовая, пироксен-скаполит-магнетитовая-полосчатая.

Руды Куржункульского месторождения – вкрапленные и прожилковые-эпидот-актинолит-магнетитовые в порфиритах. В то же время для Качарского месторождения характерны тонко и мелко-вкрапленные скаполит-магнетитовые.

Залегания разновидностей руд неоднородны даже в пределах одного месторождения – отдельные участки богатых по железу руд, во многих случаях чистые по сере, перемежаются

с более сернистыми или с более бедными и даже убогими рудами различного минерального состава [42].

В то же время и соотношение руд в подаваемом на обогащение сырье, также не является постоянным.

Оператор технологического цикла не в состоянии оперативно осмыслить такой объем информации и принять оптимальное решения (при этом на него обычно возложено управление не одной мельницей, а всем циклом обогащения).

Для перевода данного процесса на автоматический режим необходимо оценить достаточность получаемой с датчиков информации. Для этого необходим детальный анализ применяемой схемы.

По технологической инструкции АО «ССГПО» [38, с. 16] из бункеров технологических секций I-II очереди участка ММО конвейерами №37 и №38 с регулируемыми приводами и конвейером №39 промпродукт подается на измельчение в стержневые мельницы МСЦ_3200×4500 (секции 1-5) или МСЦ 3600×4500 (секции 6-9).

Расход промпродукта, поступающего на измельчение, измеряется автоматическими тензометрическими конвейерными весами типа ЛТМ-1М, 4561К, 4449К (или как на 12 секции весами ВЕР-10 фирмы Schenck). Регулирование нагрузки осуществляется с помощью вторичных приборов со щитов контроля с помощью задатчиков ДЗФМ (или как на 12 секции цифровой станцией Contronic S). Исполнительными механизмами являются конвейеры №37 и №38. Приводами конвейеров №37 и №38 являются ДПТ серии П101 или ПБ86. Мнемосхема процесса измельчения в стержневых мельницах приведена на рисунке 1.7.

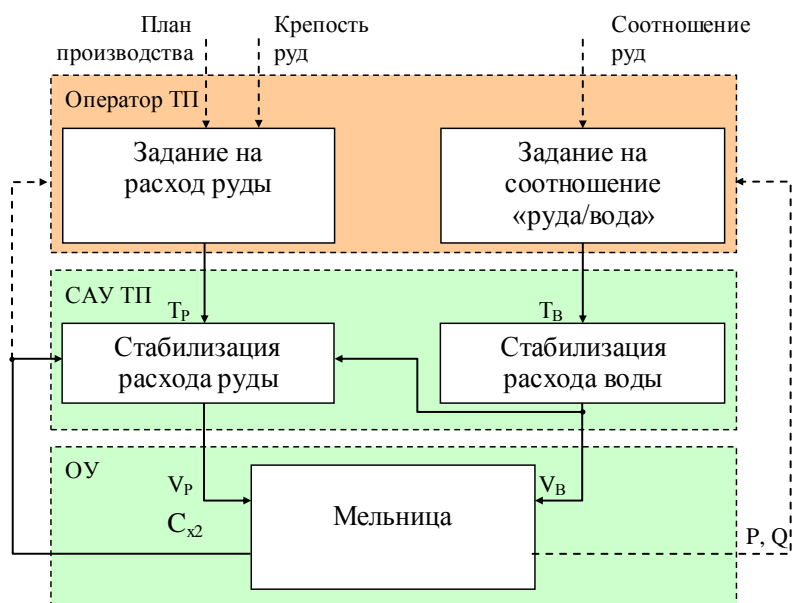
В качестве датчиков расхода воды используются индукционные расходомеры фирмы «Endress & Hauser», «Promag 30» или «Promag 30R». Исполнительным механизмом для данного контура является задвижка на трубопроводе воды в мельницу. На задвижке использован линейный привод RS10.

Как уже говорилось выше, раскрытие минерала зависит от соотношения «жидкое-твердое» в мельнице. Это соотношение не является константой, оно зависит от свойств руды

Для горных пород из-за сложности их состава, неоднородности структуры и плотности, наличия дефектов и других факторов автоматическое измерение параметров руд, характеризующих их физико-механические свойства, затруднено или невозможно. Но с учетом внедрения комплексных систем автоматического управления технологическим процессом (например, таких как «Автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления» – «АСОДУ» [54]), становится возможен учет объема поступающих руд в приемные бункера комплекса обогащения. Поэтому, при учете транспортных задержек и перемешивания возможен косвенный учет соотношения руд в продукте, подаваемом на

измельчение.

Как следствие, становится возможным создание системы автоматического задания оптимального соотношения «руда/вода» для процесса измельчения. Такие системы позволят оптимизировать данный процесс, что повлечет за собой: улучшение качества продукта измельчения, уменьшение времени технологического цикла, снижение энергозатрат на измельчение и, как следствие, снижение себестоимости.



- где: T_P – задание на расход руды;
 T_B – задание на соотношение «руда/вода»;
 V_P, V_B – объем руды, воды;
 C_{x2} – гранулометрический состав слива мельницы;
 P, Q – энергопотребление, производительность мельницы.

Рисунок 2.4 – Схема управления первой стадией измельчения на фабрике ММС АО «ССГПО»

Так же следует отметить наличие на фабрике двух типовых схем: схемы автоматической системы регулирования (АСР) процесса магнитной сепараций и схемы автоматического управления работой вакуум-фильтров.

На рисунке 2.5. представлена АСР магнитной сепарации, которая состоит из контуров стабилизации расхода воды в зумпф и стабилизации уровня пульпы за счет добавочной воды и воды на взмучивание.

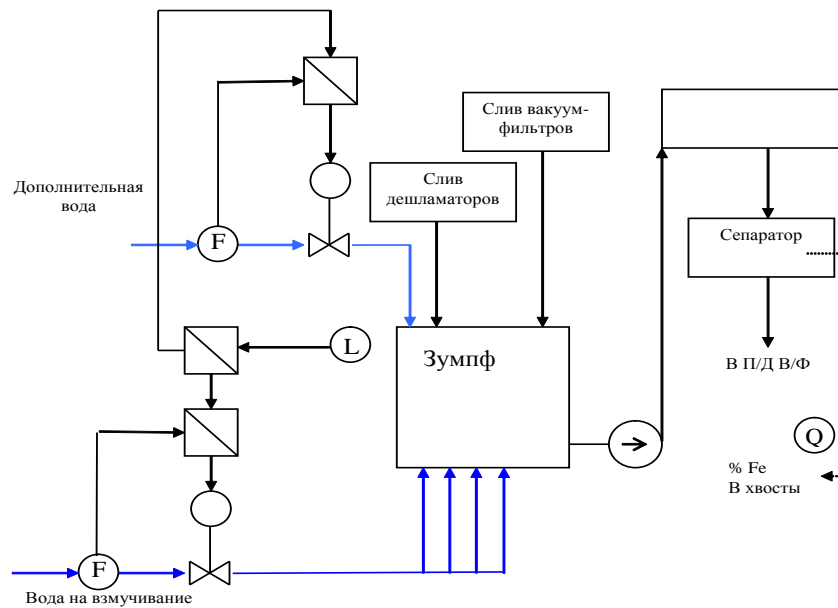


Рисунок 2.5 – АСР магнитной сепарации

На рисунке 2.6 представлены АСР влажности кека на выходе вакуум-фильтра и АСР вакуума в ресивере набора кека.

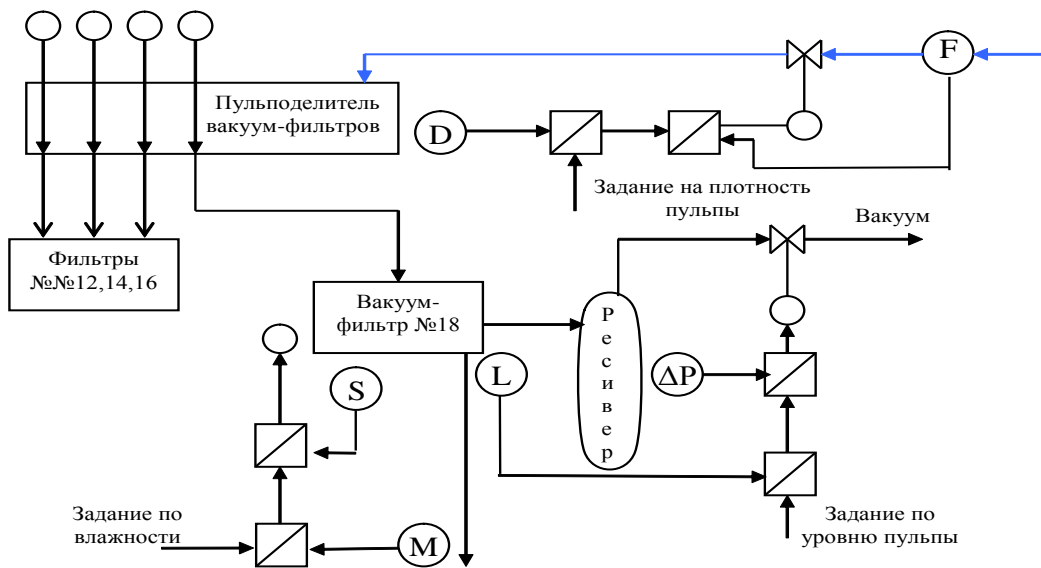


Рисунок 2.6 – АСР влажности кека на выходе вакуум-фильтра и АСР вакуума в ресивере набора кека

АСР влажности кека на выходе вакуум-фильтра на данном этапе реализована, но не используется из-за большой погрешности датчиков влажности кека. Задание на плотность пульпы питания вакуум-фильтров задает оператор.

2.4 Выводы по разделу

Автоматизация технологических процессов ФРПО представлена успешно функционирующими системами управления нижнего уровня – САУ ТП. На втором уровне системы автоматизации представлены в большей степени автоматизированными системами управления, хотя широко применяются до сих пор и системы ручного управления. Системы верхнего уровня представлены в основном системами оперативно-диспетчерского управления и не выполняют функции оптимизации процессов.

При этом давно доказано, что человек не может оперативно обрабатывать большой объем информации, связанный с взаимовлияющими параметрами технологических циклов. Как правило, в таких ситуациях применяют либо специальные системы поддержки принятия решения оператором, либо вообще исключают оператора из системы принятия таких решений и используют системы экстремального управления. В тех ситуациях, где принятое решение не влечет за собой последствий для человеческих жизней, в системах автоматики наибольшее распространение получило второе направление как требующее меньших капитальных затрат на создание и внедрение, а так же обладающее большим быстродействием.

В условиях постоянного повышения стоимости ресурсов и использования для обогащения все более и более бедных руд применимость систем управления технологическими циклами операторами становится недопустимым анахронизмом, тем более при тотальной компьютеризации всех технологических процессов и борьбе за снижение себестоимости продукции.

Исходя из вышеперечисленного можно сделать вывод о наличии дополнительных возможностей повышения эффективности ТП ЖОК за счет применения систем управления первого и второго уровня – систем экстремального управления.

Вместе с тем, развитие систем искусственного интеллекта – искусственных нейронных сетей – дает основание предположить, что такие системы могут быть разработаны и эффективны именно на искусственных нейронных сетях. Поскольку они не требуют детального изучения взаимосвязей входных и выходных параметров, а строятся по схеме «черный ящик». В качестве исследуемого процесса предпочтительно использование процесса измельчения в стержневых мельницах, как наиболее энергоемкого.

3 Разработка математических моделей технологических процессов обогащения железной руды

3.1 Общие положения по моделированию объектов управления

При решении задач управления следует учитывать сложность конкретной производственной ситуации. Это наилучшим образом обеспечивается экспериментированием в реальных условиях. Однако горно-обогатительный комбинат – система, не допускающая экспериментов, так как некорректно или неправильно поставленные задания даже на отдельном участке технологического цикла могут повлечь за собой нарушение всего цикла производства и, как следствие, серьезные экономические потери. Поэтому при решении таких задач целесообразно производить экспериментирование не на реальном объекте, а на его моделях.

С учетом возможных экономических потерь, для дальнейшей работы необходимо построение модели, на которой возможно исследование поведения реального объекта при принятии тех или иных методов решения задач управления.

Модель – это система, находящаяся в объективном соответствии с исследуемым объектом, отражающая наиболее существенные его свойства и дающая в процессе изучения информацию о самом объекте [2].

Для построения модели, в первую очередь, необходимо детально изучить технологический процесс: выделить все элементы, входящие в данную систему, их взаимосвязи, а так же значимые параметры для моделирования.

Поэтому на первом этапе разработки математических моделей произведен детальный анализ рассматриваемых технологических процессов с позиции параметров, значимых в процессе моделирования.

Как уже говорилось в результатах предыдущего этапа, целью моделирования является получение системы с определенной степенью точности соответствующей реальному исследуемому объекту. Для оценки оптимальности работы объекта управления необходимы не только его качественные, но и количественные характеристики. Для количественной оценки объекта возможно применение математических и сетевых моделей.

Математическая модель – модель объекта, процесса или явления, представляющая собой математические закономерности, с помощью которых описаны основные характеристики моделируемого объекта, процесса или явления. Методы математического моделирования, сводят исследование явлений внешнего мира к математическим задачам. Они занимают ведущее место среди других методов исследования, особенно в связи с

появлением ЭВМ. В зависимости от назначения модели укрупнено делятся на оптимизационные и информационные. В оптимизационных моделях отражается цель функционирования объекта, на их основе непосредственно вырабатываются решения.

Информационные модели предназначены для получения информации, используемой, в том числе, и в оптимизационных моделях. К информационным относятся модели имитации технологических процессов, корреляционные и прогнозные модели и модели месторождений.

Сетевая модель – это логическая модель в виде произвольного графа.

Математическую модель сложной системы можно представить как функциональный оператор Φ , преобразующий пространство вектора входных X , внутрисистемных параметров процесса Z и управляющих переменных U в выходные параметры Y .

Различают два метода математического моделирования: аналитическое и имитационное.

При аналитическом моделировании модель системы или ее элементов имеет вид функциональных зависимостей между входными, выходными и параметрами состояния системы. Это могут быть математические или логические функции, а модели могут иметь вид алгебраических, дифференциальных, интегро-дифференциальных уравнений или логических условий.

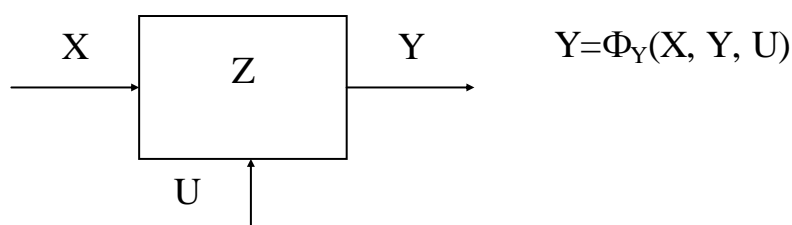


Рисунок 3.1 – Представление математической модели сложной системы

Исследования поведения системы или ее элементов по аналитическим моделям состоит в решении аналитически, либо численными методами соответствующих уравнений и интерпретации полученных результатов.

Для аналитического моделирования характерно то, что процессы функционирования элементов системы записываются в виде функциональных соотношений (алгебраических, интегро-дифференциальных, конечно-разностных и т.п.) или логических условий.

Аналитическая модель может быть исследована следующим методами:

- аналитическими, когда стремятся получить в общем виде зависимости для

искомых характеристик;

- численными, когда стремятся получить числовые результаты при конкретных начальных данных;
- качественными, когда, имея решения в явном виде, можно найти некоторые свойства решения (оценить устойчивость решения).

Однако аналитическое моделирование дает хорошие результаты в случае достаточно простых систем. В случае сложных систем требуется либо существенное упрощение первоначальной модели, чтобы изучить хотя бы общие свойства системы. Это позволяет получить ориентировочные результаты, а для определения более точных оценок использовать другие методы, например, имитационное моделирование.

При имитационном моделировании процесс функционирования исследуемого объекта воспроизводится на ЭВМ в отсутствие аналитических зависимостей между входными, выходными параметрами и параметрами состояния системы. По результатам имитационного моделирования на ЭВМ можно прогнозировать поведение исследуемой системы.

При имитационном моделировании процесс функционирования системы воспроизводится по времени, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики системы.

Имитационные модели позволяют достаточно просто учитывать такие факторы, как наличие дискретных и непрерывных элементов, нелинейные характеристики системы, многочисленные случайные воздействия и другие.

В настоящее время имитационное моделирование – наиболее эффективный метод исследования больших систем, включая задачи оценки: вариантов структуры системы, влияние изменения различных параметров системы.

Поэтому на втором этапе моделирования необходимо выделить значимые параметры и формализовать их в виде математической модели, которые в дальнейшем будут использованы для построения программной реализации данной.

3.2 Разработка математических моделей процесса дробления

Дробление – головной технологический процесс передела руды, техническое состояние оборудования которого определяет производительность всей фабрики. На долю отделения дробления приходится до 17% от общего объема информации, используемой для управления всей обогатительной фабрикой.

Циклы дробления и измельчения, являются самыми энергоемкими и дорогостоящими в горно-обогатительной промышленности, кроме того, затраты на дробление и измельчение составляют 45-55 % капитальных и до 60 % эксплуатационных затрат ряда предприятий, например, обогатительных фабрик. К основным направлениям, позволяющим снизить эти затраты, относят интенсификацию процессов дробления и измельчения материалов путем оптимизации режимов работы оборудования, совершенствование схем дробильно-измельчительных переделов, а также разработку и внедрение в производство нового высокоэффективного оборудования.

Оптимальные режимы работы дробильного оборудования предполагают работу дробилки с производительностью, равной её пропускной способностью, и при максимальном использовании мощности привода дробилки. Обеспечить такие режимы работы дробилок можно только при автоматическом управлении процессом дробления, основными задачами которого являются:

- автоматический контроль состояния оборудования передела: наличия металлических предметов на линии конвейера перед дробилкой и их удаление; температуры подшипников технологических агрегатов; подпрессовки дробилки; уровней руды в бункере; параметров централизованной жидкой маслосмазки; наличия материала на линии конвейера;

- автоматический контроль технологических параметров процесса дробления: производительности по исходной руде; уровня загрузки пасти дробилки рудой; мощности потребляемая на дроблении; гранулометрического состава дробленного продукта; ширины щели;

- автоматическое управление стабилизации мощности, потребляемой на дробление; стабилизацию уровня материала в пасти дробилки; приводом дробилок и питателей; централизованным пуском оборудования дробительного передела; системы смазки.

На ДОФ АО «ССГПО» в настоящий момент реализованы САР управления процессами дробления, представленные в таблице 3.1.

Руда поступает на приемный пункт по третьему и седьмому железнодорожным путям. Составы с сырьем разгружаются в приемные отверстия двух дробилок типа ККД 1500/180. Технические характеристики дробилки типа ККД 1500/180 приведены в таблице 3.2. При помощи панели управления, связанной с разгрузочными магнитами, и радиосвязи с машинистами, оператор управляет разгрузкой думпкаров и получает нужную информацию о весе состава, откуда он прибыл, номер электровоза.

Таблица 3.1 – САР процесса дробления

Название САР	Оборудование
Стабилизация мощности, потребляемой электроприводом дробилки	Ваттметровый преобразователь СВПА 2 преобразователя частоты Midimaster Vector Регулятор РС29 Электродвигатель питателя 4А250М 6УЗ Промышленная рабочая станция AWS-842 (ADVANTECH)
Стабилизация производительности дробилки по исходной руде	Ваттметровый преобразователь СВПА 2 преобразователя частоты Midimaster Vector Конвейерные весы ВЕР-10 Электродвигатель питателя 4А250М 6УЗ Промышленная рабочая станция AWS - 842 (ADVANTECH)
Стабилизация уровня руды в пасти дробилки	ЭХО – импульсивная измерительная система VEGASON 71 – 1 ... 75 – 1 устройство контроля скорости DDZ001 промышленная рабочая станция AWS - 842 (ADVANTECH)

Руда, попадая в дробилки типа ККД 1500/180, проходит первую стадию дробления, через распределительное устройство подается на два пластинчатых питателя типа 2С 1800×15000. Далее руда подается на дробилки второй стадии дробления, где устанавливаются 4 дробилки Н8800 (таблица 3.3). Разгрузочная щель 90±110 мм. Крупность куска руды первой стадии дробления 350±400 мм. Крупность дробленого продукта второй стадии не более 220 мм. Технические характеристики пластинчатого питателя типа 2С 1800×15000 приведены в таблице 3.4. Под каждым питателем расположен подборочный ленточный конвейер типа УКЛСТ-800 либо конвейер типа УКЛСТ-2000. Отличие конвейера УКЛСТ-800 от конвейера УКЛСТ-2000 лишь в ширине ленты (800 мм) и производительности (1100 т/ч), технические характеристики приведены в таблице 3.5. Руда с ленточного конвейера и подборочного питателя поступает на вторую стадию дробления в дробилки типа КРД 700/100. Технические характеристики дробилки типа КРД 700/100 приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические характеристики дробилок ДОФ АО «ССГПО»

Характеристика	Дробилка			
	ККД-1500/180	КРД-700/100	КСД-2200	КМДТ-2200
Производительность, м ³ /ч	1150	400	340	150
Ширина разгрузочного отверстия, мм	200	90-100	17-19	8-9
Мощность электродвигателя, кВт	400	250	250	250
Число качаний дробящего конуса	80	135	242	242
Максимальный кусок питания, мм	1200	350-400	220	40
Собственный вес дробилки, т	405	145	98	98

Таблица 3.3 – Технические характеристики дробилки «Hydrocone» Н-8800

Наименование параметра	Значение
Тип дробилки	«Hydrocone» Н-8800
Производительность, т/час	250-300
Ширина разгрузочной щели, мм	8-9
Мощность главного привода, кВт	315
Частота вращения	1500
Напряжение, В	6000

Таблица 3.4 – Технические характеристики пластинчатого питателя типа 2С 1800×15000

Характеристика	Параметр
Ширина ленты, мм	1800
Расстояние между осями, мм	15000
Передаточное число	520,5
Производительность, м ³ /ч	400
Крупность материала, мм	от 400 до 500
Максимальная масса куска материала, кг	500
Скорость цепи питателя, м/сек	0,12-0,24
Электродвигатель	АД с КЗ ротором, 3-х фазный
Мощность, кВт	60, 50, 40
Число оборотов, об/мин	1500, 1100, 750

Таблица 3.5 – Технические характеристики ленточного конвейера типа УКЛСТ-2000

Характеристика	Параметр
Ширина ленты, мм	2000
Длина по горизонтали, м	216
Длина по трассе, м	222,8
Производительность, т/ч	4500
Угол наклона,	16°49′
Скорость движения ленты, м/с	2,09
Насыпная плотность материала, т/м ³	2,2
Кусковатость материала, мм	250
Влажность материала, %	3
Электродвигатель	АД с КЗ ротором, 3-х фазный
Мощность, кВт	400
Напряжение, В	6000
Номинальный ток, А	47
Число оборотов, об/мин	1500

Основным объектом процесса дробления железной руды будет являться конусная дробилка (рисунок 3.2).

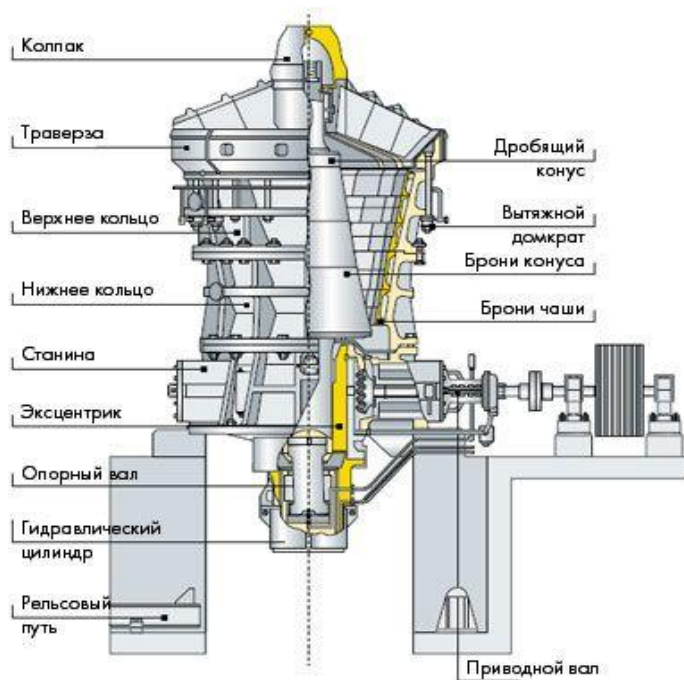


Рисунок 3.2 – Конусная дробилка (ККД 1500/180)

Мнемосхема процесса дробления приведена на рисунке 3.3.

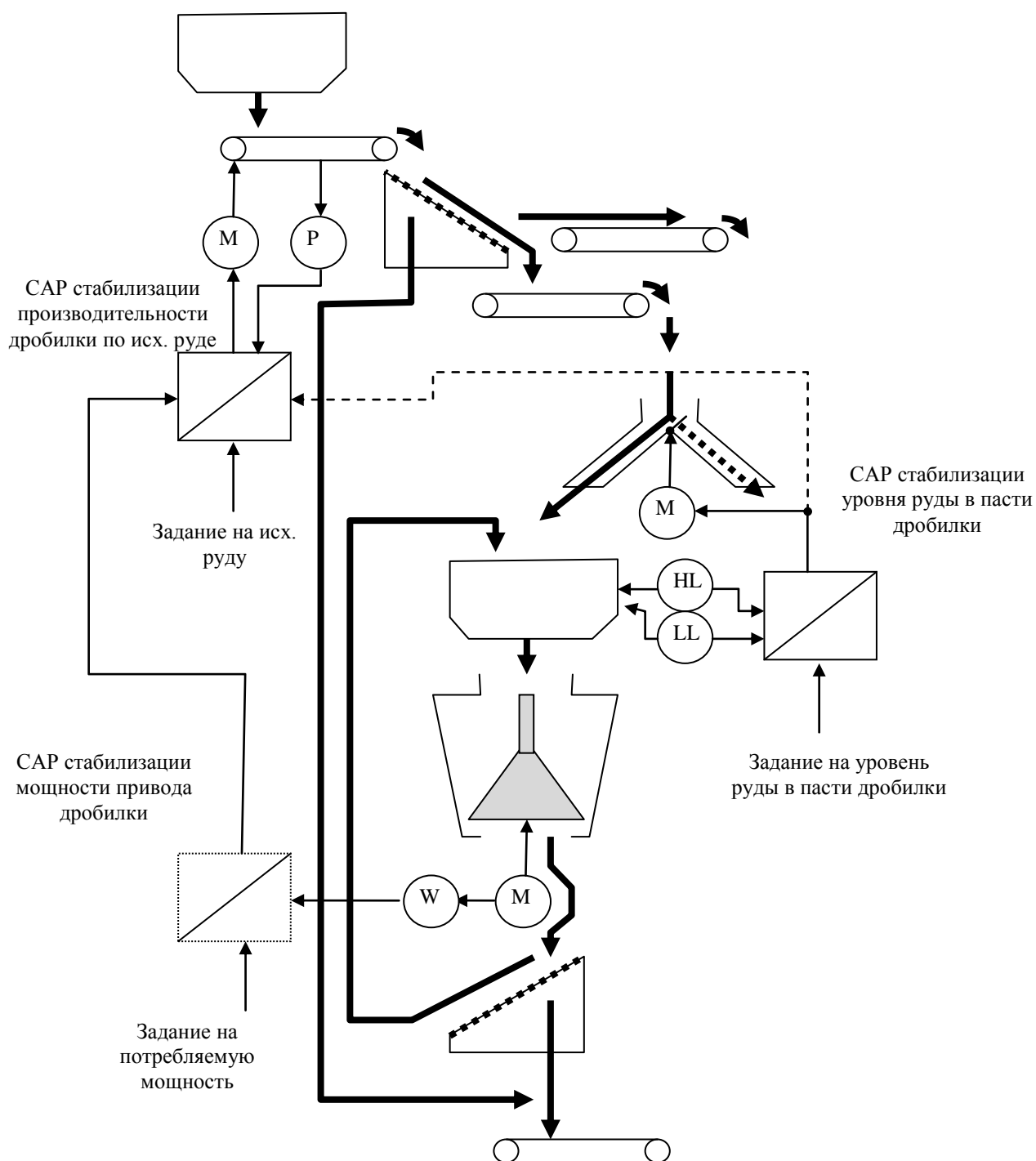


Рисунок 3.3 – Мнемосхема процесса дробления

Как управляемый объект процесс дробления характеризуется следующими параметрами (рисунок 3.4):



Рисунок 3.4 – Дробилка как объект управления

Управляющие воздействия дробилки это:

- производительность по исходной руде q ;
- перемещение дробящих элементов i ;
- частота вращения привода дробилки n .

Управляемые воздействия:

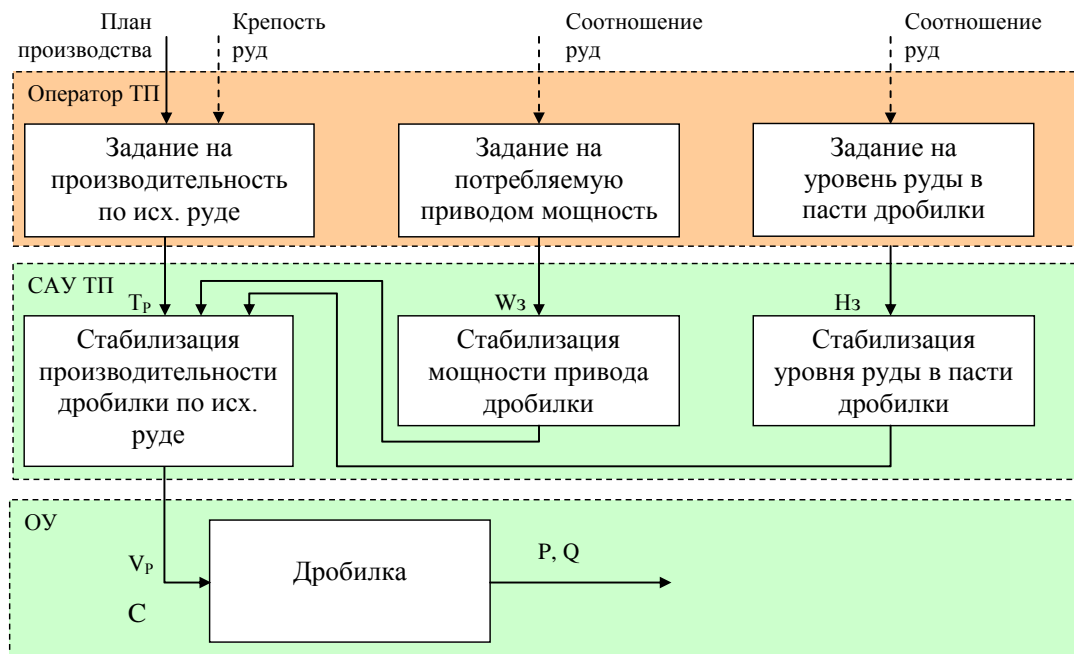
- крупность дробленого продукта $d_{др}$;
- мощность привода P ;
- уровень материала в пасти дробилки H ;
- количество дробимой руды $q_{др}$.

Возмущающие воздействия:

- крупность материала d ;
- прочность материала σ ;
- влажность материала w .

Производительность и энергопотребление дробилки находятся в зависимости от физико-механических свойств исходной руды. Получение информации о физико-механических свойствах исходной руды в настоящее время методами автоматического измерения труднореализуемо в рамках технологического процесса. Однако возможно получение косвенной информации по физико-механическим свойствам руды, исходя из того, что операторам технологического цикла известны объемы и соотношение руд питающих фабрику месторождений. Как следствие, становится возможным создание систем автоматического задания оптимальной производительности дробилки для текущих условий работы. Такие системы позволят оптимизировать данный процесс, что повлечет за собой: снижение энергозатрат на дробление и, как следствие, снижение себестоимости.

Для построения статических характеристик объекта управления использованы лабораторные данные, полученные на участке ДОФ. Характеристики построены в блоке `map` программы VisSim.



где: T_p – задание на производительность дробилки по исходной руде;
 V_p – объем руды;
 C – физико-механические свойства руды в питании дробилки;
 P, Q – энергопотребление, производительность дробилки.

Рисунок 3.5 – Схема управления дробилкой ДОФ АО «ССГПО»

На рисунке 3.6 представлены статические характеристики дробилки по управлению.

Аналогично построены статические характеристики объекта по возмущению (рисунок 3.7).

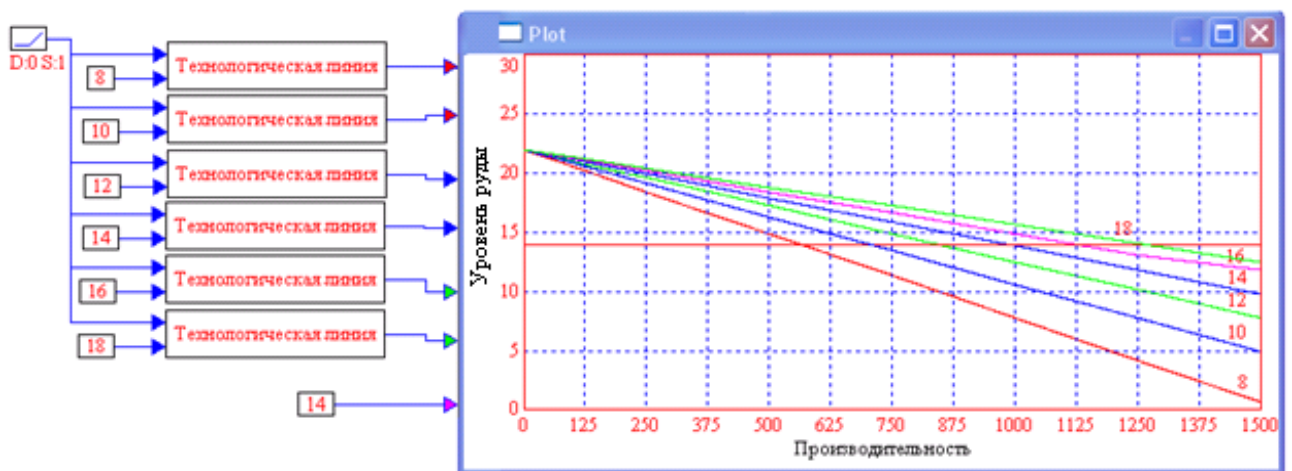


Рисунок 3.6 – Статические характеристики объекта по управлению

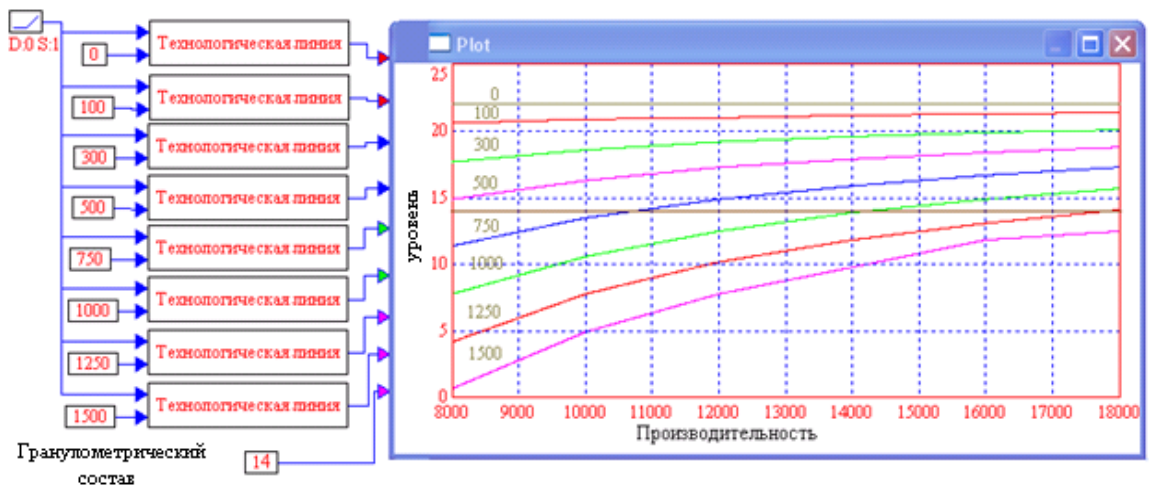


Рисунок 3.7 – Статические характеристики объекта по возмущению

По статической модели объекта управления осуществлено построение линейной динамической модели САР уровня руды в пасти дробилки.

Полученная линейная динамическая модель САР уровня руды в пасти дробилки приведена на рисунок 3.8).

