

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Факультет: Профессионального образования

Направление: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: Автоматизированный электропривод и робототехнические комплексы

Кафедра: Общенаучных дисциплин

Доцент с и.о. зав кафедрой ОНД

_____ К.В. Кондратьева

« 19 » июня 2026 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему:

«Автоматизация системы управления технологическим процессом цементной

мельницы №11 цеха «Помол» (на примере предприятия ООО

«Горнозаводскцемент»))»

Студент: _____ С.О.Шашов

(подпись, дата)

Группа: АЭП-21-16з ЛФ

Состав ВКР:

1. Пояснительная записка на _____ стр.
2. Графическая часть на _____ листах
3. Электронный носитель с материалами ВКР

Руководитель: _____ канд. физ.-мат. наук, доцент, Н.М. Кулмурзаев

(подпись, дата)

Проверено

на наличие

заимствования: _____ канд. экон. наук, доцент, К.В. Кондратьева

(подпись, дата)

СОДЕРЖАНИЕ

ВЕДЕНИЕ	5
1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	7
1.1 Место процесса помола в технологической цепочке производства цемента.....	7
1.2 Анализ устройства и принципа работы цементной мельницы	7
1.3 Существующая система управления и выявление проблемных зон	8
1.4 Обоснование необходимости комплексной автоматизации.....	9
1.5 Основные решения по автоматизации	10
2 СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ	12
2.1 Функции частей программного обеспечения.....	13
2.1.1 Функции блоков CFC.....	13
2.1.2 Функции программного обеспечения SIMATIC PCS7	13
2.2 Средства разработки	14
2.2.1 Simatic step 7	14
2.2.2 Simatic hmi	14
2.3 Система загрузки в мельницу	15
2.3.1 Архитектура системы и типы дозаторов Fengbo	15
2.3.2 Управление и расчет подачи материала (Математическая модель)	15
3 ИНТЕГРАЦИЯ ТРЕХ ДОЗАТОРОВ В ОБЩУЮ СИСТЕМУ АСУ ТП	18
3.1 Физический уровень подключения	18
3.2 Уровень автоматизации (SCADA/DCS)	18
3.3 Логика взаимоблокировок.....	19
3.4 Интерфейс оператора (HMI «Цифровой двойник»).....	19
3.5 Работа оператора.....	20
3.5 Типовая схема обвязки для системы трёх дозаторов	21
3.6 Алгоритм работы системы автоматизации загрузки мельницы	25
4 АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ	27
4.1 Автоматизация выгрузки готового цемента из мельницы	27

4.1.1 Характеристика пневмокамерных насосов как транспортирующего оборудования	27
4.1.2 Назначение и область применения.....	27
4.1.3 Технические данные	28
4.1.4 Контроллер Jazz от Unitronics: технические характеристики и возможности	32
4.1.5 Приборы КИПиА ПКН	34
4.1.6 Аналоговый сигнал (4-20 мА) — непрерывный контроль	37
4.1.7 Дискретный сигнал (сигнализация) — для модификации ДМ5001Г	38
4.1.8 Блок конечных выключателей Camozzi SBA для кранов управления воздухом.....	38
4.1.9 Алгоритм работы системы автоматики ПКН.....	39
4.2 Автоматизация системы впрыска воды для охлаждения материала в мельнице	45
4.2.1 Технологическая необходимость охлаждения цемента в мельнице.....	45
4.2.2 Математический расчёт и подбор частотного преобразователя Siemens для насоса 3 кВт	50
4.3 Технологический контроль цементной мельницы по температурным датчикам и датчику разрежения	61
4.4 Автоматизация регенерации	65
4.4.1 Управление регенерацией рукавного фильтра.....	65
4.4.2 Исполнительные механизмы: импульсные клапаны.....	67
4.4.3 Принцип работы рукавного фильтра цементной мельницы.....	67
4.4.4 Автоматизация встряхивания: два режима управления.....	68
5 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ.....	73
5.1 Расчёт затрат на внедрение	73
5.2 Оценка экономической эффективности	74
5.2.1 Снижение расхода электроэнергии	74
5.2.2 Экономия клинкерной составляющей	74

5.2.3 Снижение эксплуатационных расходов.....	75
5.2.4 Расчёт срока окупаемости	76
5.3 Оценка влияния автоматизации на качество цемента.....	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	79
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	81

ВЕДЕНИЕ

Цементная промышленность является базовой отраслью строительного комплекса и национальной экономики. В условиях высокой конкуренции и ужесточения требований к качеству готовой продукции ключевыми факторами конкурентоспособности предприятия выступают повышение эффективности производства, снижение энергоемкости и материалоемкости, а также обеспечение стабильности технологических параметров[2].

Процесс помола клинкера в цементной мельнице представляет собой один из наиболее энергоемких и критически значимых этапов производства цемента, поскольку его нестабильность непосредственно влияет на тонкость помола, производительность агрегата, удельный расход электроэнергии и потребительские свойства готового продукта [4]. На многих действующих предприятиях, в том числе в ООО «Горнозаводскцемент», управление подобными процессами базируется преимущественно на опыте оперативного персонала и периодическом ручном контроле, что приводит к субъективным ошибкам, колебаниям режимов работы и нерациональному расходованию ресурсов.

Внедрение автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) на базе современных программно-аппаратных комплексов позволяет осуществить переход к оптимальному и адаптивному управлению, обеспечивая функционирование мельницы в заданных расчетных режимах. Таким образом, автоматизация управления цементной мельницей в ООО «Горнозаводскцемент» является актуальной научно-практической задачей, решение которой направлено на достижение значимого технико-экономического эффекта.

Теоретические основы автоматизации технологических процессов в цементной промышленности, в том числе методы управления помольными агрегатами, детально представлены в трудах отечественных и зарубежных исследователей, а также в виде готовых технических решений ведущих

мировых производителей средств автоматизации (Siemens, Schneider Electric, ABB и др.). Однако практическая реализация подобных систем требует их глубокой адаптации к конкретным условиям предприятия: технологической схеме, характеристикам оборудования, организационно-экономическим ограничениям. Это обуславливает необходимость разработки индивидуального проекта автоматизации для каждого объекта [1].

Теоретическая и методологическая основа исследования работы базируется на положениях теории автоматического управления, методах системного анализа технологических процессов, современных стандартах проектирования АСУ ТП (включая ГОСТ и ISA), а также на анализе технической документации предприятия и научно-технической литературы.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанный проект автоматизации может быть непосредственно реализован в ООО «Горнозаводскцемент». Внедрение предлагаемой системы и модернизация пускорегулирующей аппаратуры позволят повысить стабильность технологического режима, увеличить производительность мельницы, снизить удельный расход электроэнергии, улучшить качество целевого продукта и уменьшить влияние человеческого фактора. Результаты исследования также могут быть адаптированы для использования на других аналогичных производствах.

1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1.1 Место процесса помола в технологической цепочке производства цемента

Производство цемента представляет собой многостадийный процесс, включающий добычу и подготовку сырья, обжиг сырьевой смеси для получения клинкера, помол клинкера с добавками и складирование готовой продукции [3]. Участок помола является завершающим и критически важным, поскольку именно здесь формируются конечные свойства цемента: марка прочности, сроки схватывания, тонкость помола (удельная поверхность), непосредственно влияющие на активность цемента и качество бетонных смесей.

В ООО «Горнозаводскцемент» применяется классическая технология помола в трубных шаровых мельницах как замкнутого цикла (с сепаратором), так и открытого цикла (без сепаратора). Основная задача участка — тонкое измельчение клинкера, гипса (регулятора сроков схватывания) и минеральных добавок (шлак, зола и др.) до заданной дисперсности с их последующим гомогенным смешением.

1.2 Анализ устройства и принципа работы цементной мельницы

Цементная мельница № 11, подлежащая автоматизации в ООО «Горнозаводскцемент», представляет собой горизонтальный вращающийся барабан (длиной 15 м, диаметром 3,2 м), футерованный изнутри бронеплитами. Барабан загружается мелющими телами (шарами различного диаметра) и материалом. При вращении барабана мелющие тела под действием центробежной силы поднимаются по стенке, а затем падают, измельчая материал ударом и истиранием [4].

Ключевые технологические параметры процесса:

1. Загрузка мельницы (питание): производительность питателя (т/ч), весовое дозирование компонентов (клинкер, гипс, добавки),

гранулометрический состав материала. Оптимальная загрузка обеспечивает полное заполнение межкамерной перегородки; перегрузка ведет к снижению эффективности помола, недогрузка — к потерям производительности и перерасходу энергии.

2. Выгрузка готового продукта: тонкость помола (остаток на сите или удельная поверхность по Блейну), температура выходящего материала, производительность разгрузочного устройства. Скорость выгрузки должна соответствовать скорости образования новых частиц; ее задержка вызывает переизмельчение, рост температуры и налипание материала.

3. Охлаждение материала: температура материала на входе и выходе, расход охлаждающей воды, температура корпуса мельницы. Превышение температуры (выше 110–120°C) ведет к дегидратации гипса и риску ложного схватывания цемента.

4. Термоконтроль: температура отходящих газов, подшипников, масла в редукторе, материала на выходе. Используется для автоматического регулирования аспирации и впрыска воды.

5. Аспирация (вентиляция): разрежение внутри барабана, скорость газов, расход воздуха, запыленность отходящего воздуха. Недостаточная аспирация приводит к перегреву и замазыванию бронеплит, избыточная — к уносу недомолотого сырья.

Указанные параметры тесно взаимосвязаны: например, повышение загрузки требует усиления аспирации и охлаждения для соблюдения температурных ограничений. Оптимизация процесса направлена на достижение максимальной удельной поверхности при минимальных энергозатратах.

1.3 Существующая система управления и выявление проблемных

ЗОН

В настоящее время на предприятии применяется локализованная автоматика (регулирование отдельных параметров) и ручное управление

оператором на основе эмпирического опыта и периодических лабораторных анализов. В ООО «Горнозаводскцемент» для увеличения выпуска цемента марки М400 была произведена реконструкция устаревшей сырьевой мельницы под шаровую мельницу № 11 для помола клинкера. В процессе эксплуатации выявлены следующие системные проблемы:

1. Нестабильность качества цемента: ручное дозирование компонентов и регулирование загрузки приводят к колебаниям тонкости помола и химического состава от партии к партии.

2. Субоптимальные режимы работы: отсутствие комплексной системы управления, интегрирующей все параметры, не позволяет устойчиво поддерживать режим максимальной производительности при минимальном удельном расходе электроэнергии.

3. Высокая энергоемкость: процесс помола является самым энергозатратным (до 60–70% электроэнергии цеха помола); неоптимальная загрузка и ручное управление обуславливают перерасход энергии.

4. Отсутствие детальной архивации и анализа данных: затруднены анализ причин отклонений, планирование ремонтов и расчет точных технико-экономических показателей.

1.4 Обоснование необходимости комплексной автоматизации

Переход от локализованного и ручного управления к комплексной АСУ ТП является необходимым этапом модернизации предприятия. Решение указанных проблем достигается за счет:

- стабилизации ключевых параметров (загрузка, тонкость помола, температура) с помощью контуров автоматического регулирования (ПИД-регуляторов);
- оптимизации процесса в реальном времени на основе каскадных и программно-логических систем управления (например, связь сигнала акустики, тока двигателя и подачи сырья);

- создания единого информационного пространства с визуализацией на мнемосхемах SCADA-системы;
- автоматизации вспомогательных операций (последовательный пуск/останов тракта, аварийная защита);
- накопления и анализа исторических данных для выявления зависимостей, прогнозирования и формирования отчетности.

1.5 Основные решения по автоматизации

Система управления разработана на базе контроллеров SIEMENS S7-400 и S7-1200 с использованием распределенных модулей ввода/вывода ET200M. В качестве человеко-машинного интерфейса (HMI) применяются панели управления KTP700 и автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора на базе персонального компьютера с программным обеспечением SIEMENS SIMATIC PCS7.

Система обеспечивает:

- управление технологическим процессом помола цементной мельницы № 11;
- сбор информации о состоянии оборудования и технологических параметрах;
- аварийную и предупредительную сигнализацию;
- графическую визуализацию и архивирование параметров процесса;
- защиту персонала, оборудования и окружающей среды при нештатных ситуациях.

Технические решения приняты в соответствии с действующими нормативными и руководящими документами по проектированию АСУ ТП. В состав технических средств входят: источники бесперебойного питания (с резервированием), преобразователи частоты Siemens G120, контроллеры Siemens S7-400 (CPU 414-3 PN/DP) и S7-1200, модули ввода/вывода ET200M, панели управления KTP700, АРМ оператора. Система предусматривает

резерв по каналам ввода/вывода и свободное место для дальнейшего наращивания и модернизации. Управление исполнительными механизмами реализовано в автоматическом и ручном режимах с формированием аварийных сообщений на экранах АРМ при возникновении неисправностей. Связь между контроллером, станциями ввода/вывода и АРМ осуществляется по сети PROFINET. Программное обеспечение включает Siemens PCS7 V9.0 и Siemens WinCC V7.4.

2 СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Программа контроллера включает следующие блоки:

- PLC symbols - таблица сигналов контроллера;
- PLC datatypes - пользовательские типы данных;
- Program blocks -программные блоки (FC, FB, DB, OB);
- Technology objects - технологические объекты (например, Siemens Drive G120);
- CFC blocks - непрерывные функциональные схемы, реализующие основную логику программы ПЛК;
- Distributed I/O - распределенные станции ввода/вывода.

Основная часть программы контроллера содержится в блоках CFC.

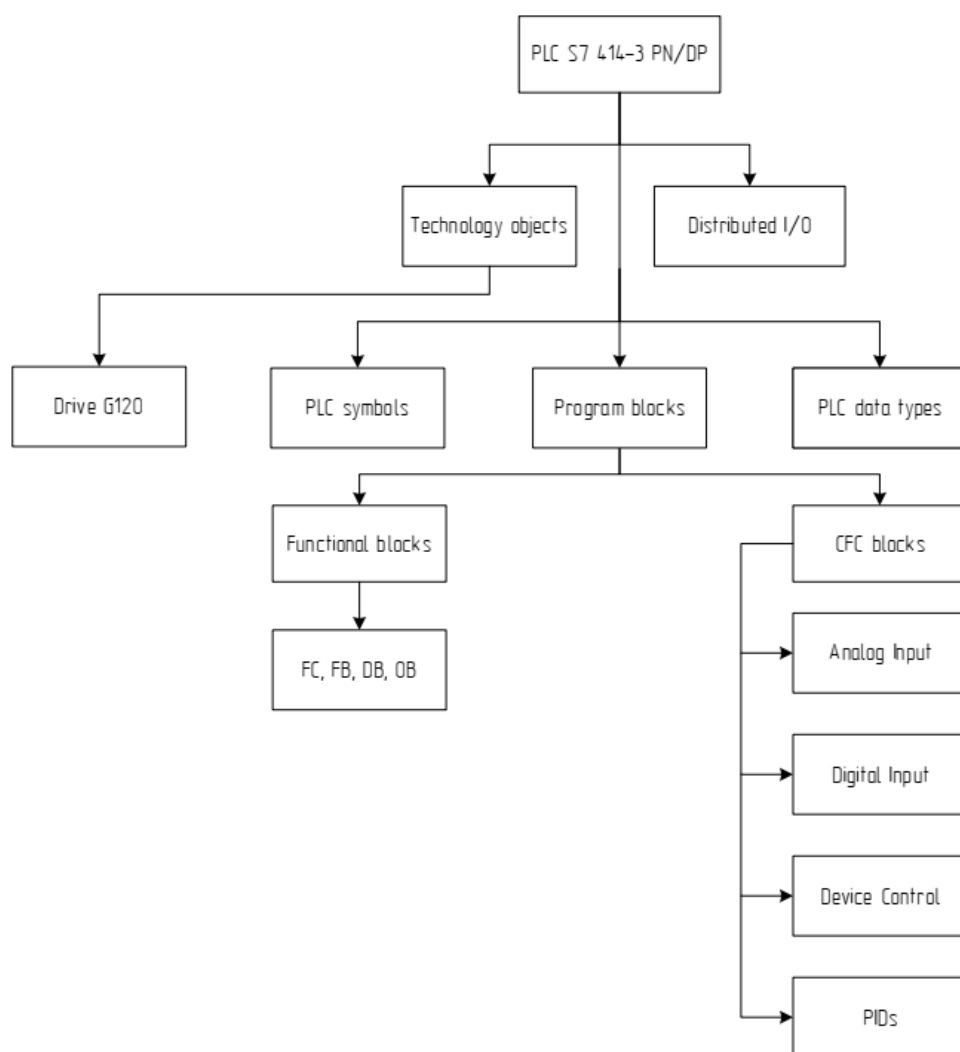


Рисунок 1 -Структура программного обеспечения

2.1 Функции частей программного обеспечения

2.1.1 Функции блоков CFC

Analoginput - обработка входных аналоговых сигналов (преобразование, масштабирование) с использованием функции FB1006.

