

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:

«Модернизация схемы управления подачей шлама в обжиговую
печь (на примере предприятия ООО «Горнозаводскцемент»)»

Студент: _____ А.Г. Голованов
(подпись, дата)

Группа: АЭП-21-1бз 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

ВВЕДЕНИЕ	5
1 УЧАСТОК ЦЕХА ОБЖИГА	8
1.1 Устройство и принцип работы обжиговой печи	8
1.1 Холодильник клинкера и обеспыливание	13
1.2 Транспортировка клинкера на склад	13
2 АНАЛИЗ И ОБОСНОВАНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ	15
2.1 Анализ существующей системы управления подачей шлама	15
2.2 Выявление недостатков существующей системы и обоснование необходимости модернизации	16
2.2.1 Проблемы, связанные со стабильностью процесса обжига	16
2.2.2 Энергетическая неэффективность	16
2.2.3 Проблемы, связанные с реологическими свойствами шлама	17
2.2.4 Отсутствие комплексной автоматизации	17
2.3 Анализ современных подходов к автоматизации процесса подачи шлама	17
2.3.1 Внедрение частотно-регулируемого электропривода шламовых насосов	17
2.3.2 Корректировка задания по физико-химическим параметрам шлама	19
2.3.3 Экстремальное управление подвижностью шлама	20
2.3.4 Применение методов нечеткой логики для управления дозированием .	21
2.3.5 Комплексная АСУ ТП подачи шлама	22
2.4 Сравнительный анализ и выбор направления модернизации	23
2.5 Критерии эффективности модернизации	24
3 УПРАВЛЕНИЕ РАСХОДОМ ШЛАМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАКА ПОСТОЯННОГО УРОВНЯ (БУФЕРНОГО БАКА) И КОНТРОЛЬНОГО БАКА	27
3.1 Описание работы системы «бак постоянного уровня – контрольный бак»	31
3.2 Функции и преимущества двухбаковой схемы	32
3.3 Недостатки существующей схемы на «Горнозаводскцемент»	33
3.4 Предлагаемая модернизация существующей двухбаковой системы	33
3.5 Алгоритм работы модернизированной системы	35

3.6 Ожидаемые результаты модернизации на предприятии ООО «Горнозаводскцемент»	36
4 РАЗРАБОТКА И МОДЕРНИЗАЦИЯ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗАМЕРА ШЛАМА.....	37
4.1 Обоснование в модернизации схемы управления замером шлама.....	37
4.1.1 Особенности существующей системы замера расхода шлама на предприятии ООО «Горнозаводскцемент»	37
4.1.2 Недостатки существующего метода замера расхода.....	37
4.2 Предлагаемые технические решения для модернизации замера шлама...	39
4.3 Ожидаемая эффективность от модернизации замера шлама	41
4.4 Разработка модернизированной схемы управления замера шлама	42
4.5 Подбор оборудования для модернизации.....	47
4.5.1 Обоснование выбора программируемого логического контроллера (ПЛК).....	47
4.5.2 Обоснование выбора модулей аналогового ввода.....	49
4.5.3 Обоснование выбора датчика влажности шлама.....	51
4.5.4 Обоснование выбора электромагнитного расходомера	54
4.5.5 Итоговая спецификация оборудования для узла управления	57
5 РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ШЛАМА.....	59
5.1 Расчет экономии электроэнергии	59
5.2 Расчет экономии топлива	60
5.3 Суммарный годовой экономический эффект.....	60
5.4 Срок окупаемости	60
5.5 Оценка дополнительных качественных эффектов	61
6 ОХРАНА ТРУДА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ШЛАМА	62
6.1 Общие требования охраны труда	63
6.2 Требования электробезопасности согласно ПУЭ и ПТЭЭП	64
6.2.1 Общие положения ПУЭ.....	65
6.2.2 Классификация помещений по электробезопасности и взрывопожароопасности.....	65
6.2.3 Система заземления и защитные меры	67

6.2.4 Требования к кабельным линиям и электропроводкам	68
6.2.5 Требования безопасности при работе с контрольно-измерительными приборами и автоматикой (КИПиА)	69
6.3 Меры пожарной безопасности	70
6.4 Организационные мероприятия по обеспечению безопасной эксплуатации	72
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	77