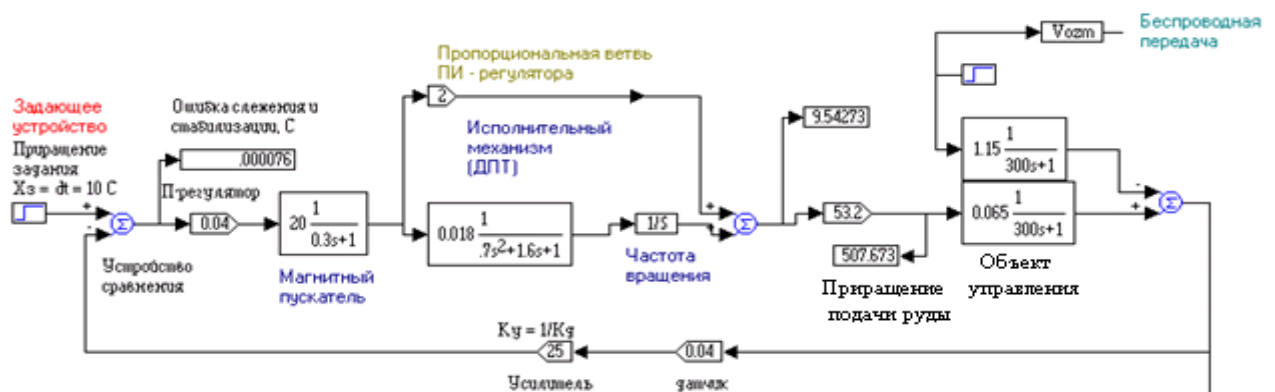


Рисунок 3.8 – Линейная динамическая модель САР уровня руды в пасти дробилки

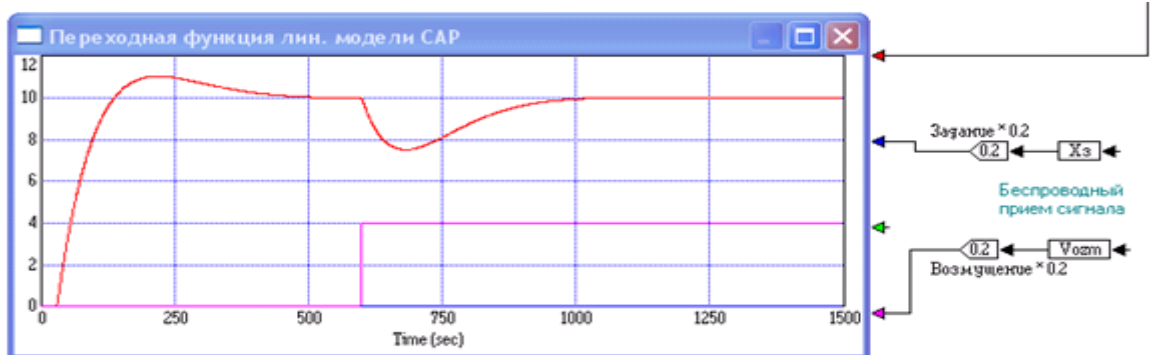


Рисунок 3.9 – Переходные процессы

В связи с тем, что время переходного процесса САР значительно меньше времени

значимого изменения физико-механических свойств исходной руды, то данные САУ можно рассматривать как пропорциональные звенья в системе управления.

Таким образом, в рамках данной работы оператор технологического цикла может быть задан вектором входных параметров для модели системы:

- T_P – задание на расход руды;
- T_B – задание на соотношение «руда/вода».

Так как САУ стабилизации производительности дробилки по исходной руде возможно представить усилительным звеном, то математическая функция будет иметь вид

$$V_P = K_P \cdot T_P, \quad (3.1)$$

где K_P – передаточный коэффициент. В данной модели K_P примет значение равное «1».

Аналогично САУ стабилизации мощности привода дробилки можно представить функцией вида

$$T_P = K \cdot W_D, \quad (3.2)$$

где K – передаточный коэффициент. В данной модели K примет значение равное «1».

САУ стабилизации уровня руды в пасти дробилки можно представить функцией вида

$$T_P = K \cdot H, \quad (3.3)$$

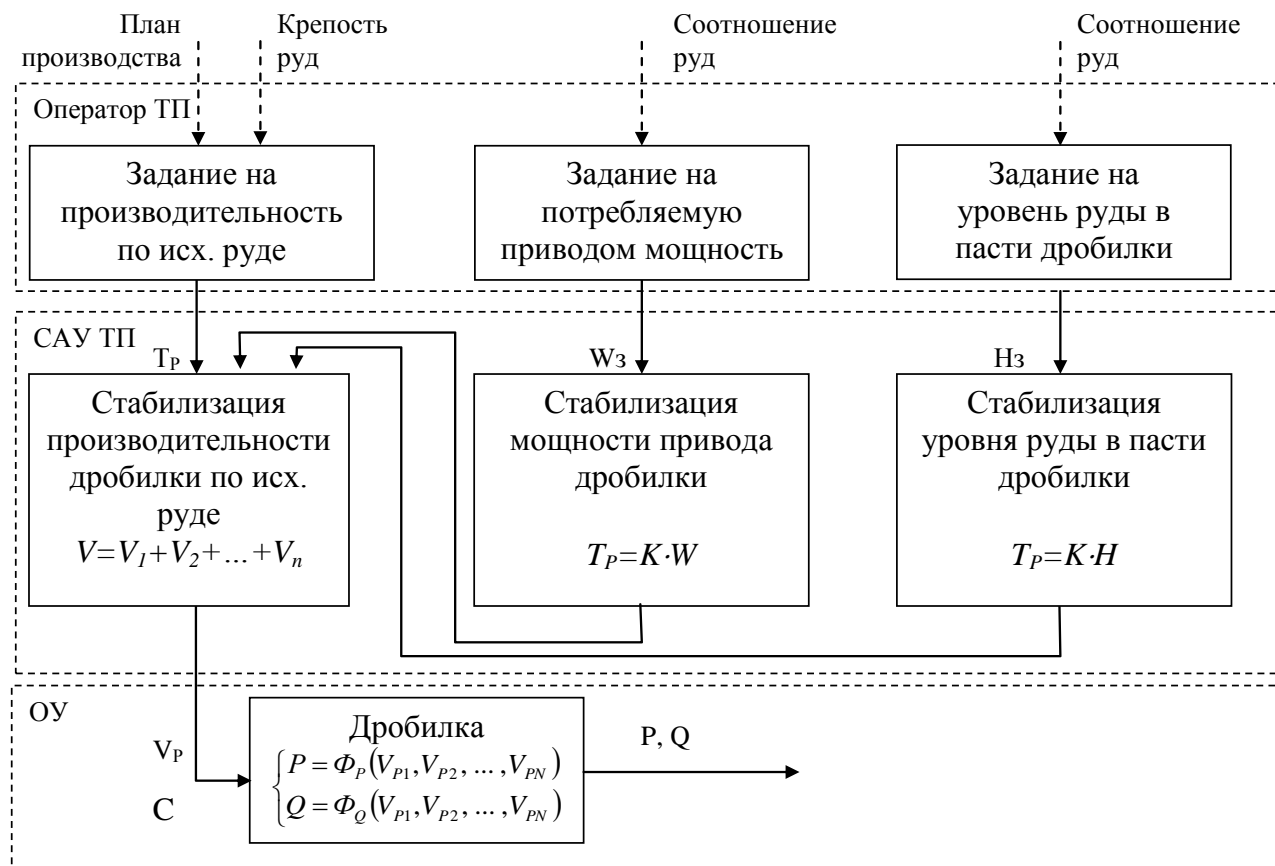
где K – передаточный коэффициент. В данной модели K можно принять равное «1».

Наиболее сложным, с точки зрения моделирования, будет дробилка. Описание функционирования дробилки для данной модели может быть представлено системой из двух уравнений:

$$\begin{cases} P = \Phi_P(V_{P1}, V_{P2}, \dots, V_{PN}) \\ Q = \Phi_Q(V_{P1}, V_{P2}, \dots, V_{PN}) \end{cases} \quad (3.4)$$

Функции Φ_P и Φ_Q являются многопараметриальными и носят нелинейный характер.

Получить математическую зависимость значения функций от значения аргументов можно путем аппроксимации.



- где: T_p – задание на производительность дробилки по исходной руде;
 V_p – объем руды;
 C – физико-механические свойства руды в питании дробилки;
 P, Q – энергопотребление, производительность дробилки.

Рисунок 3.10 – Укрупненная математическая модель «САУ – оператор» для процесса дробления

В рамках данной работы аппроксимация зависимостей P и Q может быть осуществлена различными методами. С учетом того, что целью моделирования является изучение возможности применения экстремальных адаптивных САУ, работающих в условиях нестабильности входных параметров, а не выявление и изучение зависимостей процесса дробления, то высокая точность аппроксимации не требуется (можно даже сказать, что вид математической зависимости объекта управления – не влияет на достижение

поставленной задачи). Поэтому аппроксимация зависимостей Φ_P и Φ_Q осуществлена для фиксированных значений входных параметров (на равномерной сетке) по данным протоколов работы оборудования АО «ССГПО» методом N-мерной табличной интерполяции.

В зависимости от задачи при N-мерной табличной интерполяции метод интерполяции может быть задан ступенчатым, линейным или кубическим.

Результатом построения математической модели будет являться схема, представленная на рисунке 3.10.

Полученная математическая модель может быть использована при программной реализации имитационной модели процесса дробления в конусной дробилке с управлением данного процесса оператором технологического цикла.

3.3 Разработка математических моделей процесса магнитной сепарации

Мокрая магнитная сепарация представлена системами управления, представленными в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – САР процесса мокрой магнитной сепарации АО «ССГПО»

Название САР	Оборудование
1	2
Поддержание требуемых параметров процесса обогащения и требуемых объемов производства	Станции Contronic-S и Contronic-R
Стабилизация расхода руды в стержневую мельницу за счет регулирования скорости конвейера	Конвейерные весы BER-10, Станция Contronic-R
Поддержание соотношения руда/вода путем регулирования расхода воды в стержневую мельницу	Расходомер PROMAG-30, Станция Contronic-R
Стабилизация расхода добавочной воды в зумпфы	Расходомер PROMAG-30, Станция Contronic-R
Стабилизация расхода воды в пульподелитель	Расходомер PROMAG-30, Станция Contronic-R

Продолжение таблицы 3.6

1	2
Стабилизация уровня пульпы за счет добавочной воды и воды на взмучивание	Расходомер PROMAG-30, Ультразвуковой измеритель уровня FDD80 (Ультразвуковой датчик Prosonic FDU 80 и измерительный преобразователь Prosonic FDU 860), Станция Contronic-R
Стабилизация расхода воды в П/Д вакуум-фильтров	Расходомер PROMAG-30, Станция Contronic-R
Стабилизация вакуума в ресивере набора кека вакуум-фильтра	Станция Contronic-R
Стабилизация плотности песков дешламаторов	Станция Contronic-R
Стабилизация скорости дисков вакуум-фильтров	Дискретный датчик скорости ПДФ-3, Устройства управления однофазные нереверсивные серии БУ3509, Станция Contronic-R
Стабилизация плотности пульпы в пульподелителе	Станция Contronic-R
Стабилизация плотности питания вакуум-фильтров.	Станция Contronic-R
Стабилизация уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра	Ультразвуковой измеритель уровня FDD80 (Ультразвуковой датчик Prosonic FDU 80 и измерительный преобразователь Prosonic FDU 860), Станция Contronic-R

Первичным в раскрытии руды для процесса магнитной сепарации является процесс измельчения.

Для выбора основных управляющих параметров процесса необходим анализ состояния используемых схем автоматизации и технологической инструкции в комплексе.

Обогащение руд черных металлов, как самостоятельная отрасль горно-металлургического производства, осуществляется методами механической обработки, не связанной с химическими превращениями минералов. Химический состав минералов при этом остается неизменным. Изменяется лишь количественное соотношение между

содержанием ценных минералов и пустой породы в исходном сырье и продуктах обогащения.

Механическое обогащение основано на использовании различия в физических свойствах минералов: плотности, крупности, формы, цвета и блеска, магнитной восприимчивости и других.

Перед обогащением руду приводят в такое состояние, при котором содержащиеся в ней минералы будут, как можно полнее освобождены от сростков друг с другом. Это достигается при дроблении и измельчении руды и сортировкой измельченного материала по крупности.

Для измельчения кусков материалов до крупности частиц менее 1-2 мм используют стержневые, шаровые мельницы или мельницы самоизмельчения [51, 52].

На фабриках обогащения руд черных металлов, как уже говорилось выше, наиболее распространены двухстадиальные (для легкоизмельчаемых руд) и трехстадиальные (для трудноизмельчаемых руд) циклы измельчения.

В первой стадии установлена стержневая мельница, работающая в открытом цикле, а во второй и третьей стадиях – шаровые мельницы, работающие в замкнутом цикле [38, с. 15].

В стержневых мельницах работа дробящей среды (стержней) происходит по прямой линии во многих точках. Крупные куски руды отделяют стержни друг от друга и заставляют их у загрузочного конца мельницы подниматься выше, чем концы стержней у разгрузочного конца. Поднимающаяся масса стержней образует промежутки клинообразной формы, через которые проходят, как через отверстия грохота, мелкие частицы руды. То есть в стержневой мельнице происходит и классификация руды по крупности, что позволяет получать более равномерный по крупности зернистый продукт. При измельчении кинетическая энергия падающих стержней должна быть достаточной для разрушения максимальных кусков исходной руды.

При постоянном коэффициенте заполнения мельницы с изменением размера стержней число соударений в мельнице увеличивается. Поэтому необходимо применять измельчающие тела минимально допустимых размеров. При заполнении мельницы стержнями одного размера измельчение протекает менее эффективно, чем при использовании стержней разных размеров. В процессе измельчения происходит истирание и разрушение стержней, поэтому в процессе работы мельницы через определенный интервал времени производят удаление стержней меньших определенного диаметра и дозагрузку новых стержней [53].

Большинство технических операций обогатительной технологии проводят в водной среде. Механическая смесь твердого материала с жидкостью называется пульпой. Основной

характеристикой пульпы является масса твердого материала.

Количество воды, подаваемое на мельницу, влияет на измельчение. При измельчении крупного материала (от 10 мм и более) достаточно 65-76% твердого материала в пульпе, для более мелкого материала – 50-70%.

Руды по крепости делятся на три типа:

- 1 – руды с повышенной крепостью;
- 2 – руды средней крепости;
- 3 – руды низкой крепости.

В зависимости от крепости руд изменяется процент твердого в сливе и производительность мельницы [38, 53].

Плотность пульпы, находящейся в мельнице, существенно влияет как на производительность по исходному сырью, так и по вновь образовавшемуся готовому продукту. Водный режим измельчения регулируется подачей воды в барабан мельницы. Установлено, что с увеличением подачи воды в мельницу ее производительность сначала быстро возрастает, а затем медленно падает, а производительность по питанию возрастает. В стержневых мельницах содержание твердого в пульпе до предела, при котором она остается подвижной, повышает производительность процесса. Это объясняется увеличением числа зерен, попадающих в зону ударных воздействий стержней.

При содержании твердого более 85% возможно слипание стержней и резкое снижение производительности. При избыточной подаче воды в мельницу налипание зерен руды на мелющие тела резко уменьшается, и интенсивность измельчения падает. Этим объясняется снижение производительности по готовому продукту при разжижении пульпы.

Рыхлые разновидности руд с большим содержанием глинистых примесей создают в мельнице вязкую пульпу, увлекающую недоизмельченную фракцию в слив мельницы. Эффективность измельчения этих руд повышается при более низкой плотности.

В связи с этим интерес представляет управление процесса по параметру соотношения «руда-вода» в питании мельницы.

Производительность мельницы будет также зависеть от ряда таких факторов, как:

- размер мельницы;
- конструкция;
- условия измельчения;
- характер руды.

Однако первые два фактора являются константами и не могут меняться в течение технологического цикла.

Условия измельчения зависят от большого числа влияющих параметров (влажности воздуха, вибрация, напряженности магнитных полей и многого другого), однако, их коэффициенты корреляции с энергозатратами процесса измельчения менее 0,3. Поэтому их влияние решено не учитывать.

Измельчение является одним из самых ресурсо- и энергоемких процессов в обогащении железорудного сырья. Задачи оптимального управления этим процессом: минимизация себестоимости получаемого продукта и максимизация производительности агрегатов. Они являются приоритетными при решении задач оптимального управления обогатительной фабрикой.

Основная задача процесса измельчения – обеспечение подготовки пульпы к обогащению (крупность, раскрытие минералов и т.д.). В то же время в цикле измельчения должно перерабатываться плановое количество руды.

В связи с этим при управлении процессом измельчения обеспечивают стабилизацию гранулометрического состава продукта измельчения при постоянной производительности по исходной руде, обеспечение максимального выхода готового класса, стабилизацию гранулометрического состава продукта измельчения при максимальной производительности цикла по исходной руде.

При управлении процессом измельчения для достижения этих целей компенсируют изменение физико-механических свойств руды, изменение количественных характеристик входных потоков руды и воды. Для достижения целей управления решают задачи стабилизации (оптимизации) входных потоков руды и воды, стабилизации условий измельчения, стабилизации гранулометрического состава выходного потока пульпы.

Для их решения было предложено множество принципов управления процессом измельчения, которые можно объединить в группы [4, 6, 58]:

- регулирование воздействием на подачу исходной руды в цикл измельчения;
- регулирование воздействием на подачу исходной воды в барабан мельницы;
- регулирование гранулометрического состава пульпы на выходе цикла;
- регулирование воздействием на подачу измельчающих тел в барабан мельницы.

К первой группе, которая объединяет принципы управления, использующие в качестве управляющего воздействия изменение производительности цикла по исходной руде, относятся следующие:

- стабилизация производительности цикла по исходной руде путем изменения подачи исходной руды;
- стабилизация уровня загрузки барабана мельницы путем изменения подачи

исходной руды;

- стабилизация суммарного сигнала производительности и уровня загрузки барабана мельницы рудой;
- стабилизация суммарного сигнала с воздействием на изменение подачи исходной руды.

Стабилизация производительности цикла по исходной руде путем изменения подачи исходной руды ($Q = \text{const}$ $n_0 = \text{var}$) широко применяется на отечественных и зарубежных обогатительных фабриках. Этот принцип оправдывает себя, когда гранулометрический состав и физико-механические свойства руды сравнительно постоянны. Но даже если свойства руды изменяются, этот принцип применим с корректировкой задания. Основное его преимущество – простота технической реализации.

Применение систем этой группы дает прирост производительности измельчающих агрегатов на 5% и выше при незначительных колебаниях физико-механического состава руды.

При стабилизации уровня загрузки барабана мельницы путем изменения подачи исходной руды позволяет отражать изменение физико-механических свойств руды.

Этот принцип управления наиболее известен и апробирован. Использование его при управлении дает увеличение производительности измельчительного агрегата до 10%.

Стабилизация суммарного сигнала производительности и уровня загрузки барабана мельницы рудой ($Q + A_m = \text{const}$) с воздействием на изменение подачи исходной руды. Преимущество этого принципа состоит в том, что косвенным образом учитывается изменение физико-механических свойств исходной руды по изменению уровня загрузки барабана мельницы и циркулирующей нагрузки.

Вторая группа объединяет принципы управления процессом измельчения, использующие в качестве управляющего воздействия изменение расхода воды в барабан мельницы.

Ко второй группе принципов относится два метода. Первый из них – стабилизация расхода воды в барабан мельницы ($W_m = \text{const}$) с воздействием на положение регулирующего клапана трубопровода, подающего воду в мельницу. Этот принцип применим при условии стабилизации расхода руды в барабан мельницы.

Второй – стабилизация соотношения твердого продукта и жидкого ($T:Ж = \text{const}$) путем изменения расхода воды в барабан мельницы ($W_m = \text{var}$). Применение этого принципа позволяет стабилизировать плотность пульпы в барабане мельницы, чем стабилизируются условия измельчения. Это позволяет избежать переизмельчения или недоизмельчения руды. Этот принцип управления имеет преимущественное распространение на отечественных и

российских обогатительных фабриках.

Третья группа принципов управления процессом измельчения основана на использовании прямой или косвенной информации о гранулометрическом составе пульпы на выходе цикла измельчения.

Регулирование подачи измельчающих тел реализовано только для шаровых мельниц. Для стержневых мельниц загрузка стержней производится через определенный интервал работы мельницы вручную с использованием стержнезагрузочных машин [37, 53]. Поэтому данный фактор может рассматриваться как возмущающий, его реализация в качестве управляющего фактора затруднительна.

Анализ представленных подходов нижнего уровня автоматизации процесса измельчения позволяет говорить, что цели этих систем, как правило, взаимоисключающие. Достижение одной цели приводит к ухудшению другого параметра. Это позволяет говорить о необходимости многомерной (многопараметрической) оптимизации процесса.

На рисунке 3.11 изображена схема автоматизации процесса измельчения в стержневой мельнице, используемая на фабрике ММС АО «ССГПО» [38]. Как видно из рисунка в данной схеме используются два контура:

- контур стабилизации производительности цикла по исходной руде путем изменения подачи исходной руды (изменение скорости движения питающих конвейеров);
- контур стабилизации соотношения твердого продукта и жидкого путем изменения расхода воды в барабан мельницы.

Но задания по производительности цикла по исходной руде и на соотношение «руда-вода» задает с пульта управления оператор в зависимости от физико-механических свойств руды.

Оператору технологического цикла для управления данным процессом поступает следующая информация:

- план производства;
- энергоемкость измельчения;
- гранулометрический состав слива мельниц;
- производительность мельницы;
- косвенно объемы руд, поступивших с различных месторождений.

Оператор технологического цикла на данном участке может задавать параметры:

- расход руды;
- соотношение «руда/вода».

Первый параметр характеризует, в первую очередь, производительность мельницы по

исходной руде. Обычно изменяется оператором при изменении либо плана производства, либо крепости руды.

Второй параметр характеризует соотношение «руда/вода» в мельнице, то есть, в определенных пределах, задает физико-механические свойства измельчаемого продукта. Исходным сырьем для обогатительного комплекса АО «ССГПО» являются магнетитовые руды Сарбайского, Качарского, Соколовского, Куржункульского карьеров и Соколовского подземного рудника. Физико-механические свойства руд этих месторождений значительно отличаются друг от друга.

В магнетитовых рудах Сарбайского, Соколовского, Качарского и Куржункульского месторождений основным рудным минералом является магнетит, в качестве примесей содержатся пирит, халькопирит пирротин, из нерудных – пироксен, скаполит, актинолит, гранат, эпидот [24, 38, 42].

Руды Сарбайского месторождения это – пироксен-скаполит-магнетитовая, пироксен-магнетитовая, пироксен-гранат-магнетитовая, прожилково-вкрапленная, эпидот-актинолит-магнетитовая. Руды Соколовского месторождения – скаполит-титаномагнетитовая, прожилково-магнетитовая, пироксен-скаполит-магнетитовая-полосчатая.

Руды Куржункульского месторождения – вкрапленные и прожилковые-эпидот-актинолит-магнетитовые в порфиритах. В то же время для Качарского месторождения характерны тонко и мелко вкрапленные скаполит-магнетитовые.

Залегания разновидностей руд неоднородны даже в пределах одного месторождения – отдельные участки богатых по железу руд, во многих случаях чистые по сере, перемежаются с более сернистыми или с более бедными и даже убогими рудами различного минерального состава [42].

В то же время и соотношение руд в подаваемом на обогащение сырье, также не является постоянным.

Оператор технологического цикла не в состоянии оперативно осмыслить такой объем информации и принять оптимальное решения (при этом на него обычно возложено управление не одной мельницей, а всем циклом обогащения).

Для перевода данного процесса на автоматический режим необходимо оценить достаточность получаемой с датчиков информации. Для этого необходим детальный анализ применяемой схемы.

По технологической инструкции АО «ССГПО» [38, с. 16] из бункеров технологических секций I-II очереди участка ММО конвейерами №37 и №38 с регулируемыми приводами и конвейером №39 промпродукт подается на измельчение в

стержневые мельницы МСЦ_3200×4500 (секции 1-5) или МСЦ 3600×4500 (секции 6-9).

Расход промпродукта, поступающего на измельчение, измеряется автоматическими тензометрическими конвейерными весами типа ЛТМ-1М, 4561К, 4449К (или как на 12 секции весами ВЕР-10 фирмы Schenck). Регулирование нагрузки осуществляется с помощью вторичных приборов со щитов контроля с помощью задатчиков ДЗФМ (или как на 12 секции цифровой станцией Contronic S). Исполнительными механизмами являются конвейеры №37 и №38. Приводами конвейеров №37 и №38 являются ДПТ серии П101 или ПБ86. Мнемосхема процесса измельчения в стержневых мельницах приведена на рисунке 3.11.

В качестве датчиков расхода воды используются индукционные расходомеры фирмы «Endress & Hauser», «Promag 30» или «Promag 30R». Исполнительным механизмом для данного контура является задвижка на трубопроводе воды в мельницу. На задвижке использован линейный привод RS10.

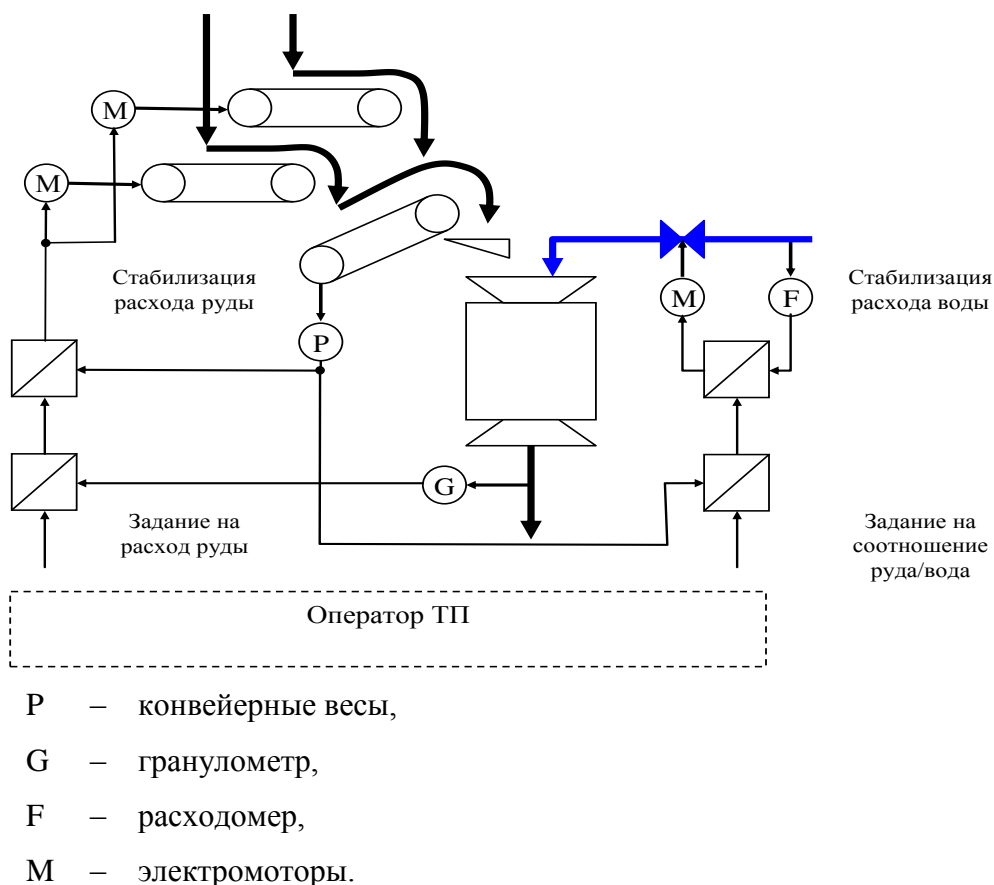
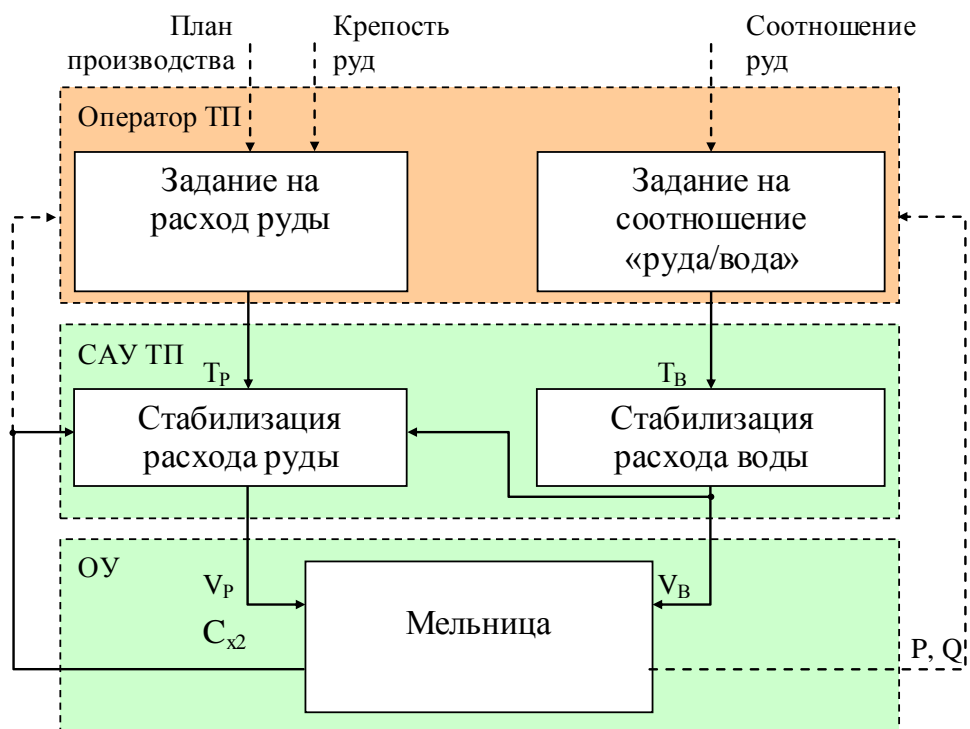


Рисунок 3.11 – Мнемосхема первой стадии измельчения на фабрике ММС АО «ССГПО»

Как уже говорилось выше, раскрытие минерала зависит от соотношения «жидкое-твердое» в мельнице. Это соотношение не является константой, оно зависит от свойств руды.

Для горных пород из-за сложности их состава, неоднородности структуры и плотности, наличия дефектов и других факторов автоматическое измерение параметров руд, характеризующих их физико-механические свойства, затруднено или невозможно. Но с учетом внедрения комплексных систем автоматического управления технологическим процессом (например, таких как «Автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления» – «АСОДУ» [54]), становится возможен учет объема поступающих руд в приемные бункера комплекса обогащения. Поэтому, при учете транспортных задержек и перемешивания возможен косвенный учет соотношения руд в продукте, подаваемом на измельчение.



- где: T_p – задание на расход руды;
 T_B – задание на соотношение «руда/вода»;
 V_p, V_B – объем руды, воды;
 C_{x2} – гранулометрический состав слива мельницы;
 P, Q – энергопотребление, производительность мельницы.

Рисунок 3.12 – Схема управления первой стадией измельчения на фабрике ММС АО «ССГПО»

Как следствие, становится возможным создание системы автоматического задания оптимального соотношения «руда/вода» для процесса измельчения. Такие системы позволят

оптимизировать данный процесс, что повлечет за собой: улучшение качества продукта измельчения, уменьшение времени технологического цикла, снижение энергозатрат на измельчение и, как следствие, снижение себестоимости.

При создании данной модели необходимо выделить значимые параметры и информационные потоки. Параметры, значениями которых можно пренебречь, оставляя модель на требуемом уровне точности, необходимо исключить из модели с целью минимизации затрат на ее создание и использование.

Для выбора свойств системы для моделирования применен метод декомпозиции системы «сверху-вниз».

Для моделирования системы необходимо описать:

- объект управления – мельницу;
- САУ ТП;
- оператора ТП,
- взаимосвязи этих объектов между собой и влияние окружающей среды.

Основным объектом в системе является стержневая мельница.

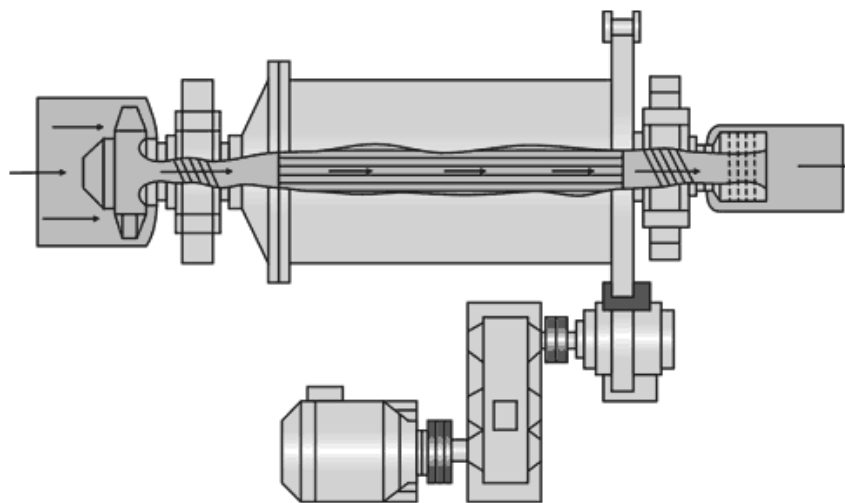


Рисунок 3.13 – Стержневая мельница с центральной разгрузкой

В стержневых мельницах работа дробящей среды (стержней) происходит по прямой линии во многих точках. Крупные куски руды отделяют стержни друг от друга и заставляют их у загрузочного конца мельницы подниматься выше, чем концы стержней у разгрузочного конца. Поднимающаяся масса стержней образует промежутки клинообразной формы, через которые проходят, как через отверстия грохота, мелкие частицы руды. То есть в стержневой мельнице происходит и классификация руды по крупности, что позволяет получать более равномерный по крупности зернистый продукт. При измельчении кинетическая энергия

падающих стержней должна быть достаточной для разрушения максимальных кусков исходной руды.

Как объект управления цикл измельчения в мельнице характеризуется входными и выходными параметрами (рисунок 3.14).



Рисунок 3.14 – Мельница – как объект управления

Обычно для задач автоматизации входными параметрами для мельницы являются:

- производительность цикла по исходной руде V_P ;
- расход воды в мельницу V_B ;
- гранулометрический состав C_{x1} ;
- физико-механические свойства руды q ;
- частота вращения барабана мельницы n ;
- количество мелющей среды f ;
- температура исходной руды T .

Выходные параметры:

- гранулометрический состав C_{x2} слива;
- плотность q_2 слива;
- производительность цикла по готовому классу Q ;
- мощность, потребляемая электроприводом мельницы P .

В качестве управляемых параметров в большинстве систем обычно используют:

- плотность и гранулометрический состав слива;
- мощность, потребляемую электроприводом мельницы;
- амплитуду или частоту шумового сигнала, производимого мелющими телами в

зоне падения.

Управляющими воздействиями могут служить:

- производительность цикла по исходной руде;
- расход воды в мельницу;
- частота вращения барабана мельницы.

Основными возмущающими воздействиями являются гранулометрический состав и физико-механические свойства исходной руды. Такие параметры как износ мелющих тел и футеровки барабана обычно характеризуются как помехи.

При управлении процессом измельчения для достижения этих целей необходимо компенсировать изменение физико-механических свойств руды, изменение количественных характеристик входных потоков руды и воды.

Как уже говорилось выше, для автоматизации цикла измельчения в стержневых мельниц МСЦ 3600×4500, используемых на ММС АО «ССГПО», применена схема стабилизации расхода руды. Для работы САР стабилизации расхода руды требуются входной параметр – объем (вес) руды, поступающей на измельчение – и выходной параметр – гранулометрический состав слива мельницы. САР стабилизации расхода воды по схеме автоматизации не использует параметры мельницы.

Частота вращения барабана мельницы n , является постоянной, поэтому влияние изменения ее значений можно исключить, и данный параметр не учитывать при построении модели.

Автоматическое измерение количества мелющей среды f в мельнице не производится. Косвенная оценка по последней дате загрузки стержней возможна. Однако, загрузка стержней производится достаточно часто (один раз в две недели), поэтому не отслеживается значительного влияния количества мелющей среды на процесс измельчения. В связи с этим данный параметр может быть опущен в данной модели без значимого снижения точности моделирования.

Колебания температуры исходной руды T_1 составляют в среднем $\pm 10..15$ градусов Цельсия и не оказывают значимых влияний на процесс измельчения. Параметр в данной модели может быть опущен без значимых изменений точности моделирования.

Естественно, что качество и эффективность процесса измельчения будут зависеть от физико-механических свойств поступающей руды и соотношения «руда/вода». Для схемы автоматизации, применяемой на АО «ССГПО», физико-механические свойства руды можно косвенно оценить по объемам (соотношениям) руд в питании с различных месторождений.

Самым значимым параметром процесса измельчения, оценивающим качество процесса, является производительность цикла по готовому классу.

Естественно, что цель любой автоматизации технологического процесса – снижение

затрат. Энергопотребление мельницы – значимый фактор в себестоимости готового концентрата, и, соответственно, по удельному энергопотреблению можно оценить эффективность работы системы автоматизации.

Таким образом, для решения поставленной задачи объект управления – стержневая мельница – может быть представлен входными параметрами q , V_p, V_B и выходными параметрами C_{x2} , Q , P . В рамках условия данной задачи всеми остальными параметрами можно пренебречь.

Так как изменение входных параметров системы происходит значительно медленнее переходных процессов в объекте управления, то для снижения сложности модели допустимо считать ОУ безинерционным звеном без запаздывания

Структурная схема САУ расходом руды в мельницу изображена на рисунке 3.15. В схеме объектом управления ОУ является 37 конвейер. Исполнительным механизмом ИМ – асинхронный двигатель, измерительным устройством ИУ – конвейерные весы, задающим устройством ЗУ – пульт управления частотного преобразователя. Сравняющее устройство СУ находится в регулирующем органе РО – ПИД-регуляторе, который совместно с преобразовательным устройством ПУ является элементом системы «Contronics», на схеме эти устройства обведены пунктирной линией.