Digital input - обработка входных дискретных сигналов (функции FB1871, FB1873).

Device Control - обработка технологического оборудования и автоматических режимов:

Drive Control - управление двигателями (FB1001);

Valve Control - управление клапанами (FB1002);

Interlock - защитные блокировки (FB1060, FB1061, FB1062);

Auto Mode - автоматическое управление (FB1009–FB1015).

PIDs - обработка ПИД-регуляторов (в зависимости от типа используются FB1818, FB1874, FB1875, FB1878, FB1830).

2.1.2 Функции программного обеспечения SIMATIC PCS7

SIMATIC PCS7 представляет собой интегрированную инструментальную среду для программирования и обслуживания систем автоматизации SIMATIC S7 и систем компьютерного управления SIMATIC WinCC. Основные функции:

- планирование, конфигурирование и параметризация аппаратуры и систем связи;
- разработка прикладного программного обеспечения;
- документирование, тестирование и отладка;
- обслуживание, управление процессом и архивация данных.

PCS7 объединяет SIMATIC STEP 7 и SIMATIC WinCC в едином инженеринговом инструменте.

2.2 Средства разработки

2.2.1 Simaticstep 7

SIMATIC STEP 7 позволяет конфигурировать, программировать, тестировать и диагностировать контроллеры серии S7 [1]. Включает:

- SIMATIC Manager - ядро пакета для управления компонентами проекта;
- Symbol Editor - задание символьных имен, типов данных и комментариев;
- Hardware Configuration - конфигурирование аппаратуры и проверка корректности;
- Communication - настройка циклической или событийно-управляемой передачи данных (MPI, PROFIBUS, PROFINET);
- System diagnosis — обзор состояния контроллера;
- Information functions — анализ данных CPU и поведения программы;
- Документирование — формирование проектной документации.

STEP 7 поддерживает языки программирования по стандарту IEC 61131-3 (STL, LAD, FBD), а также специализированные языки, включая CFC. Программа может содержать организационные блоки (OB), функциональные блоки (FB), функции (FC) и блоки данных (DB).

2.2.2 Simatic hmi

SIMATIC HMI охватывает устройства от базовых панелей (Basic Panels) и SIMATIC Comfort Panels до решений на базе SIMATIC PC с функциональностью SCADA. Программирование всех устройств выполняется в едином программном пакете SIMATIC WinCC.

2.3 Система загрузки в мельницу

2.3.1 Архитектура системы и типы дозаторов Fengbo

Для загрузки мельницы обычно используются три дозатора для клинкера, гипса и добавок. Fengbo предлагает три основных типа оборудования, и выбор зависит от физических свойств материала (порошок, гранулы, кусковой)[5].

Таблица 1 – Типы дозаторов

Характеристика	Ленточный весовой дозатор (FB-IWFL/M)	Роторный весовой дозатор (FB-IDRFS)	Пневмовесовой (FB-CWFL)
Тип материала	Кусковой, сыпучий (клинкер, гипс)	Мелкодисперсный пылевидный (зола, цемент)	Легкие порошки/гранулы (добавки)
Точность	±0.5%	±0.5%	±0.5%
Принцип	Измерение нагрузки на ролик + тахометр	Заполнение ячеек ротора по закону гравитации	Измерение убыли массы бункера за единицу времени
Интеграция	RS485 / Modbus	RS485 / Modbus / DCS	RS485 / Modbus / DCS
Весовой элемент	Один или два тензодатчика	Тензодатчик (компенсация давления)	Три тензодатчика (120°)

2.3.2 Управление и расчет подачи материала (Математическая модель)

Автоматизация строится на замкнутом цикле:

- Задание → Измерение → Сравнение (PID) → Коррекция.

Алгоритм работы трех дозаторов на мельницу осуществляется по технологической карте.

Принцип расчета рассмотрим на примере ленточного дозатора

Самый распространенный тип для основных компонентов цемента. Контроллер непрерывно вычисляет расход по формуле расчета объемной производительности дозатора с учетом коэффициента заполнения (1).

$$Q = \frac{q \cdot v}{L} \text{ или } Q = W \cdot V \quad (1)$$

Где:

Q - Мгновенный расход (кг/с или т/ч).

W (q) - Вес материала на метр конвейерной ленты (кг/м). Определяется тензодатчиком, интегрированным в роlikоопору.

V (v) - Скорость движения ленты (м/с). Измеряется датчиком скорости (тахогенератором) на ведомом валу.

Например, по технологической карте: требуется подавать 100 т/ч клинкера, 5 т/ч гипса и 3 т/ч шлака.

Алгоритм работы:

- установка задания. Оператор в АСУ ТП вводит пропорции. Система рассчитывает задание для каждого дозатора: Дозатор №1 - 100%, №2 - 5%, №3 - 3%.

- прямое управление. Контроллер дозатора получает задание и выставляет начальную частоту на преобразователе частоты (ПЧ) мотора, чтобы раскрутить ленту/ротор до расчетной скорости.

- измерение. Ленточный дозатор взвешивает нагрузку на ленте. Если клинкер влажный или крупный, вес на ленте будет больше, чем расчетный.

Роторный дозатор пыли (Fengbo) использует уникальную технологию: материал ссыпается в ячейки ротора, и тензодатчик взвешивает заполненный объем. Система компенсирует давление аэрации (поддува), которое обычно сбивает точность обычных весов.

- коррекция (ПИД-регулирование). Контроллер сравнивает фактический расход (Q факт.) с заданием (Q зад.).

Если фактический расход гипса упал, значит забился бункер.

Для продолжения работы контроллер увеличивает скорость вращения шнека или ленты дозатора №2, чтобы восстановить пропорцию 5%.

- стабилизация мельницы. Система стремится к тому, чтобы суммарный поток материала в мельницу был стабилен. Резких скачков «общей загрузки» не происходит, что предотвращает перегрузку сепараторов и вибрацию мельницы.

3 ИНТЕГРАЦИЯ ТРЕХ ДОЗАТОРОВ В ОБЩУЮ СИСТЕМУ АСУ ТП

Интеграция трех дозаторов в единую систему управления мельницей строится на двух уровнях:

- локальном (автономном)
- верхнем (диспетчерском).

3.1 Физический уровень подключения

Все современные контроллеры Fengbo поддерживают цифровую связь, что позволяет обойтись без аналоговых сигналов 4-20 мА (хотя они часто дублируются для аварийного режима) [6].

- интерфейс: RS-485.
- протокол: Modbus RTU (наиболее распространен), Profibus DP (опционально).
- топология: все три дозатора подключаются к одному сегменту сети DCS как ведомые устройства (Slaves).

3.2 Уровень автоматизации (SCADA/DCS)

Программное обеспечение верхнего уровня (например, WinCC, iFix, MasterSCADA) получает следующий массив данных с каждого дозатора через OPC-сервер или напрямую по Modbus:

- технологические параметры: Мгновенный расход (т/ч), Суммарный расход за смену (т), Загрузка бункера (%).
- диагностика: Статус работы (Пуск/Стоп/Авария), Текущая частота ПЧ, Температура подшипников (опционально).
- уставки: Плановая производительность мельницы.

3.3 Логика взаимоблокировок

Самое важное в АСУ ТП мельницы — это безопасность. Система должна реализовывать алгоритм:

- пуск (старт мельницы):

- 1) запрет пуска, если нет сигнала "готовности" от всех трех дозаторов.

- 2) задержка: сначала включается главный привод мельницы, затем (через 10-30 сек) запускаются дозаторы снизу вверх (начиная с клинкера).

- аварийный стоп:

- 1) если останавливается дозатор клинкера (самый массовый), система должна мгновенно остановить два других дозатора, чтобы избежать дисбаланса состава в работающей мельнице.

- 2) если останавливается мельница (по вибрации или температуре подшипников), система обязана выдать команду на мгновенную остановку всех дозаторов.

- коррекция по уровню:

В системе АСУ ТП задается общая загрузка мельницы (например, 150 т/ч). Контроллер DCS автоматически увеличивает или уменьшает общий коэффициент для всех трех дозаторов, сохраняя между ними процентную пропорцию[7].

3.4 Интерфейс оператора (НМИ «Цифровой двойник»)

Современные решения Fengbo (FB-DACS9000) предлагают не просто графики, а «информатизацию» производства:

- 1) Удаленный доступ:

Инженер или начальник цеха может получать SMS-уведомления о забивании бункера или падении точности дозирования.

- 2) Исторические тренды:

Система хранит данные о расходе за месяц. Если цемент потерял прочность, технологи смотрит архив - не было ли час назад падения подачи гипса.

3) Самодиагностика:

Дозатор сам сигнализирует в АСУ ТП: «Проверьте сход ленты» или «Срочная калибровка».

3.5 Работа оператора

В диспетчерской на мониторе отображается мнемосхема «Дозирование Мельницы №11».

1. Оператор вводит Производительность: 120 т/ч.

2. Система автоматически рассчитывает:

Клинкер 115.2 т/ч (96%), Гипс 4.8 т/ч (4%).

3. Он нажимает кнопку «Пуск».

4. Контроллеры дозаторов Fengbo начинают вращать двигатели на рассчитанной скорости.

При фиксации датчиком на дозаторе гипса падения веса материала на ленте (завис гипс в бункере). Контроллер локально увеличивает обороты питателя (шнека), восстанавливая заданные 4.8 т/ч. Оператор видит это только по графику (зубчик на линии расхода).

При аварийной ситуации - обрыв ремня на дозаторе клинкера. Расход падает до нуля. Система АСУ ТП мгновенно выдает: «Авария: Дозатор №1. Остановка мельницы» и автоматически глушит два других дозатора, предотвращая выпуск «жидкого» цемента без клинкера.

Таким образом, трехдозаторная система Fengbo выступает как «черный ящик» с интеллектом внутри для АСУ ТП верхнего уровня, обеспечивая стабильность химического состава цемента и энергоэффективность помола.

Основываясь на технической документации производителя, для дозаторов Fengbo используются строго определенные типы датчиков. В отличие от энкодеров в классическом понимании (которые дают высокоточный цифровой код угла поворота), здесь применяются датчики скорости импульсного типа.

Точная спецификация компонентов для каждого типа оборудования:

1. датчики для контроля веса (Весовые элементы)

Во всех моделях дозаторов Fengbo (ленточные FB-WFL, шнековые FB-DHM) для измерения массы материала применяются тензодатчики (LoadCells). Датчик встроен в электронное весоизмерительное устройство (ElectricalWeighing Device), расположенное под транспортной лентой или под шнеком. Когда материал воздействует на датчик, он генерирует аналоговый сигнал, пропорциональный весу материала, и передает его в контроллер. В зависимости от модели дозатора точность взвешивания составляет от $\pm 0.5\%$ (ленточные питатели) до $\pm 1\%$ (шнековые питатели). В ленточных питателях FB-WF используется уникальная конструкция весового устройства, обеспечивающая надежность и отсутствие паразитного трения, влияющего на точность. Для сыпучих материалов (пыль, зола) в роторных питателях и шнеках применяются тензодатчики, компенсирующие давление аэрации (поддува), которое обычно сбивает показания обычных весов.

2. Датчики определения числа оборотов (Скорости)

Датчик скорости (Speed Sensor) устанавливается на хвостовом барабане (на конце вала, противоположном приводу) или на ведомом шкиве ленточного питателя. Датчик фиксирует скорость вращения (количество импульсов за оборот). Этот сигнал также передается в контроллер. Система умножает сигнал веса (от тензодатчика) на сигнал скорости, вычисляя мгновенный расход. Скорость измеряется в пределах $0.01 \sim 1.5$ м/с.

3.5 Типовая схема обвязки для системы трёх дозаторов

Для подачи компонентов в мельницу связка из трех дозаторов выстраивается параллельно:

1) Клинкер:

- приемный бункер с колосниковой решеткой, вибраторы;
- ленточный питатель (тяжелый);
- ленточный дозатор -Fengbo FB-WFL или Schenck MULTIDOS R.

2) Гипс/шлак:

- бункер с гладкими стенками;
- шнековый (винтовой) питатель;
- ленточный дозатор -Fengbo FB-WFM (стандартный).

3) Добавки:

- бункер малого объема + аэрация;
- питатель - шнек с переменным шагом;
- ленточный дозатор малой производительности.