ВВЕДЕНИЕ

Цементная промышленность является одной из ключевых отраслей строительного комплекса Российской Федерации, обеспечивающей производство важнейших строительных материалов. На сегодняшний день значительная часть цемента в стране производится по «мокрому» способу, который, несмотря на более высокие энергозатраты по сравнению с «сухим» способом, остаётся востребованным из-за возможности переработки сырья с переменными свойствами и относительно простой технологии подготовки сырьевой смеси. Однако именно высокая энергоёмкость — главный недостаток этого метода. До 40% тепла, расходуемого на обжиг клинкера, уходит на испарение воды, которая вводится в сырьевую смесь (шлам) для придания ей текучести. Дополнительные потери возникают из-за несовершенства систем подачи шлама: устаревшие методы дроссельного регулирования насосов и дискретный контроль расхода приводят к перерасходу электроэнергии, нестабильности теплового режима печи и снижению качества клинкера.

Объектом исследования в данной работе является участок цеха обжига вращающаяся печь №7 предприятия ООО «Горнозаводскцемент», на котором используется двухбаковая схема подачи шлама (бак постоянного уровня — контрольный бак). Предмет исследования — существующая система управления подачей шлама и методы её модернизации с целью повышения энергоэффективности и технологической стабильности процесса обжига.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка и технико-экономическое обоснование модернизации схемы управления подачей шлама в обжиговую печь, обеспечивающей снижение расхода электроэнергии и топлива, а также повышение стабильности технологического процесса.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- 1) Проведён анализ существующей системы управления подачей шлама на ООО «Горнозаводскцемент», выявлены её основные недостатки: дискретность дозирования, отсутствие частотного регулирования насосов и учёта реологических свойств шлама (влажности, вязкости).
- 2) Выполнен обзор и сравнительный анализ современных подходов к автоматизации подачи шлама (частотно-регулируемый привод, коррекция по физико-химическим параметрам, экстремальное управление подвижностью, нечёткая логика) и выбран оптимальный комплексный вариант модернизации.
- 3) Предложена модернизированная структурная и принципиальная схема управления, включающая: сохранение двухбаковой системы для стабилизации напора, внедрение частотно-регулируемого привода шламового насоса, установку электромагнитного расходомера QTLД/J и влагомера FIZEPR-SW100.30.2.
- 4) Выполнен подбор основного оборудования автоматизации (программируемый логический контроллер ПЛК110-220.30.P-M, модуль аналогового ввода MB110-224.8A производства ОВЕН), обоснован его выбор.
- 5) Проведён технико-экономический расчёт эффективности модернизации, включающий оценку экономии электроэнергии и топлива, а также расчёт срока окупаемости капитальных затрат.
- 6) Рассмотрены вопросы охраны труда и электробезопасности при эксплуатации модернизированной системы в соответствии с требованиями ПУЭ и ПТЭЭП.

Научная новизна и практическая значимость работы заключаются в комплексном подходе к модернизации классической двухбаковой схемы подачи шлама. В отличие от типовых решений, предлагаемая система не заменяет существующую инфраструктуру, а дополняет её современными средствами непрерывного контроля (влагомер, расходомер) и интеллектуальным управлением на базе ПЛК. Это позволяет при минимальных капитальных затратах и простое производства достичь значительного экономического эффекта. Результаты работы могут быть

непосредственно использованы на ООО «Горнозаводскцемент», а также тиражированы на других предприятиях цементной отрасли, работающих по мокрому способу.

1 УЧАСТОК ЦЕХА ОБЖИГА

Функция цеха обжига клинкера — это центральное звено в технологической цепочке производства цемента. Основная задача цеха — превратить подготовленную сырьевую смесь (шлам) в готовый клинкер — прочные гранулы, которые после помола с добавками и становятся привычным нам цементом.