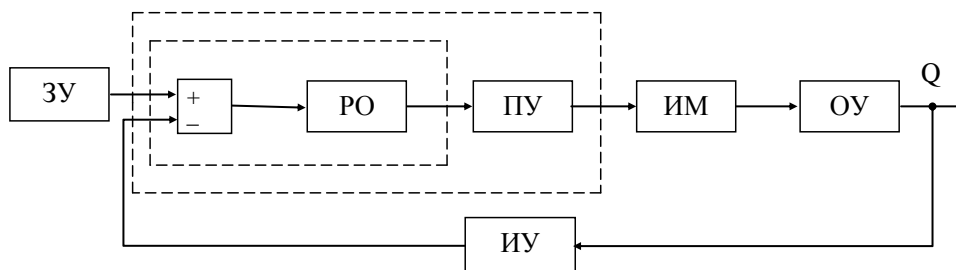


Рисунок 3.15 – Структурная схема САУ расходом руды в мельницу

Данная САУ работает следующим образом: оператор через задающее устройство выдает управляющий сигнал на вход системы, т.е. на вход сравнивающего устройства регулятора, на которые поступает сигнал связи от измерительного устройства. В сравнивающем устройстве осуществляется сравнение сигнала контролируемой величины (производительность) с сигналом эталонной величины, поступающим с задающего устройства. Полученный результата сравнения подается на регулирующий орган, который по соответствующему закону регулирования преобразует полученный сигнал в величину удобную для передачи. Этот сигнал поступает на преобразовательной устройстве, которое управляет соответствии с этим сигналом исполнительный механизм, а он в свою очередь

объектом управления. Таким образом, происходит стабилизация производительности стержневой мельницы по исходной руде.

График переходных процессов в системе питания мельницы рудой с САУ расходом руды представлен на рисунке 3.16. Исследованию подлежит кривая полного переходного процесса. По кривой переходного процесса можно сказать, что система носит аperiodический характер.

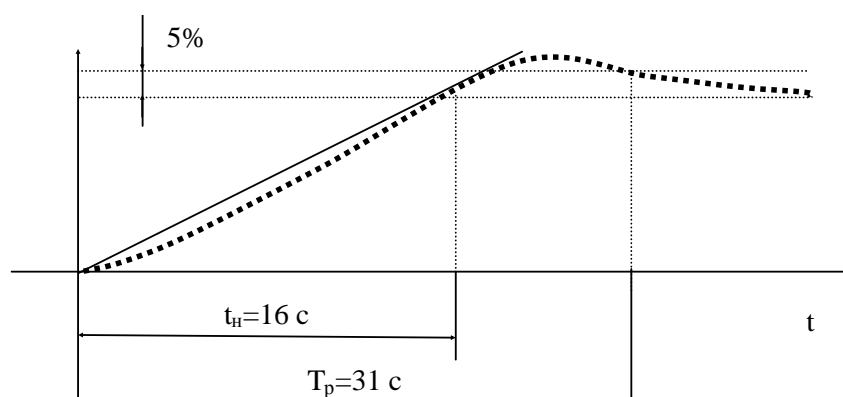


Рисунок 3.16 – График переходного процесса в системе питания мельницы рудой

Время нарастания переходного процесса – минимальное время, за которое переходная характеристика системы пересекает уровень установившегося значения. По графику переходного процесса определяется время нарастания $t_n=16$ с. Время регулирования t_p , характеризует продолжительность переходного процесса. По графику определяем $t_p=31$ с.

Так как изменение входных параметров системы происходит значительно медленнее переходных процессов в данной САУ, то для снижения сложности модели допустимо считать эту систему безинерционной. Тогда САУ расходом воды в стержневую мельницу (в данной модели) можно представить как усилительное звено.

Структурная схема системы автоматического управления расходом воды в стержневую мельницу представлена на рисунке 3.17.

Датчик расхода воды в первом приближении является усилительным звеном.

Пускатель бесконтактный реверсивный ПБР-3А также является усилительным звеном

Механизм исполнительный однооборотный может быть с достаточной степенью точности представлен аperiodическим звеном первого порядка.

Объект управления может быть представлен последовательным соединением аperiodического и запаздывающего звеньев. Параметры определяются из кривой разгона, представленном на рисунке 3.18.



- где Дв – датчик расхода воды;
 Р – регулятор;
 ПБР – пускатель бесконтактный реверсивный;
 МЭО – механизм исполнительный однооборотный;
 РО – регулирующий орган;
 ОУЗ – объект управления – задвижка.

Рисунок 3.17 – Структурная схема САУ расходом воды в мельницу

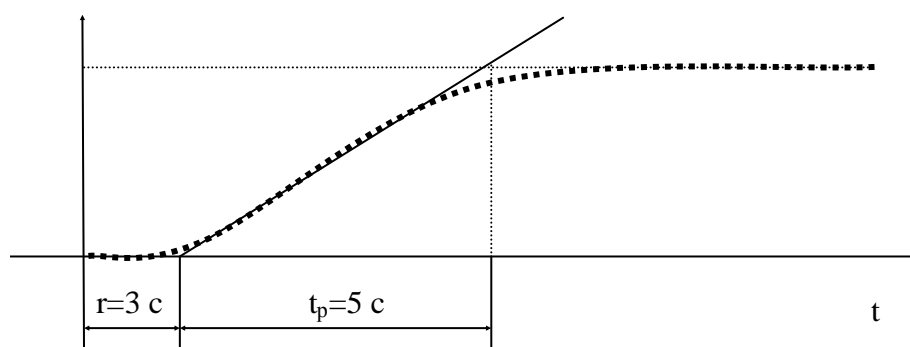


Рисунок 3.18 – Кривая разгона ОУЗ

В технологическом цикле используются регуляторы, настроенные на ПИ-закон регулирования.

С учетом вышесказанных упрощений функций элементов системы, САУ расходом воды в стержневую мельницу может быть представлена, как апериодическое звено третьего порядка. Инерционность данной системы будет порядка 10 секунд.

Так как изменение входных параметров системы происходит значительно медленнее переходных процессов в данной САУ, то для снижения сложности модели допустимо считать эту систему безинерционной. Тогда САУ расходом воды в стержневую мельницу (в рамках данной модели) можно представить как усилительное звено.

Как итог для обеих САУ можно заключить, что для моделирования их влияния на объект управления необходимо знать значения параметров, задаваемых оператором и САУ T_P, T_B , а так же их выходные значения V_P, V_B .

Для моделирования влияния человека-оператора и его действий необходимо знать физико-механические свойства руд q (или объемы руд с различных месторождений), задание на объем руды, поступающей в стержневую мельницу T_P и задание на соотношение «руда/вода».

На рисунке 3.19 представлена схема взаимодействия человека-оператора, систем автоматического управления технологическими процессами и объекта управления.

В модели придется учитывать взаимовлияние контуров управления друг на друга, поэтому модель систем управления процессом измельчения придется рассматривать как систему взаимовлияющих элементов.

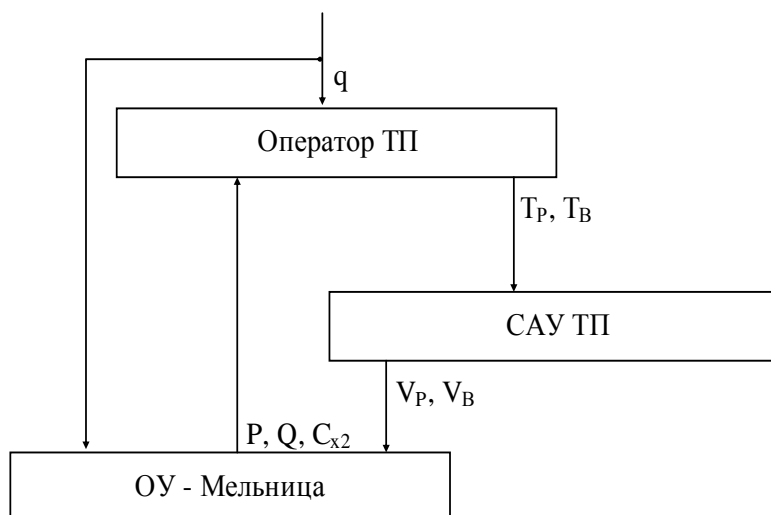


Рисунок 3.19 – Схема взаимодействия

Таким образом, модель придется рассматривать как совокупность трех взаимовлияющих подсистем: человека-оператора, первой стадии измельчения и САУ ТП.

Факторы, необходимыми для описания интерфейса «человек-оператор» разделяются на входные и выходные.

Входные факторы это:

- соотношение руд различных месторождений;
- план производства;
- текущий расход руды;
- текущее соотношение «руда/вода»;

- энергопотребление.

Выходные факторы это:

- задание на расход руды;
- задание на соотношение «руда/вода».

Подсистема «первая стадия измельчения» более сложна – она должна иметь не только входные и выходные параметры, но и внутренние (для описания схем взаимодействия элементов). Поэтому входными факторами для нее будут:

- соотношение руд различных месторождений;
- задание на расход руды;
- задание на соотношение «руда/вода».

Выходными факторами будут:

- текущий расход руды;
- текущий расход воды;
- текущее соотношение «руда/вода»;
- энергопотребление;
- гранулометрический состав слива.

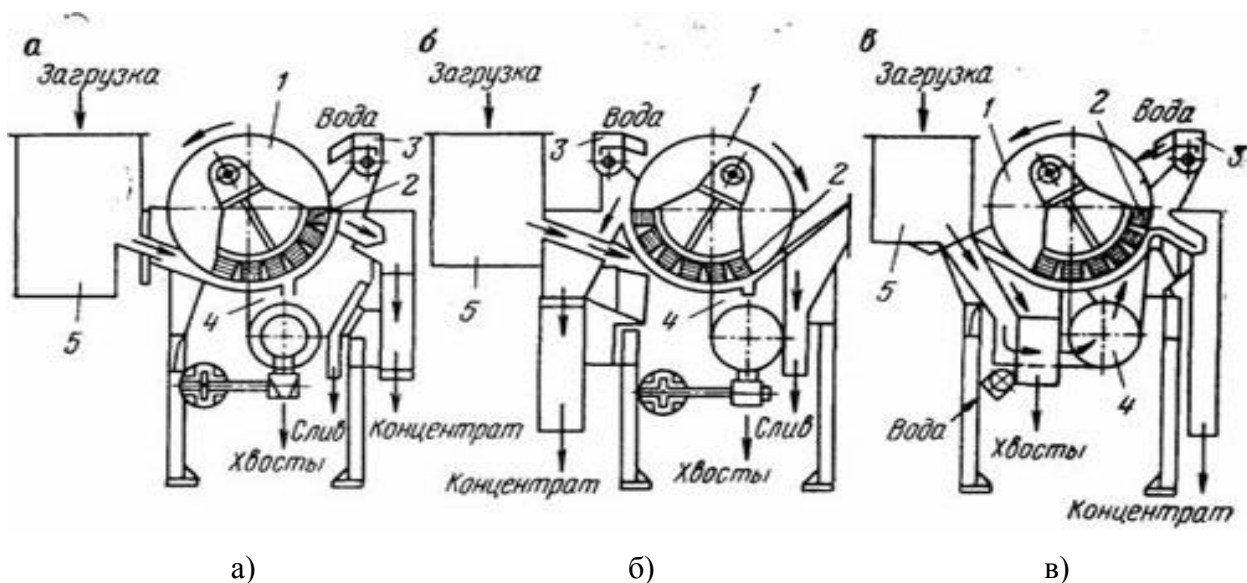
Параметры «текущий расход руды» и «текущий расход воды» будут использоваться для описания взаимодействия элементов данной подсистемы. То есть, их можно назвать не только выходными, но и внутренними параметрами.

Так как гранулометрический состав S_{x2} используется только для регулирования загрузки мельницы (что в рамках задачи экстремального адаптивного управления процессом измельчения по параметрам физико-механические свойства руд – соотношение «руда/вода» не планируется использовать), то данный параметр (в рамках данной задачи) можно исключить из модели.

Полученная математическая модель может быть использована при программной реализации имитационной модели процесса измельчения в стержневой мельнице с управлением данного процесса оператором технологического цикла.

Вторым наиболее значимым процессом магнитного обогащения по потребляемым ресурсам и первым по важности является процесс именно самого обогащения. В практике мокрого магнитного обогащения сильномагнитных руд используются в основном барабанные сепараторы. Устройство и принцип работы этих сепараторов представлено на примере сепаратора ПБМ-90/250 (209В-СЭ), получившего применение на ММС АО «ССГПО» и разработанного институтом «Механобр» (рисунок 3.20). Сепаратор имеет барабан 1 с шестипольсной магнитной системой 2, изготовленной из постоянных магнитов

(сплав ЮНДК-24), ванну 4, загрузочную коробку 5, переливную коробку для смывной воды 3. Внешняя поверхность барабана покрыта резиной.



- а) – с прямоточной ванной;
- б) – с противоточной ванной;
- в) – с полупротивоточной ванной.

Рисунок 3.20 – Барабанный сепаратор ПБМ-90/250 для мокрого обогащения руд

Напряженность магнитного поля на поверхности барабана этих сепараторов составляет 90-100 кА/м, на расстоянии 50 мм от поверхности барабана – 40-50 кА/м, производительность сепаратора зависит от типа ванны, свойств сырья и достигает 40-200 т/ч.

С точки зрения автоматизации автоматическая система управления технологической линией магнитной сепарации на ММС АО «ССГПО» содержит автоматические системы стабилизации плотности сливов классифицирующих аппаратов перед магнитными сепараторами (рисунок 3.21), автоматические системы стабилизации качеств концентратов каждой стадии обогащения путем корректировки заданных значений плотности сливов классифицирующих аппаратов и системы автоматического регулирования процессом измельчения. В настоящий момент САР состоит из контуров стабилизации расхода воды в зумпф и стабилизации уровня пульпы за счет добавочной воды и воды на взмучивание.

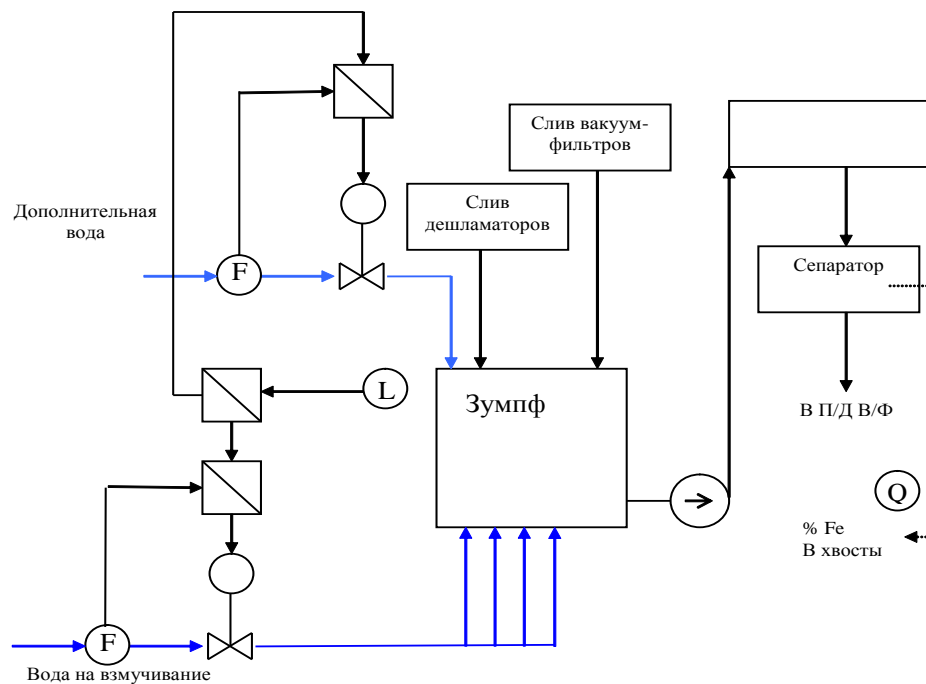


Рисунок 3.21 – Мнемосхема САР магнитной сепарации

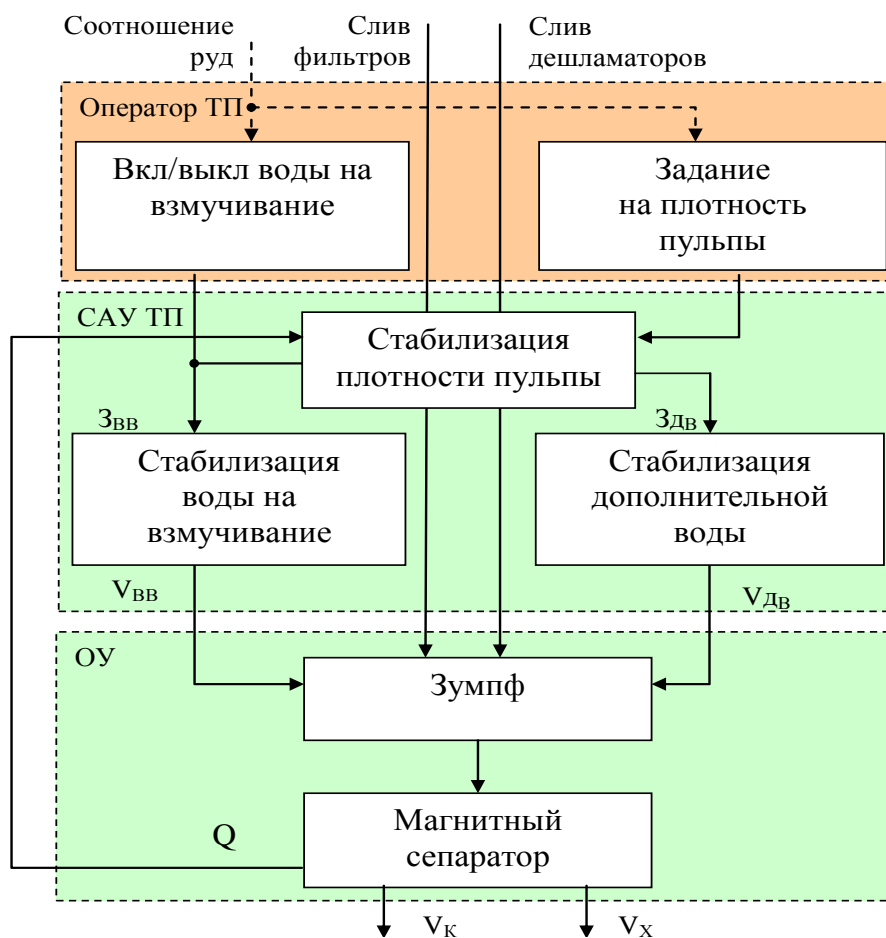
Отсутствие стабилизации плотности пульпы, поступающей на сепарацию, приводит к нестабильному режиму работы сепаратора, вследствие колебаний нагрузки на магнитный сепаратор из-за изменения производительности цикла измельчения при непостоянстве гранулометрического состава исходной руды. Поэтому для управления (стабилизации) качеством концентрата и необходима регулирование плотность пульпы, поступающей в процесс сепарации. Основным назначением системы автоматического регулирования является увеличение содержания железа в концентрате и уменьшение его в хвостах.

В настоящий момент САР должна поддерживать на выходе классификатора постоянную плотность слива, находящуюся в пределах $1000-1800 \text{ гр/м}^3$.

С учетом того, что САР первого уровня системы автоматического управления магнитной сепарацией успешно отрабатывают свои задачи, то разработка решений по их модернизации представляется малоперспективной в рамках данного исследования. Модернизация самой АСР и замена ее на адаптивную САУ при незначительном ожидаемом экономическом эффекте на данный момент представляется достаточно трудоемкой задачей из-за отсутствия формализованных зависимостей объемов подачи дополнительной воды и воды на взмучивание от информации, полученной в результате технологического процесса.

При этом, предполагается, что эта система также как и предыдущие может быть представлена двумя САР первого уровня (пропорциональные звенья из-за значительно меньших значений переходных процессов по сравнению с процессом оседания пульпы в зумпфах с коэффициентом «1») и многомерными зависимостями с инерционностью

(представляющей зумпф с пульпой и магнитный сепаратор).



- где: $Z_{ВВ}$ – задание на объем воды на взмучивание;
 $Z_{ДВ}$ – задание на объем добавочной воды;
 $V_{ВВ}, V_{ВД}$ – объем воды на взмучивание и добавочной воды;
 Q – плотность слива сепаратора;
 $V_{К}, V_{Х}$ – объем концентрата, хвостов.

Рисунок 3.22 – Схема управления магнитной сепарацией на фабрике ММС АО «ССГПО»

Для обезвоживания концентрата используют вакуум-фильтры. Схемы автоматического управления работой вакуум-фильтров представлена рисунке 3.23.

АСР влажности кека на выходе вакуум-фильтра на данном этапе реализована, но не используется из-за большой погрешности датчиков влажности кека. Задание на плотность пульпы питания вакуум-фильтров задает оператор.

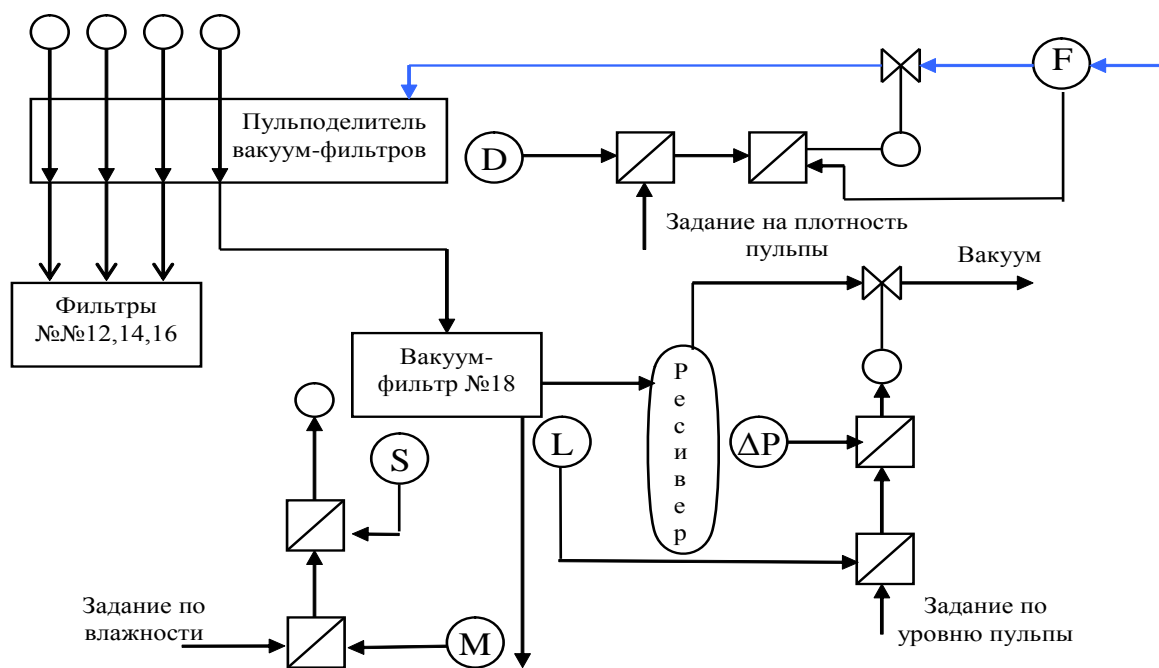


Рисунок 3.23 – САУ процесса обезвоживания в вакуум-фильтрах

3.4 Разработка математических моделей процесса сушки

Сушка концентрата применяется в осенне-зимне-весенний период с целью предотвращения его смерзания при транспортировании. При сушке концентрата удаляется только влага, связанная с материалом физико-механически. Процесс сушки относится к массообменным процессам в связи с перемещением тепла и влаги внутри материала, и испарения влаги с поверхности материала.

Характерной особенностью процесса сушки является переход влаги материала из жидкой фазы в газообразную, путем испарения, которое происходит тогда, когда парциальное давление пара окружающей среды меньше, чем парциальное давление пара влаги концентрата. С уменьшением разности давлений испарение влаги из материала снижается и при разности давлений равной нулю процесс сушки прекращается. Процесс сушки характеризуется изменением влажности и температуры материала, а также скоростью сушки.

При выпуске готовой продукции в практике обогащения полезных ископаемых тепловая сушка является последней операцией обезвоживания. Допустимая влажность при транспортировке рудных концентратов в зимнее время составляет 2.5-3%. Такая степень влажности не может быть достигнута другими операциями обезвоживания.

В качестве теплоносителя (сушильного агента) возможно применение дымовых газов,

нагретого воздуха или перегретого пара. При обтекании частиц влажного материала горячим воздухом или другим газом происходит испарение влаги с поверхности, диффузия паров идёт через поверхностную плёнку в газовую среду и, наконец, удаление паров током газа. Для сушки продуктов обогащения на АО «ССГПО» используют дымовые газы, образующиеся при сгорании газа.

При перемешивании материала и использовании высокотемпературного носителя испарение частиц жидкости содержащихся в железорудном концентрате протекает без резкого разделения.

Сушка концентрата требует непрерывного контроля, как за состоянием выходного продукта, так и за значением рабочего агента-теплоносителя. О состоянии выходного продукта обычно судят по значению параметров теплоносителя на тракте его движения.

Показателем эффективности процесса является влажность материала выходящего из сушилки, а целью управления – поддержание этого параметра на определённом уровне при максимальной производительности сушильных барабанов.

Влажность высушенных продуктов обогащения должна исключать возможность их смерзаемости в зимнее время при перевозках или хранении и отвечать требованиям технологии дальнейшей переработки или использования этих продуктов.

Процесс сушки зависит от влажности, размеров частиц материала и способов их укладки, гидродинамических условий обтекания и параметров среды (температура, влажность, скорость, давление). Совокупность этих факторов определяет характер протекания процесса и называется режимом сушки.

Особенность сушки железорудного концентрата АО «ССГПО» и ТОО «Оркен» заключается в том, что размер зерен концентрата составляет 74 микрона. Для того, чтобы концентрат не выносился в атмосферу необходимо соблюдать оптимальную скорость движения дымовых газов, скорость вращения барабана и число лопастных насадок. Следует учитывать также, что влага, содержащаяся в концентрате, связана с ним капиллярно-стыковой связью.

Как уже отмечалось, на АО «ССГПО» применяют конвективные сушилки барабанного типа. Автоматизация процесса сушки представлена системами управления, представленными в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – САР процесса сушки

Название САР	Оборудование
Стабилизация соотношения газ-воздух	Датчик Метран-100ДД Контроллер SIMATIC S7-315 Исполнительный механизм МЭО – 87 Расходомер-счетчик ультразвуковой ДНЕПР-7 Станция Contronic-R
Стабилизация температуры газа на входе в сушильный барабан	Термопреобразователь ТСП-5071 Термопреобразователь термоэлектрический ТХА-280М Станция Contronic-R
Стабилизация влажности высушенного продукта	Влагомер «Нейтрон-3М» Дифманометр ДКО-3702 Регулятор РС. 29.0.42 Станция Contronic-R

Сушильный агрегат как объект управления представлен на рисунке 3.24.

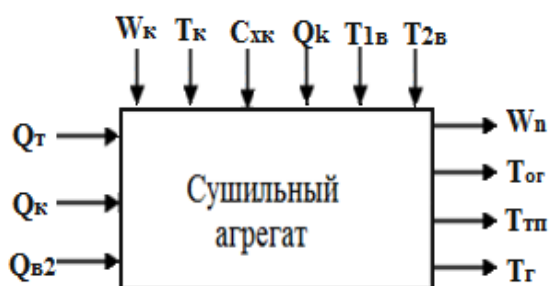


Рисунок 3.24 – Сушильный агрегат как объект управления

В качестве управляемых параметров могут быть использованы:

- влажность высушенного продукта ω_p ;
- температура отходящих газов T_g ;
- температура в топке $T_{тп}$;
- температура газов в определенном сечении сушильного барабана.

Основные возмущающие воздействия:

- влажность ω_k концентрата;
- температура T_k концентрата;
- гранулометрический состав $C_{хк}$;

- производительность q_k по концентрату;
- температура первичного $T_{1в}$ и вторичного $T_{2в}$ воздуха.

Управляющими воздействиями могут служить

- расход топлива;
- расход концентрата;
- расход вторичного воздуха.

Помехами процесса можно считать изменение теплоемкости топлива и материала.

Как управляемый объект сушильный барабан характеризуется значительными инерционностью и транспортным запаздыванием, а также воздействиям большого числа возмущений, изменяющихся случайно. Он работает как теплообменник, в котором должна быть обеспечена передача тепла от газа к материалу, и как транспортное устройство, которое должно пропускать заданное количество материала.

Таким образом, для сушки АО «ССГПО» система управления процессом сушки должна обеспечивать оптимальный режим горения, необходимую скорость сушильного агента (топочных газов) через барабан, поддержание газового режима в различных точках барабана и стабильную влажность высушенного продукта.

Стабилизация соотношения «газ-воздух» обеспечивает полное сгорание газа.

Стабилизация температуры газов на входе в сушильный барабан обеспечивает постоянство температуры сушильного агента перед контактом с материалом. Топочные газы, имеющие температуру до 1300 °С, смешиваются с потоком вторичного воздуха и охлаждаются до 700-800 °С. Температура измеряется термопарой, а регулирующее воздействие регулятора реализуется поворотной заслонкой, установленной на трубопроводе.

Стабилизация тягодутьевого режима обеспечивает нормальный режим горения и соответствующую скорость сушильного агента. Разрежение в топке характеризует состояние всего сушильного и газового трактов и определяет интенсивность сушки. Нарушение режима по разрежению происходит, во-первых, из-за неправильного положения заслонки и, во-вторых, вследствие изменения количества газа при колебаниях температуры в топке или барабане. Понижение разрежения уменьшает интенсивность сушки. Увеличение разрежения приводит к уменьшению времени контакта материала с теплоносителем, увеличению выноса твердых частиц материала в тракт газоочистки, что приводит к износу дымососа.

В качестве управляющей величины используют положение заслонки в дымососе. Положение заслонки меняется в зависимости от объема подачи газа и расчетного значения разрежения которое лежит в пределах от 3-6 мм вод. ст. От положения заслонки зависит

весь процесс разряжения.

В качестве возмущающего воздействия можно рассматривать объем подачи газовой смеси.

В качестве управляемой величины используется разряжение в топке ГВК. Что бы добиться разряжения в топке барабана рабочей точки в пределах 5 мм вод. ст.

Стабилизация влажности высушенного продукта, опять же, затруднительна в связи с большой погрешностью используемых датчиков влажности. Найти решение, способное исправить данную ситуацию с точностью измерений на текущий момент предприятиям не удалось. Поэтому контур управления разработан и реализован, однако практически не используется.

В таком случае, используя подход, реализованный в предыдущих пунктах, структуру объекта управления «Сушка» можно представить как на рисунке 3.25.

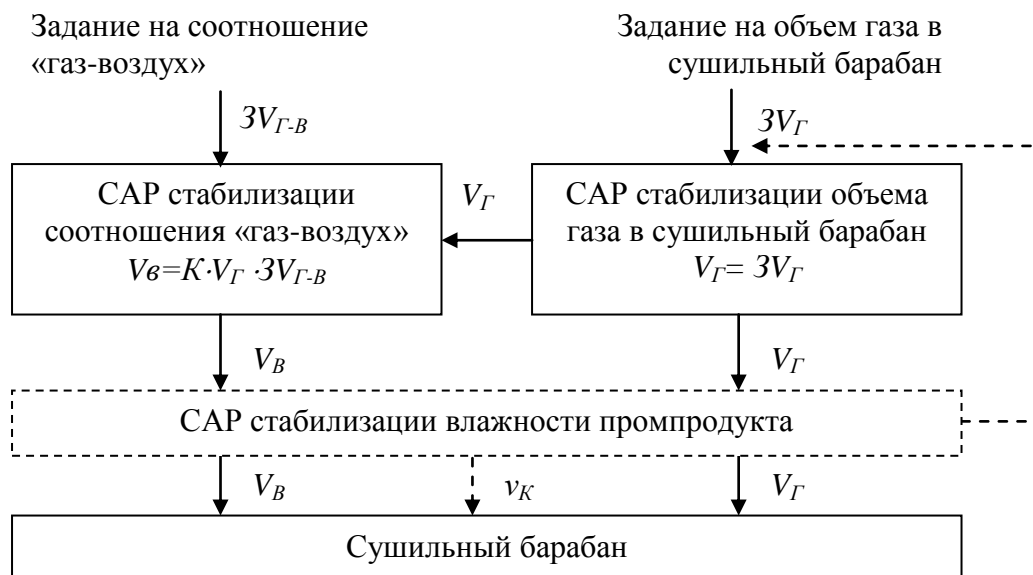


Рисунок 3.25 – Укрупненная математическая модель процесса сушки концентрата

В связи с этим, и так как две имеющиеся системы эффективно решают поставленные задачи, интерес при исследовании представляет только оптимизация процесса сушки при стабилизации влажности готового концентрата. В связи с отсутствием возможности точных измерений влажности возможно использование группы косвенных признаков для оценки влажности промпродукта.

Для сушильного барабана в данном случае в качестве управляемой будет использована величина влажности промпродукта. В связи с трудностями прямого и точного ее измерения возможна косвенная комплексная оценка по группе параметров: показания

датчиков влажности различных типов, цвет концентрата, температура концентрата, температура выходящих газов, их влажность. В связи с тем, что на текущий момент нет данных, позволяющих формализовать данные зависимости, да и они будут постоянно меняться в связи с изменением физико-механических свойств исходной руды, то эти зависимости в модели при исследовании принято решение представить набором гиперповерхностей. При реализации системы адаптивного управления неточности зависимостей объекта управления могут быть устранены адаптивной системой в процессе подстройки и поиска оптимальных управляющих воздействий.

В качестве управляющих – могут быть использованы: температура газа на входе в сушильный барабан, его объем, время сушки.

В качестве возмущающих: исходная влажность концентрата, его физико-механические свойства (в частности, теплоемкость и теплопроводность), качество газовой смеси, температура окружающей среды.

3.5 Выводы по разделу

Автоматизация технологических процессов ФРПО представлена успешно функционирующими системами управления нижнего уровня – САУ ТП. На втором уровне системы автоматизации представлены в большей степени автоматизированными системами управления, хотя широко применяются до сих пор и системы ручного управления. Системы верхнего уровня представлены в основном системами оперативно-диспетчерского управления и не выполняют функции оптимизации процессов.

При этом давно доказано, что человек не может оперативно обрабатывать большой объем информации, связанный с взаимовлияющими параметрами технологических циклов. Как правило, в таких ситуациях применяют либо специальные системы поддержки принятия решения оператором, либо вообще исключают оператора из системы принятия таких решений и используют системы экстремального управления. В тех ситуациях, где принятое решение не влечет за собой последствий для человеческих жизней, в системах автоматики наибольшее распространение получило второе направление как требующее меньших капитальных затрат на создание и внедрение, а так же обладающее большим быстродействием.

В условиях постоянного повышения стоимости ресурсов и использования для обогащения все более и более бедных руд применимость систем управления технологическими циклами операторами становится недопустимым анахронизмом, тем более при тотальной компьютеризации всех технологических процессов и борьбе за

снижение себестоимости продукции.

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод о наличии дополнительных возможностей повышения эффективности ТП ЖОК за счет применения систем управления первого и второго уровня – систем экстремального управления.

Для комплекса ДОФ возможно использование адаптивных систем управления для повышения производительности дробилок путем оптимизации производительности по исходной руде в зависимости от физико-механических свойств исходных руд.

Для комплекса ММС также схемы с адаптацией могут быть использованы для управлением подачей воды в зумпфы и заданием плотности пульпы. Однако в связи с небольшим ожидаемым экономическим эффектом от внедрения систем для данных процессов использование адаптивных систем управления в них решено не рассматривать.

Для комплекса сушки схемы адаптивного управления могут быть применены для стабилизации влажности готового промпродукта.

4 Анализ применения аппарата нейроиформатики для решения задач в системах автоматического управления

4.1 Анализ опыта применения искусственных нейрорободных сетей для управления технологическими процессами предприятий

Искусственные нейрорободные (нейронные) сети (ИНС) получили широкое распространение за последние 20 лет и позволили решать сложные задачи обработки данных, часто значительно превосходя точность других методов статистики и искусственного интеллекта, либо являясь единственно возможным методом решения отдельных задач.

Основа теории искусственных нейрорободных сетей заложена в работах У. Маккалоха, У. Питса, Д. Хебба, Ф. Розенблатта, Д. Хьюбела, Т. Визеля, В. Уидроу, К. Штайнбуха, М. Минского, Дж. Хопфилда, В.К. Левина, Ц.Г. Литовченко и других.

Этой теме посвящены публикации таких зарубежных авторов как П. Спек, Л. Паттерсон, Р. Бишоп, Дж. Голландок. Теоретические аспекты искусственных нейросетей достаточно хорошо разработаны такими известными украинскими и российскими исследователями, как Н.М. Амосов, В.М. Белов, Э.М. Куссуль, В.М. Глушков, А.И. Галушкин, А.Н. Горбань, В.Л. Дуин-Барковский, Е.М. Миркес, В.Г. Царегородцев А.Б. Барский и др. В научно-технической литературе Республики Казахстан проблемы, связанные с аппаратом искусственных нейрорободных сетей, рассматриваются в работах В.Л. Лося, А.Ф. Цехового, Д.Ш. Ахмедова, Н.Г. Макаренко, В.В. Яворского и многих других.

Имеются факты успешного внедрения ИНС для управления технологическими процессами (например, на международной конференции по нейронным сетям в Вашингтоне в 1999 году М. Мозер объявил о проекте «Нейродом», интеллектуального здания, в котором нейронные сети управляют всем оборудованием адаптируясь к поведению и потребностям обитателей, в 2004 году системы на основе нейрорободных сетей внедрены на Ачинском глиноземном комбинате ОАО «Русский алюминий» для управления печью №5, в книге «Опыт семилетнего применения нейрокорпьютеров на атомных станциях Южной Кореи» приводятся данные об использовании нейросистем в атомной промышленности).