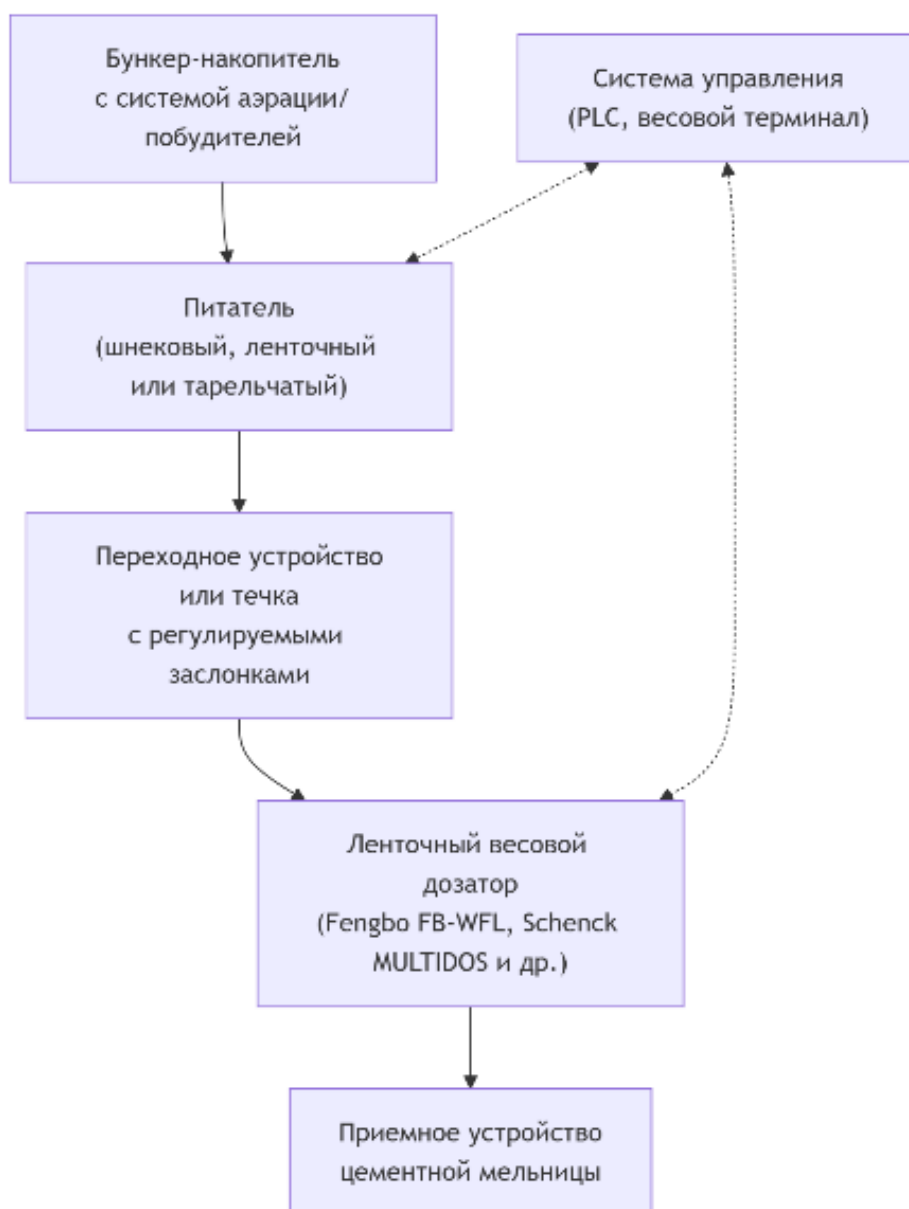


Рисунок 2 -Структурная схема обвязки

Используемые преобразователи частоты Schneider Electric ATV320U15N4C (рисунок 3) для дозаторов добавок 1.1 кВт и гипса 1.5 кВт.



Рисунок 3 – Преобразователь частоты Schneider Electric ATV320U15N4C

Для дозатора клинкера 4 кВт оптимальным будет преобразователь Schneider Electric ATV320U55N4B. (рисунок 4)



Рисунок 4 – Преобразователь частоты Schneider Electric ATV320U55N4B

Параметры, по которым был выбран данный производитель:

- Покрывание плат 3С3: Печатные платы имеют специальное лаковое покрытие класса 3С3 по стандарту IEC 60721-3-3, которое защищает электронику от проводящей пыли и коррозии

- Температурный режим: сохраняет работоспособность при температуре до 60°C без дополнительного охлаждения, что важно в запыленном цеху.

3. Управление на «ползущих» скоростях (5–10 Гц)

На частоте 5 Гц двигатель перегревается из-за плохого охлаждения. ATV320 поддерживает векторное управление без датчика (Sensorless Flux Vector Control). Это позволяет ЧРП «держат» вал на сверхнизких оборотах, не дергая дозатор, и компенсировать потерю момента там, где обычный частотник (V/f) уже «сдался».

4. Встроенная безопасность (STO)

По современным нормам охраны труда при обслуживании ленточного дозатора нужно снимать напряжение с двигателя, но не обязательно обесточивать весь шкаф. В ATV320 есть встроенная функция STO (Safe Torque Off). Это позволяет техникам чистить механизмы, не отключая управление — это требование Safety, которое не у всех бюджетных брендов реализовано «в железе» по умолчанию.

5. Простота настройки

Расчеты тепловой защиты (2,75 А) и частот (50 Гц) записываются в память ЧРП за 1 минуту через дисплей. Кроме того, он поддерживает встроенный логический контроллер (ATVLogic), позволяющий делать простую автоматику (блокировки, задержки) прямо внутри частотника, без внешнего ПЛК.

В качестве альтернативы:

- Danfoss (серия VLT Micro Drive FC 51) — тоже очень надежный бренд. Будет работать, но проверьте наличие покрытия плат 3С3 в конкретной спецификации поставки (у базовых версий его может не быть).

- Siemens (серия G120C) — отличный привод, но обычно дороже Schneider при аналогичных характеристиках.

- АВВ (серия ACS180 или ACS580)— хороший уровень защиты, но для получения полного функционала (как у ATV320) часто нужно покупать дополнительные модули ввода-вывода.

3.6 Алгоритм работы системы автоматизации загрузки мельницы

Разработанный алгоритм управления загрузкой цементной мельницы включает следующие основные шаги:

Шаг 1.Задание рецепта и производительности

Оператор на АРМ вводит требуемую производительность мельницы $Q_{\text{мельницы}}$ (т/ч) и процентное содержание компонентов: %клинкер, %гипс, %добавки.

Шаг 2.Расчёт уставок расходов

Программно рассчитываются уставки расхода для каждого дозатора:

- $G_{\text{клинкер}} = Q_{\text{мельницы}} \times \% \text{клинкер} / 100 \quad (2)$

- $G_{\text{гипс}} = Q_{\text{мельницы}} \times \% \text{гипс} / 100 \quad (3)$

- $G_{\text{добавки}} = Q_{\text{мельницы}} \times \% \text{добавки} / 100 \quad (4)$

Шаг 3.Пуск и выход на режим

При пуске мельницы дозаторы запускаются в следующей последовательности:

1. Подача клинкера с минимальной производительностью
2. Подача гипса и добавок по достижении заданной загрузки
3. Постепенное увеличение производительности до достижения уставок с темпом нарастания 5% от уставки в минуту.

Шаг 4.Стабилизация расхода (ПИД-регулирование)

Для каждого дозатора реализован ПИД-закон регулирования с обратной связью по текущему весу на ленте:

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \times \int e(t)dt + K_d \times de(t)/dt \quad (5)$$

где: $u(t)$ — управляющий сигнал на выходе регулятора (то, что подаётся на объект управления, например, напряжение нагревателя, угол поворота заслонки, открытие клапана).

$e(t)$ — сигнал ошибки (рассогласование). Вычисляется как:

$$e(t) = \text{"Задание"}(SP) - \text{"Текущее значение процесса"}(PV).$$

Показывает, насколько текущее состояние отличается от желаемого.

K_p — коэффициент передачи пропорциональной составляющей.

K_i — коэффициент передачи интегральной составляющей (иногда обозначается как $K_i = K_p / T_i$, где T_i — постоянная времени интегрирования).

K_d — коэффициент передачи дифференциальной составляющей (иногда $K_d = K_p \cdot T_d$, где T_d — постоянная времени дифференцирования).

Шаг 5. Контроль текущего состава

Система постоянно рассчитывает текущий процентный состав и сигнализирует оператору при отклонении.

Шаг 6. Остановка

При останове мельницы дозаторы останавливаются в обратной последовательности: сначала добавки, затем гипс, через 30 секунд клинкер.

4 АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ

4.1 Автоматизация выгрузки готового цемента из мельницы

4.1.1 Характеристика пневмокамерных насосов как транспортирующего оборудования

Пневмокамерные насосы предназначены для транспортировки цемента от разгрузочного патрубка мельницы до силосов. Принцип действия основан на аэрации цемента сжатым воздухом и перемещении аэросмеси по трубопроводу [7].

Основные элементы пневмокамерного насоса:

- Загрузочное устройство с шиберной заслонкой;
- Камера насоса;
- Система аэрации (пористые плиты, трубки);
- Выпускной клапан;
- Система трубопроводов сжатого воздуха.

Работа насоса циклическая: заполнение камеры материалом, аэрация и выдув, продувка.

4.1.2 Назначение и область применения

Шкаф управления собран на основе программируемого логического контроллера Jazz компании Unitronics и предназначен для автоматического управления работой пневмокамерного насоса.

ШУ ПКН могут быть изготовлены для управления пяти и более механизмами ПКН по отдельным каналам.

ШУ ПКН имеет степень защиты IP65 и по устойчивости к климатическим воздействиям соответствует исполнению УХЛ категории 3.1 по ГОСТ 15150 (группе исполнения СЗ по ГОСТ 2997), но для работы при температуре от минус 10° до + 50°С (или исполнению ТЗ по ГОСТ 15150) [8].

При эксплуатации ШУ ПКН допускаются воздействия:

- синусоидальной вибрации частотой от 5 до 25 Гц и амплитудой до 0,1 мм
- магнитных полей постоянного и переменного тока с частотой (50 ± 1) Гц;
- относительной влажности от 30 до 80% во всем диапазоне рабочих температур.

ШУ ПКН являются восстанавливаемыми изделиями.

ШУ ПКН не создают промышленных помех.

4.1.3 Технические данные

Питание ШУ ПКН осуществляется от сети переменного тока напряжением $(220 + 22/-33)$ В (ток не более 0.5А).

- Число входных каналов 20, в том числе цифровых 18, аналоговых 2, аналог. /цифр. 2.
- Число выходных (релейных) каналов: 11.
- Объем памяти: 24К (виртуальная), 256 катушек, 256 регистров
- Число таймеров: 64
- ЖК экран: 2 строки по 16 символов
- Число клавиш: 16
- Выходное напряжение: 24В
- Максимальный ток нагрузки на каждый канал: от 25 мА до 120 мА
- Блоки имеют защиту от перегрузки и короткого замыкания по каждому каналу.

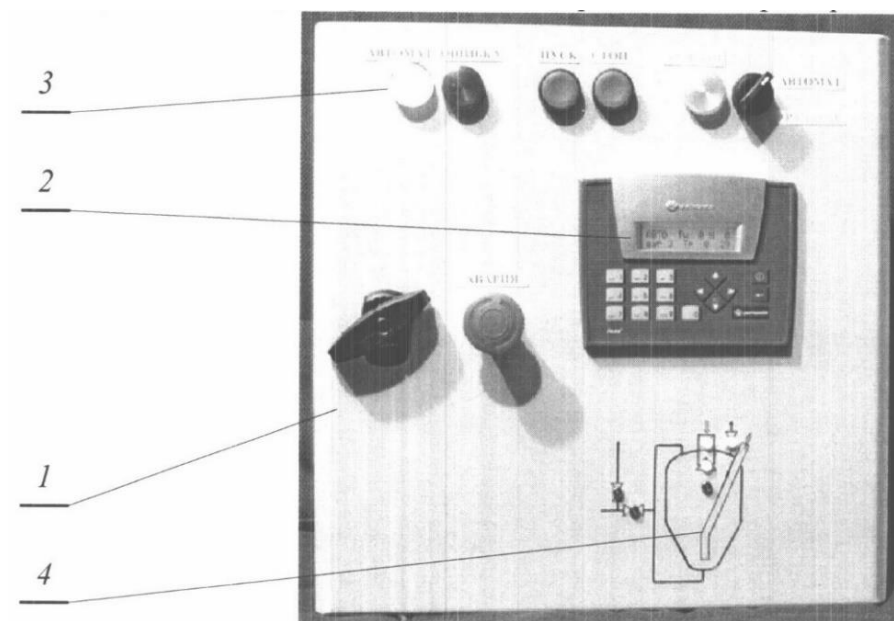


Рисунок 5 - Лицевая сторона шкафа управления. 1-шкаф, 2-панель логического контроллера, 3-кнопки управления, 4-мнемосхема

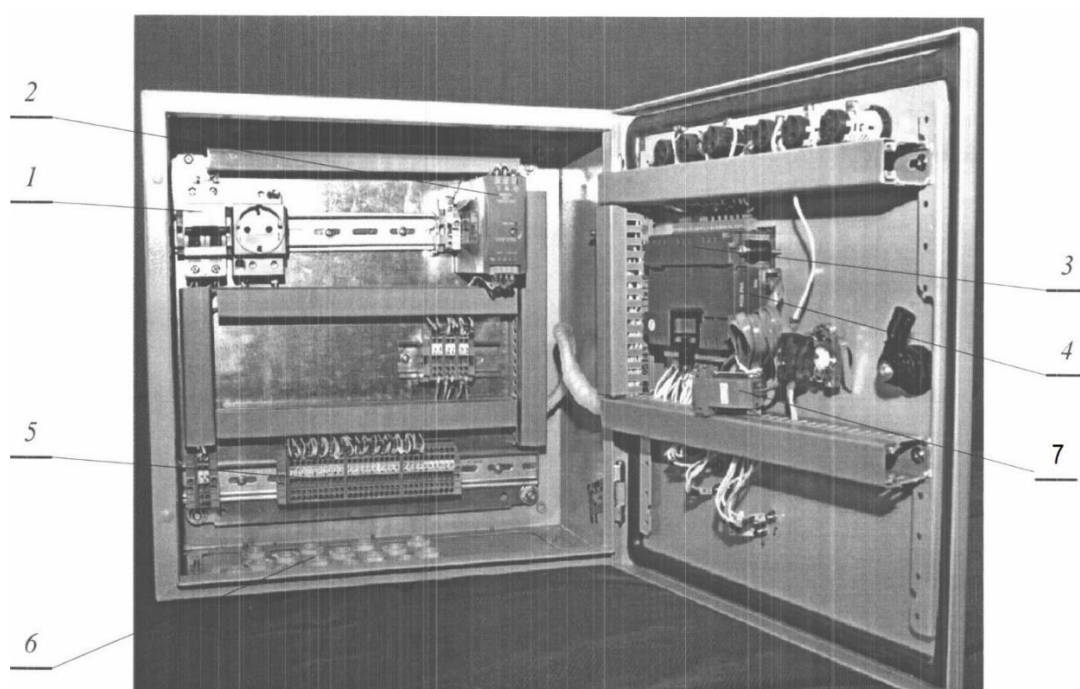


Рисунок 6 - Шкаф управления пневмокамерным насосом. 1-автомат, 2-блок питания, 3-контроллер, 4-модуль программирования, 5-клеммник для подключения внешних устройств, 6-кабельные вводы, 7-кабель для соединения с компьютером

В таблице 2 и 3 приведен перечень и описание входных и выходных каналов контроллера UnitronicsJAZZJZ10-11-R31

Таблица 2 - Описание входных каналов (Input)

№ канала	Описание подключенного устройства	Обозначение при наличии сигнала (+24В) (конечникзамкнут)	Начальное значение при включении шкафа	№ клеммы
I0	Кнопка пуск (НО)	пуск	Разомкнут (нет сигнала)	- // -
I1	Кнопка стоп (НЗ)	стоп	Замкнут (нет сигнала)	- // -
I2	Конечник загрузочного клапана (1) (НЗ)	закрыт	замкнут (есть сигнал)	11 (+24В) 12 (-)
I3	Сухой контакт, входящий сигнал о продувке другого ПКН (НО)	Продувка другого ПКН	Разомкнут (нет сигнала)	31 (+24В) 32(-)
I4	Конечник дискового затвора (2) (НО)	Открыт	Разомкнут (нет сигнала)	13(+24В) 14(-)
I5	Сухой контакт, входящий сигнал о загрузке другого ПКН (НО)	Разгрузка другого ПКН	Разомкнут (нет сигнала)	35 (+24В) 36 (-)
I6	Конечник шарового крана сброса воздуха (3) (НО)	Открыт	Разомкнут (нет сигнала)	15 (+24В) 16 (-)
I7	- // -	- // -	- // -	- // -
I8	Конечник шарового крана подачи воздуха в сосуд (4) (НО)	Открыт	Разомкнут (нет сигнала)	17 (+24В) 18 (-)
I9	- // -	- // -	- // -	- // -
I10	Конечник шарового крана подачи воздуха в азротрубу (5) (НО)	Открыт	Разомкнут (нет сигнала)	19 (+24В) 20 (-)
I11	- // -	- // -	- // -	- // -
I12	Датчик реле уровня (материал в сосуде) (6) (НО)	Заполнен	Разомкнут (нет сигнала)	21 (+24В) 22 (-)
I13	Сухой контакт, входящий сигнал от реле уровня силоса, в который перекачивается материал (НЗ)	Силос не заполнен (перекачка разрешена)	замкнут (есть сигнал)	25 (+24В) 26 (-)
I14	Электроконтактный манометр ЭКМ нижний предел (7) (НО)	Замкнут, остаточное давление выше установочного предела	Разомкнут (нет сигнала)	23 (+24В) 24 (-)
I15	Кнопка аварийной остановки (нз)	Команда «АВАРИЯ» - при размыкании НЗ кнопки	замкнут (есть сигнал)	- // -
I16	Переключатель ручной режим/автоматический	- // -	- // -	- // -