1.1 Устройство и принцип работы обжиговой печи

Печной агрегат включает в себя:

- корпус вращающейся печи — представляет собой полый, открытый с торцов сварной цилиндр, установленный с уклоном 3,5–4 %, со встроенными теплообменными устройствами;
- питатель шлама (позиция 2, смотреть рисунок 1.1), включающий приёмный бак, куда шлам поступает по напорной магистрали и распределяется на две печи (№ 6 и № 7) с помощью поворотного колена, управляемого машинистом с пульта; контроль подачи шлама осуществляется по времени заполнения контрольного бака (позиция 3), тарированного на 500 л;
- газовую горелку (позиция 8) типа ДВГ-4М для сжигания природного газа;
- холодильник (позиция 4), в котором охлаждается клинкер при выходе из печи и подогревается воздух для горения топлива;
- дымосос (позиция 10; 9) типа ДРЦ21х2, служащий для удаления дымовых газов и поддержания аэродинамического режима (тяги) в печи;
- пылеулавливающие устройства: пылеосадительную камеру (позиция 12; 14) и электрофильтр (позиция 13; 15) перед запечными дымососами типа ПГД4х50, а также после холодильника на печах № 6 и № 7 перед аспирационным дымососом (позиция 9; 10) типа ПГДС 3х24;

- устройство для возврата в печь пыли, уловленной в пылеуловителях (позиция 15, 16; 17, 18);
- уплотнительные устройства на холодном и горячем концах печи;
- контрольно-измерительные и регулирующие приборы и аппаратуру, позволяющие контролировать процессы в отдельных механизмах, устройствах, частях и зонах печи, а также регулировать интенсивность этих процессов и управлять всей установкой из одного пункта.

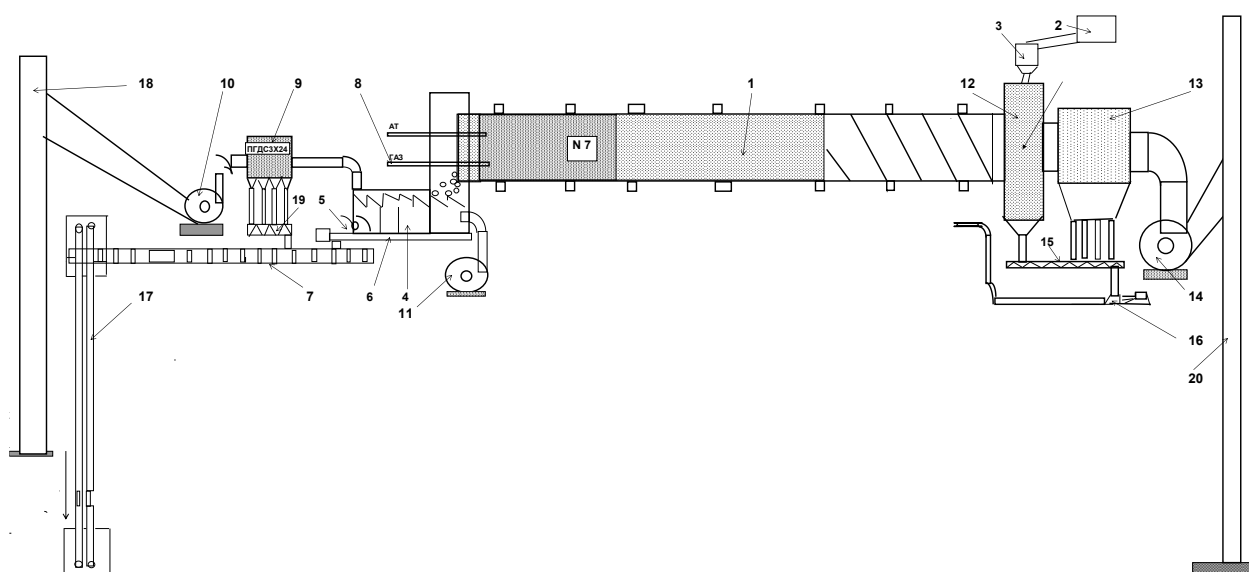


Рисунок 1.1 – Структурная схема вращающейся печи

Печь работает по принципу противотока: шлам подаётся со стороны верхнего («холодного») конца печи, а топливно-воздушная смесь — со стороны нижнего («горячего») конца. Сырьевая смесь, проходя последовательно от загрузочной воронки до горячего обреза печи, превращается в клинкер.