Основной принцип применения нейросетей и построенных на их основе нейрокорпьютеров в системах управления – это управление нелинейными динамическими объектами. Управление в этом случае заключается в полном (или на первоначальном этапе частичном) отказе от необходимости формализации поведения объекта в виде системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений и, как следствие, в разработке

методов их решения.

В случае применения нейрокомпьютеров для решения задач идентификации нелинейного объекта управления и разработки корректирующих динамику фильтров используются нейронные сети определенной структуры. В этом случае нейронные сети с обратными связями применяются, например, для идентификации нелинейных объектов и являются более гибким средством, использующим меньшее количество априорной информации, чем системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений.

Данный принцип управления в настоящее время реализован в электроэрозионных станках японского производства, в частности поставляемых в Российскую Федерацию на Магнитогорский металлургический комбинат.

Принцип управления нелинейными объектами заложен в системах управления электроприводами. Электродвигатель является существенно нелинейной динамической системой, для управления которой ведутся разработки на базе нейрокомпьютеров. Это касается широкой номенклатуры электродвигателей – от микроминиатюрных до сверхмощных (несколько мегаватт), используемых при переработке руды или перекачки нефти и газа. Фирмой Texas Instruments выпущена специальная серия СБИС TMS320C240, ориентированная на реализацию систем управления электродвигателями с эмуляцией на СБИС нейросетевых алгоритмов управления.

Реализация нейроуправления в АСУ ТП различного вида требует определенной культуры построения системы сбора информации с датчиков. Эта культура определяется переходом от общепринятых сетевых архитектур типа Ethernet к сетевой архитектуре LonWorks, реализуемой на базе контроллеров на СБИС «Нейрон» и объединяющей в единой системе множество датчиков, исполнительные механизмы и вычислительные ресурсы. Основная часть системы управления размещается в ПЗУ СБИС «Нейрон», на основе которого построены контроллеры сети LonWorks. Фундамент АСУ ТП, реализованный по технологии LonWorks, позволяет реализовать в виде надстройки над ним нейрокомпьютерную систему управления объектами с характерными для них критериями оптимизации.

Нейронные сети продемонстрировали свою способность решать сложные задачи. Они имеют уникальные потенциальные возможности, такие как возможность решения сложноформализуемых задач, хотя не свободны от ограничений и вопросов, на которые до сих пор не существует ответа. Это в первую очередь такие проблемы как отсутствие формализованных алгоритмов выбора архитектуры нейросетей, проблемы быстрого обучения сетей и вопросы их устойчивости.

4.2 Тонкое управление технологическим динамическим объектом в условиях воздействия детерминированных и стохастических не учитываемых факторов

Математические модели объектов управления (ОУ) строятся в зависимости от поставленной и решаемой при проектировании системы управления цели с той или иной степенью приближения. В случае построения сложных систем управления на технологический ОУ воздействует множество факторов, из которых при описании и моделировании обычно выбирают несколько главных, наиболее значимых. Другие, не учитываемые факторы, и поэтому создающие ситуацию априорной неопределенности, относят к причинам возникновения ошибок регулирования, как случайных, так и детерминированных, систематических. И если эти ошибки допустимо малы, то такой моделью и ограничиваются. Для учета «не учитываемых» факторов и обеспечения более тонкой, более точной настройки объекта на оптимум функционирования могут быть применены разные решения, в том числе и применение нейронной сети. Но, для начала, полезно представить математическое описание объекта управления в условиях нестабильности не учитываемых факторов, возмущений, воздействующих на объект управления.

Маттапарат аналитического описания сложных нелинейных динамических ОУ на основе уравнений состояния является практически единственным, строгим и корректным [89, 92]. Достоинство такого описания, это его универсальность и единообразие представления уравнений, что позволяет использовать развитые унифицированные методы исследования и оптимизации систем управления такими объектами. Недостаток уравнений состояния в том, что они недостаточно прозрачны. Теряется физическая причинно-следственная связь между факторами, влияющими на ход технологического процесса и переменными, характеризующими его состояние и ход.

Уравнения состояния применяют для описания, исследования и оптимизации сложных нелинейных нестационарных динамических объектов и систем управления. Уравнения состояния получают, приводя к форме Коши систему дифференциальных уравнений, составляемых для отдельных элементов объекта, с использованием уравнений связей между ними [89]:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(t, x, u), & x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m \\ y = g(t, x, u, z), & y \in \mathbb{R}^m, n \geq m, z \in \mathbb{R}^l \end{cases} \quad (4.1)$$

где x – вектор переменных состояния;
 u – вектор воздействий на объект;
 y – вектор выходных величин объекта;
 z – вектор помех;

$f(.)$ и $g(.)$ – некоторые, довольно общего вида функции.

В нелинейной модели числовые матрицы связей заменяются функциональными.

При разработке модели динамических объектов на основе уравнений состояния возможно применение полной модели с разделенными переменными или усеченной модели.

Алгоритм построения полной модели с разделенными переменными можно представить следующим образом. Представим гипотетически, что для некоторой динамической системы известны все возможные воздействия на нее, а также все ее внутренние связи. В этом случае линейаризованная модель ОУ или САУ имеет вид [80, 81] как на рисунке 4.1.

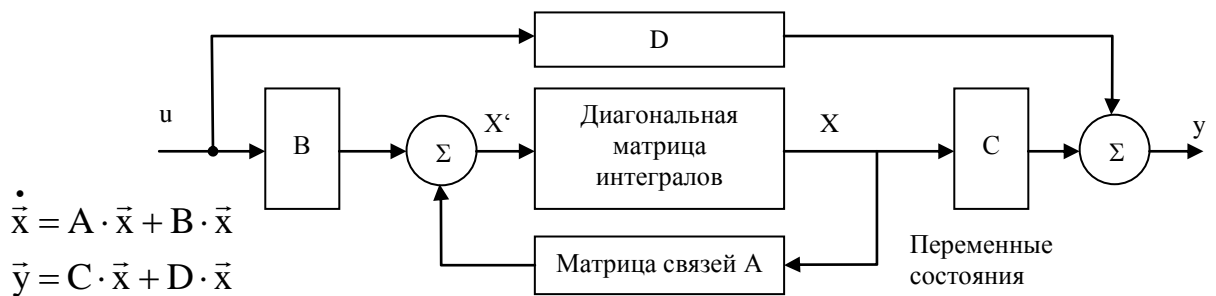


Рисунок 4.1 – Структура полной линейной модели динамического объекта на основе уравнений его состояния

В нелинейной модели числовые матрицы связей являются функциональными. Естественно, в такой полной модели многомерного объекта могут быть и десятки, и сотни, и миллионы уравнений, поэтому она может иметь скорее теоретический, но не практический интерес.

Алгоритм построения традиционной усеченной модели можно представить следующим образом. Из полной, но гипотетической модели на практике выделяют детерминированную часть, для которой известны, т.е. выбраны как управляемые величины, так и управляющие и возмущающие воздействия в основном и определяющие состояние и поведение объекта. Получается формализованная аппроксимация, приближенная модель. Система уравнений состояния состоит из сравнительно небольшого числа уравнений, а не учитываемые внешние факторы относят к источникам помех (шумов), сопровождающих

измерение вектора выходных величин.

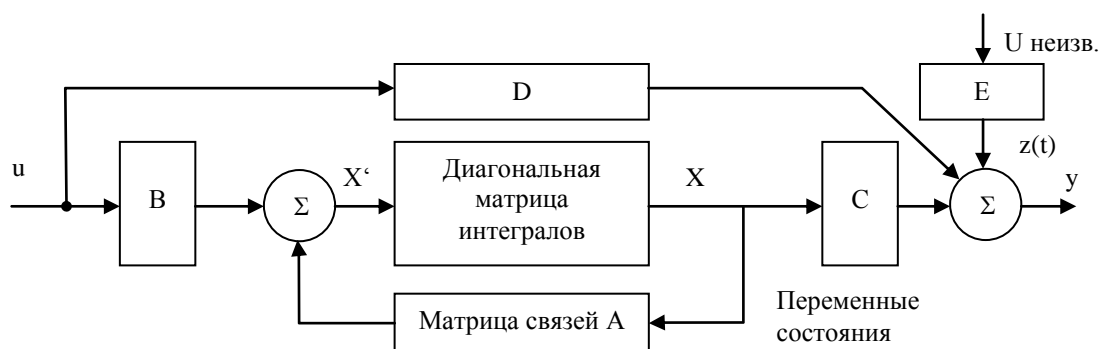


Рисунок 4.2 – Структура упрощенной линейной модели динамического объекта

Неизвестные и не учитываемые факторы формально отнесены к причине возникновения ошибок оценки значения вектора выходных величин y , u – вектор заданий системы управления, y – вектор управляемых величин, $u_{\text{неизв}}$ – вектор неизвестных воздействий, влияющих, как возмущения, на управляемые величины.

Матрица E введена формально, поскольку ни сами возмущения, ни их влияние на вектор управляемых величин не известны. Это просто отображения факта существования таких возмущений. На практике, по результатам наблюдения поведения объекта, ошибкам регулирования, можно сделать вывод о величине и характере вектора возмущений $z(t)$.

Существующие детерминированные системы управления технологическими процессами и объектами сравнительно хорошо обеспечивают функционирование последних, близко к оптимальным режимам. Ошибки слежения и стабилизации определяются и совокупностью неизвестных факторов. Каждый из них может слабо влиять на состояние и поведение объекта управления. Но в совокупности, множество таких факторов может оказать заметное влияние на ход технологического процесса.

Но при этом для более тонкой и точной настройки необходимо учитывать уже второстепенные, трудно поддающиеся непосредственному или косвенному измерению и детерминированной формализации факторы.

Чтобы несколько сгладить строгость и чопорность математического аппарата уравнений переменных состояния в приложении к не учитываемым факторам, влияющим на состояние и поведение сложного технологического объекта управления, приведем показательное наблюдение, сделанное по управлению соотношением «руда-вода» в процессе измельчения на фабрике ММС АО «ССГПО».

Формально процесс измельчения проходит в рамках нормативных требований. Но мастер-оператор время от времени, наблюдая процесс, вносит в задания некоторые малые

коррективы. При этом процесс измельчения, как правило, улучшается. Если же спросить мастера, чем он руководствовался при уточнении заданий, он оказывается не в состоянии объяснить, что именно в ходе процесса, какие наблюдения и чего, позволили ему сделать вывод, что процесс можно улучшить и как это сделать. Управление осуществляется мастером на уровне опыта интуиции.

Аналогично происходит и для многих других процессов с автоматизированными системами управления. Хотя к настоящему времени модели объектов и системы управления ими достигли высокого уровня совершенства, тем не менее, роль человека, в управлении процессом все еще велика.

Априорная неопределенность в составе не учитываемых факторов, заметно влияющих при их совокупном воздействии на объект управления и его состояние и поведение, казалось бы, не позволяет исключить их влияние на объект. Однако если попытаться, пусть в грубом приближении, воспроизвести алгоритм поведения мастера, уточняющего настройки системы управления процессом, то введением этого алгоритма в процесс управления можно будет более точно оптимизировать ход технологического процесса, осуществить его тонкую настройку. Это своего рода антропоморфный подход к модернизации существующей системы управления.

Ввиду неизвестности параметров, опираясь на оценку которых человек-оператор уточняет настройки системы управления, можно попробовать учитывать большое число факторов, не имеющих, на первый взгляд, влияния на ход процесса. Например, такие второстепенные показатели как, например, состав руд, температура руды и воды, продолжительность работы мельницы после загрузки стержней и ремонта футировки барабана, влажность, температура и давление в цехе, шумы, вибрации от посторонних агрегатов и т.п. Естественно, многие из этих параметров могут никак и не влиять на ход технологического процесса. Но, в то же время, они сами могут быть подвержены влиянию не учитываемых непосредственно факторов, которые уже напрямую могут оказывать пусть и малое воздействие на ход технологического процесса. Такой опосредованный учет причин, влияющих на ход и качество технологического процесса, и позволит осуществить тонкую его настройку на оптимум функционирования.

Естественно, проводить многофакторный статистический анализ такого значительного числа факторов с целью выявления их, довольно слабых корреляционных связей с управляемыми величинами трудоемко и, пожалуй, нецелесообразно. В то же время, в совокупности часть этих факторов может оказать заметное влияние на степень оптимальности технологического процесса.

Следуя антропоморфному подходу существующую систему управления можно

совершенствовать путем введения надстройки в виде нейросети, которая должна будет корректировать в малых пределах, не нарушая в целом работу основной системы управления, величины задания. На период обучения на ее входы могут быть поданы сигналы с многочисленных датчиков всевозможных физических величин, характеризующих как сам технологический процесс, так и внешние условия, в которых он протекает. По результатам эксплуатации можно будет выбрать наиболее значимые переменные.

Степень ограничения корректирующих сигналов нейросети можно определить как некоторый процент, например 5%, от значения максимума каждой координаты вектора управляемых величин, если критерий управления – выведение этого вектора на максимальное значение. Сглаживание фильтром обеспечит квазистатический режим работы штатной системы, т.е. при отработке корректирующих сигналов штатная система должна успевать с запасом.

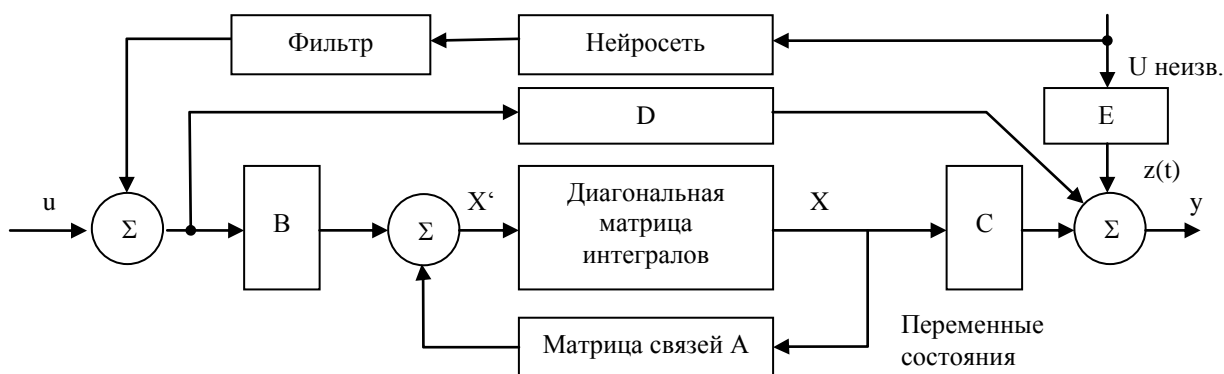


Рисунок 4.3 – Модель САУ с надстройкой из нейросети

Нейросеть можно использовать в качестве дополнения к уже существующей системе управления, обеспечивающей тонкую настройку объекта и позволяющей учитывать антропогенный фактор, участвующий в управлении. В режиме обучения выходной вектор нейросети подстраивается под вектор малой корректировки заданий, осуществляемой мастером на основании его опыта и интуиции

Предлагаемый подход с одной стороны, позволяет осуществлять тонкую настройку технологического процесса, что может давать ощутимый экономический эффект. С другой стороны, ограничение, накладываемое на величины корректирующих задание воздействий, вырабатываемых нейросетью, даже при нарушении ее работы не повлечет существенных потерь, поскольку основная система управления будет продолжать функционировать. И, что не менее важно, при таком подходе исключаются проблемы устойчивости и качества управления собственно нейросети, которые обычно существуют [81] при непосредственной замене детерминированной системы управления на нейросетевую, поскольку в таком случае

качество динамического и статического режимов управления обеспечивает основная, традиционная система управления.

4.3 Разработка структуры нейросетевой системы адаптивного управления

Системы управления с недостаточной предварительной априорной информацией об управляемом процессе получили название адаптивных систем. Термин «адаптация» заимствован теорией управления из биологии, где им обозначают свойства приспособления организмов к изменениям внешней среды. Эффект приспособления к изменяющимся условиям в адаптивных системах достигается за счет того, что часть функций по получению, обработке и анализу недостающей информации об управляемом процессе осуществляется уже не проектировщиком, а самой системой в процессе ее нормальной эксплуатации.

Поскольку адаптивные системы широко используют рабочую информацию для анализа динамического состояния системы управления и организации контролируемых изменений свойств, параметров, управляющих воздействий и структуры системы управления, то в зависимости от способов реализации контролируемых изменений в процессе нормальной эксплуатации системы можно провести следующую классификацию адаптивных систем: самонастраивающиеся системы, системы с адаптацией в особых фазовых состояниях и обучающиеся системы (рисунок 4.4).

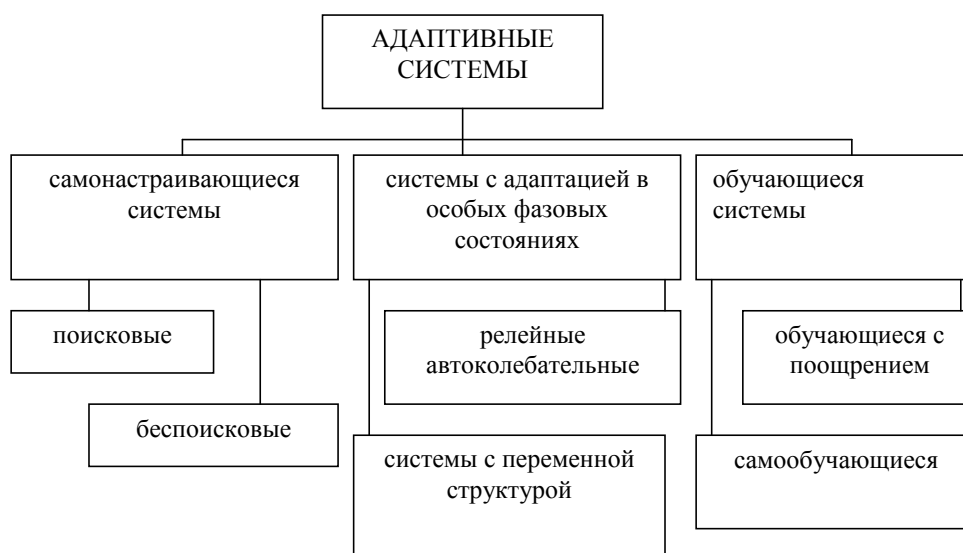


Рисунок 4.4 – Классификация адаптивных систем управления

Самонастраивающиеся системы (СНС) характеризуются наличием специальных контуров самонастройки, с помощью которых оцениваются динамические и статические

свойства системы и формируются такие контролируемые воздействия, что система самопроизвольно приближается к определенному эталону, часто задаваемому математически в виде критерия качества функционирования. При этом контур самонастройки служит для изменения параметров или структуры основного контура с целью обеспечения заданного критерия качества управления. Обычно критерий качества управления выражается в виде функционала или функции от параметров и измеряемых координат системы. В процессе работы системы значение функционала качества изменяется, и задача контура самонастройки сводится к обеспечению экстремального значения критерия. Нахождение и поддержание экстремального значения критерия качества управления может производиться или с помощью пробных отклонений системы, или путем аналитического определения условий экстремума. В зависимости от указанных способов нахождения экстремума самонастраивающиеся системы подразделяют на поисковые и беспоисковые. В свою очередь поисковые самонастраивающиеся системы в зависимости от применяемых методов поиска делят на системы со случайным поиском, с поиском по методу Гаусса-Зейделя, с поиском по методу градиента, с поиском по методу наискорейшего спуска. В классе беспоисковых СНС можно выделить самонастраивающиеся системы, использующие информацию о частотных характеристиках, СНС с контролем временных характеристик и границ устойчивости, СНС с эталонными моделями, градиентные СНС.

Система с адаптацией в особых фазовых состояниях использует особые режимы или свойства нелинейных систем, например режимы автоколебаний, скользящие режимы для организации контролируемых изменений динамических свойств системы управления. Специально организованные особые режимы в таких системах либо служат дополнительным источником рабочей информации об изменяющихся условиях функционирования системы, либо наделяют систему управления новыми свойствами, за счет которых динамические характеристики управляемого процесса поддерживаются в желаемых пределах, независимо от характера возникающих при функционировании изменений. Эти системы можно подразделить на релейные автоколебательные системы и адаптивные системы с переменной структурой.

Обучающиеся системы управления характеризуются наличием специальных процессов обучения, которые заключаются в постепенном накапливании, запоминании и анализе информации о поведении системы и изменении законов функционирования в зависимости от приобретаемого опыта. К процессу обучения приходится прибегать тогда, когда не только мал объем априорных сведений об объекте, но и отсутствует возможность установления детальных причинно-следственных связей в структуре самой системы из-за ее сложности. Накопление и обобщение информации в процессе обучения можно

осуществлять за счет внесения «эталонного опыта» в систему извне либо путем формирования такого опыта внутри системы. Например, в первом случае обучаемой системе предъявляют последовательность ситуаций, образов или режимов, которые имеют заранее известные характеристики или различаются по принадлежности определенным классам. Поведение системы в ответ на такую обучающую последовательность ситуаций формируют на основе принципа «поощрение-наказание», то есть правильная реакция системы на предъявленную ситуацию запоминается и используется для организации контролируемых изменений динамических свойств системы управления. В зависимости от способов накопления опыта указанные системы разделяют на обучающиеся с поощрением и обучающиеся без поощрения (самообучающиеся) системы.

При построении адаптивных систем часто используют сочетание различных принципов. В этом случае создаются комбинированные системы управления, наделяемые полезными свойствами различных систем.

Наиболее простым вариантом реализации адаптивных систем являются системы с самонастройкой. В данной работе предложена структура системы управления соотношением «руда/вода» процесса измельчения в стержневой мельнице. В связи с тем, что система должна являться адаптивной с самонастройкой и самообучением, то в ней необходимо наличие

- модуля поиска для адаптации и нахождения оптимального значения при изменении внешних воздействий на объект управления и саму систему;
- модуля или блока памяти, для хранения предыдущего опыта оптимизации и имеющихся оптимальных настроек;
- модуля сравнения, для возможности обучения и улучшения хранимых значений.

Структурно систему можно представить схемой на рисунке 4.5.

Работу данной САУ можно описать следующим алгоритмом:

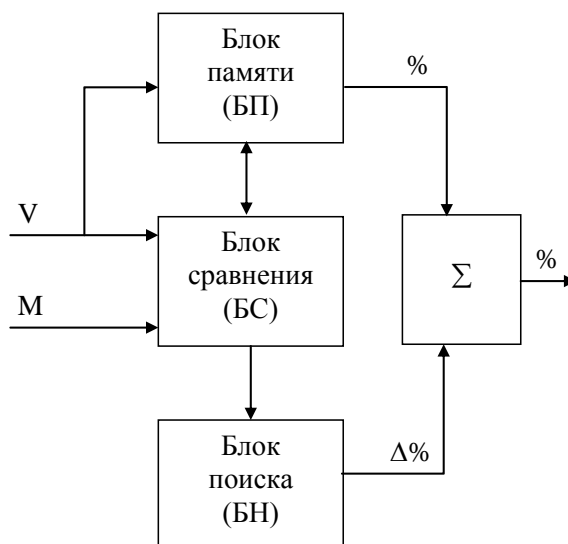
1) если значение Y при текущем X , хранимое в БП, лучше полученного с ОУ и уменьшается абсолютное значение их разности, то направления уточнения оптимального значения сохраняется. БС не выдает никаких сигналов. БН сохраняет знак ΔX . Значения БП не изменяются.

2) если значение Y при текущем X , хранимое в БП, лучше полученного с ОУ и увеличивается абсолютное значение их разности, то необходимо изменить направление уточнения оптимального значения. С БС подается сигнал на БН. БН меняет знак ΔX . Значения БП не изменяются.

3) если значение Y при текущем X , хранимое в БП, хуже полученного с ОУ, то

получено более точное оптимальное значение. БС передает в БП значение пары X и Y. БП сохраняет знак ΔX . Значения БП изменяются.

Соответственно, в любой момент времени выходной управляющий сигнал X САУ состоит из геометрической суммы сигнала X, как функции от Y, и сигнала поискового приращения ΔX , выдаваемого БН.



где V – входные параметры (объемы руд месторождений);
 M – параметры оптимизации;
 % – управляющий параметр (соотношение «руда/вода»).

Рисунок 4.5 – Структура САУ с самонастройкой и обучением

Представленная схема САУ работоспособна, в тех случаях, когда время переходных процессов в объекте управления и САУ будет много меньше времени значимого изменения входных параметров.

Так как значение соотношения руд в промпродукте, подаваемом на измельчение, значимо меняется не чаще 5-6 раз в сутки, а время переходного процесса в мельнице составляет минуты, то возможно пренебречь возникающей в результате переходных процессов погрешностью. Данное положение послужило обоснованием отказа от реализации механизма учета предыстории состояния ОУ.

Для работы представленной системы необходимо реализовать блок памяти, осуществляющий постановку в соответствие какому-либо значению входного воздействия значение выходного сигнала.

Получение цельного, непрерывного информационного пространства (или, что более практично, его значимой части в пределах которой могут изменяться параметры руд)

возможно методами теории приближения функций – аппроксимацией зависимости соотношения «руда/вода» от соотношений руд по известным данным.

Для применения в модуле памяти исследованы возможности применения как классических подходов (полиномиальная и сплайн интерполяция), так и подходов на основе применения нейророботных сетей.

При построении блока памяти требуется задействовать хранение N-1 измерений для задания процента руд с месторождений в подаваемой смеси, как минимум, одно измерение для задания значений оптимизируемых параметров и одно измерение для хранения оптимального значения соотношения «руда-вода». Таким образом, получается система из двух гиперповерхностей в (N+1)-мерном пространстве.

В процессе работы были выяснены несколько осложняющих факторов, присущих данной задаче. Это, во-первых, факторы, связанные с самим технологическим процессом – нестабильность свойств руд месторождений, неточность и неоднозначность исходных (экспериментальных) данных (в связи с износом мельниц и мелющих тел), неравномерность данных в исследуемом пространстве и прочее, и, во-вторых, факторы, связанные с информационной емкостью задачи.

При аппроксимировании поверхности пространства первоначально упор был сделан на классические методы: аппроксимированием полиномом, кубическими сплайнами.

Аппроксимация функции полиномом заключается в нахождении интерполянта

$$y_i = \sum_{k=0}^N c_k x^k \quad (4.2)$$

Для описания функции требуется определить N+1 неизвестных коэффициентов полинома и решить систему из N+1 линейных алгебраических уравнений. Для аппроксимации зависимости из M измерений требуется система из M·(N+1) уравнений.

Существенный недостаток аппроксимации полиномом – рост степени полинома (а в нашем случае системы полиномов) с ростом числа исходных точек. Причем поведение полиномов очень нестабильно – возможны значительные скачки приближающих функций, которые могут сильно расходиться с поведением моделируемых функции и увеличение степени полиномов не всегда позволяет решить эту проблему.

При аппроксимации кубическими сплайнами интервал определения функции разбивается на N отрезков. На каждом из отрезков интерполируемая функция представляется в виде полинома третьей степени

$$y_i = a_i + b_i(x_i - x_{i-1}) + c_i(x_i - x_{i-1})^2 + d_i(x_i - x_{i-1})^3, \quad (4.3)$$

где $i=1..N$.

При этом функция, ее первая и вторая производные должны быть непрерывны. Для описания функции требуется определить $4N$ неизвестных и решить систему из $4N-2$ уравнений.

Для аппроксимации зависимости из M измерений требуется система из $M \cdot (4N-2)$ уравнений.

Аппроксимирование сплайнами – метод, дающий более стабильный результат, однако имеющий свои недостатки. Во-первых, это достаточно громоздкий вид результирующих функций. Во-вторых, метод испытывает известные трудности в случае иррегулярных входных данных. В-третьих, объем сплайн-коэффициентов подчас превышает объем исходных данных, и это приводит к значительным вычислительным нагрузкам.

К тому же все эти методы обладают следующим недостатком – в процессе работы оптимизирующая САР должна при поступлении новых, не имеющих в базе, данных производить их накопление и, соответственно, уточнение использующих аппроксимирующих функций. При этом возникает не решаемая классическими методами проблема пластичности данных – изменение значения даже в одной точке приводит к пересчету значения всех коэффициентов функции

Проблемами применения методов является ресурсоемкость алгоритмов настройки и отсутствие возможности перенастройки отдельного фрагмента зависимости при дрейфе параметров. Эти причины послужили одним из факторов причины отказа от выбора использования классических методов в блоке памяти САУ.

В области систем искусственного интеллекта достаточно давно используется аппарат искусственных нейроподобных сетей для аппроксимации различного вида зависимостей. ИНС представляют собой распределенные и параллельные системы, способные к адаптивному обучению путем анализа положительных и отрицательных воздействий при подаче обучающей выборки. В процессе дальнейшей работы сеть, опираясь на данные обучающей выборки и полученные знания, будет формировать новые значения.

Тот факт, что для оптимизирующей САР, в принципе, не важно знание аппроксимирующей зависимости (т.е. формализации знаний), а достаточно знание только достоверных значений аппроксимируемых параметров, послужил дополнительным плюсом в выборе этого направления исследования.

В настоящий момент для аппроксимации зависимостей могут быть использованы различные конфигурации сетей (сети прямого и обратного распространения ошибки, сети радиального базиса и другие) или спроектированы собственные архитектуры ИНС и другие.

Поэтому в дальнейшей работе исследованы возможности применения нейросетевых методов: сетей с обратным распространением ошибки (Neural Network with Back Propagation Training Algorithm – NNwBPTA), сетей встречного распространения (Counter Propagation Network – CPN или Hecht-Nielsen Neurocomputer) и сетей радиальных базисных функций (Radial Basis Function Network – RBFN).

Первой исследованной на применимость нейросетью была сеть с обратным распространением ошибки (Neural Network with Back Propagation Training Algorithm – NNwBPTA). NNwithBPTA построена на основе многослойных персептронов, которые были предложены и исследованы в 1960-х годах Розенблаттом, Минским, Пейпертом и др. В середине 1980-х годов был предложен эффективный алгоритм обучения многослойных персептронов, основанный на вычислении градиента функции ошибки и названный обратным распространением ошибки.

В NNwithBPTA применяются несколько вариантов сигмоидальных передаточных функций: функция Ферми, рациональная сигмоида или гиперболический тангенс.

Функция Ферми (экспоненциальная сигмоида):

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-2as}} \quad (4.4)$$

где s – выход сумматора нейрона,
 a – некоторый параметр.

Рациональная сигмоида:

$$f(s) = \frac{1}{|s| + a} \quad (4.5)$$

Гиперболический тангенс:

$$f(s) = \operatorname{th}\left(\frac{s}{a}\right) = \frac{e^{\frac{s}{a}} - e^{-\frac{s}{a}}}{e^{\frac{s}{a}} + e^{-\frac{s}{a}}} \quad (4.6)$$

Перечисленные функции относятся к однопараметрическим. Значение функции зависит от аргумента и одного параметра, используются также и многопараметрические

передаточные функции, например:

$$f(s) = p_1 \frac{s}{|s| + p_2} + p_3 \quad (4.7)$$

Сигмоидальные функции являются монотонно возрастающими и имеют отличные от нуля производные на всей области определения. Эти характеристики обеспечивают правильное функционирование и обучение сети.

Наиболее эффективной передаточной функцией является рациональная сигмоида. Для вычисления гиперболического тангенса требуются большие вычислительные затраты.

Функционирование многослойной нейронной сети осуществляется в соответствии с формулами:

$$\begin{aligned} s_{i_q} &= \sum w_{i_q, i_{q-1}} w_{i_{q-1}} - b_{i_q} & i_q &= 1..N_q & m &= 1..L \\ y_{i_q} &= f(s_{i_q}) & i_q &= 1..N_q & m &= 1..L \end{aligned} \quad (4.8)$$

где s – выход сумматора,
 w – вес связи,
 y – выход нейрона,
 b – смещение,
 i – номер нейрона,
 N – число нейронов в слое,
 m – номер слоя,
 L – число слоев,
 f – функция активации.

При решении поставленной задачи сетью такого типа в качестве функций активации нейронов использованы два вида функций: функция Ферми (экспоненциальная сигмоида) и рациональная сигмоида. От еще одного часто встречающегося варианта функции активации – гиперболического тангенса – было принято решение отказаться сразу из-за большой вычислительной нагрузки. Как и первый, так и второй вариант обеспечили решение задачи. Вариант с функцией активации вида рациональная сигмоида обеспечил более быстрое обучение, но все же не применимо на практике из-за значительных затрат времени. В настоящий момент существуют более быстрые алгоритмы обучения данного вида сети, чем использованные в работе. Возможно, применение данных алгоритмов позволит сделать

NNwithBPTA применимой для практического использования в оптимизирующих САР.

Вторым вариантом была попытка применить сеть встречного распространения (Counter Propagation Network – CPN или Hecht-Nielsen Neurocomputer). Данный вид сети разработан Р. Хехт-Нильсеном в 1986 г. В CPN объединены две нейропарадигмы: самоорганизующаяся карта Кохонена и звезда Гроссберга. Считается, что в человеческом мозге именно соединения модулей различной специализации позволяют выполнять требуемые вычисления.

В процессе обучения сети встречного распространения входные векторы ассоциируются с соответствующими выходными векторами. Эти векторы могут быть двоичными или непрерывными. После обучения сеть формирует выходные сигналы, соответствующие входным сигналам. Обобщающая способность сети дает возможность получать правильный выход, когда входной вектор неполон или искажен.

В режиме обучения на вход сети подается входной сигнал и веса корректируются, чтобы сеть выдавала требуемый выходной сигнал.

Слой Кохонена функционирует по правилу «победитель получает все». Для данного входного вектора только один нейрон этого слоя выдает логическую единицу, все остальные – нули. Выход каждого нейрона Кохонена является просто суммой взвешенных элементов входных сигналов.

Выходы нейронов слоя Гроссберга также являются взвешенными суммами выходов нейронов слоя Кохонена. Каждый нейрон слоя Гроссберга выдает величину веса, который связывает этот нейрон с единственным нейроном Кохонена, чей выход отличен от нуля.

На этапе предварительной обработки входных сигналов осуществляется нормализация входных векторов. На этапе обучения слой Кохонена классифицирует входные векторы в группы схожих. Это достигается с помощью такой подстройки весов слоя Кохонена, что близкие входные векторы активируют один и тот же нейрон данного слоя. Какой именно нейрон будет активироваться при предъявлении конкретного входного сигнала, заранее трудно предсказать, так как слой Кохонена обучается без учителя.

Затем задачей слоя Гроссберга является получение требуемых выходов. Обучение слоя Гроссберга – это обучение с учителем. Выходы нейронов вычисляются как при обычном функционировании. Далее каждый вес корректируется лишь в случае, если он соединен с нейроном Кохонена, имеющим ненулевой выход. Величина коррекции веса пропорциональна разности между весом и требуемым выходом нейрона Гроссберга.

Не смотря на то, что CPN прошла процесс обучения значительно быстрее NNwithBPTA, добиться достоверных или хотя бы применимых результатов не получилось. На наш взгляд, причина неудачи связана с тем, что не было найдено оптимальное количество

числа нейронов в слоях сети.

Третьим и самым удачным вариантом была система, состоящая из сетей радиальных базисных функций (Radial Basis Function Network – RBFN).

Под парадигмой RBFN понимается архитектура, предложенная Moody и Darken в 1989 г. Сеть содержит два слоя нейронов: скрытый и выходной – рисунок 4.6.

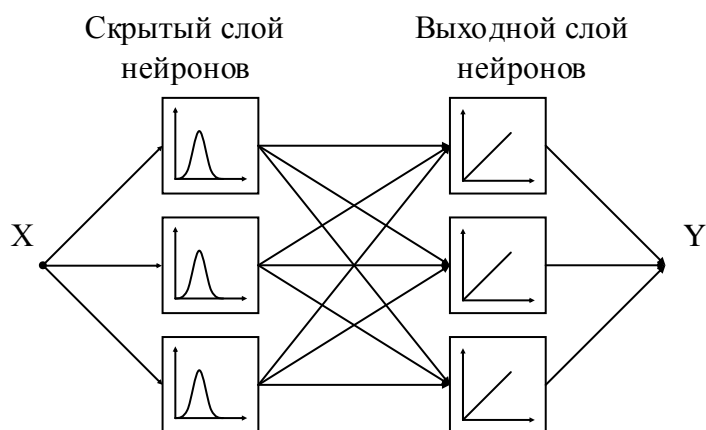


Рисунок 4.6 – Сеть радиальных базисных функций

В общем случае под термином RBFN понимается нейронная сеть, которая содержит слой скрытых нейронов с радиально симметричными активационными функциями, каждый из которых предназначен для хранения отдельного эталонного вектора (рисунок 4.7).

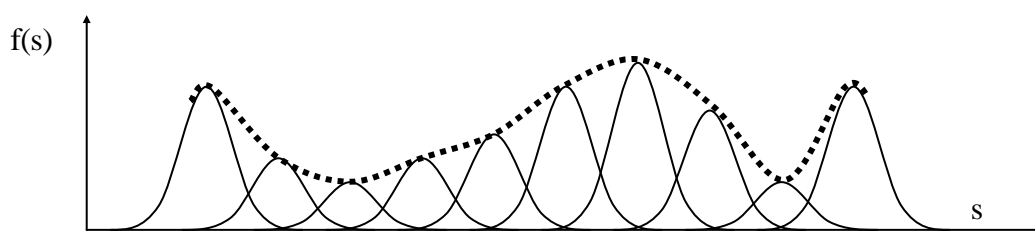


Рисунок 4.7 – Получение результирующей функции как суммы функций нейронов скрытого слоя

На практике в различных задачах наиболее часто применяются следующие виды радиально-базисных функций:

- $f(s) = s$ – степенная RBF. Аналог интерполяции полиномом;
- $f(s) = s \cdot \ln(s)$ – thin-plate spline. Используется для интерполяции гладких функций двух переменных, так как обеспечивает наиболее гладкое приближение;

- $f(s) = e^{-as^2}$ – гауссиан. Локализована вокруг центра;
- $f(s) = \sqrt{s^2 + c^2}$ – мультиквадратичная функция. Локализована вокруг центра.