Таблица 3 - Описание выходных сигналов (Outputs)

№ канала	Описание подключенного устройства	Обозначение при наличии сигнала (+24В) (конечник ЗАМКНУТ)	Начальное значение при включении шкафа	№ клеммы
O0	Загрузочный клапан (1)	Вкл. на открытие	Разомкнут	1 (+24В) 2 (-)
O1	Дисковый затвор (2)	Вкл. на открытие	Разомкнут	3 (+24В) 4 (-)
O2	Кран сброса воздуха (3)	Вкл. на открытие	Разомкнут	5 (+24В) 6 (-)
O3	Кран подачи воздуха в сосуд (4)	Вкл. на открытие	Разомкнут	7 (+24В) 8 (-)
O4	Кран подачи воздуха в азротрубу (5)	Вкл. на открытие	Разомкнут	9 (+24В) 10 (-)
O5	Индикатор аварии или ошибки 6 (красный светодиод на лицевой панели шкафа)	Авария	Разомкнут	
O6	Индикатор нормальной работы в автоматическом режиме 7 (зеленый светодиод на лицевой панели шкафа)	Нормальная работа в автоматическом режиме	Разомкнут	
O7	Индикатор ручного режима работы. (желтый светодиод на лицевой панели шкафа)	Ручной режим работы	Разомкнут	
O8	Индикатор срабатывания датчика РЕЛЕ уровня (маленький зеленый светодиод на лицевой панели шкафа)	Материал заполнил сосуд	Разомкнут	
O9	Исходящий сигнал (на сухой контакт) для другого ПКН 2 о продувке ПКН 1	Замкнут (идет продувка ПКН 1)	Разомкнут	
O10	Исходящий сигнал (на сухой контакт) для другого ПКН 2 о загрузке ПКН 1	Замкнут (идет загрузка ПКН 1)	Разомкнут	

4.1.4 Контроллер Jazz от Unitronics: технические характеристики и возможности

Unitronics- израильский производитель контроллеров, специализирующийся на интегрированных решениях «контроллер + HMI панель». Серия Jazz представляет собой компактные контроллеры для средних задач автоматизации.

Таблица 4 -технические характеристики контроллера Jazz для проекта

Параметр	Значение
Процессор	32-бит 80 МГц
Встроенный дисплей	2х16 символов, LCD
Кнопки управления	8 программируемых
Дискретные входы	12 (24 В DC)
Дискретные выходы	8 (реле, 2А 250В AC)
Аналоговые входы	2 (4-20 мА, 0-10 В)
Аналоговые выходы	2 (0-10 В, 4-20 мА)
Коммуникационные порты	RS232/RS485, Modbus
Питание	24 В DC
Степень защиты	IP20
Температура эксплуатации	0...50 °С



Рисунок 7- КонтроллерJazz

Основные преимущества контроллера Jazz для управления пневмокамерным насосом:

- Встроенная HMI-панель для отображения параметров;
- Наличие резервного питания для сохранения данных;
- Поддержка UDFB (User Defined Function Blocks) для создания алгоритмов управления;
- Карта памяти для хранения настроек.

Работа пневмокамерного насоса осуществляется циклически в следующем порядке.

Открываются загрузочный клапан (1) и клапан выпуска (сброса) воздуха (3). Затем открывается дисковый затвор (2) и начинается загрузка сыпучим материалом сосуда.

При достижении необходимого уровня загрузки сосуда срабатывает датчик реле (6) уровня. После этого сначала закрывается дисковый затвор (2), а затем загрузочный клапан (1) и клапан сброса воздуха (3). Таким образом, сосуд заполнен сыпучим материалом, герметично закрыт и готов к разгрузке. После этого сначала открывается клапан (5) подачи воздуха в аэротрубу и начинается продувка транспортной трубы. Через некоторое время открывается клапан (8) и сжатый воздух подается в сосуд, начинается процесс разгрузки сосуда. При этом давление сжатого воздуха в сосуде начинает расти, т.к. по мере заполнения транспортной трубы материалом

увеличивается ее аэродинамическое сопротивление. После освобождения сосуда и транспортной трубы от материала сопротивление транспортного тракта и давление в сосуде падает. При достижении избыточного давления в сосуде 0.5 атм. (конкретное значение зависит от геометрии тракта и свойств материала и устанавливается при пуско-наладке) происходит срабатывание нижнего уровня электроконтактного манометра и поступает команда на закрытие сначала клапана (4) подачи воздуха в сосуд, а затем закрытие клапана (5) подачи воздуха в аэротрубу [9]. После этого ПКН готов к началу очередного разгрузочного цикла.

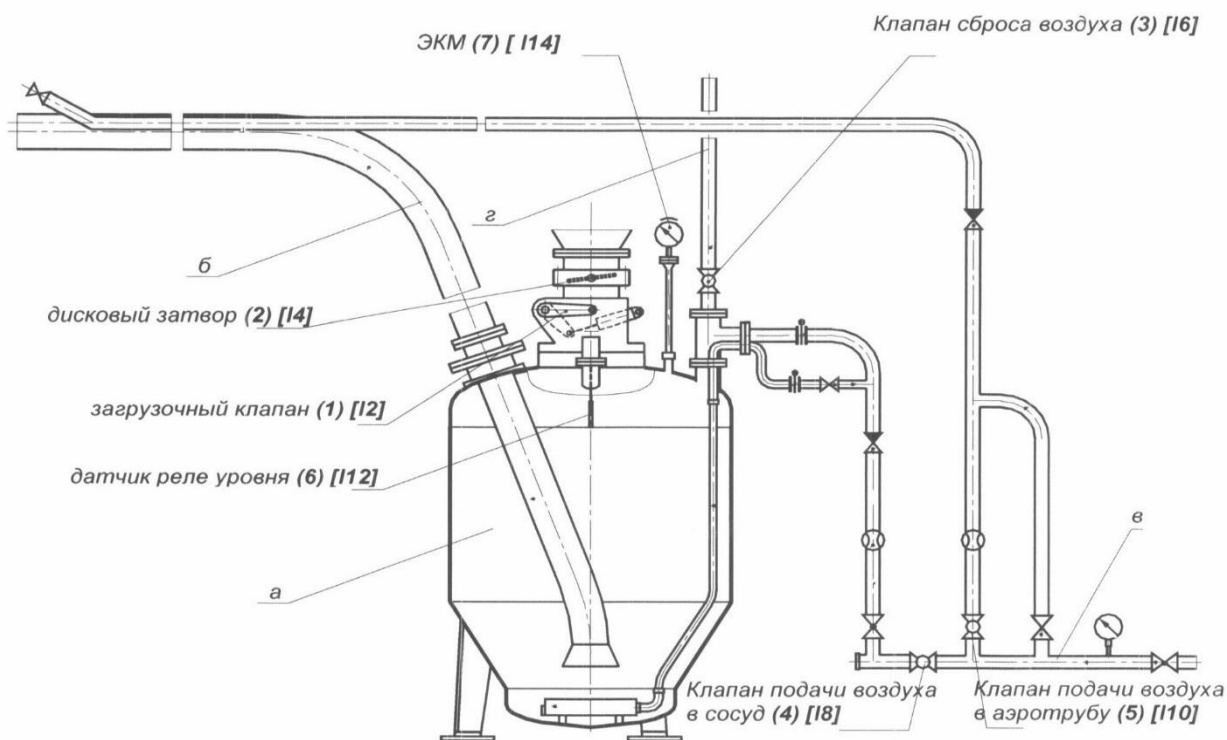


Рисунок 8- Типовая схема пневмокамерного насоса

4.1.5 Приборы КИПиА ПКН

1. Вибрационный датчик уровня (Сигнализатор предельного уровня)

Этот прибор используется для дискретного контроля (верхний/нижний предел) заполнения сосуда сыпучими материалами или жидкостями. Он работает на принципе "камертона".

Принцип действия: Чувствительный элемент (вилка) постоянно вибрирует с определенной резонансной частотой с помощью пьезоэлементов. Как только материал (например, руда или песок) полностью покрывает вилку, амплитуда колебаний резко падает из-за сопротивления среды. Электроника фиксирует это затухание и переключает выходное реле.



Рисунок 9 -Датчик уровня вибрационный

2. Магнитный геркон для пневмоцилиндра

В пневмокамерных насосах (ПКН) часто используются загрузочные клапаны (шиберы), управляемые пневмоцилиндрами. Герконовые датчики используются для точного контроля крайних положений штока цилиндра (открыто/закрыто).

Принцип действия: на штоке цилиндра закреплено кольцевой магнит. Геркон (герметичный контакт) устанавливается на корпусе цилиндра. При движении поршня магнит приближается к геркону -> контакты замыкаются (или размыкаются), подавая дискретный сигнал 24В на контроллер.

Применение в системе: Контроль состояния загрузочного клапана ПКН.

Конечный датчик «Открыто»: Сигнализирует ПЛК о том, что клапан полностью открыт и можно начинать загрузку насоса материалом.

Конечный датчик «Закрыто»: сигнализирует о герметизации камеры насоса, после чего можно подавать сжатый воздух на транспортировку (выдавливание) смеси в трубопровод.

Важно: это двоичный сигнал (дискретный), позволяющий автоматизировать цикл "загрузка-выгрузка" без участия человека.



Рисунок 10 -Датчик магнитный герконовый

3. Электромагнитный манометр ДМ 5001Г в системе выгрузки

Этот прибор измеряет избыточное давление неагрессивных сред. В контексте системы «Мельница -> ПКН» он играет роль контроля процесса транспортировки.

- Роль в системе выгрузки: после загрузки порции материала в ПКН, в камеру насоса подается сжатый воздух. Пульпа (смесь воздуха и материала) выдувается в трубопровод, ведущий на склад или в следующий технологический этап. Манометр ДМ 5001Г контролирует давление в этой линии или непосредственно в камере насоса.

- Диагностика процесса:

Нормальный режим: Давление в заданных пределах (например, 4–6 атм.) — выгрузка идет штатно.

Засорение (авария): если трубопровод забит, сопротивление растет. Датчик фиксирует превышение порога. Система аварийно останавливает насос, чтобы избежать разрыва шлангов или поломки.

Окончание выгрузки: Падение давления в камере до нуля (или минимальной отметки) сигнализирует о том, что весь материал вытолкнут из ПКН, и можно закрывать воздушный клапан, открывать загрузочный шибер для следующего цикла.

4.1.6 Аналоговый сигнал (4-20 мА) — непрерывный контроль

Это основной сигнал от прибора.

- Принцип: Давление преобразуется в пропорциональный ток в петле 4-20 мА (или 0-5 мА). Связь — трехпроводная. Сопротивление нагрузки — не более 600 Ом для сигнала 4-20 мА.

Нижний предел (4 мА) соответствует минимальному давлению в диапазоне (например, 0 бар).

Верхний предел (20 мА) соответствует максимальному давлению (например, 16 бар, 40 бар или выше — доступны диапазоны до 1600 кгс/см²).

- Применение в системе выгрузки ПКН:

Мониторинг процесса транспортировки:

Аналоговый сигнал непрерывно поступает на контроллер (ПЛК). Оператор на мнемосхеме видит реальное, плавно изменяющееся значение давления в камере насоса или линии выдачи.

Анализ состояния трубопровода: По скорости нарастания и спада давления ПЛК может диагностировать засорение или утечки, не дожидаясь достижения аварийных уставок.

Управление задвижкой: Сигнал 4-20 мА может использоваться для плавного регулирования положения выпускной задвижки.

4.1.7 Дискретный сигнал (сигнализация) — для модификации ДМ5001Г

Это дополнительная опция, реализованная в версии ДМ5001Г. Прибор имеет встроенное сигнализирующее устройство с релейными выходами для управления внешними цепями.

- Принцип: на передней панели с помощью сенсорной клавиатуры (технология запатентована) задаются верхняя и нижняя уставки (пороги срабатывания). При достижении этих значений срабатывают встроенные реле.
- ДМ5001Г позволяет задавать гистерезис (зону возврата) для уставок. Это исключает "дребезг" реле при околопредельных значениях давления.



Рисунок 11 -Цифровой манометр

4.1.8 Блок концевых выключателей Camozzi SBA для кранов управления воздухом

В отличие от герконовых датчиков, которые контролируют линейное движение штока пневмоцилиндра (открытие/закрытие шибера), блоки SBA используются для контроля поворотного движения (ротации) вала кранов (шаровых кранов). Они обеспечивают обратную связь: действительно ли

воздушный клапан открыт для подачи давления в камеру ПКН или закрыт (стравлен).

- Конструктивные особенности: Camozzi SBA выполнен в защищенном корпусе (стандарт IP65), что критично для работы в запыленной среде мельницы и насоса. Он предназначен для монтажа на четверть-оборотные приводы (угол поворота 90°, максимальная скорость вращения вала — 250 об/мин).
- Принцип действия: Блок механически связывается с валом пневмопривода крана. При повороте кулачки внутри блока воздействуют на встроенные концевые выключатели (микрореключатели или герконы), формируя дискретный электрический сигнал для контроллера.
- Совместимость: Оборудование комплектуется монтажным кит-набором согласно стандарту VDI/VDE 3845, что позволяет устанавливать его на приводы с высотой вала 20, 30, 40 или 50 мм.



Рисунок 12 - Блок конечных выключателей

4.1.9 Алгоритм работы системы автоматизации ПКН

Диагностика после нажатия кнопки «ПУСК»

Выполняется проверка концевиков: I2 замкнут, т.е. концевик загрузочного клапана (1) закрыт (нормально замкнутый при закрытом положении). Это важно для проверки полного закрытия. Геркон горит в крайнем положении при полностью закрытом клапане.

Концевик I13 замкнут т.е. силос (бункер) куда перекачиваем не заполнен. Остальные концевики (I4, I6, I8, I10, I12, I14) разомкнуты (при закрытом положении клапанов).

Если все условия выполнены, идет переход к шагу 1.

Шаг 1

Запускается счетчик времени всего цикла. Если концевик I5 разомкнут, т.е. нет блокировки с другого ПКН о его разгрузке, то выполняется открытие клапана (3) сброса воздуха и через время $T10=3с$ открытие загрузочного клапана (1) за время не более $T13=20с$. (Таймер T13).

После подтверждения с концевиков I2, I6 открытия делается пауза $T16=2 с$.