Сырьевой шлам из шламоприготовительного отделения сырьевого цеха шламовыми насосами через шламовый питатель подаётся во вращающуюся печь, где происходит термохимическое превращение сырьевой массы в клинкер. Горячий клинкер поступает в холодильник.

По длине печь разделяется на несколько зон в зависимости от физических и термохимических процессов, происходящих с сырьевыми компонентами шлама.

1) Зона испарения

В зоне испарения, начинающейся от загрузочного конца вращающейся печи, протекают только физические процессы: удаление влаги из материала, подсушка и его подогрев до 200 °С. По мере удаления влаги из шлама, сопровождающегося увеличением его вязкости, образуются комки, которые при дальнейшем нагревании распадаются на значительно более мелкие гранулы.

2) Зона подогрева

Сырьевая смесь по мере продвижения в печи попадает в зону подогрева, где подвергается воздействию более высоких температур и нагревается примерно до 500–600 °С. В этой зоне начинаются химические реакции: выгорают органические вещества, дегидратируются (теряют воду) глинистые минералы. Дегидратация глинистых минералов начинается при 450 °С и влечёт за собой понижение пластических свойств глинистого компонента, в результате чего гранулы начинают рассыпаться.

3) Зона декарбонизации

При дальнейшем повышении температуры начинается разложение известняка и одновременно протекают реакции в твёрдом состоянии между образующейся окисью кальция и составными частями глины. Процесс декарбонизации углекислого кальция (превращение CaCO_3 в CaO и CO_2) сначала идёт медленно, но при достижении температурой материала 900 °С и выше из известняка начинает быстро выделяться углекислота.

Часть печи, где с достаточной скоростью происходит разложение углекислого кальция, называется зоной декарбонизации. Эта зона — наиболее напряжённая в тепловом отношении, так как процесс разложения известняка требует большого расхода тепла. Температура обжигаемого материала здесь колеблется примерно в пределах 900–1200 °С, в среднем около 1100 °С.

Декарбонизация CaCO_3 требует значительных затрат тепла: для разложения 1 кг карбоната кальция по реакции (1)



требуется 425 ккал, поэтому подводимое тепло расходуется на протекание реакции, а не на нагрев материала, что и обуславливает медленный рост температуры сырьевой смеси в этой зоне.

4) Зона экзотермических реакций

При дальнейшем продвижении материала и повышении температуры реакции в твёрдом состоянии между известью и глинистыми составляющими протекают быстрее. Содержание несвязанной окиси кальция уменьшается за счёт образования силикатов, алюминатов и ферритов кальция. Эти реакции являются экзотермическими (протекают с выделением тепла в количестве примерно 420 кДж на 1 кг клинкера). Они идут в конце зоны кальцинирования и на небольшом протяжении за ней. Температура материала здесь составляет 1200–1300 °С.

На границе между зоной кальцинирования и зоной экзотермических реакций наблюдается световой контраст, условно разделяющий материал на «чёрный» и «светлый». Это связано с быстрым разогревом материала на коротком участке печи. Для правильного хода обжига необходимо, чтобы реакции образования первичных соединений прошли с достаточной полнотой и подготовили материал к спеканию.

Последовательность образования соединений в твёрдом состоянии примерно следующая:

- при температуре около 1000 °С весь глинозём входит в соединение $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, а кремнезём реагирует с известью, образуя небольшое количество $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (белит);
- с повышением температуры до 1200 °С белит образуется более интенсивно;

- однокальциевый алюминат насыщается окисью кальция, переходит в $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ и затем в $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$;
- окись железа даёт $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ или $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$;
- избыточная окись кальция остаётся свободной.

При температуре 1300 °С все эти реакции заканчиваются, и в состав обжигаемого материала могут входить C_2S , C_{12}A_7 , C_3A , C_4AF , C_2F , CaO , MgO и ряд примесей.