Нейроны скрытого слоя соединены по полносвязной схеме с нейронами выходного слоя, которые осуществляют взвешенное суммирование. Для нахождения значения весов от нейронов скрытого к выходному слою используется линейная регрессия.

Во многих источниках говорится, что сеть радиального базиса уверенно функционирует только с теми образами, которые были «предъявлены» в процессе создания. Однако сеть показала достаточно высокую точность и в других точках. Отличительной особенностью данного вида сетей является то, что они не имеют процесса обучения, а настраиваются один раз в процессе создания. Вычислительная сложность процесса настройки по сравнению с обучением незначительна. Соответственно, при получении новых данных сеть может быть просто перестроена заново.

Сеть RBFN показала наилучшую точность и достаточно высокое, по сравнению с другими видами нейросетей и алгоритмов аппроксимации, время перенастройки. Этим и обосновано ее применение в блоке памяти.

4.4 Выводы по разделу

Общим и сильным математическим аппаратом аналитического описания, моделирования реальных сложных, нелинейных, инерционных, с элементами запаздывания технологических объектов управления является аппарат уравнений состояния. Моделирование таких объектов осуществляется аппроксимацией, основанной на выборе наиболее существенных факторов, влияющих на состояние и поведение объекта.

Учет второстепенных, трудно поддающихся выделению и формализации детерминированных и стохастических факторов, не сформулированных вербально, но влияющих на состояние и поведение объекта управления, позволит создавать системы управления, например, на основе ИНС, которые, являясь надстройкой над существующей классической детерминированной системой управления, будут способны осуществлять тонкую подстройку объекта управления на оптимум функционирования.

Для построения адаптивной оптимизирующей САУ предложена структура, состоящая из блока памяти, блока поиска и блока сравнения. Для реализации в блоке памяти исследована применимость как классических методов аппроксимации многомерных

зависимостей, таких как аппроксимация полиномом и аппроксимация сплайнами, так и нейросетевых методов: сетей с обратным распространением ошибки – NNwBPТА, сетей встречного распространения – CPN и сетей радиальных базисных функций – RBFN.

Сеть RBFN показала наилучшие результаты, что и явилось причиной ее использования при реализации программной модели системы управления.

5 Разработка модели системы управления технологическими процессами, построенной на основе искусственных нейрноподобных сетей

5.1 Разработка программной модели существующего технологического процесса как эталонной системы

В настоящее время для программного имитационного моделирования разработано большое количество специальных языков (GPSS, MATLAB, SLAM, GASP, SIMSCRIPT и др.). Не будем останавливаться на особенностях имитационного моделирования с помощью этих языков – достаточно хороший анализ этих и других языков имитационного моделирования приведен в работах [28, 29, 30]. Эти языки (и их модификации), как правило, написаны или базируются на других языках типа: ассемблер, фортран, паскаль или других языках высокого уровня. При этом авторы разработок этих языков в качестве основных положительных качеств своих разработок зачастую отмечают простоту и компактность разрабатываемых моделей и отсутствие необходимости в изучении достаточно сложных языков программирования, которые послужили базовой основой для этих разработок [32].

При выборе среды программной реализации модели произведен краткий анализ трех направлений программного обеспечения для имитационного моделирования: использование языков высокого уровня (метод ЯВУ), использования системы имитационного моделирования SIMPAS и использования системы MATLAB совместно со средой визуально-ориентированного программирования SIMULINK.

Результат анализа сведен в таблицу 5.1. Для программной реализации данной модели решено использовать пакет MATLAB с toolbox визуально-ориентированного программирования SIMULINK.

Реальные объекты, в том числе и выбранный как основной на данном этапе исследования процесс – процесс измельчения, являются динамическими системами. Они функционируют во времени, в них протекают определенные процессы, которые можно представить чередой сменяющих друг друга состояний. Время является неизменным атрибутом таких систем и, следовательно, его необходимо моделировать наряду с другими параметрами.

При моделировании реальные параметры объекта заменяются модельными. Это касается и реального времени: в ходе моделирования оно представляется некоторым искусственным (системным) временем, которое обычно называют модельным временем. Существуют два классических способа его продвижения: «принцип Δt » и «принцип δz ». Особенности механизмов продвижения модельного времени приведены на рисунке 5.1.

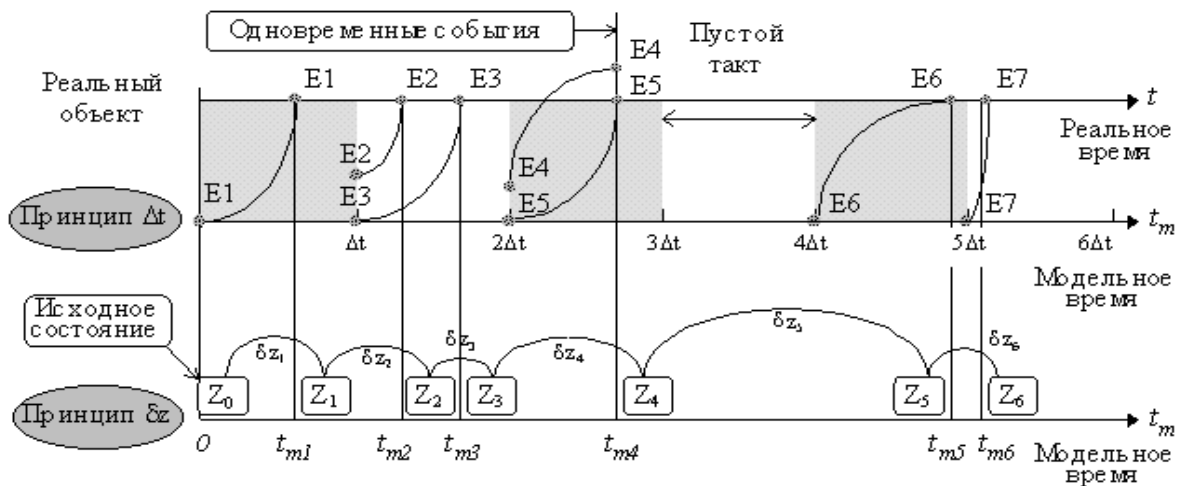


Рисунок 5.1 – Механизмы продвижения модельного времени

При простоте реализации принципа продвижения модельного времени « Δt » его существенным недостатком является то, что большая часть процессорного времени тратится на обработку «пустых» интервалов (рисунок 5.1). Их число резко возрастает при попытке более точно смоделировать реальные события, так как для этого надо уменьшать длительность такта принципа Δt .

Принцип δz более экономичен к ресурсам используемой вычислительной системы, однако его значительно труднее реализовать в виде программной реализации.

В рамках данной работы решено использовать механизм продвижения модельного времени по принципу Δt .

Имитационный моделирующий алгоритм воспроизводит сам процесс-оригинал, имитирует элементарные явления, составляющие процесс с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени.

Сущность имитационного метода моделирования состоит в реализации на ЭВМ специального алгоритма, который воспроизводит формализованный процесс сложной системы. Моделирующий алгоритм позволяет по исходным данным, содержащим сведения о начальном состоянии процесса (входной информации) и его параметрах, получить информацию о состояниях процесса в произвольные моменты времени.

Имитационный моделирующий алгоритм делится на три основных подалгоритмов и их функции:

- 1) Моделирование элементарных подпроцессов исследуемого процесса.
- 2) Учет взаимодействия элементарных подпроцессов и объединение их в единый процесс.
- 3) Обеспечение согласованной работы отдельных подалгоритмов при реализации

модели на ЭВМ.

Таблица 5.1 – Результаты анализа ПО для имитационного моделирования

Метод ЯВУ (языки программирования Pascal, C, C++ и их модификации)	Система имитационного моделирования SIMPAS	Система визуально-ориентированного программирования SIMULINK примененная для имитационного моделирования:
<p>1. Языки достаточно сложны в изучении, причем этим отличается в большей степени язык C++.</p> <p>2. Язык Pascal по сравнению с языками типа C, C++ отличается меньшей сложностью изучения и программирования, хотя версия этого языка с указателями, объектами и т. п. по сложности программирования приближается к языку C++, а система DELPHI по своим возможностям близка к системе Borland C++ Builder;</p> <p>3. По сравнению с системами моделирования SIMPAS и SIMULINK метод ЯВУ отличается хорошей гибкостью в использовании различных подходов моделирования.</p>	<p>1. Система сравнительно проста в изучении.</p> <p>2. При программировании требуется знать не только саму систему моделирования SIMPAS, но и язык программирования Pascal.</p> <p>3. Система, выигрывая в простоте изучения и программировании, проигрывает в гибкости использования различных подходов моделирования.</p>	<p>1. SIMULINK отличается сравнительной сложностью (по сравнению с системой имитационного моделирования SIMPAS) при изучении и простотой при программировании.</p> <p>2. По удобству графического пользовательского интерфейса, по обилию компонентов в множестве библиотек, разнообразию виртуальных средств регистрации и визуализации результатов моделирования эта система выгодно отличается от других систем моделирования.</p>

Влияние случайных факторов на течение процесса имитируется с помощью случайных чисел с заданными или вырабатываемыми в процессе моделирования вероятностными характеристиками.

Согласно имитационного моделирующего алгоритма на первом этапе реализации имитационной модели необходимо произвести моделирование объекта управления – мельницы, двух САУ ТП и задатчиков, имитирующих работу оператора данного процесса.

Этап реализации модели объекта управления можно разбить на следующие части:

- получение зависимостей;
- построение имитационной модели.

Как уже говорилось, зависимости «вход-выход» могут быть представлены в виде аппроксимирующих функций. К настоящему моменту времени накоплен большой массив данных «вход-выход» с контрольной аппаратуры о работе технологического оборудования фабрики ММС АО «ССГПО» в виде протоколов работы (например, протоколирование являлось одной из функций системы «Contronics»).

Если проанализировать эти данные по первой стадии измельчения, то можно сказать, что имеется система зависимостей, имеющих вид гиперповерхностей в $(N+1)$ -мерном пространстве, где:

- $(N-1)$ измерений задействовано для описания объемов руд с различных N месторождений как доли в процентах от общего объема (зная, что суммарный объем руд составит 100% и, зная суммарное значение поступивших объемов с $N-1$ месторождения можно косвенно задать и объем руды с N -ого месторождения);

- одно измерение – для задания значение соотношения «руда-вода» к объемам этих руд в данной точке);

- одно измерение для задания выходного параметра.

В реальной ситуации, например на АО «ССГПО», на практике используются только часть возможных сочетаний объемов руд и, соответственно, в частных случаях, можно отказаться от использования всей гиперповерхности, а взять только ее используемые фрагменты. Это, естественно, в дальнейшем снизит информационную емкость модели.

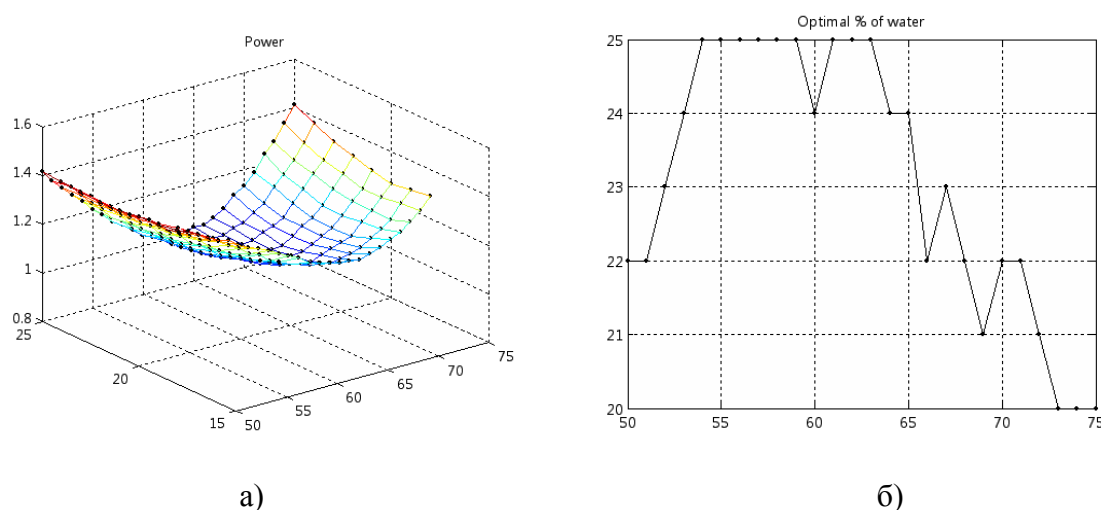
Из-за сложности визуального отображения и восприятия гиперпространства с числом измерений более трех в работе решено ограничить модель соотношением руд двух месторождений – базового и условного (сумма объемов руд всех остальных месторождений). Это позволит производить визуальное отображение в виде трехмерной поверхности.

Согласно теории планирования эксперимента при аппроксимации зависимости энергопотребления от соотношения «руда/вода» и соотношения руд различных месторождений число исходных наблюдений определяется из количества влияющих факторов и числа их уровней. В данном случае имеются два фактора с $22-15=7$ уровнями и $75-50=25$ уровнями. Согласно плана полнофакторного эксперимента число наблюдений

должно быть не менее $25 \cdot 7 = 175$. То же самое относится и к числу наблюдений для аппроксимации производительности мельницы по готовому классу.

Так как данные протоколов работы оборудования соответствуют различным планам производства решено привести значения энергопотребления и производительности по готовому классу к удельной энергоемкости и удельной производительности.

Моделирование и/или аппроксимация поверхностей по неравномерно расположенным данным относительно координатной сетки всегда более сложна, поэтому первоначально данные протоколов были обработаны и приведены к равномерному расположению. На рисунке 5.2а и 5.3 отображены узловые точки, соответствующие обработанным данным протоколов для зависимостей удельного энергопотребления и удельной производительности по готовому классу.



- а) зависимость энергопотребления мельницы от соотношения руд месторождений и соотношения «руда/вода»
- б) оптимальное соотношение «руда/вода» для различных соотношений руд месторождений

Рисунок 5.2 – Зависимость энергопотребления процесса измельчения от соотношения «жидкое-твердое»

График (рисунок 5.2а) зависимости энергопотребления мельницы от соотношения двух руд и воды в питании построен в пакете MATLAB методом аппроксимации обработанных данных протоколов работы фабрики ММС АО «ССГПО». Для аппроксимации использована n-мерная табличная интерполяция – функция «`interp(...)`». Для представления данных использованы средства визуального отображения «`plot3(...)`» и «`mesh(...)`».

На рисунке 5.2б показано оптимальное процентное содержание воды в питании мельницы для данных соотношений руд. По интерполированной поверхности были найдены минимальные значения энергопотребления для каждого соотношения руд. Значения содержания воды, соответствующие этим точкам и приведены на данном графике. Значимое влияние на процесс измельчения оказывает и состояние мельницы, физический износ ее компонент – этим частично и объясняются пульсации на графике.

Аналогичным образом произведено аппроксимирование и зависимости производительности мельницы (рисунок 5.3).

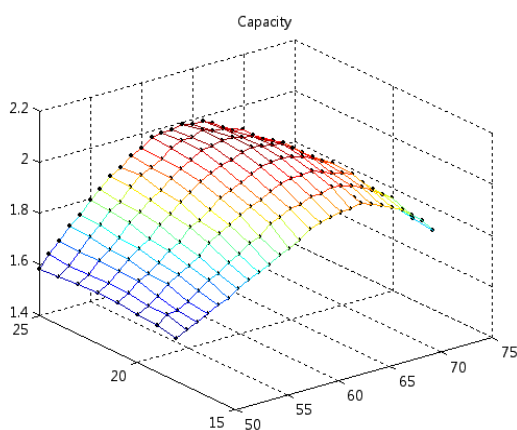


Рисунок 5.3 – Зависимость производительность по готовому классу от соотношения «руда/вода»

На рисунке 5.4 приведен фрагмент программного кода m-файла пакета MATLAB для аппроксимации.

Таким образом, модель объекта управления будет представлять из себя две параллельные функции аппроксимации (при моделировании большего числа процессов, соответственно, увеличивается и число функций – взаимовлиянием параметров друг на друга решено пренебречь из-за значительно большего влияния входных параметров), относительные значения выходов которых будут умножаться на вес поступающей в мельницу руды. Модель мельницы в toolbox «SIMULINK» представлена на рисунке 5.5.

Согласно полученным математическим моделям САУ расходом руды и САУ расходом воды имитационные модели данных САУ будут заданы пропорциональными звеньями с коэффициентом умножения равным «1».

```

% Ore1 - percent of first ore in mill. Ore=Ore1+Ore2=100%
% Water - percent of water in mill. Ore+Water=100%
plot3(Ore1,Water,P,'.k')
...
P1=interp( Ore1,Water,P,Ore1,Water);
mesh(Ore1,Water,P1)

```

Рисунок 5.4 – Фрагмент программного кода m-файла для аппроксимации зависимости энергопотребления от соотношения «руда/вода»

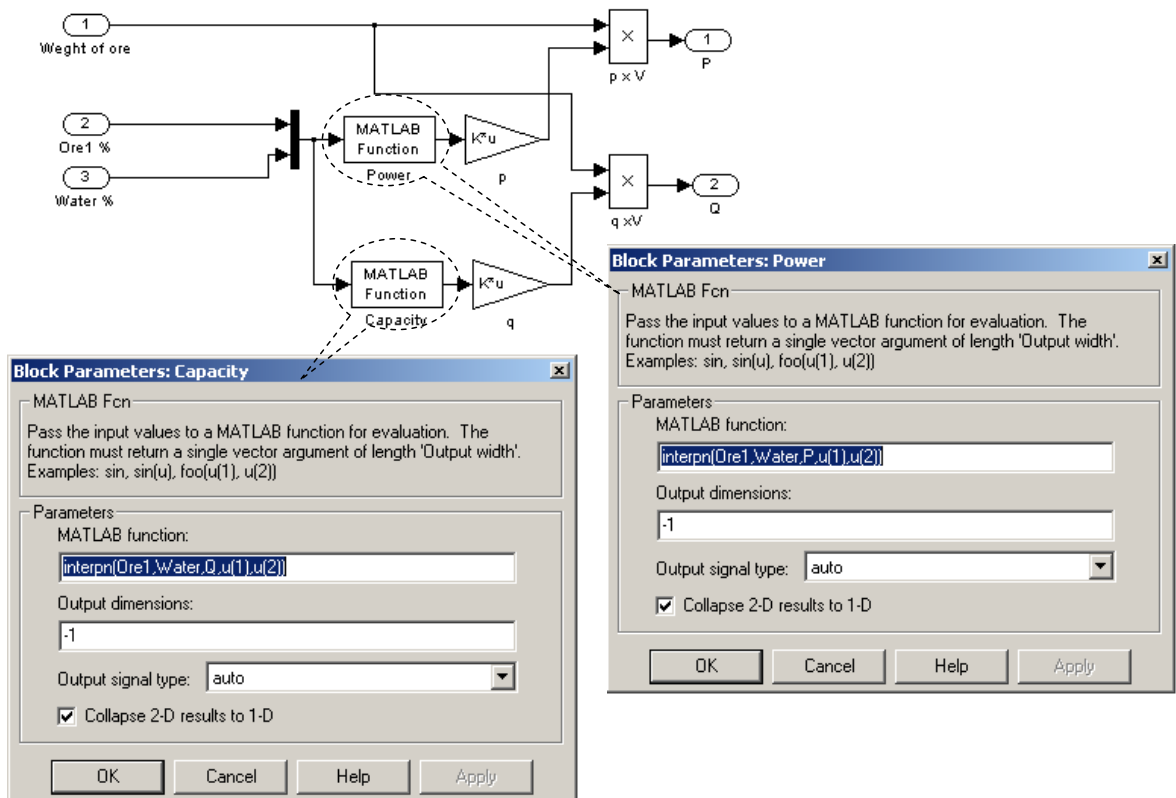


Рисунок 5.5 – Подсистема модели процесса измельчения – мельница как объект управления

Для задания действий оператора использованы генераторы сигналов. В качестве задатчика задания по руде могут быть использованы как генератор случайных чисел с заданными границами (моделирование реальной производственной ситуации с изменяющимися объемами) или как задатчик фиксированного числа (при моделировании упрощенной ситуации). Для возможности переключения режимов использован ручной коммутатор. В качестве генератора соотношений руд использован генератор случайных чисел. В качестве задатчика соотношения «руда/вода» использован задатчик фиксированного числа. Модель блоков задания действий оператора представлена на рисунке 5.6.

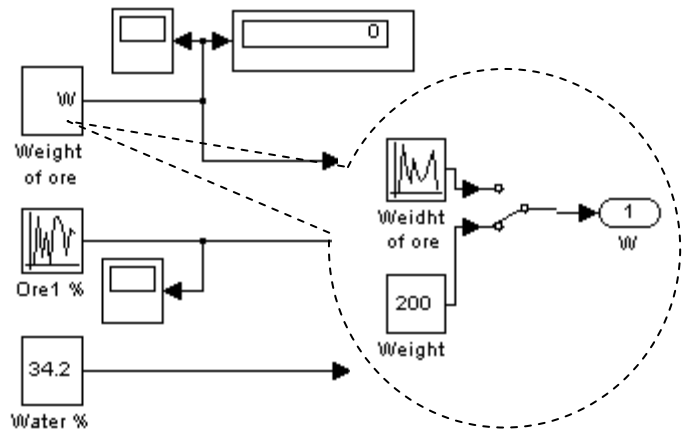


Рисунок 5.6 – Блоки задания действий оператора

Используя полученную модель объекта управления, зная функции САУ ТП и входные параметры (объем руд с различных месторождений и объем воды) построена модель всего процесса измельчения (рисунок 5.7).

Результатом является программная реализация модели процесса измельчения по параметрам энергоемкость, производительность по готовому классу – соотношение руд месторождений и содержания воды.

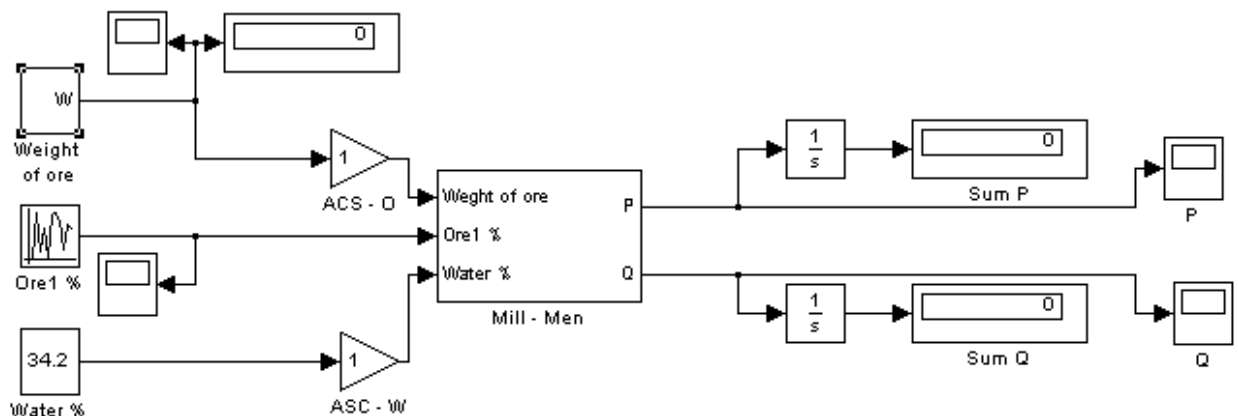


Рисунок 5.7 – Модель процесса измельчения

Любая модель после ее разработки должна быть оценена. Исследованию различных аспектов проблемы оценки моделей уделяли и уделяют много внимания известные учёные и специалисты в области имитационного моделирования. Работы раннего периода в этой области представлены публикациями Р. Шеннона [44], Н.П. Бусленко [45-47], Дж. Клейнена [48], И.Н. Коваленко [50], Ю.Г. Поляка [52], В.В. Калашникова, А.А. Вавилова, С.В. Емельянова, Б.Ф. Фомина и многих других.

В середине 90-х годов прошлого века американские специалисты выполнили цикл работ применительно к проблеме оценки достоверности в рамках соответствующих научно-технических программ и программ Министерства обороны США. На зимней конференции по имитационному моделированию в 1998 году О. Балчи представил обобщенные результаты исследований по указанному вопросу, сформулированные как своего рода методолого-технологические стандарты решения указанной проблемы [8]. Вопросы практического использования этих стандартов рассматривались в докладах Р. Сэджента, Дж. Карсона, А. Ло, М. МакКомаса на зимних конференциях 2001-2002 гг. [34, 35, 36]. Ими были предложены различные методологические схемы, согласно которым реализация задачи оценки достоверности есть многоэтапный итерационный процесс получения доказательства правильности и корректности выводов (или, по крайней мере, достижение приемлемого уровня уверенности в правильности таких выводов) относительно поведения исследуемой (проектируемой) системы. Наиболее известными являются схемы О. Балчи и Р. Сэджента [37].

В данной работе оценка модели произведена на основании принципов, предложенных О.Балчи.

Шаг моделирования является одним из основных параметров процесса моделирования, определяющим точность модели. Для систем с механизмом продвижения модельного времени по принципу Δt , как правило, шаг модельного времени принимается на порядок меньше чем время между двумя соседними значимыми событиями в моделируемой системе. Для имитационной модели процесса измельчения шаг моделирования выбран равным 1/100 часа.

Так как используется статическая модель и в системе отсутствуют неустановившиеся участки работы модели, то отпадает необходимость отсечения участков разгона модели.

Как уже говорилось выше для оценки модели необходимо провести экспериментирование на всех возможных значениях, для построенной модели число прогонов равно 175. Анализ данной модели по параметру точность произведен на основании сравнения данных, полученных в результате моделирования работы системы, и данных, полученных в результате протоколирования работы оборудования.

Максимальное абсолютное отклонение моделируемой потребляемой мощности составляет 0,0612 МВт.

Таким образом, максимальное относительное отклонение (погрешность модели) составляет 5,1 процента. Анализ распределения погрешности в зависимости от исходных данных показал, что погрешность возрастает к границам моделируемого интервала.

Аналогично произведена оценка точности модели по параметру производительность

по готовому классу. Погрешность модели по данному параметру составила 4,8 процента.

Резюмируя вышеизложенное, можно сказать – разработана модель процесса измельчения и на основании ее оценки доказана адекватность данной модели реальной системе в рамках поставленной задачи.

5.2 Разработка оптимизирующей САУ на основе нейрорегулятора

Согласно, существующей схеме управления технологическим процессом измельчения (рисунок 3.12) разрабатываемый блок должен заменить оператора ТП. Поэтому в нем необходимо реализовать функции задания на расход руды и задания оптимального соотношения «руда/вода» в соответствии с соотношением полученных руд.

Для создания данной системы необходимо реализовать два блока: автоматическое управление расходом руды и соотношением «руда/вода».

В предыдущем этапе работы, по результатам анализа адаптивных систем предложено, что в данной работе система управления соотношением «руда/вода» процесса измельчения в стержневой мельнице будет являться комбинацией самообучающейся системы и системы с поиском.

Программная реализация модели выполнена в среде визуального программирования Simulink (рисунок 5.8).

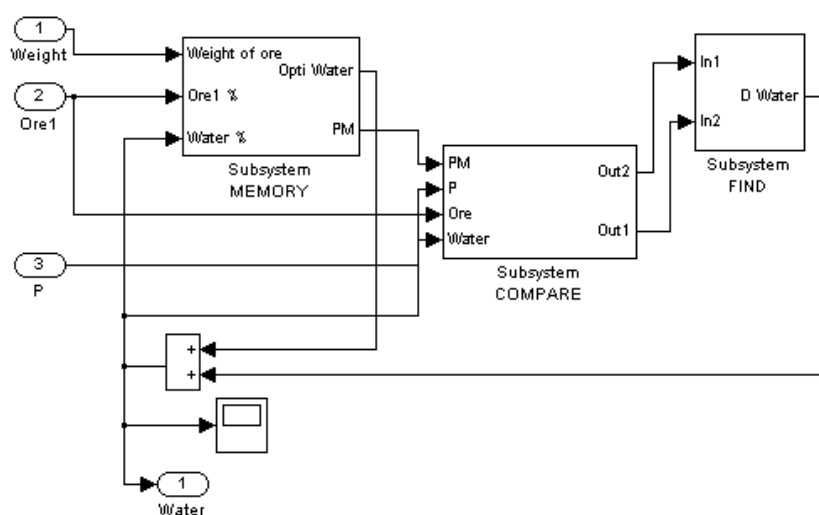


Рисунок 5.8 – Модель САУ

В результате обработки данных протоколов работы фабрики ММС АО «ССГПО» получен график соотношения «руда/вода» от соотношения руд в питании. Полученные значения являются дискретными и не охватывают все возможные сочетания руд. Однако

САУ должна функционировать в непрерывном пространстве значений. Поэтому для ее функционирования необходимо интерполировать значения для задаваемых точек. Как уже говорилось, в качестве аппарата интерполяции предлагается использовать искусственную нейрноподобную сеть с радиально-базисными функциями активации. Для этого на предварительном этапе создана RBFN, реализующая зависимость оптимального соотношения «руда/вода» от соотношения руд в питании мельницы. Для этого в пакете MATLAB, на этапе предварительной подготовки, создана следующая функция:

```
net=newrb(Ore,OptimalWater);
```

где net – идентификатор построенной нейросети;
 Ore – соотношение руд в питании мельницы;
 OptimalWater – оптимальное соотношение «руда/вода».

Для использования построенной сети радиально-базисной функции можно воспользоваться блоком «MATLAB function» пакета SIMULINK, реализующим функцию «Sim» с передачей идентификатора нейросети и значения текущего соотношения руд.

Модель блока памяти может быть представлена схемой, показанной на рисунке рисунок 5.9.

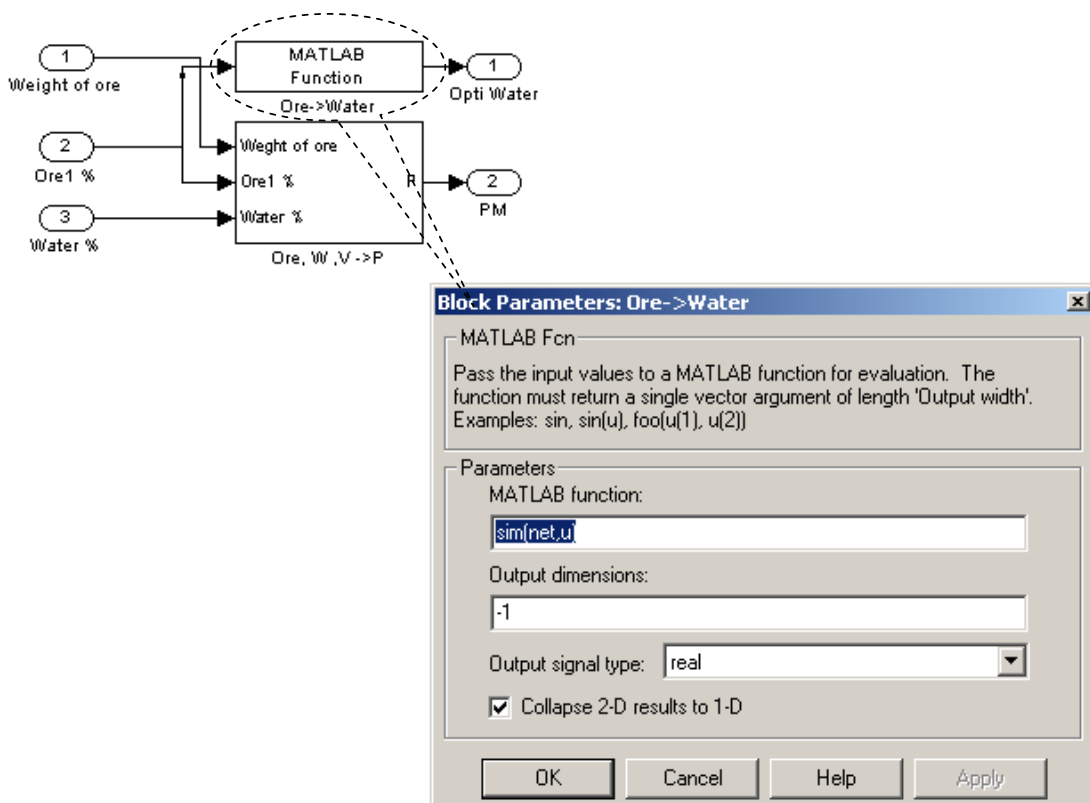


Рисунок 5.9 – Модель блока памяти

В соответствии с предложенным алгоритмом работы адаптивной САУ, блок сравнения должен выполнять две функции:

- отдавать команду на смену направления поиска оптимума;
- отдавать команду на переобучение блока памяти новому оптимальному значению и переобучить его.

Реализация первой функции основывается на выполнении двух условий. Во-первых, что предыдущее значение было лучше текущего и, во-вторых, что энергопотребление мельницы меньше спрогнозированного блоком памяти.

Реализация второй функции может быть разделена на два последовательных действия: определения условия необходимости переобучения (энергопотребление мельницы меньше спрогнозированного блоком памяти) и, непосредственно самого переобучения.

Для переобучения блока памяти разработана подсистема «ModifyNet» (рисунок 5.10), для которой написана m-функция в пакете MATLAB (рисунок 5.11).

В работе было решено отказаться от архитектур нейроподобных сетей, обладающих свойством пластичность, в пользу скорости пересоздания RBFN. Поэтому данная m-функция производит пересоздание нейроподобной сети с тем же самым идентификатором «net» по новым данным. В функции также происходит замена значения энергопотребления в точке с заданными соотношением руд месторождений и соотношением «руда/вода».

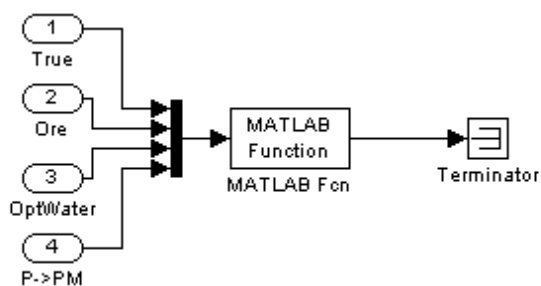


Рисунок 5.10 – Подсистема ModifyNet блока сравнения

```
function out=ModifyNet (F, Ore, W, PMx)
if F==1
    OptimalWater (Ore-49)=W;
    net=newrb (Ore, OptimalWater);
    PM (Ore-49, OptimalWater-29)=PMx;
end
out=1;
```

Рисунок 5.11 – Программный код m-функции ModifyNet

Итогом всего вышперечисленного является схема блока сравнения, представленная на рисунке 5.12.

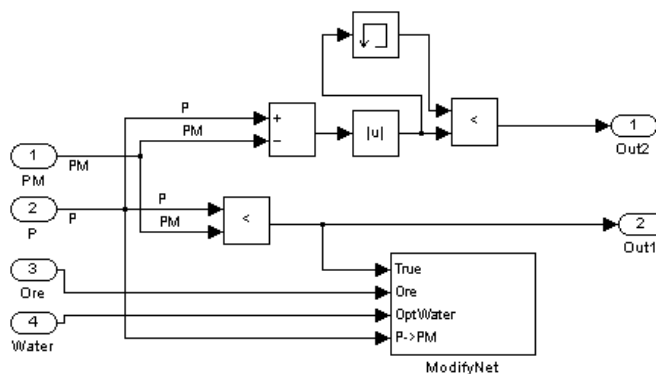


Рисунок 5.12 – Структура блока сравнения

Блок поиска является третьим основным компонентом адаптивной САУ. Его функцией является формирование отклонения для соотношения «руда/вода» с целью постоянного уточнения оптимума. Для предложенного алгоритма работы адаптивной САУ блок поиска формирует фиксированные значения отклонения. Направление уточнения оптимума задается с помощью знака отклонения. Для реализации этого основным элементом блока может являться коммутатор на два входа с управлением, реализованным на базе одного логического элемента «И».

Схема блока поиска представлена на рисунке 5.13.

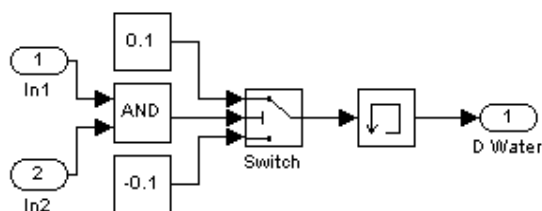


Рисунок 5.13 – Схема блока поиска

Компоновка этих трех блоков согласно схеме, представленной на рисунке 5.8, и сумматора (для сложения сигнала с блока памяти и отклонения с блока поиска) дает адаптивную систему автоматического регулирования соотношением «руда/вода» по параметру минимизации энергопотребления привода мельницы.

5.3 Исследование качества управления адаптивной САУ на основе нейрорегулятора по сравнению с эталонным процессом

Как правило, для технических систем коммерческого использования основным

показателем эффективности внедрения той или иной схемы автоматизации является снижение себестоимости продукции. Внедрение адаптивной системы автоматического управления процессом измельчения также преследует цель – снижение себестоимости продукции.