Если концевик I5 замкнут, т.е. приходит блокировка с другого ПКН о его разгрузке, то ждем окончания разгрузки другого ПКН.

Ошибка на шаге 1

Ошибка возникает, если через $T13=20с$ выполняется одно из условий:

- 1) I2 концевик замкнут, т.е. загрузочный клапан (1) закрыт (не открылся);
- 2) I6 концевик разомкнут, т.е. клапан (3) сброса воздуха закрыт (не открылся);

Шаг 2

Выполняется:

Открытие дискового затвора (2) за время не более $T14=6с$. (Таймер T14 – максимальное время открытия, и таймер $T17=3с$ минимальное время открытия).

Ошибка на шаге 2

Ошибка возникает, если через $T14=6с$ концевик I4 (разомкнут), т.е. дисковый затвор (2) закрыт (не открылся).

Шаг 3

Выполняется:

Запуск таймера предельного времени загрузки $T_{11}=40$ мин. Ждем сигнала «Сосуд заполнился» с датчика уровня I_{12} (стабильное замыкание датчика уровня в течении $T_8=2$ с).

Ошибка на шаге 3

Ошибка возникает, если концевик I_{12} (связанный с реле датчиком уровня) не замкнется через $T_{11}=40$ минут.

Шаг 4

Выполняется:

Закрытие дискового затвора (2) за время от $T_{23}=4$ с до $T_{19}=8$ с. (Таймер T_{19} – максимальное время закрытия, и таймер $T_{23}=4$ с минимальное время закрытия).

Проверка концевики I_4 , должен быть разомкнут.

Ошибка на шаге 4

Ошибка возникает, если через $T_{19}=8$ с концевик I_4 замкнут, т.е. дисковый затвор (2) открыт (не закрылся).

Шаг 5

Выполняется:

Закрытие загрузочного клапана (1), пауза на время $T_{18}=2$ с, закрытие клапана сброса воздуха (3) за время не более $T_{20}=6$ с.

Проверка концевики I_2 загрузочного клапана (1) – должен быть замкнут (закрыт) и концевики I_6 кран сброса воздуха (3) – должен быть разомкнут (закрыт).

Ошибка на шаге 5

Ошибка возникает, если через $T_{20}=6$ с концевик I_2 разомкнут, т.е. загрузочный клапан (1) открыт или через $T_{20}=6$ с концевик I_6 замкнут, т.е. клапан (3) сброса воздуха открыт (не закрылся).

Шаг 6

Выполняется:

Пауза $T_{24}=2\text{с}$. Открытие клапана (5) подачи воздуха на продувку в азототрубу за время не более $T_{21}=5\text{с}$, при условии, что нет входящей блокировки с другого ПКН о его разгрузке т.е. $I_3=0$, иначе ждем.

Ошибка на шаге 6

Ошибка возникает, если через $T_{21}=5\text{с}$ ($+T_{25}=2\text{с}$) концевик I_{10} разомкнут, т.е. клапан (5) подачи воздуха на продувку в азототрубу закрыт (не открылся).

Шаг 7

Выполняется:

Открытие клапана (4) подачи воздуха в сосуд за время не более $T_{22}=5\text{с}$. Параллельно запускается таймер $T_{12}=10\text{мин}$ разгрузки сосуда, который действует на последующих шагах до полной разгрузки сосуда.

Ошибка на шаге 7

Ошибка возникает, если через $T_{22}=5\text{с}$ концевик I_8 разомкнут, т.е. клапан (4) подачи воздуха в сосуд закрыт (не открылся).

Шаг 8

Выполняется:

Проверка набора давления в сосуде: срабатывание ЭКМ (замыкание концевики I_{14}) за время максимум $T_7=2\text{мин}$, стабильно в течение $T_9=10\text{с}$.

Ошибка на шаге 8

Ошибка возникает, если в интервале времени $T_7=2\text{мин}$ набор давления не произойдет т.е. I_{14} разомкнут.

Шаг 9

Выполняется:

Падение давления в сосуде ниже нижнего предела, ЭКМ срабатывает (размыкание концевики I_{14}) – это окончание разгрузки.

Ошибка на шаге 9

Ошибка возникает если после падения давления на ЭКМ ниже нижнего предела (признак окончания разгрузки), замкнут концевик I_{12} датчика реле

уровня, т.е. датчик уровня показывает, что материал в сосуде есть (разгрузка сосуда не произошла).

Шаг 10

Выполняется:

Закрытие клапана (4) подачи воздуха в сосуд за время от $T_6=2\text{с}$ до $T_{26}=8\text{с}$.

Ошибка на шаге 10

Ошибка возникает, если через время $T_{26}=8\text{с}$ концевик I8 замкнут, т.е. клапана (4) подачи воздуха в сосуд открыт (не закрылся).

Шаг 11

Выполняется:

Закрытие клапана (5) подачи воздуха на продувку в азротрубу за время не более $T_{27}=8\text{с}$.

Ошибка на шаге 11

Ошибка возникает, если через $T_{27}=8\text{с}$ концевик I10 замкнут, т.е. клапан (5) подачи воздуха в азротрубу открыт (не закрылся).

Шаг 12

Проверяем, была ли нажата кнопка «СТОП» в процессе работы в автоматическом режиме, если была нажата, то останавливаемся и переходим в режим ожидания. Если кнопка «Стоп» не нажималась, то сбрасываем главный счетчик цикла, и переходим к диагностике правильного начального состояния всех клапанов и их концевиков, далее цикл загрузки/разгрузки ПКН повторяется.

Ошибка разгрузки $>10\text{мин}$

Ошибка возникает, если время разгрузки ПКН превысило $T_{12}=10\text{мин}$.

U90Ladder - Cyrillic(Russian) - D:\РАБОТА\ПКН\new2010\cd-disk-2010\pkn_jazz_r31.U90 PLC type: JZ10-11-R31

Project Edit View Format Controller Ladder Window Tools Help

Project Navigation

- Displays
 - 1 - ГОТОВ К РАБОТЕ
 - 2 - РЕЖИМ АВТОМАТ
 - 3 - РЕЖИМ РУЧНОЙ
 - 4 - ДИАГНОСТИКА
 - 5 - РЕЖИМ ИНФОРМАЦИИ 1
 - 6 - РЕЖИМ ИНФОРМАЦИИ 2
 - 7 - РЕЖИМ ИНФОРМАЦИИ 3
 - 8 - РЕЖИМ ИНФОРМАЦИИ 4
 - 9 - переполнен бункер
 - 66 - ОШИБКА!
- Variables
 - 1 - (M1 0) Сообщение об ошибке
 - 2 - (M1 2) Что шас в автомате?
 - 3 - (M1 8) Счетчик всего цикла
 - 4 - (M1 4) Т загрузки
 - 5 - (T 15) пауза на диагностики
 - 6 - (M1 5) счетчик сосудов
 - 7 - (M1 1) Текущая ручная кома
 - 8 - (M1 9) Время всего цикла
 - 9 - (M1 7) Т разгрузки
 - 10 - (M1 11) флаг легальной ос
 - 11 - (I 13) флаг разрешения ра
 - 12 - (O 0) 1 загр. клапан
 - 13 - (O 1) 2 диск. затвор
 - 14 - (O 2) 3 сброс возд.
 - 15 - (O 3) 4 возд. в сосуд
 - 16 - (O 4) 5 возд. в трубу
 - 17 - (I 12) уровень
 - 18 - (I 3) другой ПКН не дуется

Timers

Op	Addr	In Use	Preset	Resolution	Value	Symbol
T	1	☐	00:00:00.00	10 ms		
T	2	☐	00:00:00.00	10 ms		
T	3	☐	00:00:00.00	10 ms		
T	4	☐	00:00:00.00	10 ms		
T	5	☒	00:00:09.00	10 ms		пауза перед диагностикой (даем сосуду сбросить давление в
T	6	☒	00:00:02.00	10 ms		задержка
T	7	☒	00:02:00.00	10 ms		набралось ли давление?
T	8	☒	00:00:02.00	10 ms		проверка датчика уровня
T	9	☒	00:00:10.00	10 ms		проверка набора давления в сосуде
T	10	☒	00:00:03.00	10 ms		задержка на шаге 1
T	11	☒	00:40:00.00	1 sec		T предельное загрузки
T	12	☒	00:10:00.00	100 ms		T предельное разгрузки
T	13	☒	00:00:20.00	10 ms		предельное время открытия механизмов
T	14	☒	00:00:06.00	10 ms		предельное время открытия задвижек
T	15	☒	00:00:02.00	10 ms		пауза для диагностики
T	16	☒	00:00:02.00	10 ms		пауза после шага 1
T	17	☒	00:00:03.00	10 ms		открытие задвижек
T	18	☒	00:00:02.00	10 ms		задержка шаг 5
T	19	☒	00:00:08.00	10 ms		макс. время закрытия диск. затвора
T	20	☒	00:00:06.00	10 ms		макс. закрытие загруз. и сбросного клапана
T	21	☒	00:00:05.00	10 ms		продувка азотрубы
T	22	☒	00:00:05.00	10 ms		предельное открытие клапана подачи воздуха в сосуд
T	23	☒	00:00:04.00	10 ms		мин. время закрытия диск. затвора
T	24	☒	00:00:02.00	10 ms		пауза перед подачей воздуха
T	25	☒	00:00:02.00	10 ms		пауза перед проверкой на ошибку
T	26	☒	00:00:10.00	10 ms		предельное закрытие воздуха в сосуд
T	27	☒	00:00:08.00	10 ms		предельное закрытие воздуха в азотрубу
T	28	☐	00:00:00.00	10 ms		
T	29	☐	00:00:00.00	10 ms		
T	30	☐	00:00:00.00	10 ms		
T	31	☐	00:00:00.00	10 ms		

Рисунок 13 - Основные таймеры программы ПЛК

4.2 Автоматизация системы впрыска воды для охлаждения материала в мельнице

4.2.1 Технологическая необходимость охлаждения цемента в мельнице

В процессе измельчения клинкера в шаровой мельнице выделяется значительное количество тепла за счет:

1. ударов шаров друг о друга и о бронеплиты;
2. трения между частицами материала;
3. экзотермических реакций на свежесформованных поверхностях.

Температура цемента на выходе из мельницы может достигать 120-140°C, что приводит к следующим негативным последствиям:

- Дегидратация гипса (двуводный гипс → полуводный гипс), вызывающая ложное схватывание цемента;
- Снижение активности цемента (до 5-7% на каждые 20°C сверх нормы);
- Ускоренный износ мелющих тел и футеровки;
- Трудности при хранении и отгрузке горячего цемента.

Требования технологического регламента: температура цемента на выходе из мельницы не должна превышать 100°C, оптимальное значение 90°C [17].

Блок впрыска воды устанавливается во входной конусе шаровой мельницы и выступает внутрь мельницы до её входной стенки. Блок впрыска воды может устанавливаться как в мельницах с промежуточным подшипником, так и в мельницах с ползунковой опорой. Качество используемой воды:



Рисунок 14 - Станция впрыска воды

Перед блоком впрыска воды предусмотрена установка фильтра для очистки воды от загрязнений.

Тем не менее, вода должна быть чистой и не содержать крупных частиц. На прилагаемом эскизе показаны отдельные компоненты блока впрыска воды. Отдельные компоненты водоснабжения смонтированы на единой раме. Все электрические устройства поставляются в сборе после электромонтажа в клеммной коробке и заводского испытания. Блок впрыска воды должен управляться с главного устройства управления.

Конструкция блока впрыска воды

Подача воды:

- К шаровому крану, перекрывающему подачу воды в бак
- К блоку фильтров для очистки воды
- К блоку обратной промывки для автоматической периодической чистки блока фильтров
- К 2/2-ходовому клапану, открывающему подачу воды в бак
- К водяному баку ёмкостью 1000 л с подключением к переливу
- Уровнемер, определяющий минимальный и максимальный уровень воды в баке

- Подогрев водяного бака с измерением температуры
- К шаровому крану, перекрывающему подачу воды на насос
- Водяной насос, управляемый преобразователем частоты, для дозирования требуемого объема воды
- К 2/2-ходовому клапану, открывающему подачу воды в пик
- К манометру для локального контроля давления воды
- К счетчику воды для учета текущего расхода воды
- К обратному клапану
- К шаровому крану, перекрывающему всю арматурную линию
- Трубы (поставка заказчика) для подачи воды, перелива, блока обратной промывки и для соединения с пиком

Подача воздуха:

- Центробежный вентилятор для защиты форсунки от пыли
- Шланг для соединения центробежного вентилятора с пиком

Пика:

- К специальной форсунке для распыления воды, устанавливаемой на пик для подачи воды
- К водопроводной трубе для впрыска воды в 1-ю камеру мельницы
- К защитной трубе для защиты водопроводной трубы и форсунки от повреждений
- Ко входам для воды и центробежному вентилятору

Работа автоматики:

Система подогрева водяного бака оборудована элементами измерения температуры (РТ100 с преобразователем).

Благодаря системе подогрева температура воды должна поддерживаться на уровне 5 °С.

Эта температура должна регулироваться с главного устройства управления. При падении температуры до 5 °С устройство управления должно включить подогрев. Если вода в баке нагревается до температуры 10 °С, подогрев снова выключается. Если уровень воды в баке находится ниже

максимума, клапан подачи воды в бак открывается. Если бак полон, клапан закрывается. При запуске размольной установки устройство управления также должно запустить центробежный вентилятор блока впрыска воды. Запуск выполняется примерно за 10 секунд перед началом работы вентилятора фильтра мельницы и защищает форсунку от забивания. Если температура цементной смеси после выхода из мельницы выше нормальной рабочей температуры, устройство управления запускает насос, управляемый преобразователем частоты, и открывает клапан после насоса.

Важное указание: Насос не должен эксплуатироваться при открытом клапане! Блок регулирования в устройстве управления осуществляет регулирование объема требуемой воды в зависимости от температуры. Текущий объем воды учитывается счетчиком воды. Если температура ниже нормальной рабочей температуры, или выполняется отключение установки, или происходит аварийный останов, или возникает ошибка, блок впрыска воды должен быть остановлен следующим образом.

Выключается насос, а через несколько секунд закрывается клапан после насоса.

Регулирование:

Если температура цементной смеси после мельницы выше 110 °С, блок впрыска воды должен быть включен в режим ок. 5 л/мин.

Если температура продолжает расти, устройство управления должно также повысить расход воды.

Если температура цементной смеси после мельницы составит 108 °С, блок впрыска воды следует остановить, выполнив приведенную выше последовательность действий.

Описание сигналов:

Цифровые сигналы:

Для всех цифровых сигналов должно быть предусмотрено время устранения дребезга контактов 5 секунд.

Это время должно устанавливаться уполномоченным для этого специалистом.

Аналоговые сигналы:

Для всех аналоговых сигналов должно быть предусмотрено время фильтрации 5 секунд. Это время должно устанавливаться уполномоченным для этого специалистом. Аналоговые сигналы должны отображаться на устройстве визуализации. Должна быть обеспечена возможность вывода на экран или печати трендов аналоговых сигналов. Уполномоченный обслуживающий персонал должен быть в состоянии выполнять настройки предупреждений и аварийных сигналов.