5) Зона спекания

Материал, пройдя экзотермическую зону, поступает в зону спекания, где частично плавится, образуя жидкую фазу. Максимальная температура материала здесь обычно составляет 1420–1470 °С (в среднем около 1450 °С). Спекание начинается уже при 1300 °С, продолжается при подъёме температуры до 1450 °С и при охлаждении снова до 1300 °С (интервал 1300–1450–1300 °С).

Зона спекания характеризуется наименьшим перепадом температур газов и обжигаемого материала (в других зонах он достигает 400–600 °С). Тепло от газов к материалу передаётся интенсивно, главным образом излучением. В зонах испарения, подогрева и декарбонизации тепло передаётся в основном конвекцией. Время пребывания материала в зоне спекания составляет 15–30 минут при температуре 1450 °С и размере гранул клинкера 10–50 мм.

После образования жидкой фазы двухкальциевый силикат (C_2S) частично растворяется в расплаве и, соединяясь с окисью кальция, образует трёхкальциевый силикат (C_3S — алит), менее растворимый в расплаве. C_3S выделяется в виде мельчайших, способных к росту кристаллов. Наиболее прочные цементы получают из клинкеров с хорошо оформленными кристаллами алита некрупных размеров. Слишком длительный обжиг и медленное охлаждение, вызывающие чрезмерный рост кристаллов алита, снижают активность цемента.

6) Зона охлаждения

Из зоны спекания клинкер поступает в зону охлаждения, где его температура понижается с 1300 до 1000 °С. Расплав кристаллизуется: из него выделяются минералы C_3A , C_4AF , C_2S , MgO и в небольшом количестве C_3S , а часть жидкой фазы затвердевает в виде стекла. Пройдя эту зону, клинкер выходит из печи с температурой примерно 1000–1200 °С и поступает в холодильник.

Общее время пребывания материала во вращающейся печи составляет от 3 до 6 часов в зависимости от размеров печи и других факторов. Степень заполнения материала в различных зонах неодинакова: в подготовительных зонах продвижение замедляют теплообменные устройства; выделение CO_2 в зоне декарбонизации, наоборот, способствует продвижению, а появление жидкой фазы в зоне спекания и агрегирование зёрен клинкера замедляют его.

1.1 Холодильник клинкера и обеспыливание

Температура выходящего из печи клинкера составляет около 1360 °С, поэтому его необходимо охладить. Холодильник клинкера (позиция 5; 4) производит охлаждение на движущихся колосниках, продуваемых аспирационным воздухом с помощью вентиляторов охлаждающего воздуха (позиция 10). Количество подаваемого воздуха регулируется заслонками. На клинкерном холодильнике смонтировано устройство впрыска воды для дополнительного охлаждения. Для измельчения крупных кусков клинкера и дробления сошедшей обмазки применена молотковая дробилка (позиция 5). Отбор воздуха из внутреннего пространства холодильника осуществляется по трубопроводу отходящего воздуха к электрофильтру (позиция 9), где происходит очистка воздуха от клинкерной пыли. Отходящие газы, прошедшие электрофильтр, направляются вентилятором (позиция 10) к трубе отходящих газов (позиция 18).

1.2 Транспортировка клинкера на склад

Под молотковой дробилкой (позиция 5) расположена распределительная течка, направляющая потоки дроблёного материала на ковшовые

транспортеры (позиция 11 или 7). Клинкер транспортируется на объединённый склад клинкера.

Для защиты от высоких температур корпуса тепловых агрегатов изнутри футеруются огнеупорными материалами.

2 АНАЛИЗ И ОБОСНОВАНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ

2.1 Анализ существующей системы управления подачей шлама

На сегодняшний день на большинстве цементных заводов, работающих по мокрому способу, управление подачей шлама в обжиговую печь осуществляется по традиционным схемам, которые не в полной мере соответствуют современным требованиям к энергоэффективности и качеству конечного продукта. Вращающаяся печь как объект управления отличается сложностью, нелинейностью зависимостей и наличием существенных запаздываний, что делает применение классических методов регулирования малоэффективным.