Исходя из этого, для оценки эффективности качества управления необходимо выделить параметры, влияющие на себестоимость процесса измельчения. Основным параметром, влияющим на себестоимость, будет являться энергопотребление мельницы. Так же значимым может оказаться такой параметр как изменение производительности мельницы по готовому классу.

Параметр, характеризующий изменение потребления воды в процессе измельчения, не может быть использован, так как процесс мокрого магнитного обогащения характеризуется добавлением воды и стабилизацией плотности пульпы на других этапах. Снижение себестоимости за счет экономии воды будет носить локальный характер только для процесса измельчения, но не будет значимым при комплексной оценке себестоимости всего процесса обогащения.

Такие параметры как износ футеровки барабана мельницы и мелющих тел, на построенных моделях оценить невозможно. Однако, если предположить, что процесс измельчения будет проходить в более оптимальных условиях, то меньше будет «холостой» работы и, соответственно, должен уменьшиться механический износ.

Имитационное моделирование является машинным экспериментом с моделью исследуемой системы. Эффективность использования экспериментальных ресурсов во многом зависит от плана эксперимента.

Основная задача планирования эксперимента получение необходимой информации о свойствах моделируемой системы с достаточной степенью точности и достоверности при ограниченных машинных ресурсах (времени, памяти и т.п.).

В настоящее время теория планирования эксперимента достаточно полно разработана [10,18,21,33]. Однако перенос этих результатов на область машинных экспериментов с моделями может иметь место только с учетом специфики моделирования систем на ЭВМ. Несмотря на то, что цели натуральных и машинных экспериментов совпадают между ними есть существенные различия. Поэтому при проведении машинного эксперимента важное значение имеет следующее:

- простота повторения эксперимента;
- возможность управления экспериментом с моделью;
- легкость варьирования исходных условий;
- наличие корреляции между последовательностью точек в процессе моделирования;

– трудности, связанные с определением интервала моделирования.

Для любого эксперимента, будь то машинный, либо натурный эксперимент важными моментами являются определение значимых факторов и границы их допустимых изменений, точности моделирования и числа прогонов модели.

Поэтому при планировании эксперимента, во-первых, необходимо задать границы изменения исходных значений. Так как входными параметрами для процесса измельчения являются план производства, соотношения руд различных месторождений в питании мельницы и соотношение «руда/вода», то необходимо задать допустимые границы их изменения.

Так как современные предприятия, как правило, для снижения себестоимости продукции загружают оборудование по максимуму, то значение параметра «план производства» предлагается задать константой со значением близким к максимальной производительности мельницы. Для стержневой мельницы МСЦ 3600×4500 с максимальной производительностью 230 тонн в час примем значение параметра «план производства» равным 200 тоннам в час.

Изменение соотношения руд в питании мельницы для исследуемого периода можно задать объемом руды первого месторождения. Соотношение руды этого вида в общем объеме руды в питании мельницы составляло от 50 до 75 процентов. Соответственно, интервал изменения данного параметра в машинном эксперименте необходимо также ограничить этими значениями.

Соотношение «руда/вода» по технологической инструкции может варьироваться в интервале от 30 до 40 процентов. Поэтому, чтобы не создавать условия недопустимые технологической инструкцией, граничными значениями изменения параметра «соотношение “руда/вода”» зададим 15 и 22 процентов от массы руды.

Для модели процесса измельчения с автоматизированным управлением соотношение «руда/вода», как правило, является константой. Поэтому для эксперимента значение этого параметра задано равным 34,2 процента. Такое значение этого параметра получено, исходя из максимальной производительности и минимальной энергоемкости процесса измельчения при равновероятных соотношениях руд различных месторождений.

Во-вторых, необходимо определить число реализаций эксперимента. В данном случае может быть предложено два решения: во-первых, произвести реализации всех возможных сочетаний факторов и, во-вторых, производить эксперимент со случайными значениями факторов, до тех пор, пока абсолютное значение разности между энергопотреблением за два периода не станет меньше заранее заданного значения.

Первое решение основывается на том, что число реализаций, обеспечивающих

требуемую точность, зависит от числа значимых параметров – факторов. Для процесса измельчения в рамках данной модели значимым фактором будет только соотношение руд различных месторождений. При разрешении равном 1 проценту данный фактор будет иметь 25 уровней.

Однако, система управления содержит блок уточнения оптимального значения, поэтому определенное влияние будет оказывать процесс постоянного поиска и уточнения оптимума.

Второе решение – итерационное – учитывает влияние адаптивной САУ, однако требует значительно больше машинных ресурсов для реализации.

Для сравнения качества управления двух систем – автоматизированного и автоматического управления соотношением «руда/вода» в процессе измельчения на полученных моделях – необходимо поместить эти две модели в идентичные условия и обеспечить идентичность исходных значений. Для обеспечения этого условия предлагается для их моделирования использовать одну рабочую область, а так же значения плана производства и соотношения руд подавать одновременно на обе системы.

Число реализаций эксперимента решено определять итерационно. Требуемая точность не может превышать точность модели процесса измельчения, поэтому в как максимум абсолютного значения разности между энергопотреблением за два периода примем 0,0612 МВт.

Таким образом, структура полученной объединенной модели для эксперимента получит вид, представленный на рисунке 5.14.

Графики энергопотребления мельницы и производительности при сравнении работы модели стрежневой мельницы при автоматическом адаптивном и автоматизированном управлении за 1 час работы приведены на рисунках 5.15 и 5.16.

На графиках непрерывной линией показаны энергопотребление и производительность мельницы при автоматизированном управлении, а пунктирной – при адаптивном автоматическом. Ступенчатый характер графиков объясняется использованием механизма продвижения модельного времени Δt . Единичные участки превышения энергопотребления и снижения производительности исследуемой системы по сравнению с эталонной вызваны работой в системе блока поиска при удалении от оптимального значения соотношения «руда/вода».

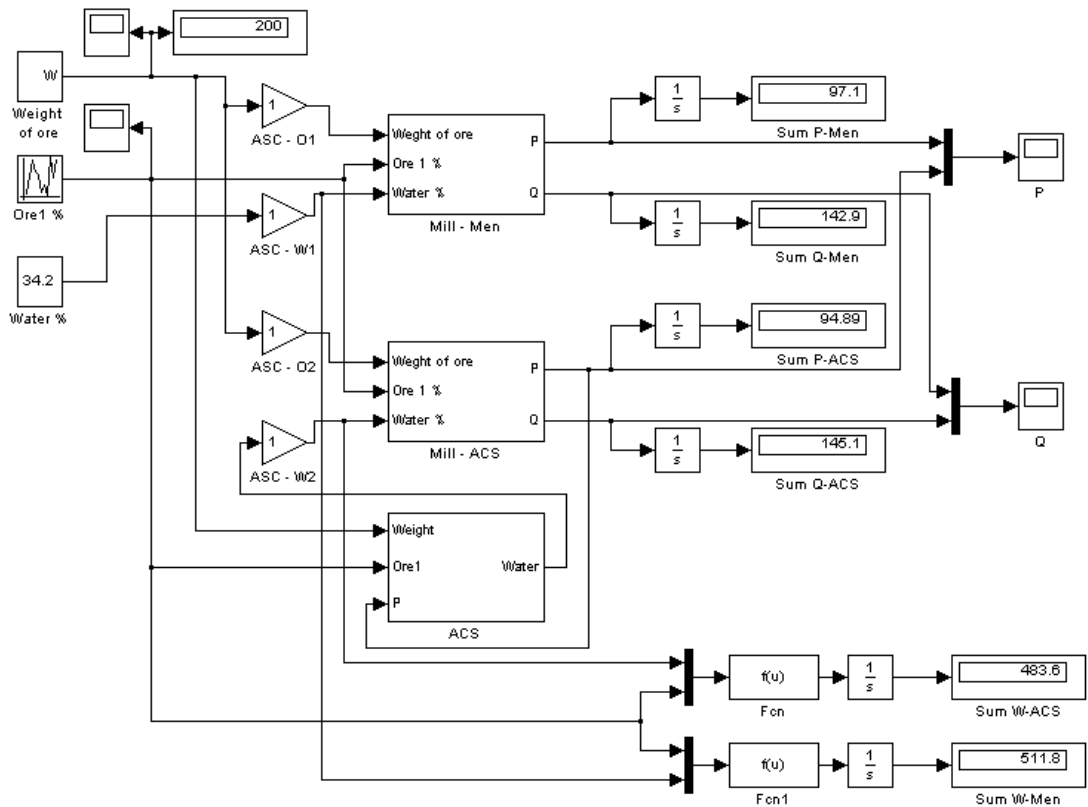


Рисунок 5.14 – Схема включения моделей процесса измельчения с автоматизированным и автоматическим управлением соотношением «руда/вода»

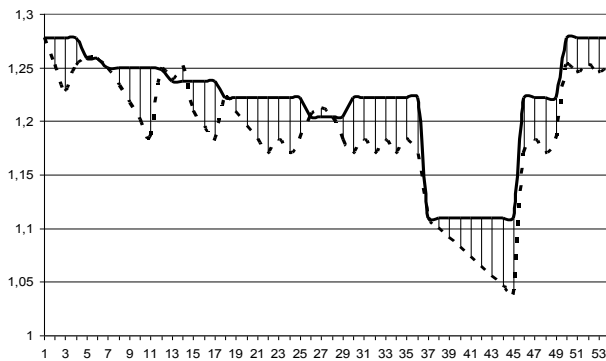


Рисунок 5.15 – График энергопотребления

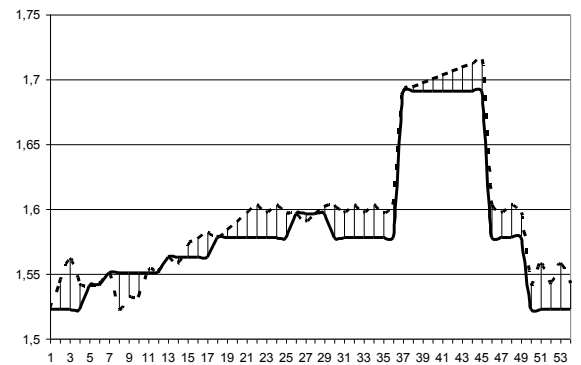


Рисунок 5.16 – График производительности

Суммарное энергопотребление модели мельницы при исследуемой системе управления по сравнению с эталонной меньше на 76 кВт·ч. Погрешность моделирования составляет 61,2 кВт·ч. Исходя из наихудшей ситуации (погрешность моделирования накладывается на экономию энергии) достоверным является факт экономии энергии в размере 15,8 кВт·ч. Таким образом, экономия энергопотребления одной мельницы в месяц составляет

$$\mathcal{E}_{\text{э/н(мес)}} = \mathcal{E}_{\text{э/н(час)}} \cdot T \cdot K = 15,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \cdot 24 \text{ часа} \cdot 30 \text{ дней} = 11,376 \text{ МВт} \cdot \text{ч} \quad (5.1)$$

Производительность мельницы по готовому классу также имеет тенденцию к росту, что характеризует улучшение качества управления процессом.

Как итог сравнения моделей можно сказать:

- модель является адекватной реальной системе в рамках решаемой задачи;
- моделирование произведено с погрешностью порядка 5 процентов, данная точность достигнута при реализации 175 прогонов модели;
- модель показывает снижение энергопотребления и прирост производительности процесса измельчения при использовании разработанной САУ по сравнению с АСУ.

Последний пункт доказывает, что разработанная адаптивная система автоматического управления технологическим процессом измельчения в условиях нестабильности входных параметров по сравнению с имеющейся автоматизированной системой управления более эффективна по параметру себестоимости продукции и ее внедрение может быть экономически оправдано.

5.4 Выводы по разделу

Для возможности исследования поведения разрабатываемой адаптивной САУ разработана модель процесса измельчения и на основании ее оценки доказана адекватность полученной модели реальной системе в рамках поставленной задачи. В рамках теории планирования эксперимента оценена точность полученной модели. Погрешность модели составила 5,1 процента.

По предложенной в разделе 4 структуре разработана модель «САУ – подсистема адаптации» на основе ИНС для процесса измельчения. Для этого спроектирована структура адаптивной системы управления соотношением «руда/вода».

Произведен анализ эффективности применения разработанной САУ на основе ИНС по сравнению с существующей схемой управления. Анализ произведен на данных модельного эксперимента. В результате доказано снижение энергопотребления мельниц в среднем на 379 кВт в сутки или на 6,9%. Что доказывает эффективность применения подобных адаптивных систем в управлении технологическими процессами.

6 Аппаратная реализация прототипа системы управления на основе ИНС

6.1 Анализ методов реализации систем управления

В настоящий момент на предприятиях отечественной и зарубежной горно-обогатительной промышленности существуют и функционируют два больших класса систем управления:

- аналоговые системы;
- цифровые системы;
- гибридные системы.

В условиях унификации систем управления, усложнения реализуемых законов управления, взаимосвязи и взаимовлияния процессов, использование аналоговых решений является очень дорогостоящим и сложным решением. Следует отметить, что современное производство систем автоматики и телемеханики к настоящему времени практически полностью «свернуло» производство данного вида устройств. Поэтому и коллективом разработчиков реализация модели адаптивной САУ рассматривалась только как возможное цифровое решение.

Реализация цифровых решений систем автоматического управления с использованием искусственных нейронподобных сетей в своей основе возможна тремя путями:

- при использовании специализированных модулей;
- при использовании нейрочипов и нейроконтроллеров;
- при использовании типовых бытовых или промышленных контроллеров.

Ниже проведен анализ трех этих направлений для выбора наиболее эффективной схемы реализации.

Следует отметить, что современный уровень развития аппаратных средств позволяет пересмотреть подходы к проектированию САУ технологическими процессами. В настоящее время в методах построения систем управления явно выделяются, по крайней мере, три основных тенденции:

- отказ от представления САУ как набора специализированных программно-аппаратных блоков в пользу унифицированных аппаратно-программных средств;
- отказ от «федеративных» архитектур в пользу интегрированных решений;
- внедрение тактируемых архитектур (Time-Triggered Architecture).

Несмотря на то, что сегодня существует достаточно много примеров работоспособных САУ на базе специализированных модулей, все же такие системы обладают рядом существенных недостатков, как на этапе разработки, так и в эксплуатации.

Разработка САУ на специализированных модулях требует специалистов с очень широким спектром знаний в прикладной области, области аппаратного и программного обеспечения. Как правило, для каждого модуля используются свои средства отладки, зачастую недостаточно мощные и удобные. Модернизация таких систем осложнена из-за недостатка унификации подходов к разработке, скудной документации – на выпуск хорошей документации в рамках одного проекта обычно не хватает ни времени, ни бюджета. Смена аппаратной части нередко приводит к глубокой модернизации всего программного обеспечения. Поддержку и развитие САУ на специализированных модулях, как правило, могут осуществлять только непосредственные разработчики этой системы.

Изменения в подходах к построению САУ технологическими процессами стали возможны, прежде всего, благодаря росту производительности и объема памяти современных процессорных модулей, что позволило использовать универсальные операционные системы реального времени (ОСРВ). Применение ОСРВ решает большинство из упомянутых проблем, что существенно снижает сроки разработки и увеличивает качество и удобство эксплуатации. Операционные системы также представляют собой прослойку между аппаратным и прикладным программным обеспечением, благодаря которой аппаратура может модернизироваться без изменений в программном обеспечении, и наоборот.

Применение производительных вычислителей и ОСРВ привели к идее размещения большей части расчетов в едином процессорном модуле. Такие архитектуры САУ получили название «интегрированные» (в отличие от «старых», «федеративных» архитектур).

САУ с интегрированной архитектурой обладает лучшими массогабаритными характеристиками при более низкой себестоимости.

При использовании интегрированной архитектуры остро встает вопрос надежности совместного выполнения различных задач на одном аппаратном модуле. Очевидным требованием является то, что сбои в одном из приложений не должны повлиять на выполнение других. В идеале должна обеспечиваться полная независимость выполнения функций, присущая федеративной архитектуре САУ.

В настоящее время видится только один подход, отвечающий данному требованию – применение специальной операционной системы, поддерживающей разделение приложений.

Идеи разделения приложений выражены стандартом ARINC 653. Каждое приложение (возможно, состоящее из нескольких процессов), которое должно выполняться обособленно относительно других приложений, помещается в раздел. Операционная система обеспечивает:

- невозможность доступа для приложения из одного раздела в память другого

раздела (пространственное разделение);

- наличие у каждого раздела гарантированного бюджета времени, который будет ему предоставлен, даже если один или несколько других разделов имеют приложения с более высоким приоритетом (временное разделение).

Применение разделов, помимо повышения надежности САУ, дает следующие преимущества:

- независимость разработки. Поскольку разделы работают независимо друг от друга, они могут проектироваться, разрабатываться независимо (но с учетом ограничения бюджета времени и памяти). Большую часть верификации приложений (за исключением совместной доводки системы управления) также можно провести независимо;

- гибкость в развертывании системы. Если в системе есть несколько вычислительных модулей, то раздел может быть при необходимости перенесен с одного вычислителя на другой без изменения кода приложений (при условии, что оба вычислителя работают под управлением одной операционной системы).

Тактируемые архитектуры еще одно из наиболее перспективных направлений в проектировании критичных к безопасности САУ. В таких системах модули связаны между собой с помощью единого интерфейса, как правило, с шинной топологией, и все передачи по этому интерфейсу производятся в соответствии с некоторым детерминированным расписанием.

Преимуществами тактируемой архитектуры являются:

- независимость передач по интерфейсу для каждого из приложений, соответственно, сбои в работе одного из приложений не повлияют на работу других приложений;

- предопределенность задержки передачи информации между модулями;

- возможность компенсации одного или нескольких одновременных сбоев при передаче.

Надо сказать, что концепция разделов хорошо сочетается с концепцией тактируемых архитектур. Обе концепции призваны обеспечивать независимость приложений друг от друга и останавливать распространение ошибок. Приложения в тактируемой архитектуре должны разделять не только процессорное время, но и время на шине. Детерминированное расписание передач должно также поддерживаться операционной системой.

В области аппаратной реализации нейрочипов в последние годы также наблюдается значительная динамика: появились доступные коммерческие решения, емкость и производительность нейрочипов постоянно растут.

Основной причиной роста применения нейроконтроллеров является то, что

нейронные сети могут обучаться любым функциям; требуется только, чтобы в процессе обучения был предоставлен достаточно большой объем информации, а также правильный выбор самой нейронной сети. Благодаря способности нейронных сетей к самообучению, для нейроконтроллеров наличие большого объема априорной информации об объекте управления, например, данных математического моделирования, не требуется.

В последние годы ввели классификацию нейрочипов по реализуемым подходам: аналоговые, цифровые, гибридные (рисунок 6.1).

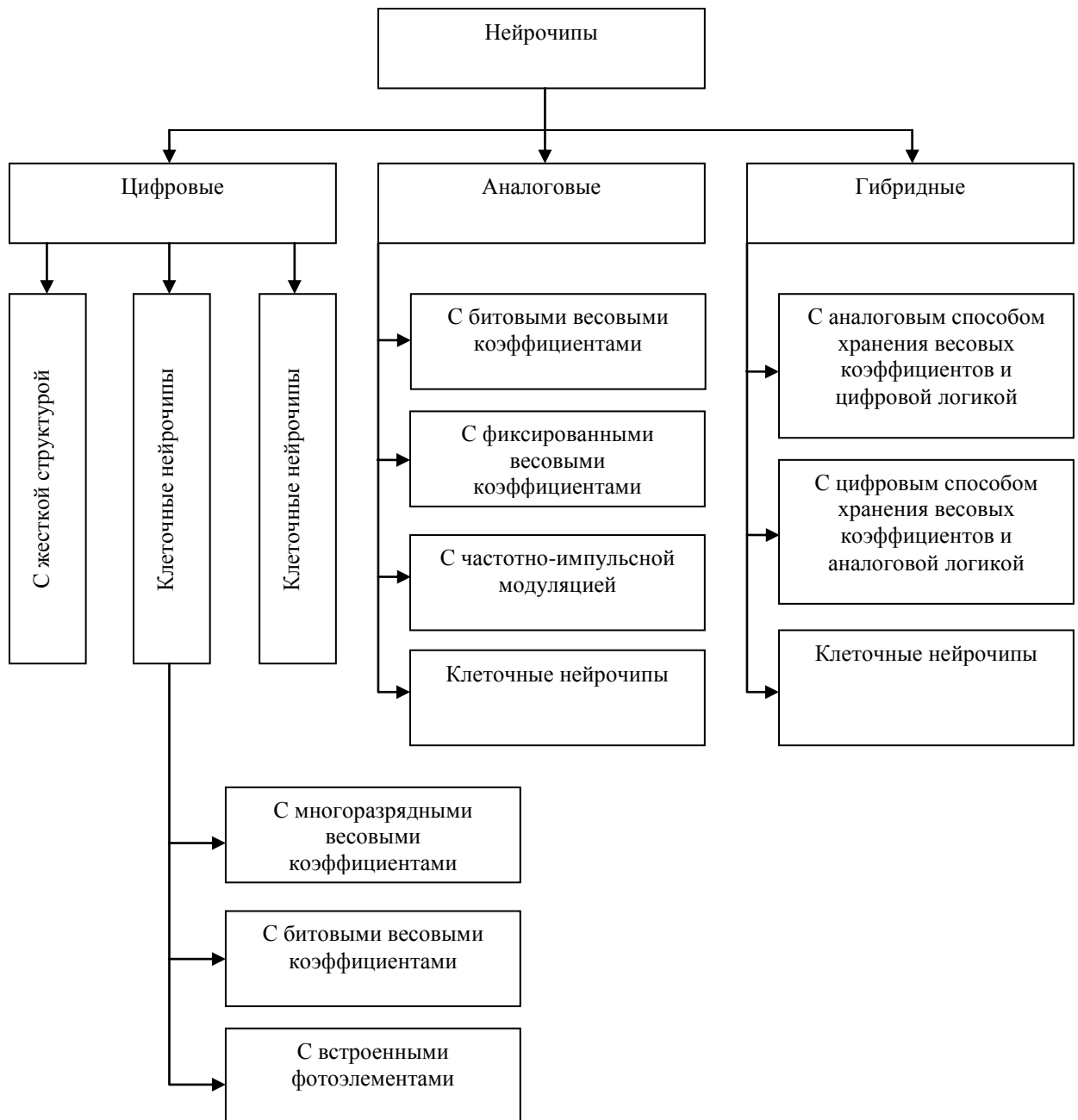


Рисунок 6.1 – Классификация нейрочипов

В области нейроконтроллеров в текущее время также ведутся разработки с внедрением новых технологий, многообещающими можно именовать технологии сотворения оптических нейрокомпьютеров, нейрокомпьютеров на пластинке, молекулярных и нанонейрокомпьютеров.

Специфичность нейропроцессорных устройств состоит в том, что эти устройства, владеют особыми способностями (функции активации, взвешенного суммирования и др.), направленные на эмуляцию и работу с нейронными сетями. Не считая этого, они высокопараллельны, что делает их в особенности действенными для обработки информации. Однако и для предстоящего развития в области нейропроцессорных технологий существует ряд проблем, к примеру, небольшая производительность нейропроцессорных устройств в связи с низкой частотой нейрочипов (30-150 МГц). Одним из методов решения первой задачи является организация многопроцессорных систем. В текущее время в области нейропроцессорных технологий ведутся исследования и разработки в части многопроцессорности, уже разработаны модули, включающие несколько микропроцессоров с разными связями (плата ВМ1, плата МЦ4.04, плата МЦ4.13, МЦ9.01, разработанные в НТЦ «Модуль»; модули SMT302, SMT344, SMT313, SMT315, SMT316 на базе 1,2 и 4 модулей семейства TMS320C4x). Но имеются препятствия, мешающие созданию действенных мультимикропроцессорных структур на базе нейропроцессоров:

- нейропроцессоры являются пока что дорогим и штучным продуктом, и не любая организация может их приобрести в подходящем количестве;
- проектирование и анализ специализированных многопроцессорных систем на базе нейрочипов является очень трудозатратным и сложным процессом.

Таблица 6.1 – Характеристики нейрочипов

Наименование	Фирма-изготовитель	Разрядность, бит	Макс/ количество синопов	Макс. число слоев	Примечание
1	2	3	4	5	6
MA16	Siemens	48 (умножители и сумматоры)	-	-	400 ММАС
Neuro Matrix NM6404, Такт. частота 133 МГц	Модуль, Россия	64 (вект.процессор), 32 RISC-ядро	4096 шт.	48	Совместим с портами TMS320C4x

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5	6
CLNN 32 CLNN 64	Bellcore	32 64	496 1024	32 нейрона	10^8 перекл./с 2×10^8 перекл./с
NC 3001	NeuriGam	16	4096 шт.	32	
ZISC 036 (Zero Instruction Set Computer)	IBM	64 разр. входного вектора	-	36 нейронов	Частота 20 МГц, векторно-прототипный нейрочип
ANNA	AT&T	Число нейронов 16-256	4096 весов	-	Число входов у нейрона 256-16
WSC (Wafer Scale Integration)	Hitachi	-	64 связи на нейрон	576 нейронов	
SASLM2	Mitsubishi	2 (одного нейрона)	-	4096 (64x64) нейронов	50 МГц

Таким образом, промышленная разработка САУ на нейроконтроллерах сталкивается с тем же набором проблем, которые стали характерными и для специализированных модулей: для обслуживания системы будут требоваться специалисты с очень широким спектром знаний в прикладной области, области аппаратного и программного обеспечения. Как правило, для каждого нейрочипа или нейроконтроллера используются свои средства отладки, зачастую недостаточно мощные и удобные. Модернизация таких систем опять же осложнена тем же самым набором проблем: недостатком унификации подходов к разработке и скудной технической документацией.

Исходя из всего вышеперечисленного, походы к построению адаптивной САУ с нейросетью на основе специализированных модулей и, как ни парадоксально, на основе нейрочипов и нейроконтроллеров в настоящий момент малоперспективны для промышленного исполнения и тиражирования для управления типовыми процессами.

Построение разработанной системы может быть эффективно только при использовании современных типовых контроллеров, построенных по модульной интегрированной архитектуре, тактируемых и, желательно, реализующих механизм

разделов.

6.2 Анализ типовых контроллеров для разработки надстройки адаптивной системы управления с нейросетью

6.2.1 Классификация типовых контроллеров систем автоматики

Применение контроллеров в автоматике позволило создать практически полностью автономные системы управления, осуществляющие свою деятельность с учетом свойств, характеристик и состояния контролируемых объектов, а участие оператора свести к общему наблюдению за процессом управления и, при необходимости – изменению заданной программы работы.

Контроллеры относятся к категории устройств реального времени и обладают целым рядом существенных отличий от оборудования со сходными назначением и архитектурой. В частности, главным отличием программируемых логических контроллеров от обычных компьютеров является развитая система обработки входящих и исходящих сигналов исполнительных механизмов и различных датчиков; главным отличием от встраиваемых систем управления – схема монтажа, отдельного от объекта управления.

Первые логические контроллеры представляли собой достаточно крупногабаритные системы, состоящие из соединенных между собой контактов и реле. Схема функционирования этих устройств задавалась еще на стадии проектирования и впоследствии не могла быть изменена.

Контроллеры, программируемые с помощью особого языка Ladder Logic Diagram («лестничной логики»), стали следующим поколением и заменили собой устройства с жестко заданной логикой. Внутренняя физическая коммутация (то есть, контакты и реле) была заменена в них виртуальной и представляла собой программу, исполняемую микроконтроллером устройства. Современной разновидностью контроллеров, программируемых после проектирования и сборки, являются так называемые свободно программируемые контроллеры. Для изменения рабочих параметров, диагностики и обслуживания этих устройств используются специальные устройства – программаторы, или ПК, оснащенные соответствующими интерфейсами для подключения и программным обеспечением. Кроме того, для управления свободно программируемыми контроллерами применяются различные системы человеко-машинного интерфейса, в частности – операторские панели. Важнейшими элементами комплексов автоматизированного управления являются также датчики и исполнительные устройства, подсоединяемые к ПЛК

централизованно или по методу распределенной периферии.

Для программирования контроллеров был разработан ряд стандартизированных языков, описанных в международном стандарте МЭК 61131.

В настоящее время на рынке РК, да и всего ЕвразЭС, преобладают контроллеры иностранных фирм: Siemens, Mitsubishi, ABB, Schneider Electric, GE Fanuc, однако, с течением времени, увеличивается доля рынка, занятая отечественной продукцией (НИЛ АП, Текон, Фаствел, ДЭП, Овен, Элемер, Эмикон и др.), что соответствует общемировой тенденции, когда в большинстве стран отечественные фирмы занимают большую долю рынка, чем иностранные.

Жесткие ограничения на стоимость и огромное разнообразие целей автоматизации привели к невозможности создания универсального программируемого логического контроллера (ПЛК), как это случилось с персональными компьютерами. Область автоматизации выдвигает множество задач, в соответствии с которыми развивается и рынок, содержащий сотни непохожих друг на друга контроллеров, различающихся десятками параметров. Каждый производитель выпускает несколько типов ПЛК разной мощности и стоимости, чтобы увеличить прибыль за счет сегментирования рынка.

Выбор оптимального для конкретной задачи контроллера основывается обычно на соответствии функциональных характеристик контроллера решаемой задаче при условии минимальной его стоимости. Учитываются также другие важные характеристики (температурный диапазон, надежность, бренд изготовителя, наличие разрешений, сертификатов и т. п.).

Несмотря на огромное разнообразие контроллеров, в их развитии заметны следующие общие тенденции:

- уменьшение габаритов;
- расширение функциональных возможностей;
- увеличение количества поддерживаемых интерфейсов и сетей;
- использование идеологии «открытых систем»;
- использование языков программирования стандарта МЭК 61131-3;
- снижение цены.

Еще одной тенденцией является появление в контроллерах признаков компьютера (наличие мыши, клавиатуры, монитора, ОС Windows, возможности подключения жесткого диска), а в компьютерах – признаков контроллера (расширенный температурный диапазон, электронный диск, защита от пыли и влаги, крепление на DIN-рейку, наличие сторожевого таймера, увеличенное количество коммуникационных портов, использование ОС жесткого

реального времени, функции самотестирования и диагностики, контроль целостности прикладной программы). Появились компьютеры в конструктивах для жестких условий эксплуатации. Аппаратные различия между компьютером и контроллером постепенно исчезают.

Основным показателем ПЛК является количество каналов ввода-вывода. По этому признаку ПЛК делятся на следующие группы:

- нано-ПЛК (менее 16 каналов);
- микро-ПЛК (более 16, до 100 каналов);
- средние (более 100, до 500 каналов);
- большие (более 500 каналов).

По расположению модулей ввода-вывода ПЛК бывают:

– моноблочными – в которых устройство ввода-вывода не может быть удалено из контроллера или заменено на другое. Конструктивно контроллер представляет собой единое целое с устройствами ввода-вывода (например, одноплатный контроллер);

– модульные – состоящие из общей корзины (шасси), в которой располагаются модуль центрального процессора и сменные модули ввода-вывода. Состав модулей выбирается пользователем в зависимости от решаемой задачи. Типовое количество слотов для сменных модулей – от 8 до 32;

– распределенные (с удаленными модулями ввода-вывода) – в которых модули ввода-вывода выполнены в отдельных корпусах, соединяются с модулем контроллера по сети (обычно на основе интерфейса RS-485) и могут быть расположены на расстоянии до 1,2 км от процессорного модуля.

Часто перечисленные конструктивные типы контроллеров комбинируются, например, моноблочный контроллер может иметь несколько съемных плат; моноблочный и модульный контроллеры могут быть дополнены удаленными модулями ввода-вывода, чтобы увеличить общее количество каналов.

Многие контроллеры имеют набор сменных процессорных плат разной производительности. Это позволяет расширить круг потенциальных пользователей системы без изменения ее конструктива.

По конструктивному исполнению и способу крепления контроллеры делятся на:

- панельные (для монтажа на панель или дверцу шкафа);
- для монтажа на DIN-рейку внутри шкафа;
- для крепления на стене;
- стоечные – для монтажа в стойке;
- бескорпусные (обычно одноплатные) для применения в специализированных

конструктивах производителей оборудования (ОЕМ – «Original Equipment Manufacturer»).

По области применения контроллеры делятся на следующие типы:

- универсальные общепромышленные;
- для управления роботами;
- для управления позиционированием и перемещением;
- коммуникационные;
- ПИД-контроллеры;
- специализированные.

По способу программирования контроллеры бывают:

- программируемые с лицевой панели контроллера;
- программируемые переносным программатором;
- программируемые с помощью дисплея, мыши и клавиатуры;
- программируемые с помощью персонального компьютера.

Контроллеры могут программироваться на следующих языках:

- на языках низкого уровня (assembler);
- на классических алгоритмических языках (C, C#, Visual Basic);
- на языках МЭК 61131-3.

Контроллеры могут содержать в своем составе модули ввода-вывода или не содержать их. Примерами контроллеров без модулей ввода-вывода являются коммуникационные контроллеры, которые выполняют функцию межсетевого шлюза, или контроллеры, получающие данные от контроллеров нижнего уровня иерархии АСУ ТП.

Исходя из приведенных параметров классификации ПЛК можно сформулировать критерии выбора промышленного контроллера для реализации адаптивной САУ ТП измельчения: тип контроллера по количеству входов/выходов от среднего до большого, по расположению модулей – модульные, по области применения – универсальные общепромышленные, по способу программирования – предпочтительно программируемые с помощью персонального компьютера, по языкам программирования – на языках МЭК 61131-3.

6.2.2 Анализ рынка типовых контроллеров для реализации адаптивной системы автоматического управления с нейросетью

Как уже отмечалось, рынок контроллеров представлен значительным количеством как отечественных, так и зарубежных компаний, занимающихся их производством и продвижением.

Однако один из самых важных параметров контроллера – быстродействие – в каталогах фирм-производителей указывается в совершенно разных вариантах. Могут фигурировать время выполнения бинарных команд, время опроса 1К дискретных входов, время выполнения смешанных команд и т.д.

Спектр продукции, предлагаемой сегодня, чрезвычайно широк. В таблице 6.2 приведены характеристики наиболее распространенных контроллеров различных фирм. В четырех последних строках указаны параметры для модулей дискретного ввода-вывода. Все они построены по магистрально-модульному принципу, монтируются на панель или DIN-рейку, работают от напряжения +24 В, поддерживают протоколы обмена Fieldbus, имеют широкий набор модулей:

- модули дискретных входов / выходов;
- коммуникационные модули;
- модули аналогового ввода / вывода;
- модули терморегуляторов;
- модули позиционирования;
- модули ПИД-регулятора;
- модули контроля движения.

Как видно из таблицы, контроллеры имеют равные функциональные возможности, близкие технические и эксплуатационные характеристики и даже почти одинаковые размеры. В такой ситуации необходимо определить критерии оценки и выбора ПЛК, удовлетворяющего поставленной задаче.

Учитывая специфику устройств, критерии оценки контроллеров можно разделить на три группы:

- технические характеристики;
- эксплуатационные характеристики;
- потребительские свойства.

Характеристики контроллеров представлены в таблице 6.2.

При этом следует считать критериями выбора потребительские свойства, то есть соотношение показателей затраты (производительность) / надежность, а технические и эксплуатационные характеристики ограничениями для процедуры выбора.

Кроме того, необходимо разделить характеристики на прямые (для которых положительным результатом является её увеличение) и обратные (для которых положительным результатом является её уменьшение).

Так как характеристики между собой конфликтны, то есть улучшение одной характеристики почти всегда приводит к ухудшению другой, необходимо для каждой

характеристики K_i определить весовой коэффициент a_i , учитывающий степень влияния данной характеристики на полезность устройства.

Для этого в дальнейшем считаем необходимым провести более детальный анализ конкретных производителей и моделей контроллеров.

Контроллер SYSMAC CQM 1 фирмы OMRON – это компактный, быстродействующий программируемый контроллер, состоящий из модулей питания, центрального процессорного устройства, модулей входов/выходов и специальных модулей. Все модули соединяются друг с другом для образования единого устройства, которое монтируется на профиле DIN.

Наличие сетевого модуля Controller Link, поддержка Protocol Macro для последовательных портов, позволяет объединить в систему до 32 контроллеров, включить в систему разнообразное специализированное оборудование – температурные и частотные регуляторы, сервоприводы, весы, измерители и другие приборы различных производителей. Контроллер является идеальным решением для автоматизации отдельных участков производства и дальнейшего объединения в сеть.



Рисунок 6.2 – Внешний вид контроллера SYSMAC CQM 1

CQM1H имеет много характерных особенностей, включая следующие:

- на ЦПУ находятся 16 встроенных входов;
- для увеличения числа входов/выходов можно добавить модули входов/выходов;
- SYSMAC CQM1H обладает большим быстродействием 0,5 мкс.;
- встроены быстродействующие таймеры и счетчики;
- выходы обслуживаются сразу при исполнении команд (прямые выходы).