Signal_AI_01, Регулирование числа оборотов

Этот аналоговый сигнал является заданным значением главного устройства управления для числа оборотов насоса блока впрыска воды в 1-й камере. Signal_DI_01, Общая работоспособность

Эти цифровые сигналы служат для контроля преобразователя частоты (готов, работает, ошибок нет) и запуска преобразователя частоты (разрешение). Если сигнал READY (ГОТОВ) не активен, либо сигнал «NO_ERROR» (нет ошибок) не активен и блок впрыска воды в 1-й камере не включен, обслуживающий персонал должен получить предупреждение о том, что включение блока впрыска воды запрещено. Если сигнал READY (ГОТОВ) не активен, либо сигнал «NO_ERROR» (нет ошибок) не активен и блок впрыска воды в 1-й камере работает, обслуживающий персонал должен получить аварийный сигнал, и блок впрыска воды должен быть выключен в порядке, описанном выше. Signal_DI_02, Уровень заполнения «Полный». Этот сигнал активен, если водяной бак блока впрыска воды в 1-й камере заполнен водой. Если этот сигнал не активен, и подача воды в бак не включена, следует включить подачу воды в бак. Если этот сигнал активен, и подача воды в бак включена, следует немедленно выключить подачу воды в бак.

Signal_DI_03, Уровень заполнения «Пустой»

Этот сигнал не активен, если водяной бак блока впрыска воды в 1-й камере пуст. Если этот сигнал не активен, и блок впрыска воды не включен, обслуживающий персонал должен получить предупреждение о том, что включение блока впрыска воды запрещено. Если этот сигнал не активен, и блок впрыска воды в 1-й камере работает, обслуживающий персонал должен получить аварийный сигнал, и блок впрыска воды должен быть выключен в порядке, описанном выше. Если этот сигнал не активен, включение подогрева бака запрещено. Если этот сигнал становится неактивным, обслуживающий персонал должен проверить подачу воды в бак. Signal_AI_02, Измерение расхода. Этот аналоговый сигнал отражает расход воды блоком впрыска воды в 1-й камере. Значение требуется для регулирования впрыска воды. Если измеренное значение слишком мало по сравнению с заданным значением для водяного насоса (Signal_AI_01), обслуживающий персонал должен получить предупреждение, после чего персонал обязан проверить оборудование впрыска воды. Signal_AI_03, Измерение температуры воды. Этот аналоговый сигнал отражает температуру воды в баке. Значение требуется для регулирования подогрева впрыска воды. Если измеренное значение опустилось до 5 °C, обслуживающий персонал должен получить предупреждение о необходимости включить подогрев. Если измеренное значение поднялось до 10 °C, подогрев должен быть выключен.

4.2.2 Математический расчёт и подбор частотного преобразователя Siemens для насоса 3 кВт

1. Исходные данные для расчёта

- Механизм: Центробежный насос (система впрыска жидкости в мельницу)
- Мощность двигателя: $P_{\text{дв}} = 3 \text{ кВт}$
- Напряжение питания: 400 В, 3 фазы (стандарт для промышленности РФ)
- Тип нагрузки: Квадратичный момент (вентиляторный тип)

2. Ключевой физический закон

Для центробежного насоса справедливы соотношения:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \text{ (расход пропорционален частоте)} \quad (6)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \text{ (напор пропорционален квадрату частоты)} \quad (7)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \text{ (мощность пропорциональна кубу частоты)} \quad (8)$$

Где: Q_1, Q_2 —расход (производительность) среды ($\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{ч}$, л/с и т.д.) при частотах вращения n_1 и n_2 .

n_1, n_2 — частота вращения рабочего колеса (об/мин).

H_1, H_2 — напор (давление, развиваемое механизмом) при частотах вращения n_1 и n_2 .

Для вентилятора H может обозначать полное давление (Па).

P_1, P_2 — мощность на валу насоса/вентилятора (кВт, Вт) при частотах вращения n_1 и n_2 .

Вывод: при снижении частоты на 20% ($n_2 = 0.8 \cdot n_1$) мощность падает в $0.8^3 = 0.512$ раза.

Это значит, что перегрузки по току у насоса практически нет.

3. Расчёт номинального тока двигателя

Примем стандартные значения для двигателя 3 кВт, 400 В, $\cos \varphi = 0.83$, КПД $\eta = 0.85$.

Формула для трёхфазного двигателя:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{дв}} \times 1000}{\sqrt{3} \times U_{\text{лин}} \times \eta \times \cos \varphi} \quad (9)$$

$I_{\text{н}}$ — номинальный линейный ток (Амперы)

$P_{\text{н}}$ — номинальная активная мощность (Ватты, обычно киловатты переводят в ватты)

$U_{\text{л}}$ — номинальное линейное напряжение (Вольты, например 380 В или 400 В)

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности (косинус фи, указывается на шильдике двигателя)

η — коэффициент полезного действия (КПД, указывается в долях единицы, например 0.85)

Подставляем:

$$I_{\text{ном}} = \frac{3000}{1.73 \times 400 \times 0.85 \times 0.83} \quad (10)$$

Считаем знаменатель:

$$1.73 \times 400 = 692$$

$$692 \times 0.85 = 588.2$$

$$588.2 \times 0.83 \approx 488.2$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{3000}{488.2} \approx 6.14 \text{ А}$$

Результат: Номинальный ток двигателя $\approx 6.1 \text{ А}$ (400 В).

4ВЫБОР ЛИНЕЙКИ SIEMENS

Есть две основные линейки для насосов:

- 1) SINAMICS G120C - компактный, насосный софт встроен, оптимален для насоса 3 кВт
- 2) SINAMICS V20 - бюджетная, простые насосы, возможно применение для насоса 3 кВт, но хуже динамика

Выбираем G120C— из-за лучшей защиты от сухого хода и встроенного ПИД-регулятора (нужен для впрыска).

Расчёт требуемого выходного тока ПЧ

Правило для насосов (квадратичный момент):

$$I_{\text{ПЧ}} \geq I_{\text{двиг}} \times 1.1 \quad (11)$$

$I_{\text{ПЧ}}$ - номинальный выходной ток преобразователя частоты(частотного преобразователя).Это максимальный длительный ток, который ПЧ может отдавать в двигатель (Амперы).

$I_{\text{двиг}}$ - номинальный ток двигателя(обычно $I_{\text{ном}}$), взятый из его паспортных данных (Амперы).

$\times 1,1$ - коэффициент запаса(10%).

Вводится для обеспечения надёжной работы ПЧ без перегрузок, с учётом:

возможных кратковременных перегрузок двигателя;

неточностей расчёта тока;

ухудшения условий охлаждения ПЧ (например, при работе на пониженной частоте или при высокой температуре окружающей среды).

Запас 10% на несимметрию сети и долговременную работу на верхней кривой насоса.

$$I_{\text{ПЧ}} \geq 6.1 \times 1.1 = 6.71 \text{ A}$$

По каталогу Siemens для G120C (400 В):

- Типоразмер FSA (Frame Size A) - до 7.8 А(при 3 кВт)
- Типоразмер FSB — уже избыточен

Проверка: $7.8 \text{ А} > 6.71 \text{ А} \rightarrow$ запас 16% — идеально.

Итоговый артикул (G120C, 400 В)

Артикул: 6SL3210-1KE18-8AF1

Расшифровка:

- 6SL3210 - G120C с фильтром СЗ
- 1KE18 - 3 кВт, 400 В, выходной ток 7.8 А
- 8 - без внутреннего тормозного модуля (насосу не нужен)
- AF1 - управление: аналоговое + полевая шина USS/Modbus RTU

Проверка на перегрузочную способность

$$\frac{I_{\text{ПЧ}} - I_{\text{авар}}}{I_{\text{авар}}} \quad (12)$$

$I_{\text{ПЧ}}$ - измеренный (фактический) ток частотного преобразователя в некотором режиме работы (Амперы).

$I_{\text{авар}}$ - аварийный ток уставки защиты (ток срабатывания аварийной защиты частотного преобразователя), при превышении которого ПЧ отключается по аварии (Амперы).

$I_{\text{ПЧ}} - I_{\text{авар}}$ - разница (отклонение) между текущим током ПЧ и аварийной уставкой.

$\frac{I_{\text{ПЧ}} - I_{\text{авар}}}{I_{\text{авар}}}$ - относительное отклонение текущего тока от аварийной уставки, выраженное в долях единицы.

У G120C допустимая перегрузка:

150% в течение 60 с (для насосного режима настроено ограничение 110-120%).

При возможном засорении форсунки впрыска насос может кратковременно выйти на прямолинейную часть характеристики (не квадрат). Тогда ток вырастет до $6.1 \times 1.2 = 7.32 \text{ A}$.

ПЧ держит $7.8 \text{ A} \rightarrow$ запас по току $= \frac{7.8 - 7.32}{7.32} \approx 6.5\%$ — достаточно.

Окончательная рекомендация

Модель: Siemens SINAMICS G120C, 3 кВт, 400 В (Рисунок 15)



Рисунок 15 - Siemens SINAMICS G120C

Артикул: 6SL3210-1KE18-8AF1 (или 6SL3210-1KE18-8UF1 для PROFINET)

Защита входа: обязательный входной дроссель (арт. 6SL3203-0CD21-0AA0) — при длине кабеля $> 50 \text{ м}$ или плохой сети.

Настройка ПИД-регулятора:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (13)$$

Коэффициент K_p начальный = 0.5

Время интегрирования $T_i = 2-5$ секунд (для инерционной системы впрыска)

$u(t)$ — управляющий сигнал (выход регулятора) в момент времени t . Это сигнал, который подаётся на исполнительное устройство — (например, частотный преобразователь, клапан, нагреватель).

$e(t)$ — ошибка (рассогласование) в момент времени t .

$e(t) = \text{Задание} - \text{Текущее значение процесса (или Текущее} - \text{Задание)}$

Показывает, насколько текущее значение регулируемой величины (температура, давление, скорость) отличается от заданного.

K_p — коэффициент пропорциональной составляющей (безразмерный или с размерностью, зависящей от величин). Усиливает текущую ошибку. Чем больше K_p , тем сильнее и быстрее реакция регулятора на ошибку.

K_i — коэффициент интегральной составляющей (часто используют

$K_i = \frac{K_p}{T_i}$, где T_i — постоянная времени интегрирования).

Интегрирует ошибку по времени. Устраняет статическую ошибку (остаточное отклонение в установившемся режиме).

$\int e(\tau) d\tau$ - интеграл от ошибки по времени от некоторого начального момента до текущего t .

Накопленная сумма ошибок. Позволяет "вспоминать" прошлые ошибки.

K_d — коэффициент дифференциальной составляющей (часто $K_d = K_p \cdot T_d$, где T_d — постоянная времени дифференцирования). Реагирует на скорость изменения ошибки. Улучшает устойчивость и уменьшает перерегулирование, "предсказывая" поведение ошибки.

$\frac{de(t)}{dt}$ — производная ошибки по времени. Показывает, быстро ли растёт или падает ошибка. Производная = 0, когда ошибка постоянна (даже если она большая) [12].

Смысл формулы (алгоритм ПИД-регулятора):

- Пропорциональная часть ($K_p \cdot e$) — "действуй сейчас пропорционально ошибке".
- Интегральная часть ($K_i \int e$) — "действуй, пока ошибка не исчезнет совсем" (накапливает историю).

- Дифференциальная часть ($K_d \cdot de/dt$) — "тормози при быстром приближении к заданию, предупреждая выброс".

- $u(t)$ — управляющий сигнал (выход регулятора) в момент времени t . Это сигнал, который подаётся на исполнительное устройство (например, частотный преобразователь, клапан, нагреватель).

- $e(t)$ — ошибка (рассогласование) в момент времени t .

$e(t) = \text{Задание} - \text{Текущее значение процесса (или Текущее} - \text{Задание)}$

Показывает, насколько текущее значение регулируемой величины (температура, давление, скорость) отличается от заданного.

- K_p — коэффициент пропорциональной составляющей (безразмерный или с размерностью, зависящей от величин).

- Усиливает текущую ошибку. Чем больше K_p , тем сильнее и быстрее реакция регулятора на ошибку.

- K_i — коэффициент интегральной составляющей (часто используют $K_i = \frac{K_p}{T_i}$, где T_i — постоянная времени интегрирования).

- Интегрирует ошибку по времени. Устраняет статическую ошибку (остаточное отклонение в установившемся режиме).

- $\int e(\tau) d\tau$ — интеграл от ошибки по времени от некоторого начального момента до текущего t . Накопленная сумма ошибок. Позволяет "вспоминать" прошлые ошибки.

- K_d — коэффициент дифференциальной составляющей (часто $K_d = K_p \cdot T_d$, где T_d — постоянная времени дифференцирования). Реагирует на скорость изменения ошибки. Улучшает устойчивость и уменьшает перерегулирование, "предсказывая" поведение ошибки.

- $\frac{de(t)}{dt}$ — производная ошибки по времени.

- Показывает, быстро ли растёт или падает ошибка. Производная = 0, когда ошибка постоянна (даже если она большая).

Смысл формулы (алгоритм ПИД-регулятора):

- Пропорциональная часть ($K_p \cdot e$) — "действуй сейчас пропорционально ошибке".
- Интегральная часть ($K_i \int e$) — "действуй, пока ошибка не исчезнет совсем" (накапливает историю).
- Дифференциальная часть ($K_d \cdot de/dt$) — "тормози при быстром приближении к заданию, предупреждая выброс".

Управление насосом с места оператора

Для насоса мощностью 3 кВт с частотным преобразователем Siemens (ранее был рассчитан SINAMICS G120X или G120C) оператор может управлять оборудованием несколькими способами. Выбор метода зависит от удобства, расстояния до привода и требований к безопасности.

1. Панель оператора (OperatorPanel) — управление непосредственно на ПЧ

Самый простой и очевидный способ управления — использовать панель оператора, установленную непосредственно на корпусе преобразователя частоты.

Таблица 5 - Варианты панелей для SINAMICS G120X

Панель	Тип подключения	Дисплей	Назначение
BOP-2(Basic OperatorPanel)	Монтируется на ПЧ	строки, символьный	Базовая диагностика и управление
IOP-2 (Intelligent OperatorPanel)	Монтируется на ПЧ или как портативное устройство с кабелем	графический, полноцветный	Удобное интуитивное управление, продвинутая диагностика

Функции панели оператора:

- Пуск/остановка двигателя - кнопки RUN и STOP
- Задание скорости - изменение уставки частоты (в Гц или %)

- Контроль параметров - отображение тока, напряжения, частоты, температуры
- Диагностика - просмотр текущих ошибок и журнала неисправностей
- Настройка параметров - полное конфигурирование ПЧ
- Сохранение/восстановление настроек - копирование параметров на другие ПЧ

Важно: Панель оператора не имеет защиты от несанкционированного доступа. После настройки рекомендуется снять панель и хранить её в безопасном месте.

2. Дискретные входы (Local Control) - управление с кнопочного поста

Стандартный промышленный метод — подключение внешних кнопок и переключателей к дискретным входам преобразователя. Для насосных применений Siemens рекомендует использовать готовые макросы (DefaultSettings).

Макрос 46: «AI controllocal/remote» — локальное управление с места оператора. Этот макрос реализует удобную схему с переключением между местным и дистанционным управлением [19].

3. Дистанционное управление (Remote) — от PLC или АСУ ТП

Для системы впрыска воды в мельницу насос должен быть интегрирован в общую систему автоматизации (АСУ ТП), примеры приведены в таблице.

Таблица 6 - Варианты связи с PLC

Интерфейс	Скорость	Применение
Modbus RTU (RS-485)	До 115.2 кбит/с	Простой и дешевый вариант
PROFIBUS DP	До 12 Мбит/с	Промышленный стандарт
PROFINET	100 Мбит/с	Современный стандарт для Ethernet

Макрос51: "Modbus RTU control" предназначен для управления через полевую шину.

В этом режиме:

- Управление пуском/остановом осуществляется командами от PLC
- Задание скорости передается через полевая шина
- ПЧ возвращает в PLC: фактическую частоту, ток, напряжение, статус, ошибки

4. В сводной таблице приведены способы управления

Таблица 7 – способы управления

Способ управления	Где находится оператор	Скорость отклика	Сложность монтажа	Рекомендация для мельницы
Панель оператора (BOP-2/IOP-2)	У шкафа с ПЧ	Мгновенная	Минимальная	Для наладки и ТО
Кнопочный пост (дискретные входы)	У мельницы (до 50 м)	Мгновенная	Средняя	Основной способ для оператора
Беспроводной модуль (Smart Access)	В любом месте цеха (до 20 м)	0.5-1 сек	Минимальная	Удобно для диагностики и перенастройки
АСУ ТП (Modbus/PROFIN ET)	Из ЦПУ или диспетчерской	0-100 мс	Высокая	Для интеграции в общий процесс

Рекомендация для поставленной задачи

Для оператора, обслуживающего мельницу, наиболее удобной будет комбинация двух способов:

1. Основное управление с места— использовать макрос 46с подключением:

Кнопочного поста (ПУСК/СТОП/СБРОС) у мельницы

Потенциометра для ручного задания расхода воды (или переключателя "максимум/минимум")

2. Удаленная диагностика— установить модуль Smart Access для возможности быстрой перенастройки и диагностики со смартфона/планшета.

3. Интеграция в АСУ ТП— подключить ПЧ к общей системе управления мельницей через Modbus RTU или PROFIBUS (чтобы автоматика могла корректировать расход воды в зависимости от загрузки мельницы)

Это обеспечит оператору максимальный контроль и удобство при минимальных затратах на монтаж.

4.3 Технологический контроль цементной мельницы по температурным датчикам и датчику разрежения

Для обеспечения безопасной и надежной работы цементной мельницы организован непрерывный контроль нескольких критических параметров. Все температурные измерения выполняются с помощью платиновых термометров сопротивления типа Pt100, установленных в ключевых точках оборудования. Сигналы от этих датчиков обрабатываются и передаются в систему управления через измерительные преобразователи Seneca K121.

Основной защитной логикой является аварийная остановка главного привода мельницы при достижении любым из критических параметров заданного порогового значения. В частности, на стойках главного привода установлены датчики Pt100, контролирующие температуру подшипников или обмоток статора электродвигателя. При превышении температуры 70 градусов Цельсия на любой из стоек система автоматически останавливает главный привод, предотвращая перегрев и возможное разрушение подшипникового узла или изоляции двигателя. Аналогичным образом, датчики температуры на входной и выходной цапфах мельницы (опорных подшипниках барабана) также имеют уставку 70 градусов: превышение этого значения на любой цапфе приводит к немедленной аварийной остановке

главного привода, поскольку перегрев цапф может вызвать заклинивание подшипников, деформацию опорных узлов и серьезную аварию.

Кроме контроля подшипниковых узлов, система отслеживает тепловое состояние технологического процесса. Датчик температуры цемента на выходе из мельницы имеет существенно более высокую уставку срабатывания — 150 градусов Цельсия. При превышении этой температуры происходит остановка главного привода, так как перегрев готового цемента приводит к дегидратации гипса (потере вяжущих свойств), повреждению разгрузочных устройств, сепаратора и создает реальную опасность возгорания угольной пыли или резиновых уплотнений. Дополнительно контролируется температура в шахте мельницы (аспирационной шахте), где при значениях около 100-120 градусов срабатывает предупредительная сигнализация, а при достижении 150 градусов также возможна остановка привода как дублирующий канал защиты [18].

Параллельно с температурным контролем ведется измерение разрежения в шахте мельницы. Этот параметр характеризует эффективность работы аспирационной системы (отсоса запыленного воздуха). Выход разрежения за установленные границы (например, снижение разрежения ниже минус 200 Па или повышение выше минус 800 Па) свидетельствует о забивке циклонов или рукавного фильтра, либо об обрыве аспирационной цепи с подсосом холодного воздуха. Нарушение разрежения ухудшает сушку и охлаждение материала, поэтому при критических отклонениях также может выдаваться предупредительный сигнал или останавливаться привод.

Важнейшим элементом системы является применение преобразователей Seneca K121 для каждого датчика Pt100 (рисунок 16, 17). Эти устройства выполняют несколько критических функций.

Во-первых, они обеспечивают гальваническую развязку между датчиками, установленными непосредственно на мощном электрооборудовании (главный привод, мельница), и входными цепями контроллера. Это защищает дорогостоящий ПЛК от высоковольтных

наводок, импульсных помех при пусках двигателя и разности потенциалов «земель», которая на цементной мельнице может достигать значительных величин.

Во-вторых, преобразователь выполняет линеаризацию характеристики Pt100: сопротивление платинового датчика меняется по нелинейному закону, а Seneca K121 преобразует его в строго пропорциональный температуре токовый сигнал 4-20 мА в соответствии с международным стандартом МЭК 60751 [13].

В-третьих, K121 унифицирует сигнал к стандартному для промышленных контроллеров формату 4-20 мА, поскольку большинство ПЛК (Siemens, Schneider Electric, Овен и др.) имеют входы именно для токовой петли, а не для прямого измерения сопротивления. Это упрощает подключение и исключает необходимость в специализированных термомодулях.

В-четвертых, использование токовой петли 4-20 мА обеспечивает высокую помехоустойчивость на длинных линиях связи (датчики могут быть удалены от шкафа управления на десятки и сотни метров), что критично в условиях цементного производства с мощными электродвигателями, частотными преобразователями и сварочными аппаратами.

В-пятых, преобразователь реализует компенсацию сопротивления соединительных проводов по трехпроводной схеме подключения, что позволяет пренебречь влиянием длины кабеля и температуры окружающей среды на точность измерения.

В-шестых, Seneca K121 обеспечивает диагностику обрыва линии: если ток на выходе падает ниже 3,6 мА или превышает 21 мА, контроллер фиксирует неисправность датчика или повреждение кабеля, что исключает ложное восприятие обрыва как нормального нулевого сигнала (4 мА). И наконец, преобразователь питается непосредственно от токовой петли (loop-powered), то есть ему не требуется отдельный источник питания на место

установки, что упрощает монтаж в существующих шкафах и снижает затраты на кабельную продукцию.



Рисунок 16 - Преобразователь Seneca K121



Рисунок 17 –Датчик Pt100

Таким образом, каждый датчик Pt100 на стойках привода, цапфах, выходе цемента и в шахте подключается к отдельному преобразователю Seneca K121, который преобразует сопротивление датчика в унифицированный токовый сигнал 4-20 мА, поступающий на аналоговые входы программируемого логического контроллера. ПЛК в реальном времени масштабирует ток в температуру (например, 4 мА = 0°C, 20 мА = 200°C) и при достижении заданных уставок (70°C для стоек и цапф, 150°C для цемента на выходе) выдает команду на отключение главного привода мельницы. При этом обязательно вводится небольшая временная задержка (2-5 секунд) для исключения ложных срабатываний на кратковременные выбросы температуры, а гистерезис возврата составляет 5-10 градусов ниже

уставки для предотвращения частых повторных пусков. Все параметры архивируются в SCADA-системе, а оператор получает предупредительные сигналы при приближении к критическим значениям (например, 65°C для подшипников или 135°C для цемента) [15]. Датчик разрежения в шахте подключается к ПЛК напрямую через аналоговый вход 4-20 мА (от отдельного преобразователя давления), поскольку он не требует линеаризации Pt100 и не нуждается в K121. Такая структура контроля обеспечивает надежную защиту цементной мельницы от аварийных режимов, продлевает срок службы оборудования и исключает выпуск некондиционного цемента из-за термической деструкции гипса.

4.4 Автоматизация регенерации

4.4.1 Управление регенерацией рукавного фильтра

Управление регенерацией рукавного фильтра цементной мельницы с использованием контроллера КФУ-220.24К (рисунок 18) построено на автоматизации процесса импульсной продувки, который признан наиболее эффективным для цементной промышленности. Контроллер, работая по сигналам от датчика перепада давления (тягомера), отслеживает рост сопротивления фильтровальной ткани: как только разница давлений на входе и выходе достигает предельного значения (обычно 80-90 мм вод. ст.), блок управления инициирует цикл очистки.



Рисунок 18 -Контроллер КФУ-220.24К

4.4.2 Исполнительные механизмы: импульсные клапаны

Ключевыми исполнительными механизмами в этой схеме являются импульсные электромагнитные клапаны мембранного типа, такие как модели VXFA2 (рисунок.19) или аналогичные. Эти клапаны выполняют функцию «встряхивания» (регенерации) рукавов. При поступлении команды от КФУ-220.24К катушка клапана возбуждается, открывая мембрану на 60-120 миллисекунд. За это короткое время сжатый воздух под давлением 0,5-0,7 МПа из ресивера через сопло (эжектор) устремляется внутрь фильтровального рукава. Мощная ударная волна вызывает резкую деформацию и вибрацию стенок рукава, в результате чего осажденный пылевой слой разрушается и осыпается в бункер. Использование контроллера позволяет гибко настраивать параметры (паузы между импульсами и длительность продувки) для достижения максимальной эффективности очистки.



Рисунок 19 -Электромагнитный клапан VXFA2

4.4. 3 Принцип работы рукавного фильтра цементной мельницы

Принцип работы рукавного фильтра цементной мельницы циклический.

Этап фильтрации: Запыленный газ от мельницы поступает в корпус фильтра, где крупные частицы под действием гравитации падают в бункер, а мелкая взвесь оседает на внешней поверхности специальных тканевых рукавов. Очищенный воздух проходит сквозь ткань и выбрасывается в атмосферу или возвращается в систему.

Этап регенерации: По мере накопления пыли сопротивление рукавов растёт. Контроллер КФУ-220.24К дает команду на открытие импульсных клапанов, обеспечивая обратную продувку сжатым воздухом. Образовавшийся «пылевой пирог» сдувается с поверхности и сыпается в сборный бункер, откуда возвращается в технологический процесс. Благодаря такой автоматизации достигается стабильная работа аспирации с высокой эффективностью очистки (запыленность на выходе не превышает 100 мг/м³).

4.4.4 Автоматизация встряхивания: два режима управления

Процесс автоматизации встряхивания рукавного фильтра цементной мельницы при помощи прибора КФУ-220.24К основан на реализации двух независимых режимов управления — по времени («Таймер») или по перепаду давления («Давление»), выбор которых задается при настройках устройства. В исходном состоянии после подачи питания прибор может быть настроен на автоматический переход в режим «Работа» либо «Останов», причем в состоянии «Останов» все выходы на клапаны обесточены, и регенерация не производится, тогда как для запуска рабочего цикла необходимо нажать и удерживать кнопку «Отмена» более трех секунд.

Режим «Таймер»

В режиме управления по таймеру алгоритм работы предельно прост и не зависит от степени запыленности рукавов: контроллер отсчитывает заданный временной интервал между циклами очистки, и по его истечении автоматически запускает процедуру регенерации. При этом активация выходных каналов производится строго циклически — каждый последующий импульс увеличивает номер канала на единицу, причем цикл начинается со второго канала, а завершается на первом, что обеспечивает равномерную последовательную продувку всех секций фильтра.

Режим «Давление» (оптимальный)

Значительно более эффективным и энергосберегающим является режим управления по давлению (перепаду), реализованный на сравнении

текущего значения сопротивления фильтра с заданными уставками. В нормальных условиях, когда перепад давления находится в рабочем диапазоне между минимальным ($\Delta P_{\min}$) и максимальным ($\Delta P_{\max}$) порогами, прибор не запускает регенерацию. Как только сопротивление рукавов достигает уровня $\Delta P_{\max}$, контроллер мгновенно инициирует цикл очистки, руководствуясь настроенными параметрами паузы между импульсами (Т ПАУЗ) и длительностью открытия каждого клапана (Т ИМП). При этом на лицевой панели загорается желтый индикатор « $\max \Delta P$ », сигнализирующий о достижении верхнего рабочего порога, а зеленый индикатор «РЕГЕН» подтверждает запуск цикла продувки.

Обработка аварийных ситуаций

Критически важным элементом автоматизации является реакция на аварийные ситуации. Если давление продолжает расти и превышает установленный максимальный предел (например, при катастрофическом забивании рукавов), прибор замыкает реле «Авария» и включает красный аварийный индикатор, однако цикл регенерации при этом не отключается, продолжая попытки очистки. С другой стороны, при падении давления ниже минимального рабочего порога $\Delta P_{\min}$ (что характерно для прорыва или повреждения рукавов) контроллер автоматически выключает цикл регенерации, предотвращая бесполезную продувку, и запускает таймер ожидания. Дополнительные возможности включают настройку «дополнительных циклов очистки» при падении давления ниже уставки нулевого значения — в этом случае прибор запускает серию продувок с заданным числом импульсов для форсированного восстановления фильтрующей способности ткани.

Ручной режим и дистанционное управление

Для целей пусконаладки и проверки работоспособности предусмотрен «Ручной режим», переход в который осуществляется нажатием кнопки «Ввод»; в этом режиме оператор может принудительно включить любой из разрешенных выходных каналов, что необходимо для тестирования каждого

импульсного клапана и диагностики пневмосистемы. Помимо автоматического управления по внутренним алгоритмам, прибор оснащен входами дистанционного управления: замыкание входа «Вх.3» при замкнутых «Вх.1» и «Вх.2» запускает цикл регенерации принудительно, независимо от текущего уровня давления, а размыкание «Вх.2» полностью запрещает регенерацию и сбрасывает номер активного канала на единицу. Таким образом, КФУ-220.24К обеспечивает полный цикл автоматизации встряхивания — от мониторинга состояния фильтра через принятие решения по времени или перепаду до исполнительного управления импульсными клапанами и диагностики аварийных режимов, что позволяет поддерживать стабильное аэродинамическое сопротивление рукавного фильтра цементной мельницы в автоматическом режиме без постоянного участия оператора.

Защита от переполнения: ротационный датчик уровня

Использование ротационного датчика уровня (уровнемера) в системе аспирации цементной мельницы является критически важным решением для защиты рукавного фильтра от переполнения и предотвращения аварийных ситуаций. В пылегазовом тракте цементной мельницы фильтр выступает в роли промежуточной емкости, где происходит осаждение уловленной пыли перед её возвратом в технологический процесс (например, через шлюзовый затвор или шнек). Если система удаления пыли выходит из строя или не справляется с объемом осажденного материала, бункер фильтра переполняется, что приводит к забиванию рукавов, росту гидравлического сопротивления, падению эффективности аспирации и, в худшем случае, к разрушению фильтроэлементов.

Принцип работы ротационного датчика

Ротационный (лопастной) датчик уровня (рисунок 20) монтируется, как правило, на конусной части бункера фильтра на уровне предельно допустимого заполнения — выше нормального рабочего уровня, но ниже критического. Принцип его работы основан на простом механическом действии: синхронный электродвигатель через магнитную муфту вращает

измерительную лопасть (пэддл) с небольшой скоростью, обычно 1-6 оборотов в минуту, создавая очень низкий крутящий момент. В нормальных условиях, когда уровень пыли ниже датчика, лопасть вращается свободно. Как только уровень материала в бункере поднимается до точки монтажа, частицы цементной пыли оказывают сопротивление вращению лопасти. Двигатель продолжает пытаться вращаться, но его статор проворачивается внутри корпуса относительно ротора, воздействуя на пружинный механизм, который переключает микропереключатели.