Таблица 6.2 – Базовые характеристики рассматриваемых контроллеров

Тип контроллера	SYSMAC CQM 1	SYSMAC C200H	SMART 2	ADAM 5000	SIMATIC S7-300	MC 12	ПЛК 160
Фирма-производитель	Omron	Omron	PEP	Advantech	Siemens	Контар	Овен
Страна	Япония	Япония	Германия	Тайвань	Германия	Россия	Россия
Диапазон температуры, °C	0 - +55	0 - +55	-40 - +80	- 10 - +70	-25 - +60	0 - +60	0 - +55
Влажность воздуха, %	10 - 90	10 - 90	5 - 95	5 - 95	5 - 95	5 - 95	5 - 95
Количество модулей в каркасе, шт.	до 11	3/5/8/10	до 14	4	до 8	3/4/6/9	4/7/10/13
Гарантийный срок, лет	3	3	2	1	1	1	1
Номенклатура, шт.	42	87	18	12	45	30	80
Количество каналов в модуле	8/16/32	8/16/32/64	8	16	8/16/32	4/8/12/16	8/16/32
Размеры модуля, мм	110x32x107	130x32x118	78x31x70	110x31x75	125x40x120	90x28x75	140x35x145
Вес модуля, г	160-230	180-300	40-70	65-95	190-300	65-80	190-30
Мощность потребления, Вт	0,85 - 1,2	0,24 - 1,3	0,1 - 0,27	0,25 - 0,3	0,6 - 2,0	0,5 - 1,0	0,5 - 2,2

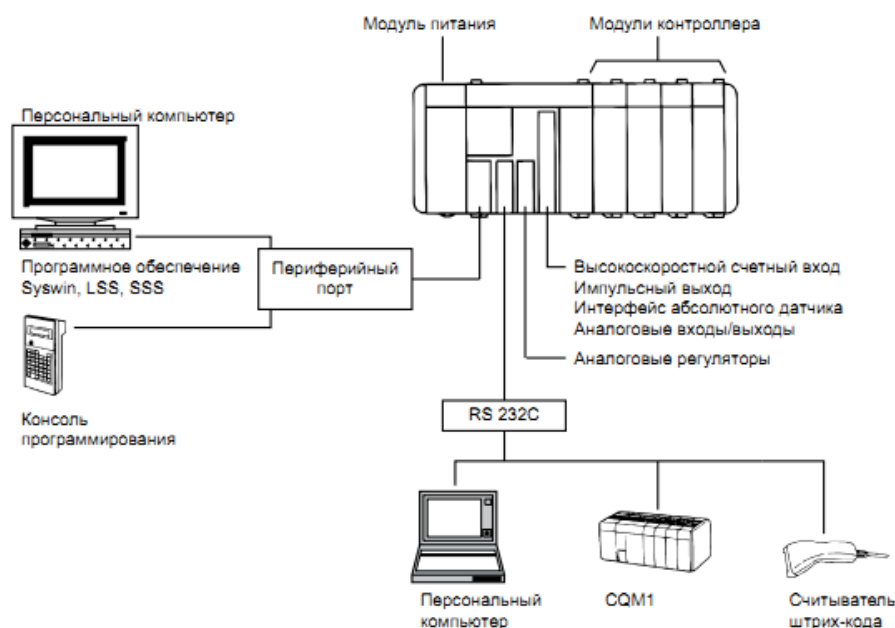


Рисунок 6.3 – Схема соединений контроллера SYSMAC CQM 1

SYSMAC CQM1H поддерживает три типа прерываний:

- входные прерывания;
- прерывания интервального таймера;
- прерывания высокоскоростного счетчика.

Входные прерывания используются для обработки входных сигналов от внешних устройств, когда сигналы короче, чем время исполнения программы. Можно использовать сигналы с шиной импульса 0,1 мкс.

Прерывания интервального таймера можно осуществлять, используя высокоскоростной интервальный таймер.

Выходами могут служить однофазные импульсы частотой до 5 кГц и двухфазные импульсы частотой до 2,5 кГц. Прерывания высокоскоростного счетчика можно объединить с выдачей импульсов и использовать для решения таких прикладных задач, как управление двигателем. Высокоскоростной счетчик имеет 2 дополнительные точки.

Импульсы частотой до 1 кГц можно выдавать с контактов модуля транзисторных выходов. CQM1H имеет два специальных порта для выдачи импульсов частотой 50 кГц.

Новой разработкой в этом классе изделий являются программируемые контроллеры серии SYSMAC CS1.

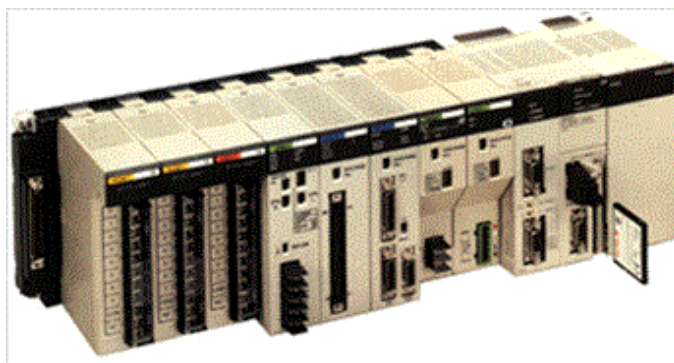


Рисунок 6.4 – Программируемый контроллер SYSMAC C200H

Контроллеры серии C200H по функциональным возможностям и техническим характеристикам существенно превосходят ранние модели PLC фирмы OMRON, а также изделия известных мировых фирм, находящихся в этом классе (класс – Medium).

Параметры PLC CS1:

- быстродействие (время исполнения инструкции LD) – 0,04 с;
- количество инструкций – более 400;
- количество точек ввода/вывода – 5120;
- емкость памяти программ – 250 Кшагов;
- емкость энергонезависимой памяти данных (DM) – 448 Кслов;
- емкость карты Flash-памяти – 48 МВ;
- номенклатура поддерживаемых модулей (ввода/вывода, специальных, коммуникационных) – более 100 типов.

Недостатком контроллера, несмотря на наличие мощных функциональных возможностей, являются сложности разработки и программирования ряда систем с непрерывными процессами. Особенно это касается систем управления объектами с взаимосвязанными контурами регулирования.

Контроллер SMART 2 фирмы PEP предназначен для построения простых систем управления для объектов с небольшим числом каналов ввода/вывода (до 100) и невысокими требованиями к скорости сбора и обработки информации.

Контроллеры имеют модульную конструкцию и komponуются из блоков, которые монтируются на DIN-рейке. В каждом из блоков может располагаться до 3-х функциональных модулей. Максимально возможное число блоков – 5, соответственно, максимальное количество модулей в контроллере – 15. Несколько контроллеров SMART могут быть связаны между собой и с другими контроллерами промышленной сетью PROFIBUS, MODBUS или CAN.

В состав контроллера могут входить следующие блоки:

- SMART-BASE – процессорный блок (MC68302) с источником питания и тремя слотами для модулей ввода/вывода;
- SMART-EXT – блок расширения на 2 слота для применения с процессорным блоком SMART-BASE;
- SMART2-BASE – базовый блок/блок расширения на 3 слота;
- SM2-CPU – процессорный модуль (MC68LC302).

Контроллеры SMART 2 имеют в своем составе большой набор модулей дискретного и аналогового ввода/вывода различных типов и уровней сигналов. Это позволяет контроллерам взаимодействовать с широким кругом исполнительных устройств и датчиков различных технологических параметров.

Контроллеры Smart 2 позволяют управлять системами автоматического управления небольшими объектами.

Однако комплекс не позволяет реализовывать на своей аппаратной базе сложные математические вычисления и обработку больших массивов информации.

Тайваньская компания Advantech производит широкую линейку контроллеров и модулей ввода/вывода. Многофункциональные PC-совместимые устройства этой компании имеют широкие возможности и могут быть использованы как для простых задач автоматизации, так и для высокоответственных приложений с высоким быстродействием.

Существуют две основные серии контроллеров Advantech – это APAX-5000 и ADAM-5000. APAX-5000 с открытой архитектурой, позволяющей использовать различные приложения, имеют высокоскоростной вычислительный процессор (APAX5570XPE/5571XPE), обеспечивая при этом гибкие функции ввода/вывода, повышающие масштабируемость системы. ADAM-5000 оснащены широким набором интерфейсов для связи, обеспечивающих гибкость коммуникационных соединений.

Одноканальные модули аналогового ввода серии ADAM 5000 имеют 2 дискретных выхода, изменение состояния которых возможно связать с событиями на канале аналогового ввода, заключающимися в выходе измеряемого параметра за пределы предварительно заданного диапазона. В контроллерах серии ADAM 5000 обеспечена возможность назначения условий управления с любого из каналов аналогового ввода контроллера на любой входящий в состав контроллера канал дискретного вывода. Для контроллеров ADAM 5000 указанная возможность расширена в еще большей степени: любой канал аналогового и/или дискретного вывода информационно-измерительной сети на базе контроллеров ADAM 5000 может быть логически связан с любым из каналов

аналогового и дискретного ввода, входящим в состав любого из контроллеров данной сети, а это означает, что любой абонент сети может быть инициатором передачи данных в адрес любого другого абонента.

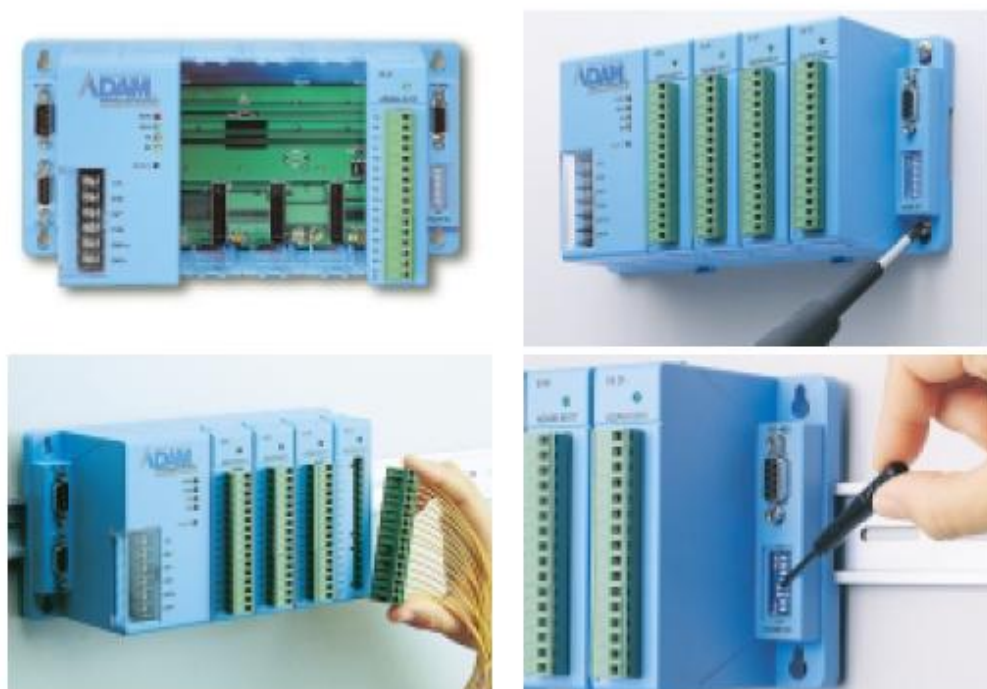


Рисунок 6.5 – Внешний вид контроллеров ADAM 5000

Модули ввода/вывода серии ADAM 5000 наиболее целесообразно применять в распределенных системах сбора данных в прикладной области, для которой характерна невысокая скорость изменения параметров технологического процесса, подлежащих контролю. Функции локального, независимого от контроллера сети, управления представлены весьма ограниченно и вряд ли смогут удовлетворить большинству требований, выдвигаемых при постановке задачи комплексной автоматизации предприятий.

Контроллеры КОНТАР предназначены для автоматического управления, сбора и передачи информации, а также дистанционного управления и диспетчеризации технологических процессов в ЖКХ и промышленности. КОНТАР обеспечивает сбор информации от разнообразных источников, используемых на объекте (датчики температуры, давления, расхода, тепло-, водо- и электросчетчики и т.п.) и передачу ее на верхний уровень. Возможно также и полностью автономное применение аппаратуры комплекса в виде отдельных модулей.



Рисунок 6.6 – Внешний вид ПТК КОНТАР

Контроллеры могут использоваться автономно или быть включенными в сеть приборов КОНТАР в составе распределенной системы управления.

Комплекс построен на новейшей элементной базе и обеспечивает простой доступ к современным коммуникационным технологиям (подключение к сети Ethernet, передача информации по сотовой сети стандарта GSM/CDMA). КОНТАР может использоваться для решения многих задач также с помощью дополнения его оборудованием других производителей.

Однако комплекс также не позволяет реализовывать на своей аппаратной базе сложные математические вычисления и обработку больших массивов информации.

ПЛК 160 фирмы ОВЕН может применяться для создания систем автоматизированного управления технологическим оборудованием в энергетике, на транспорте, в различных областях промышленности, жилищно-коммунального и сельского хозяйства.

Логика работы контроллера определяется потребителем в процессе программирования контроллера. Программирование осуществляется с помощью программного обеспечения CoDeSys 2.3 (версии 2.3.9.9). При этом поддерживаются все языки программирования, указанные в МЭК 61131-3.

Контроллер может быть использован как:

- специализированное устройство управления выделенным локализованным объектом;
- устройство мониторинга локализованного объекта в составе комплексной информационной сети.

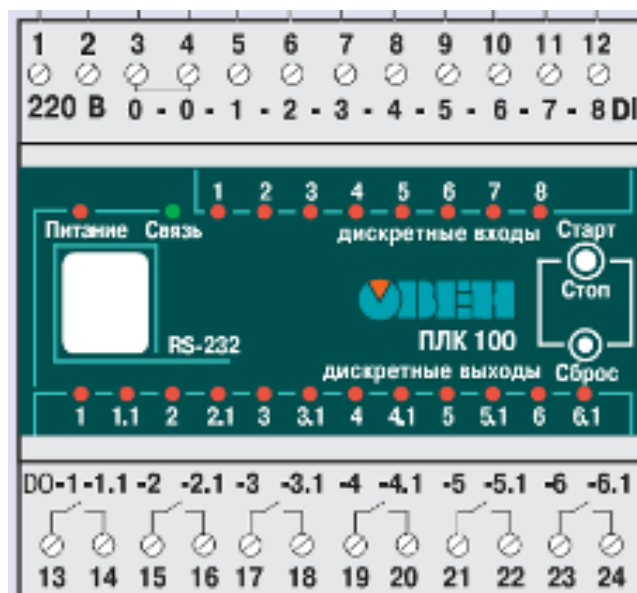


Рисунок 6.7 – Внешний вид ПЛК ОВЕН

Отличительные особенности контроллеров ОВЕН:

- мощные вычислительные ресурсы и большой объем памяти;
- небольшое количество точек ввода\вывода «на борту»;
- расширенное количество интерфейсов «на борту» контроллеров;
- наличие порта Ethernet для включения в локальные или глобальные сети верхнего уровня;
- поддержка протоколов обмена ModBus (RTU, ASCII), ОВЕН, DCon;
- возможность работы напрямую с портами контроллера, что позволяет подключать внешние устройства с нестандартными протоколами;
- контроллер имеет встроенные часы, что позволяет создавать системы управления с учетом реального времени;
- встроенный аккумулятор, позволяющий организовать ряд дополнительных сервисных функций: возможность кратковременного переживания пропадания питания, перевод выходных элементов в безопасное состояние;
- наличие Flash памяти позволяет организовывать архивирование данных на самом контроллере.

Для их программирования используется среда CoDeSys, разработанной компанией 3S-Software. Кроме того, контроллеры ОВЕН могут программироваться с помощью интегрированной SCADA и SoftLOGIC системы MasterSCADA.

Однако комплекс также не позволяет реализовывать на своей аппаратной базе обработку больших массивов информации, особенно подключение большого количества

входных каналов.

Одним из лидеров рынка производства промышленных контроллеров является компания Siemens. Их контроллеры семейства SIMATIC получили широкое распространение в управлении технологическими процессами на обогатительных комплексах Республики Казахстан (например, для рассматриваемого флагмана горнодобывающей промышленности – АО «ССГПО» контроллеры Siemens стали типовыми для фабрик сушки и обжига). Один из линейки представляемых контроллеров является контроллер SIMATIC S7-300 – модульный программируемый контроллер, предназначенный для построения систем автоматизации низкой и средней степени сложности.

Модульная конструкция, работа с естественным охлаждением, возможность применения структур локального и распределенного ввода-вывода, широкие коммуникационные возможности, множество функций, поддерживаемых на уровне операционной системы, удобство эксплуатации и обслуживания обеспечивают возможность получения рентабельных решений для построения систем автоматического управления в различных областях промышленного производства. Эффективному применению контроллеров способствует и возможность использования нескольких типов центральных процессоров различной производительности, наличие широкой гаммы модулей ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов, функциональных модулей и коммуникационных процессоров.

Центральные процессоры S7-300C оснащены набором встроенных входов и выходов, а также набором встроенных функций, что позволяет применять эти процессоры в качестве готовых блоков управления.

Программируемые контроллеры S7-300F в сочетании со станциями распределенного ввода-вывода Simatic 300M, оснащенными F-модулями, позволяют создавать распределенные системы автоматики безопасности (F-системы), в которых возникновение аварийных ситуаций не создает опасности для жизни обслуживающего персонала и угрозы для окружающей природной среды. На основе распределенных структур могут создаваться системы, отвечающие требованиям безопасности уровней SIL 1 ... SIL 3 стандартов IEC/EN 61508, а также категорий 1 ... 4 стандарта EN 954-1.

Контроллеры Simatic S7-300 имеют модульную конструкцию и могут включать в свой состав:

– модуль центрального процессора (CPU). В зависимости от степени сложности решаемой задачи в контроллерах могут быть использованы различные типы центральных

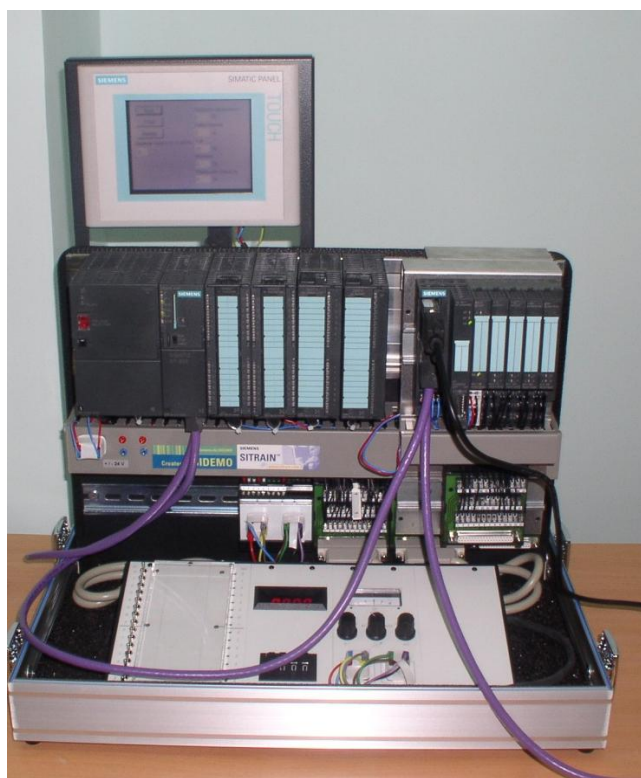


Рисунок 6.8 – Внешний вид ПЛК SIMATIC S7-300

процессоров, отличающихся производительностью, объемом памяти, наличием или отсутствием встроенных входов-выходов и специальных функций, количеством и видом встроенных коммуникационных интерфейсов и т.д.;

- модули блоков питания (PS), обеспечивающие возможность питания контроллера от сети переменного тока напряжением 120/230В или от источника постоянного тока напряжением 24/48/60/110В;

- сигнальные модули (SM), предназначенные для ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов с различными электрическими и временными параметрами;

- коммуникационные процессоры (CP) для подключения к сетям PROFIBUS, Industrial Ethernet, AS-Interface или организации связи через PtP (point to point) интерфейс;

- функциональные модули (FM), способные самостоятельно решать задачи автоматического регулирования, позиционирования, обработки сигналов. Функциональные модули снабжены встроенным микропроцессором и способны выполнять возложенные на них функции даже в случае остановки центрального процессора программируемого контроллера;

- интерфейсные модули (IM), обеспечивающие возможность подключения к базовому блоку (стойка с CPU) стоек расширения ввода-вывода. Контроллеры Simatic S7-

300 позволяют использовать в своем составе до 32 сигнальных и функциональных модулей, а также коммуникационных процессоров, распределенных по 4 монтажным стойкам.

Конструкция контроллера отличается высокой гибкостью и удобством обслуживания:

- во все модули (кроме модулей блоков питания) встроены участки внутренней шины контроллера. Соединение этих участков выполняется шинными соединителями, устанавливаемыми на тыльной стороне корпуса. Шинные соединители входят в комплект поставки всех модулей за исключением центральных процессоров и блоков питания;

- механическое кодирование фронтальных соединителей, исключающее возможность возникновения ошибок при замене модулей.

Закрытую структуру ПЛК имеют контроллеры Siemens, Мицубиши, Омрон, АВВ, GE Fanuc и многие другие. Практически все крупные фирмы-производители ПЛК создают закрытые протоколы и системы с платной средой разработки. Поэтому критерий открытости архитектуры и сред разработки как критерий выбора был отвергнут.

После сравнения выше описанных характеристик ПЛК, для реализации системы автоматического управления выбран контроллер SIMATIC S7-300. Данный контроллер соответствует требуемым критериям разрабатываемой системы автоматического управления, а так же данная аппаратура уже используется на исследуемых предприятиях, что является немало значимым критерием для последующего внедрения системы.

6.3 Разработка кода программы адаптивной системы автоматического управления с нейросетью

6.3.1 Описание алгоритма работы системы

В работе предлагается использовать модификацию алгоритма обучения сети на основании градиентного алгоритма, основанного на минимизации целевой функции ошибки сети, предложенную томским ученым В.Н. Вичуговым.

Блок-схема модифицированного градиентного алгоритма Вичугова, приведена на рисунке 6.10.

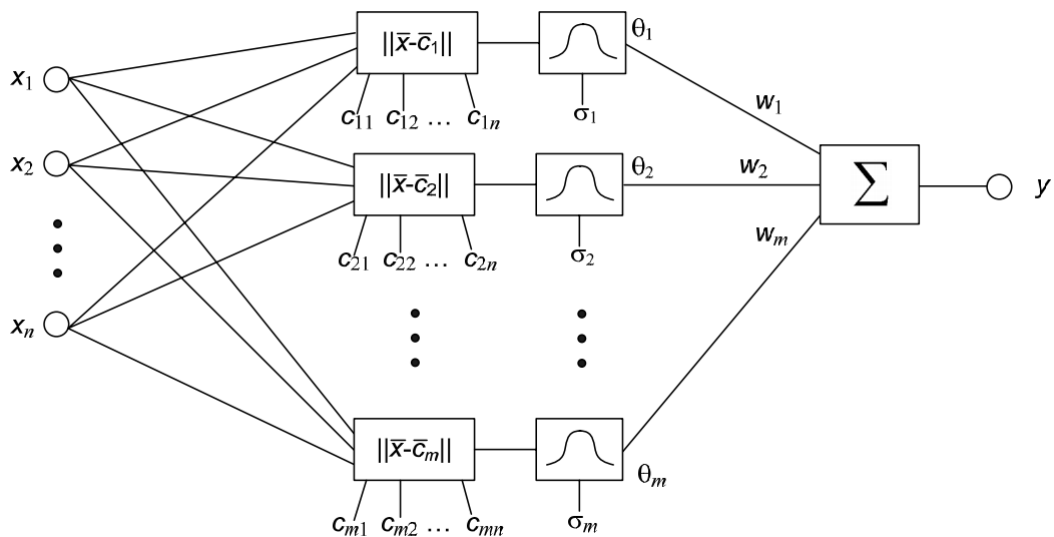


Рисунок 6.9 – Структура RBFN

Блоки, которые отсутствуют в классическом алгоритме, отмечены звездочками. Основные отличия от классического алгоритма заключаются в следующем:

1 Добавлены правила изменения структуры RBF в процессе обучения (блок 2). В начале обучения RBF не содержит элементов. По мере необходимости новые элементы добавляются, а неиспользуемые элементы удаляются.

2 Уменьшены вычислительные затраты, требуемые для каждого цикла обучения. Это достигается изменением параметров не всех элементов, как в классическом алгоритме, а только элементов, выходная величина которых в рассматриваемой точке больше величины $\theta_{\text{изм}}$ (блоки 4 и 5).

3 Исключена возможность возникновения ситуации, когда параметры некоторых элементов практически совпадают. Для этого вычисленные величины Δc_{ij} и $\Delta \sigma_i$ уменьшаются, если коэффициент взаимного пересечения элементов превышает пороговую величину $\rho_{\text{гр}}$, равную 1,9 (границу эффективности использования сети) (блоки 7, 8, 12, 13).

Изменение структуры RBF за счет добавления или удаления элементов приводит к изменению выходного значения нейросети только в окрестности центра добавляемого или удаляемого элемента, а не во всей рабочей области, как в случае с изменением структуры любой другой нейросети, например, многослойного перцептрона. Поэтому добавление и удаление элементов RBF возможно осуществлять в процессе обучения без необходимости запуска процесса обучения с самого начала.

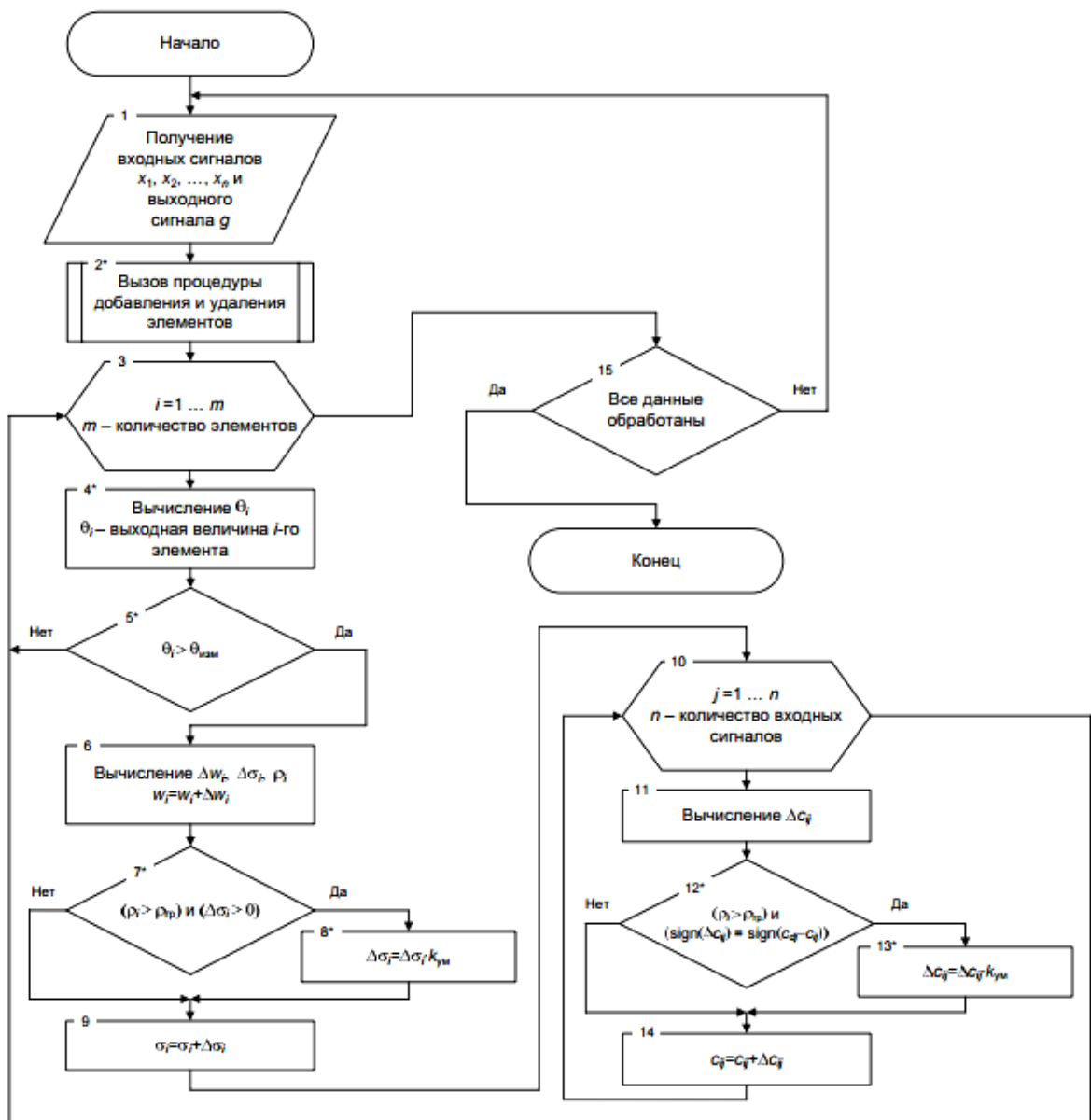


Рисунок 6.10 – Блок-схема модифицированного алгоритма обучения сети RBF, предложенная Вичуговым В.Н.

Разработанная для программной реализации в контроллере блок-схема алгоритма работы адаптивной системы автоматического управления процессом измельчения для контроллера S300 представлена на рисунке 6.11.

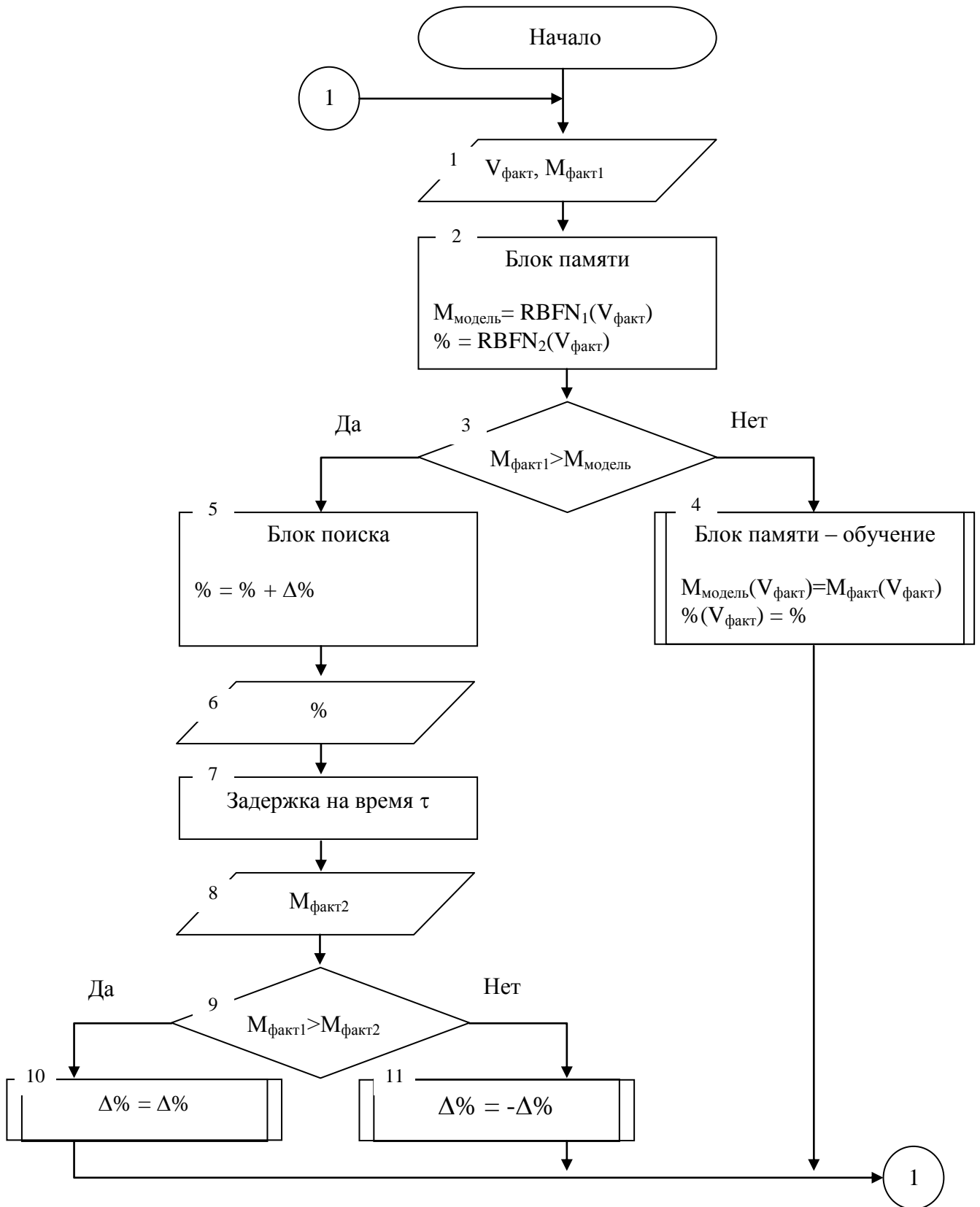


Рисунок 6.11 – Блок-схема алгоритма работы адаптивной системы

6.3.2 Выбор языка реализации системы

Большинство промышленных контроллеров имеют закрытую структуру, то есть программируются только специализированным программным обеспечением от производителя ПЛК. Так, например, ПЛК Siemens программируются только с помощью Step7, Step7 Microwin или Logo Comfort, а ПЛК Шнейдер программируются только с помощью Unity или Concept. Как уже отмечалось, практически все крупные компании выпускают контроллеры закрытой структуры.

Существуют программируемые логические и контроллеры с открытыми или полукрытыми платформами, на них предустановлены такие ОС, как Windows CE, VxWorks, Linux, либо они основываются на процессорах фирм Motorola, Intel, Infineon, Atmel, Hitachi, PowerPC и др. Такие ПЛК могут программироваться различным программным обеспечением, например, CoDeSys. Пример: ПЛК – Овен ПЛК или ADAM.

Несмотря на разнообразие программного обеспечения и реализаций ПЛК, языки программирования ограничены стандартом МЭК 61131-3. Наиболее часто выделяют шесть видов графических и текстовых языков программирования:

- LD (Ladder Diagram) – язык релейных схем – самый распространённый язык для PLC;
- FBD (Function Block Diagram) – язык функциональных блоков – 2-й по распространённости язык для PLC;
- SFC (Sequential Function Chart) – язык диаграмм состояний – используется для программирования автоматов;
- CFC (Continuous Function Chart) – не сертифицирован IEC61131-3, дальнейшее развитие получил в виде FBD;
- IL (Instruction List) – ассемблероподобный язык;
- ST (Structured Text) – паскалеподобный язык.

Использование языков программирования, основанных на МЭК 61131-3, характеризуется:

- наглядным описанием автоматизируемых технологических процессов и возможностью дальнейшей отладки в терминах исходного описания;
- мобильностью – способностью к переносу на различные аппаратные и операционные платформы;
- эффективным исполнением программ в реальном времени (РВ).

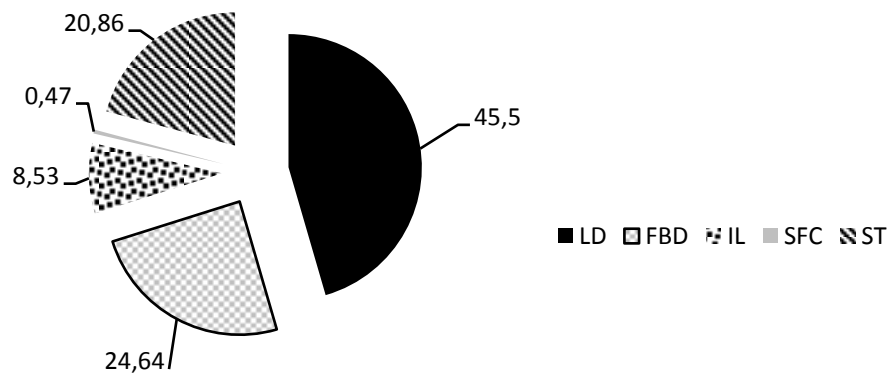


Рисунок 6.12 – Диаграмма предпочтений языков программирования разработчиками систем управления

Наглядность описания автоматизируемых ТП определяется характером объекта и следующими задачами по управлению объектом:

- задачи параллельной обработки большого числа логических контуров (сотен и тысяч) с обработкой исполнительных действий при наступлении тех или иных событий. В основе логического контура лежит проверка истинности логической функции от нескольких переменных, а событие равнозначно истинности этой функции. Задача адекватно и наглядно описывается системой булевых уравнений. Все языки стандарта, за исключением SFC, хорошо подходят для описания подобных задач, поскольку они или содержат в себе средство представления булевых функций (языки IL, ST), или являются графической формой их отображения (языки LD, FBD);

- задачи управления процессом, проходящим в своем развитии через ряд состояний (шагов, стадий). Переход от одного состояния к другому происходит по событиям, формируемым по сигналам датчиков процесса. Задачи данного типа наиболее наглядно представляются автоматными моделями. В стандарте такая модель строится с использованием языка SFC (разметка состояния, логика управления) и любого другого языка (описание действия, связанных с состоянием, и событий, предписывающих смену состояний). Заметим, что подобные задачи могут быть полностью представлены с помощью других языков стандарта, например языка FBD с использованием элементов памяти – триггеров, но в этом случае автоматная модель будет выражена неявно;

- задачи автоматического регулирования (ПИД-законы, нечеткое управление и т.д.) встречаются практически везде. При этом, как правило, используются библиотеки заранее разработанных компонентов – графических блоков для языков LD и FBD и

подпрограмм для языков ST и PL;

- задачи управления распределенными технологическими объектами, оптимизационные, а также задачи, связанные с интеллектуальным анализом данных. Задачи такого типа решаются в сложных технологических объектах. Здесь в качестве средств адекватного описания могут использоваться языки ST, универсальные типа C, C++, Паскаль, Visual Basic, объектно-ориентированные типа Java.

Контроллеры фирмы Siemens Simatic S7-300 имеет закрытую структуру и программируется с помощью программы Step7. В программе Step7 предусмотрены возможности программировать как в мнемонике SIMATIC, так и в международной мнемонике. В связи с требованиями возможных модификаций системы принято решение о программировании в международной мнемонике, т.к. она более универсальна. Кроме того, некоторые функции в мнемонике SIMATIC не предусмотрены.

Программировать контроллеры можно с помощью функционального плана – FBD, контактного плана – LAD и списка операторов – STL. В дополнение к трем основным языкам могут быть добавлены четыре дополнительных языка, поставляемые отдельно:

- SCL – структурированный язык управления;
- GRAPH 7 – язык управления последовательными технологическими процессами;
- HiGraph 7 – язык управления на основе графа состояний системы;
- SFC – язык диаграмм состояния.

Для реализации системы автоматического управления принято решение об использовании структурированного языка управления SCL. Язык базируется на стандарте DIN EN 61131-3 (часть «Structured Text» – «Структурированные тексты») и имеет сертификат совместимости с PLC Base Level версии v4.01 при использовании интернациональных мнемоник.

Выбор сделан на основании следующих критериев:

- язык SCL содержит в себе элементы языка Паскаль (Pascal) наряду с типичными для PLC элементами, такими, например, как «вход» («input») и «выход» («output»);
- язык SCL особенно подходит для программирования сложных алгоритмов или для задач, относящихся к области управления данными;
- язык SCL поддерживает характерную для STEP 7 блочную структуру, а также позволяет создавать S7-программы, включающие в себя фрагменты на базовых языках программирования STL, LAD и FBD.

6.3.3 Разработка кода системы

Для реализации адаптивной системы автоматического управления в виде кода программы на SCL требуется разработать:

- структуру программы;
- управление данными автоматического процесса;
- структуру данных;
- передачу данных;
- документацию программы и проекта.

Для реализации блок-схемы алгоритма работы адаптивной системы была запрограммирована функция ограничителя «Delimiter», которая ограничивает входные величины, адаптируя их к заданному диапазону значений; а также запрограммирован вызов этой функции в организационном блоке.

```
FUNCTION Delimiter : INT
VAR_INPUT
  MAX : INT;           //максимальное значение
  IN  : INT;           //фактическое значение
  MIN : INT;           //минимальное значение
END_VAR

BEGIN
  IF IN > MAX THEN Delimiter := MAX; // адаптация к верхнему значению
  ELSIF IN < MIN THEN Delimiter := MIN; // адаптация к нижнему значению
  ELSE Delimiter := IN; // допустимое фактическое значение
END_IF;
END_FUNCTION

ORGANIZATOR_BLOCK Mainjprogram
VAR_TEMP
  SINFO : ARRAY [1..20] OF BYTE;
END_VAR

BEGIN
  Result := delimiter (MAX := Maximum, IN := INPUT_VALUE, MIN := Minimum);
END_ORGANIZATOR_BLOCK
```

Рисунок 6.13 – Скрин программы функции ограничителя «Delimiter»

В качестве минимального и максимального значений при описании структуры системы автоматического управления с самонастройкой используются входные параметры – объемы руд месторождений. В качестве фактического значения принимаются мощность электродвигателя мельницы и производительность по готовому классу.

```
FUNCTION_BLOCK FB1  
  
VAR  
V1 : REAL; //объем 1  
V2 : REAL; //объем 2  
P  : REAL; //мощность  
TEMP: REAL;  
END_VAR
```

Рисунок 6.14 – Скрин блока «FB1»

Также реализован вызов этой функции в организационном блоке «Main Program».

Разработан блок, реализующий алгоритм переобучения нейросети (рисунок 6.10), блоки поиска и сравнения основного алгоритма (рисунок 6.11).

Выходным сигналом контроллера реализован сигнал на изменение задания на подачу воды (соотношение «руда-вода») нижестоящей САУ ТП.

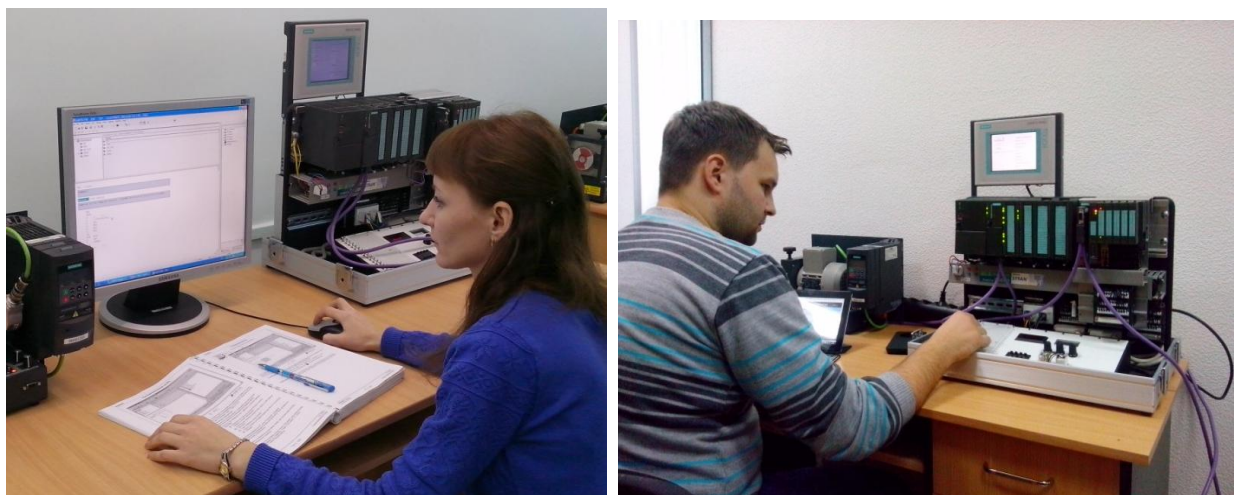


Рисунок 6.15 – Разработка и отладка кода программы контроллера

6.4 Выводы по разделу

На этапе аппаратной реализации прототипа системы управления на основе ИНС проведены

- анализ современных методов реализации систем управления;
- анализ типовых контроллеров для разработки адаптивной САУ ТП с нейросетью;
- разработка кода программы.

В результате анализа методов реализации систем управления, выявлены

современные тенденции к построению систем управления.

Выявлено, что походы к построению адаптивной САУ с нейросетью на специализированных модулях и, как ни парадоксально, на основе нейрочипов и нейроконтроллеров, в настоящий момент малоперспективны для промышленного исполнения и тиражирования для управления типовыми процессами.

Построение разработанной системы может быть эффективно только при использовании современных типовых контроллеров, построенных по модульной интегрированной архитектуре, тактируемых и, желательно, реализующих механизм разделов.

Исходя из приведенных параметров классификации ПЛК, сформулированы критерии выбора промышленного контроллера для реализации адаптивной САУ ТП измельчения: тип контроллера по количеству входов/выходов от среднего до большого; по расположению модулей – модульные; по области применения – универсальные общепромышленные; по способу программирования – предпочтительно программируемы с помощью персонального компьютера; по языкам программирования – на языках МЭК 61131-3.

Проведен анализ рынка типовых контроллеров. После сравнения характеристик ПЛК, для реализации САУ выбран контроллер SIMATIC S7-300. Данный контроллер соответствует требуемым критериям разрабатываемой системы, а так же данная аппаратура уже используется на исследуемых предприятиях (АО «ССГПО»), что является значимым критерием для последующего внедрения системы.

При разработке кода программы

- детализированы алгоритмы работы системы;
- произведен обоснованный выбор языков программирования контроллера;
- разработан код программы.

При разработке детализированного алгоритма работы принято решение отказаться от стандартного алгоритма обучения нейросети радиально-базисной функции из-за необходимости постоянной перенастройки (пересчета) всех весовых функций нейронов сети с целью улучшения параметров работы сети и минимизации вычислительных нагрузок на контроллер. Предпочтение отдано модифицированному алгоритму, разработанному В.Н. Вичуговым.

Для реализации системы автоматического управления принято решение об использовании структурированного языка управления SCL. Система реализована по блочному типу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках анализа состояния технологических процессов железорудных горно-обогатительных предприятий северного Казахстана выявлено, что Костанайская область – основной железо-рудный район Казахстана. На ее территории сосредоточено и добывается 93% всех запасов железных руд Республики.

В северном регионе РК находятся в эксплуатации карьеры: Качарский, Сарбайский, Куржункульский, Соколовский, Лисаковский, и строится Южно-Сарбайский. Разработку данных месторождений ведут два крупнейших предприятия горнодобывающей промышленности АО «ССГПО» и ТОО «Оркен».

При этом месторождения отличаются как генезисом, так и значительным колебанием физико-механических свойств добываемых руд. Колебания содержания железа по карьерам составляет от 16% до 64,5%, колебания серы от 1 до 10 %. Параметры сырой руды, поступающей на обогатительный передел, даже после внутрикарьерного усреднения, имеют значительные колебания по физико-механическому составу, что значительно усложняет процесс ее переработки и накладывает дополнительные требования по адаптации к аппаратуре управления технологическим оборудованием.

Для обоих рассматриваемых горно-обогатительных предприятий характерны однотипные схемы обогатительных комплексов, поэтому в работе более детальный анализ произведен по УРПО АО «ССГПО», как наиболее крупного. Для обогащения руд применяют фабрику рудоподготовки и обогащения, состоящую из трех фабрик: дробления и СМС, мокрого-магнитного обогащения и, в зимний период времени, сушки концентрата.

Фабрика дробления и СМС обеспечивает измельчение руды до класса плюс 2 мм первую ступень обогащения железной руды. Фабрика ММС построена по двух и трехстадиальным схемам измельчения до класса минус 0.0074 мм в зависимости от крепости руд. Сушка используется только в зимний период времени для предотвращения смерзания концентрата при складировании на складах готовой продукции и транспортировании потребителю.

По результатам анализа следует отметить, что более 90% оборудования произведено в период существования СССР и значительно выработало свой ресурс, хотя предприятия и прилагают определенные усилия по модернизации основных средств производства.

В рамках анализа систем управления технологическими процессами железообогатительной промышленности Республики Казахстан выявлено, что

автоматизация технологических процессов ФРПО представлена успешно функционирующими системами управления нижнего уровня – САУ ТП. На втором уровне системы автоматизации представлены в большей степени автоматизированными системами управления, хотя широко применяются до сих пор и системы ручного управления. Системы верхнего уровня представлены в основном системами оперативно-диспетчерского управления и не выполняют функции оптимизации процессов.

Сделан вывод об экономической недопустимости применения систем подобного рода в условиях постоянного повышения стоимости ресурсов и использования для обогащения все более и более бедных, тем более при тотальной компьютеризации всех технологических процессов и борьбе за снижение себестоимости продукции.

Исходя из вышеперечисленного, сделан вывод о наличии дополнительных возможностей повышения эффективности ТП ЖОК за счет применения систем управления первого и второго уровня – систем экстремального управления.

На основании данных о развитии раздела систем искусственного интеллекта – искусственных нейроподобных сетей – сделано предположение, что такие системы экстремального управления могут быть разработаны и эффективны именно на искусственных нейроподобных сетях. Поскольку они не требуют детального изучения взаимосвязей входных и выходных параметров, строятся по схеме «черный ящик» и способны обрабатывать значительные объемы информационных сигналов. В качестве исследуемого процесса сделано обоснованное заключение о целесообразности выбора для исследования процесса измельчения в стержневых мельницах, как наиболее энергоемкого.

При аналитическом описании сложных нелинейных систем, инерционных, с элементами запаздывания технологических объектов управления сделано предположение об эффективности использования аппарата уравнений состояния. Моделирование таких объектов осуществляется аппроксимацией, основанной на выборе наиболее существенных факторов, влияющих на состояние и поведение объекта.

Однако данный аппарат на практике не применим из-за высокой сложности для учета второстепенных и трудноподдающихся выделению и формализации факторов. Сделано предположение, что учет второстепенных, трудноподдающихся выделению и формализации детерминированных и стохастических факторов, не сформулированных вербально, но влияющих на состояние и поведение объекта управления, может быть осуществлен, например, на основе нейронных сетей, которые, являясь надстройкой над существующей классической детерминированной системой управления, будут способны осуществлять тонкую подстройку объекта управления на оптимум функционирования.

Для построения надстройки – адаптивной оптимизирующей САУ – предложена

структура, состоящая из блока памяти, блока поиска и блока сравнения. Разработаны и программно реализованы в модели системы алгоритмы поиска оптимального состояния объекта управления.

Для реализации в блоке памяти исследована применимость как классических методов аппроксимации многомерных зависимостей, таких как, аппроксимация полиномом и аппроксимация сплайнами, так и нейросетевых методов: сетей с обратным распространением ошибки – NNwBPТА, сетей встречного распространения – CPN и сетей радиальных базисных функций – RBFN.

По результатам исследования сделан вывод, о наиболее эффективной архитектуре сети – RBFN. Она показала наилучшие результаты из всех рассмотренных решений, что и явилось причиной ее использования при реализации программной модели системы управления. Модель системы управления реализована в среде MATLAB.

Исходя из приведенных параметров классификации ПЛК сформулированы критерии выбора промышленного контроллера для реализации адаптивной САУ ТП измельчения: тип контроллера по количеству входов/выходов от среднего до большого, по расположению модулей – модульные, по области применения – универсальные общепромышленные, по способу программирования – предпочтительно программируемы с помощью персонального компьютера, по языкам программирования – на языках МЭК 61131-3.

После сравнения характеристик ПЛК, для реализации САУ выбран контроллер SIMATIC S7-300. Данный контроллер соответствует требуемым критериям разрабатываемой системы, а так же данная аппаратура уже используется на исследуемых предприятиях (АО «ССГПО»), что является немало значимым критерием для последующего внедрения системы.

При разработке детализированного алгоритма работы принято решение отказаться от стандартного алгоритма обучения нейросети радиально-базисной функции из-за необходимости постоянной перенастройки (пересчета) всех весовых функций нейронов сети с целью улучшения параметров работы сети и минимизации вычислительных нагрузок на контроллер. Предпочтение отдано модифицированному алгоритму, разработанному В.Н. Вичуговым.

Для реализации САУ принято решение об использовании структурированного языка управления SCL. САУ реализована по блочному типу.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Автоматизированная система управления – совокупность математических методов, технических средств и организационных комплексов, обеспечивающих рациональное управление сложным объектом или процессом в соответствии с заданной целью. В составе АСУ выделяют:

- основную часть, в которую входят информационное, техническое и математическое обеспечение;
- функциональную часть, к которой относятся взаимосвязанные программы, автоматизирующие конкретные функции управления.

Адаптация – в теории систем – приспособление самоорганизующихся систем к изменяющимся условиям среды (лат. *Adaptare* – приспособлять).

Алгоритм управления – зависимость управляющего воздействия от задающего воздействия, управляемой величины и возмущающих воздействий.

Аппроксимация – замена одних математических объектов другими, в том или ином смысле близкими к исходным. Аппроксимация позволяет исследовать числовые характеристики и качественные свойства объекта, сводя задачу к изучению более простых или более удобных объектов.

Валидация данных (*data validity*) направлена на доказательство того, что все используемые в модели данные, в том числе входные, обладают удовлетворительной точностью и не противоречат исследуемой системе, а значения параметров точно определены и корректно используются.

Валидация модели – проверка соответствия данных, получаемых в процессе машинной имитации, реальному ходу явлений, для описания которых создана модель. Производится тогда, когда экспериментатор убедился на предшествующей стадии (верификации) в правильности структуры (логики) модели. Состоит в том, что выходные данные после расчета на компьютере сопоставляются с имеющимися статистическими сведениями о моделируемой системе.

Верификация модели – оценка ее функциональной полноты, точности и

достоверности с использованием всей доступной информации в тех случаях, когда проверка адекватности по тем или иным причинам невозможна.

Весовой коэффициент – числовой коэффициент, параметр, отражающий значимость, относительную важность, «вес» данного фактора, показателя в сравнении с другими факторами, оказывающими влияние на изучаемый процесс.

Генезис месторождения – происхождение рудных месторождений.

Измельчение – в технике, тонкое дробление (до частиц размером меньше 5 мм) какого-либо твёрдого материала. И. широко применяется для обогащения полезных ископаемых в горном деле, а также в металлургии, химической, строительной и др. отраслях промышленности.

Имитационная модель – программный образ концептуальной модели, определённый, как правило, на одном из высокоразвитых объектно-ориентированных языков программирования (моделирования).

Искусственная нейроподобная сеть – совокупность нейроподобных элементов, определенным образом соединенных друг с другом и с внешней средой с помощью связей, определяемых весовыми коэффициентами.

Контроллер – специализированное техническое устройство, предназначенное для управления другими устройствами путем получения информации в виде цифровых данных или аналого-дискретного сигнала от внешнего устройства (ЭВМ, датчики или иное устройство), преобразования этой информации по специальному алгоритму и выдачи управляющих воздействий в виде цифрового или аналого-дискретного сигнала.

Концептуальная модель на основе ряда предположений относительно абстракции реальности определяет иерархическую структуру исследуемой системы и связи между её отдельными компонентами (объектами). Квалификация концептуальной модели есть подтверждение принятого уровня соглашений и всех сделанных предположений для выделенной области приложения. Модель взаимодействий отображает динамику функционирования системы, а её верификация есть подтверждение корректности отображений взаимодействий объектов и динамики в целом исследуемой системы.

Корневые методы – различные способы оценки качества переходных процессов по расположению на комплексной плоскости корней характеристического уравнения замкнутой САУ.

Математическая модель – математические описания объектов, выражаемые с помощью математических формул и уравнений.

Месторождение – скопление минерального вещества на поверхности или в недрах Земли в результате тех или иных геологических процессов, по количеству, качеству и условиям залегания пригодного для промышленного использования.

Модель – объект, имитирующий, те или иные свойства изучаемого объекта реального мира.

Моделирование – процесс представления объекта исследования адекватной ему модели и проведение экспериментов с ней с целью получения информации о самом объекте.

Программа имитационного эксперимента – результат интеграции имитационной модели и соответствующей схемы эксперимента.

Рудопоявление – обычно небольшое природное скопление минерального вещества, которое почти удовлетворяет по качеству кондиционным требованиям, но в количественном отношении не может считаться предметом разработки в данных экономических условиях.

Система автоматического управления – совокупность взаимодействующих автоматического управляющего устройства и управляемого объекта.

Стержневая мельница – измельчительное устройство, применяемое для грубого помола (до 500-1000 мм) обогащаемого сырья перед окончательным помолом в шаровых мельницах.

Схема эксперимента – программная реализация планируемых сценариев

эксперимента. Достоверность модели по отношению к реальной системе зависит от схемы эксперимента в силу того, что каждая такая схема в форме начальных условий определяет соответствующие ограничения, поэтому модель и реальная система могут быть адекватными только по отношению к определённой схеме. Верификация схемы эксперимента есть, прежде всего, подтверждение совместимости схемы эксперимента и имитационной модели. Кроме того, должно быть установлено соответствие условий проведения эксперимента конкретному запланированному сценарию.

Управление – осуществление на объект управления совокупности управляющих воздействий.

Тестирование модели – планируемый итеративный процесс, направленный главным образом на поддержку процедур верификации и валидации имитационных моделей, в том числе обнаружение ошибок кода. В целом процесс верификации, валидации и тестирования на отдельных стадиях построения имитационного приложения обозначается как VV&T.

Технологический процесс – это часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда. К предметам труда относят заготовки и изделия.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ОАО АГК «Русский алюминий» – открытое акционерное общество Ачинский глиноземный комбинат «Русский Алюминий»

АО «ССГПО» – акционерное общество «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение»

АСОДУ – автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления

АСР – автоматическая система регулирования

АСУ – автоматизированная система управления

АФХ – амплитудно-фазовая характеристика

БЗ – база знаний

БН – блок поиска

БС – блок сравнения

ВЧХ – вещественная частотная характеристика

ГКЗ СССР – Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых СССР

ГОК – горно-обогатительный комбинат

ДГОК – Донской горно-обогатительный комбинат

ДОФ – добильно-обогатительная фабрика

ЖКХ – жилищно-коммунальное хозяйство

ЖОК – железо-обогатительный комплекс

ИНС – искусственная нейроподобная сеть

КСМД – корпус среднего и мелкого дробления

КТС – комплекс технических средств

ЛЧХ – логарифмическая частотная характеристика

ММС – мокрая магнитная сепарация

ММО – мокрое магнитное обогащение

МЧХ – мнимая частотная характеристика

МЭК – Международная электротехническая комиссия

НЦ КПМС РК – Национальный Центр по Комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан

ОС – операционная система

ОСРВ – операционная система реального времени

ОУ – объект управления

ПЗУ – постоянное запоминающее устройство

ПО	– программное обеспечение
ПЛК	– программируемый логический контроллер
ПМО	– программно-математическое обеспечение
ППР	– планово-предупредительный ремонт
ПУ	– преобразовательное устройство
РАН	– Российская Академия Наук
РВ	– реальное время
РО	– регулирующий орган
САУ	– система автоматического управления
САР	– система автоматического регулирования
СБИС	– сверхбольшая интегральная схема
СКО	– среднеквадратическое отклонение
СУ	– система управления
СМС	– сухая магнитная сепарация
СНС	– самонастраивающаяся система
ТЛ	– технологическая линия
ТНК «Казхром»	– Транснациональная компания «Казхром»
ТОО «Оркен»	– Товарищество с ограниченной ответственностью «Оркен»
ТУ	– технологическая установка
ТП	– технологический процесс
У ЦПО	– цех подготовки окатышей
РПО	– участок рудоподготовки и обогащения
ФРПО	– фабрика рудоподготовки и обогащения
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина
CFC	– Continuous Function Chart (непрерывные функциональные схемы)
CP	– Communication Processor (коммуникационный процессор)
CPN	– Counter Propagation Network (нейроподобная сеть встречного распространения)
CPU	– Central Processor Unit (модуль центрального процессора)
FBD	– Function Block Diagram (язык функциональных блоков)
FM	– Function Module (функциональный модуль)
IL	– Instruction List Language (язык списка инструкций)
IM	– Interface Module (интерфейсный модуль)
LD	– Ladder Diagram Language (язык релейных схем)

- NNwithBPTA – Neural Network with Back Propagation Training Algorithm
(нейроподобная сеть с обратным распространением ошибки)
- PLC – Programmable controller (программируемый контроллер)
- PS – Power Supply (модуль блока питания)
- RBFN – Radial Basis Function Network (нейроподобная сеть радиальных базисных функций)
- SCL – Structured Control Language (структурированный язык управления)
- SFC – Sequential Function Chart (язык диаграмм состояний)
- SM – Signal Module (сигнальный модуль)
- STL – Structured Text Language (язык списка инструкций)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Марюта, А.Н. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик /А.Н. Марюта, Ю.Г. Качан, В.А. Бунько. – М.: Недра, 1983. – 277 с.
- 2 Галлиев, С.Ж. Казахстан и мировая добыча минерального сырья: проблемы и тенденции развития / С.Ж. Галлиев //Современное состояние и перспективы развития горнодобывающих отраслей промышленности: матер. междунар. науч.-практ. конф. «Геоинформатика-2004». – Рудный, 2004. – С. 24-31.
- 3 Куксов, А.П. Минерально-сырьевая база предприятий объединения АО «ССГПО» /А.П. Куксов, С.Н. Алехин //Горный журнал. – 2004. – № 7. – С. 24-34.
- 4 Мирошниченко, Л.А. Справочник «Месторождения железа Казахстана» /Л.А. Мирошниченко, З.Т. Тилепов, Н.Я. Гуляева. – Алматы: Комитет геологии и охраны недр Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан, 1998. – 485 с.
- 5 Терминология открытых горных работ: Учеб. пособие /под. ред. академика В.В. Ржевского. – М.: Московский государственный горный университет, 1987. – 95 с.
- 6 Лукас, В.А. Теория автоматического управления /В.А. Лукас. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 416 с.
- 7 Совершенствование технологических процессов в УРПО АО «ССГПО» /М.М. Турдаунов [и др.] //Современное состояние и перспективы развития горнодобывающих отраслей промышленности: матер. междунар. науч.-практ. конф. «Геоинформатика-2004». – Рудный, 2004. – С.14-17
- 8 Турдаунов, М.М. Акционерное общество «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение» /М.М. Турдаунов //Горноперерабатывающая промышленность: реальность и перспективы сотрудничества: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Рудный, 2005. – С. 20-31.
- 9 Организация и управление горным производством. Учебник для ВУЗов /под общ. ред. В.И. Ганицкова. – М.: Недра, 1991. – 568 с.
- 10 Цеховой, А.Ф. О формализации задач проектирования в области недропользования /А.Ф. Цеховой, А.Б. Николенко //Автоматизация и управление: перспективы, проблемы и решения»: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Алматы. 2007. – С. 449-450.
- 11 Брюханов, В.Н. Теория автоматического управления /В.Н. Брюханов, М.Г. Косов, С.П. Протопопов. – М.: Высшая школа, 2000. – 268 с.
- 12 Ишмухамедов, Н.К. Черная металлургия Казахстана /Н.К. Ишмухамедов. –

Алматы: Н-И Центр «Гылым», 2002. – 584 с.

13 Обогащаемость железных руд. Справочное пособие /И.П. Богданова [и др.] – М.: Недра, 1989. – 158 с.

14 Байназарова, Л.А. Структура и параметры основных агрегатов двухстадиального измельчения /Л.А. Байназарова //Автоматизация и управление: перспективы, проблемы и решения: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Алматы, 2007. – С. 217-221.

15 Воронов, В.А. Многоуровневая оптимизация процессов обогащения /В.А. Воронов. – М.: Недра, 1991. – 154 с.

16 Мутанов, Г.М. Задачи многокритериальной оптимизации /Г.М. Мутанов, И.Ю. Быкова, С.В. Коротеев //Автоматизация и управление: перспективы, проблемы и решения: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Алматы, 2007. – С. 79-82.

17 Новожилов, М.Г. Качество рудного сырья черной металлургии /М.Г. Новожилов, Я.Ш. Ройзен, А.М. Эрперт. – М.: Недра, 1977. – 415 с.

18 Цеховой, А.Ф. Типологизация задач недропользования /А.Ф. Цеховой //Горное дело и металлургия в Казахстане. Состояние и перспективы: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Алматы, 2006. – С. 417-421.

19 Цеховой, А.Ф. Синтез задач управления формированием рудопотока в горнообогатительной системе (на примере асбестовой отрасли) /А.Ф. Цеховой. – Алматы: КазНТУ, 1997. – 274 с.

20 Брусничкина-Кириллова, Л.Ю. Измельчение руд в мельницах /Л.Ю. Брусничкина-Кириллова. – М. Наука. – 2009. – 560 с.

21 Троп, А.Е. Автоматизация обогатительных фабрик /А.Е. Троп, В.З. Козин, В.М. Аршинский. – М.: Недра, 1970. – 452 с.

22 Рахимбеков, С.М. Проблема управления горным производством в реальном времени /С.М. Рахимбеков //Горноперерабатывающая промышленность: реальность и перспективы сотрудничества: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Рудный, 2005. – С. 172-176.

23 Кошарский, Б.Д. Автоматизация управления обогатительными фабриками /Б.Д. Кошарский, А.Я. Ситковский. – М.: Недра, 1977. – 360 с.

24 Козин, В.З. Экспериментальное моделирование и оптимизация процессов обогащения полезных ископаемых /В.З. Козин. – М.: Недра. 1984. – 112 с.

25 Наносов, Д.М. Моделирование горных процессов /Д.М. Наносов. – М.: Недра. 1969. – 204 с.

26 Нейрокомпьютеры и интеллектуальные роботы /Н.М. Амосов [и др.]. – Киев:

Наукова думка, 1991. – 272 с.

27 Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: пер. с англ. – М.: Горячая линия – Телеком. 2001. – 262 с.

28 Круглов, В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика: монография /В.В. Круглов, В.В. Борисов. – 2-е изд., стер. – М.: Горячая Линия-Телеком, 2002. – 381 с.

29 Rosenblatt, F. Principles of Neurodynamics /F. Rosenblatt. – Washington D.C.: Spartan Press, 1961. – 175 p.

30 Минский, М.Л. Перцептроны /М.Л. Минский, С. Пейперт. – М.: Мир. – 1971. – 350 с.

31 Jain, Anil K. Artificial Neural Networks /Anil K. Jain, Jianchang Mao, K.M. Mohiuddin. //A Tutorial, Computer. – 1996. – Vol. 29, No. 3. – P. 31-44.

32 Захаренкова, Т.А. Алгоритмы обучения многослойных нейронных сетей в нейросетевых системах управления /Т.А. Захаренкова, В.А. Терехов, И.Ю. Тюкин //Нейрокомпьютеры: разработ., применение. – 2001. – №2. – С. 45-54.

33 Галицкий, А.В. Использование нейронных сетей в управлении промышленным производством региона /А.В. Галицкий, А.Ю. Казаков, А.В. Костюнин //Нейрокомпьютеры: разработ., применение. – 2001. – №3. – С. 60-69.

34 Еремин, Д.М. Система управления с применением технологии нейронных сетей /Д.М. Еремин //Приборы и системы. Упр., контроль, диагностика. – 2001. – N 9. – С. 8-11.

35 Федосеева, О.В. Нейронные сети в управлении технологическим процессом /О.В. Федосеева //Автоматизация и управление: перспективы, проблемы и решения: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Алматы, 2007. – С. 200-204.

36 Шаламов, А. В. Нейронные сети как новый подход к управлению технологическим оборудованием /А. В. Шаламов //Известия Челябинского научного центра. – 2003. – Вып. 1. – С. 60-64.

37 Терехов, В.А. Искусственные нейронные сети и их применение в системах автоматического управления /В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. – СПб.: Бинум, 2007. – 430 с.

38 Сабанин, В.Р. Автоматические системы регулирования на основе нейросетевых технологий /В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов, А.И. Репин //Теория и практика построения и функционирования АСУ ТП : матер. междунар. науч. – «CONTROL-2003». – М., 2003. – С. 45-51.

39 Хасенова, Г.И. Нейроуправление и идентификация с помощью искусственных нейронных сетей /Г.И. Хасенова //Автоматизация и управление: перспективы, проблемы и

решения: матер. междунар. науч. – Алматы, 2007. – С. 105-109.

40 Аверилл, М.Л. Имитационное моделирование. Классика CS /М.Л. Аверилл, В.Д. Кельтон. – 3-е изд. – СПб.: ВХВ, 2004. – 847 с.

41 Рыжиков, Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технологии /Ю.И. Рыжиков. – СПб.: КОРОНА, 2004. – 420 с.

42 Гультияев, А.К. Имитационное моделирование в среде WINDOWS /А.К. Гультияев. – СПб.: КОРОНА, 2005. – 480 с.

43 Калашников, В.В. Организация моделирования сложных систем /В.В. Калашников. – М.: Знание, 1982. – 400 с.

44 Шеннон, Р.Д. Имитационное моделирование систем – искусство и наука /Р.Д. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 418 с.

45 Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем /Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 395 с.

46 Бусленко, Н.П. Лекции по теории сложных систем /Н.П. Бусленко. – М.: Советское радио, 1973 – 440 с.

47 Бусленко, Н.П. Математическое моделирование производственных процессов /Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1964 – 365 с.

48 Клейнен, Дж. Статистические методы в имитационном моделировании /Дж. Клейнен. – М.: Статистика, 1978. – 204 с.

49 Метод прогнозирования показателей работы обогатительных фабрик на примере ОФ АО «ССГПО» /М.М. Турдахунов [и др.] // Обогащ. руд. – 2005. – № 2. – С. 22-24.

50 Коваленко, И.Н. Анализ редких событий при оценке эффективности и надёжности систем /И.Н. Коваленко. – М.: Советское радио, 1980. – 208 с.

51 Технология системного моделирования /Е.Ф. Аврамчук [и др.]. – М.: Машиностроение, 1988. – 520 с.

52 Поляк, Ю.Г. О чувствительности результатов вероятностного моделирования к изменению параметров модели /Ю.Г. Поляк // Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика. – 1972. – с. 35-40.

53 Law, A.M. How to build valid and credible simulation models /A.M. Law, M.G. McComas // Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. – 2001. – pp. 22-29.

54 Пепеляев, В.А. О современных подходах к оценке достоверности имитационных моделей [электронный ресурс] /В.А. Пепеляев, Ю.М. Чёрный //Имитационное моделирование 2003: матер. междунар. науч. – <http://www.gpss.ru/immod'03/028.html>.

- 55 Советов, Б.Я. Моделирование систем /Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 1998. – 456 с.
- 56 Гультаев, А. Визуальное моделирование в среде MATLAB /А. Гультаев. – СПб.: Питер, 2000. – 600 с.
- 57 Шрейбер, Т.Д. Моделирование на GPSS /Т.Д. Шрейбер. – М.: Машиностроение, 1980. – 520 с.
- 58 Carson, J.S. Model verification and validation /J.S. Carson //Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. – 2002. – P. 52-58.
- 59 Кочубиевский, И.Д. Динамическое моделирование и испытания технических систем /И.Д. Кочубиевский. – М.: Энергия, 1978. – 303 с.
- 60 Дьяконов, В. Simulink 4. Специальный справочник /В. Дьяконов. – СПб: Питер, 2000. – 620 с.
- 61 Дьяконов, В.П. MATLAB 6.0/6.1/6.5/6.5 + SP1 + Simulink 4/5. Обработка сигналов и изображений /В. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 592 с.
- 62 Потемкин, В. Вычисления в среде MATLAB /В. Потемкин В.. – М.: Диалог-МИФИ, 2004. – 410 с.
- 63 Сергиенко, А. Цифровая обработка сигналов /А. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2006. – 430 с.
- 64 Черных, И. Simulink: среда создания инженерных приложений /И. Черных. – М.: Диалог-МИФИ, 2003. – 362 с.
- 65 Поршнева, С. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB /С. Поршнева. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2003. – 612 с.
- 66 Ковалев, С.Н. К применению информационно-компьютерных технологий в математическом моделировании систем /С.Н. Ковалев. – М.: МАДИ, 2001. – 488 с.
- 67 Рогов, Е.И. Оптимизационное моделирование в горном деле /Е.И. Рогов. – Алма-Ата.: Наука. 1987. – 80 с.
- 68 Цеховой, А.Ф. Модели анализа и прогноза динамических ядов в задачах управления горным производством /А.Ф. Цеховой, Ю.В. Боровской //«Горное дело в Казахстане. Состояние и перспективы» : матер. междунар. науч. – Алматы, РИО ВАК, 2000. – С. 74-79.
- 69 Широков, Р.В. Нейросетевые модели систем автоматического регулирования промышленных объектов: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук /Р.В. Широков. – Сев.-Кавк. гос. техн. ун-т, Ставрополь, 2003. – 18 с.
- 70 Крапущина, Н. В. Методы искусственного интеллекта в задачах оперативного управления и оптимизации сложных технологических комплексов /Н. В. Крапущина, К. М.

Пастухова, П. А. Свиридов //Проблемы управления: матер. междунар. науч. – М.: 2003. – 560 с.

71 Мандрыкин, А. В. Использование нейронных сетей в управлении предприятием /А. В. Мандрыкин //Вестник Воронежского государственного технического университета. Серия: Экономика и управление. – 2005. – Т. 1, N 9. – С. 37-40.

72 Крушель, Е.Г. Методическое и компьютерное сопровождение задач анализа и оптимизации систем управления техническими и экономическими объектами /Е.Г. Крушель, О.В. Степанченко. – Камышин, 2000. – www.exponenta.ru.

73 Parker, D.B. Second order back propagation: Implementing an optimal $O(n)$ approximation to Newton's method as an artificial neural network /D.B. Parker. – New York: Winter Press, 2001. – 280 p.

74 Stornetta, W.S. An improved three-layer, backpropagation algorithm. In Proceedings of the IEEE First International Conference on Neural Networks /W.S. Stornetta, B.A. Huberman. – San Diego, CA: SOS Printing, 1999. – 80 p.

75 Лисицин, Е. Radial Based Functions /Е. Лисицин //On-line журнал «Графика и мультимедиа». – Выпуск №2 – <http://graphics.cs.msu.su>.

76 Нейроинформатика /А.Н. Горбань [и др.]. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение РАН, 1998 – 296 с.

77 Кьюсиак, Э. Искусственный интеллект: применение в интегрированных производственных системах /Э. Кьюсиак. – М.: Машиностроение, 1991. – 544 с.

78 Горанский, Г.К. Технологическое проектирование в комплексных автоматизированных системах подготовки производства /Г.К. Горанский, Э.И. Бендерова. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.

79 Ковалев, А. T-FLEX Технология 10 – ваша профессиональная система проектирования технологических процессов /А. Ковалев //САПР и графика. – №9. – 2006. – С. 96-102.

80 Федосов, Б.Т. Уравнения состояния динамических объектов с запаздыванием /Б.Т. Федосов. – http://model.exponenta.ru/bt/bt_172_st_sp_ext_obj.htm.

81 Принципы новой индустриальной политики /Д. Муканов [и др.] //Журнал «Промышленность Казахстана». – 2002. – №10. – С. 36.

82 Ören, T.J. Concepts for advanced simulation methodologies /T.J. Ören, B.P. Zeigler //Simulation. – Vol.32, 3. – March, 1979. – P. 69-82.

83 Муканов, Д. Информатизация и автоматизация горно-металлургического комплекса /Д. Муканов, А. Умерсеитова //Журнал «Промышленность Казахстана». – 2005. – №08. – С. 24-26.

84 Sargent, R.G. Some approaches and paradigms for verifying and validating simulation models /R.G. Sargent //Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. – 2001. – P. 106-114.

85 Короткий, С. Сайт «Лаборатория искусственного интеллекта» /С. Короткий. – www.lii.newmail.ru.

86 Вичугов, В.Н. Модифицированный градиентный алгоритм обучения радиально-базисных нейронных сетей /В.Н. Вичугов //Известия Томского политехнического университета. – 2009. – № 5. – С149-152.