Рисунок 20 -Ротационный датчик уровня

Интеграция сигнала в систему автоматизации

Срабатывание датчика генерирует дискретный релейный сигнал, который интегрируется в систему автоматизации (например, в тот же контроллер КФУ-220.24К или ПЛК верхнего уровня). Этот сигнал может использоваться несколькими способами: во-первых, подача звукового или светового предупреждения оператору о необходимости принять меры; во-вторых, автоматическая блокировка — остановка транспортера подачи сырья или мельницы во избежание дальнейшего накопления пыли; в-третьих, принудительное включение механизмов разгрузки бункера (шнека, пневмонасоса) для экстренного удаления скопившегося материала.

Требования к датчикам в условиях цементной пыли

В условиях работы на цементной пыли, которая обладает высокой абразивностью, гигроскопичностью и температурой до 100-150°C, необходимо использовать специализированные ротационные датчики. Их

конструкция включает высокотемпературный радиатор, отсекающий корпус с электроникой от нагретой лопасти, пылевлагозащищённый корпус IP65 и подшипники качения с высокотемпературной смазкой. Обязательным требованием для таких ответственных применений является наличие у датчика функции "безопасный отказ" (Failsafe) с самодиагностикой — это означает, что в случае обрыва питания, поломки двигателя или заклинивания лопасти (например, из-за налипания влажного цемента) реле принудительно перейдет в состояние «Авария/Переполнение», и система получит сигнал, а не будет считать отсутствие вращения нормой. Промышленная практика показывает, что внедрение таких ротационных сигнализаторов с отказобезопасной логикой полностью исключает риск аварийного переполнения фильтра и связанного с ним выброса пыли в атмосферу, одновременно снижая необходимость в опасных регулярных осмотрах емкости персоналом.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

5.1 Расчёт затрат на внедрение

Для внедрения разработанной системы автоматизации требуются капитальные вложения на приобретение оборудования, монтажные и пусконаладочные работы, а также приобретение программного обеспечения.

Таблица 8 - Капитальные затраты

Наименование затрат	Сумма, млн руб.
Оборудование (ПЛК, модули, блоки питания, дозаторы, ПЧ, КИП)	7,2
Система впрыска воды (насосы, форсунки, резервуар)	1,8
Монтажные и пусконаладочные работы	2,5
Программное обеспечение MasterSCADA (лицензия)	0,5
Проектные работы	0,8
Непредвиденные затраты (10%)	1,28
Итого капитальных затрат	14,08

Капитальные затраты включают все необходимые расходы для полной реализации проекта, включая 10-процентный резерв на непредвиденные работы, что является общепринятой практикой при проектировании систем автоматизации.

Таблица 9 - Эксплуатационные затраты (годовые)

Статья затрат	Сумма, млн руб./год
Амортизация оборудования (10%)	1,408
Техническое обслуживание	0,600
Расходные материалы	0,200
Повышение электропотребления САУ (+5% по управляемым приводам)	0,250
Итого эксплуатационных затрат	2,458

При расчете эксплуатационных затрат учтено, что дополнительное электропотребление собственно системы автоматизации (контроллеры, датчики, панели оператора) составляет около 5% от мощности управляемых приводов и полностью компенсируется экономией, достигаемой за счет оптимизации режимов работы оборудования.

5.2 Оценка экономической эффективности

Экономическая эффективность внедрения системы автоматизации складывается из нескольких составляющих: снижение расхода электроэнергии, экономия клинкерной составляющей и сокращение эксплуатационных расходов на ремонт и износ оборудования.

5.2.1 Снижение расхода электроэнергии

Внедрение частотных преобразователей на приводах дозаторов, вентиляторов и насосов, а также оптимизация графика загрузки мельницы за счет работы ПИД-регуляторов позволяют снизить удельный расход электроэнергии с 35 до 31,5 кВт·ч/т, что соответствует экономии 10%.

Расчет годовой экономии электроэнергии:

- Годовая экономия в натуральном выражении:
- $324\,000\text{ т} \times (35 - 31,5) = 1\,134\,000\text{ кВт}\cdot\text{ч}$
- Годовая экономия в денежном выражении:
- $1\,134\,000\text{ кВт}\cdot\text{ч} \times 6,5\text{ руб/кВт}\cdot\text{ч} = 7,371\text{ млн руб.}$

5.2.2 Экономия клинкерной составляющей

Автоматизация весового дозирования компонентов шихты (клинкер, гипс, добавки) с использованием высокоточных дозаторов Fengbo и ПИД-регуляторов позволяет сократить перерасход клинкера с 5% до 1%, то есть экономия составляет 4% от теоретического расхода клинкера.

Исходные данные:

- Теоретический расход клинкера на тонну цемента: 0,80 т/т

- Годовая выработка цемента: 324 000 т
- Стоимость клинкера: 3 500 руб/т

Расчет годовой экономии клинкера:

- Экономия клинкера в натуральном выражении:
- $324\,000\text{ т} \times 0,80\text{ т/т} \times 0,04 = 10\,368\text{ тонн в год}$
- Экономия в денежном выражении:
- $10\,368\text{ т} \times 3\,500\text{ руб/т} = 36,288\text{ млн руб.}$

5.2.3 Снижение эксплуатационных расходов

Стабилизация технологического режима работы мельницы за счет автоматического поддержания оптимальной загрузки, контроля температуры и аспирации приводит к снижению износа оборудования и уменьшению затрат на ремонты.

Таблица 10 – Эксплуатационный расходы

Статья экономии	Сумма, млн руб./год
Снижение износа мелющих тел и футеровки	1,2
Снижение затрат на ремонт	0,8
Итого снижение эксплуатационных расходов	2,000

Снижение износа достигается за счет исключения режимов перегрузки и работы при пониженной загрузке, которые в ручном режиме возникают из-за субъективных ошибок оператора. Снижение затрат на ремонт обусловлено своевременной диагностикой и предотвращением аварийных ситуаций благодаря системе технологических защит.

5.2.4 Расчёт срока окупаемости

Таблица 11 - Суммарный годовой экономический эффект

Составляющая эффекта	Сумма, млн руб./год
Экономия электроэнергии	7,371
Экономия клинкера	36,288
Снижение эксплуатационных расходов	2,000
Итого годовой экономический эффект	45,659

Чистый годовой доход (за вычетом эксплуатационных затрат):

$$\text{ЧГД} = 45,659 - 2,458 = 43,201 \text{ млн руб./год}$$

Простой срок окупаемости (PaybackPeriod, PB):

$$\text{PB} = \text{Капитальные затраты} / \text{ЧГД} = 14,08 / 43,201 = 0,326 \text{ года} \approx 4 \text{ месяца}$$

Дисконтированный срок окупаемости (DiscountedPaybackPeriod, DPB) при ставке дисконтирования 15%:

$$\text{DPB} \approx 5 \text{ месяцев}$$

Столь низкий срок окупаемости (менее полугода) объясняется значительной долей экономии клинкера в структуре годового эффекта, что характерно для производств с высокой материалоемкостью. Полученное значение значительно ниже нормативного срока окупаемости для проектов автоматизации (обычно 2-3 года), что свидетельствует о высокой инвестиционной привлекательности разработанного проекта.

5.3 Оценка влияния автоматизации на качество цемента

Помимо прямого экономического эффекта, выраженного в снижении затрат на электроэнергию, клинкер и ремонты, внедрение АСУ ТП положительно влияет на качественные показатели цемента. Стабилизация технологических параметров (загрузка мельницы, тонкость помола,

температура, дозирование компонентов) позволяет достичь следующих улучшений:

Таблица 12 – Показатели качества цемента

Показатель	До автоматизации	После автоматизации	Улучшение
Стабильность прочности (коэффициент вариации 28-суточной прочности)	8%	4%	снижение в 2 раза
Тонкость помола (удельная поверхность по Блейну)	3000 см ² /г	3200 см ² /г	повышение на 6,7%
Стандартная консистенция	25-29% (колебания)	26-28% (стабильно)	стабилизация
Сроки схватывания	иногда ложное схватывание	полностью исключено	устранение дефекта

Стабильность прочности (снижение коэффициента вариации с 8% до 4%) является одним из важнейших результатов автоматизации, поскольку позволяет предприятию прогнозировать качество цемента в каждой партии и снижает риск выпуска некондиционной продукции. Исключение ложного схватывания достигается за счет автоматического поддержания температуры цемента на выходе из мельницы в диапазоне 90-100°C с помощью системы впрыска воды.

Использование цемента со стабильными характеристиками позволяет предприятию реализовывать продукцию по более высокой цене (на 200-300 руб./т выше среднерыночной). При этом дополнительный годовой доход составит:

$$324\,000 \text{ т} \times 250 \text{ руб./т} = 81 \text{ млн руб.}$$

Данный эффект не включен в основной расчет окупаемости, так как зависит от рыночной конъюнктуры и ценовой политики предприятия.

Однако даже без учета этого фактора проект автоматизации окупается за 4-5 месяцев и приносит чистый годовой доход более 43 млн рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы на тему «Автоматизация процесса помола цементной мельницы (на примере ООО «Горнозаводскцемент»)» были решены актуальные научно-практические задачи, направленные на повышение эффективности, энергоэффективности и стабильности качества при производстве цемента.

Анализ объекта и обоснование необходимости автоматизации

Проведен детальный анализ технологического процесса помола в трубной шаровой мельнице № 11, выявлены его критические параметры: загрузка компонентами, тонкость помола, температура материала и разрежение в аспирационной системе. Установлено, что существующая система управления носит локализованный и ручной характер, что приводит к нестабильности качества цемента (коэффициент вариации прочности 8%), перерасходу электроэнергии (удельный расход 35 кВт·ч/т) и повышенному износу оборудования. Обоснована необходимость перехода к комплексной АСУ ТП.

Оценка ожидаемой эффективности от внедрения проекта показала его высокую экономическую и техническую целесообразность. Основные эффекты включают:

Технологический эффект:

Повышение стабильности процесса, сокращение отклонений по тонкости помола, снижение риска аварийных ситуаций.

Экономический эффект:

Повышение производительности мельницы на расчетные 5-7%, снижение удельного расхода электроэнергии на помол на 3-5%, сокращение потерь сырья за счет более точного дозирования. Расчетный срок окупаемости проекта составляет ориентировочно 1.5-2.5 года.

Перспективы дальнейшего развития системы могут быть связаны с интеграцией созданной АСУ ТП в общезаводскую систему управления

(MES-уровень), внедрением продвинутых алгоритмов адаптивного и оптимизирующего управления на основе методов искусственного интеллекта, а также расширением системы предиктивной аналитики для прогнозирования состояния оборудования.

Разработанная комплексная автоматизированная система управления цементной мельницей на базе современных контроллеров Siemens, дозаторов Fengbo, частотных преобразователей Schneider Electric и Siemens, а также специализированных контроллеров Unitronics и КФУ-220.24К позволяет:

- стабилизировать технологический режим помола;
- повысить производительность и качество цемента;
- снизить удельный расход электроэнергии и перерасход клинкера;
- обеспечить надежную аварийную защиту оборудования и экологическую безопасность (запыленность на выходе $<100 \text{ мг/м}^3$).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андреев, С. М. Аппаратные средства и программное обеспечение промышленных контроллеров SIMATIC S7: учебное пособие / С. М. Андреев, М. Ю. Рябчиков, Е. С. Рябчикова. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 220 с. – ISBN 978-5-9729-1411-1.
2. Закамалдин, А.А. Оптимальное управление процессом измельчения в шаровой мельнице с применением прогнозирующей модели: диссертация кандидата технических наук: 2.3.3 / А. А. Закамалдин. – Томск, 2022. – 179 с.
3. Классен, В. К. Цементология: структура, свойства цементов и оптимизация технологических процессов: учебник / В. К. Классен, Б. Т. Таймасов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – ISBN 978-5-9729-XXXX-X.
4. Малькова, А. А. Разработка и исследование автоматизированного электропривода шаровой мельницы с интеллектуальной системой управления процессом измельчения: диссертация кандидата технических наук / А. А. Малькова. – Санкт-Петербург: Горный университет, 2025.
5. Fengbo (Fengbo Weighing & Control Systems Co., Ltd.). Техническая документация по весовым дозаторам серий FB-IWFL/M, FB-IDRFS, FB-CWFL, FB-WFL, FB-WFM, FB-DHM, а также по системе FB-DACS9000. Каталоги продукции и руководства по эксплуатации. — China, 2024–2025. — 180 с.
6. Общие принципы построения АСУ ТП (Автоматизированных систем управления технологическим процессом) и DCS (Distributed Control Systems). Нормативная и техническая документация. 2025. — 120 с.
7. Пневматический транспорт сыпучих материалов в промышленности строительных материалов С. П. Ковалев, Н. И. Федосов. — Иваново: ИГЭУ, 2018.

8. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды: ГОСТ 15150-69
9. Средства автоматизации и КИП: справочник проектировщика А.А. Смирнов, В. В. Лебедев; под общ. ред. А. А. Смирнова. — М.: Энергоатомиздат, 2019. — 480 с.
10. Сафиуллин, Р.К. Основы автоматики и автоматизация процессов: учебник для вузов / Р. К. Сафиуллин. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2025. — 146 с.
11. Пантелеев, В.Н. Основы автоматизации технологических процессов: учебник / В. Н. Пантелеев, В. М. Прошин. — 4-е изд., испр. и доп. — Москва: Академия, 2024. — 222 с.
12. Башарин, А.В. Примеры расчета автоматизированного электропривода: учебное пособие / А. В. Башарин, В. А. Новиков. — Москва: Энергия, 2020. — 280 с.
13. Стандарт 4-20 мА (Analog current loop). Стандарт аналоговой передачи данных 4-20 мА для промышленных датчиков. — 2023. — 25 с.
14. PROFINET International. Техническая спецификация PROFINET для промышленной автоматизации. — Karlsruhe: PI, 2023. — 130 с.
15. Клепиков, В.В. Автоматизация производственных процессов: учебное пособие / В.В. Клепиков, Н.М. Султан-заде, А.Г. Схиртладзе. — Москва: ИНФРА-М, 2026. — 208 с.
16. Рогов, В.А. Средства автоматизации и управления: учебник для вузов / В.А. Рогов, А.Д. Чудаков. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2026. — 352 с.
17. Сулеменко Л.М. Технология минеральных вяжущих материалов и изделий на их основе: учебник / Л.М. Сулеменко. — Москва: Высшая школа, 2000. — 304 с.

18. Коротков В.И. Автоматизация технологических процессов цементных заводов: учебное пособие / В.И. Коротков, Л.Н. Полякова. — Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. — 240 с.

19. Шамсутдинов Р.Т. Аналоговая и дискретная сигнализация в АСУ ТП: учебное пособие / Р.Т. Шамсутдинов, И.А. Хайруллин. — Казань: КНИТУ, 2018. — 128 с.

20. Грибанов А.В. Программируемые логические контроллеры в системах автоматизации: учеб. пособие / А.В. Грибанов, Ю.С. Ткаченко. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. — 284 с.