Существующая система управления в типовом варианте включает в себя дроссельное регулирование расхода шлама с помощью запорно-регулирующей арматуры. При такой схеме двигатель шламового насоса работает в номинальном режиме, а регулирование расхода осуществляется за счет изменения гидравлического сопротивления. При этом насос продолжает потреблять избыточную электроэнергию, работая с пониженным КПД. Недостатком такого подхода является также то, что он не учитывает реологические свойства шлама, в частности его вязкость и подвижность, что вызывает нестабильность подачи и дополнительные энергозатраты при транспортировании.

Традиционные автоматические регуляторы на базе ПИД-законов управления оказываются малоэффективными из-за того, что зависимости, используемые при решении данной задачи, значительно отклоняются от линейности. К тому же, возникают трудности учета различных возмущений, связанных с физико-химическими свойствами сырьевых компонентов и шлама, подаваемого в печь, а также длительного времени пребывания обжигаемого материала в печи. В связи с этим, несмотря на наличие автоматических систем, фактическое управление обжигом по-прежнему ведет оператор-технолог, оценивающий режим печи визуально и по косвенным

показателям. Это снижает качество обожженного материала и сроки службы футеровки печи.

2.2 Выявление недостатков существующей системы и обоснование необходимости модернизации

2.2.1 Проблемы, связанные со стабильностью процесса обжига

Ключевой проблемой существующих систем управления является нестабильность подачи шлама. Она приводит к колебаниям технологического режима печи, что выражается в следующем:

Нарушение теплового баланса: Неравномерный расход шлама ведет к колебаниям температуры в зоне спекания, что негативно сказывается на формировании клинкерных минералов.

Снижение производительности печи: Для компенсации возмущений оператору приходится вести режим с запасами по топливу и загрузке, что снижает производительность агрегата.

Снижение качества клинкера: Из-за нестабильности обжига возможно образование недожога или пережога материала, что отражается на качестве готового цемента.

2.2.2 Энергетическая неэффективность

Наиболее существенные потери в существующей системе связаны с перерасходом энергоресурсов:

- перерасход электроэнергии: при дроссельном регулировании двигатель насоса потребляет электроэнергию практически в номинальном режиме даже при снижении требуемой производительности. Применение частотного регулирования, как будет показано далее, может снизить потребление электроэнергии на 25% и более.
- перерасход топлива на обжиг: в цементной технологии мокрого способа производства около 40% топлива, расходуемого на обжиг клинкера, затрачивается на испарение воды, которая обеспечивает

подвижность шлама. Известно, что снижение влажности шлама на 1% уменьшает расход топлива на обжиг клинкера на 5%. Существующая система не позволяет оптимально управлять влажностью и расходом шлама, что приводит к неоправданным тепловым потерям.

2.2.3 Проблемы, связанные с реологическими свойствами шлама

Одним из главных недостатков традиционного подхода к управлению является игнорирование реологических свойств шлама. Шлам — это сложная суспензия (неньютоновская жидкость), поведение которой зависит от влажности, температуры, химического состава и ряда других факторов. При отсутствии информации о его подвижности и вязкости невозможно обеспечить точное дозирование.

2.2.4 Отсутствие комплексной автоматизации

Существующие системы на многих предприятиях представляют собой набор разрозненных локальных регуляторов, не объединенных в единую информационную сеть. Это не позволяет оператору получать полную картину технологического процесса, анализировать динамику параметров и принимать обоснованные решения.

2.3 Анализ современных подходов к автоматизации процесса подачи шлама

Для преодоления указанных выше недостатков в промышленности разработаны и внедряются различные подходы к автоматизации подачи шлама. Выделим наиболее эффективные из них.

2.3.1 Внедрение частотно-регулируемого электропривода шламовых насосов

Наиболее распространенным и экономически целесообразным направлением модернизации является замена дроссельного регулирования на частотное.

Принципиальное отличие заключается в том, что регулирование расхода шлама осуществляется не созданием дополнительного гидравлического сопротивления, а плавным изменением скорости вращения рабочего колеса центробежного насоса. Для этого двигатель шламового насоса оснащается преобразователем частоты (ПЧ).

Как отмечено в патенте RU 2506510 [1], регулирование расхода шлама осуществляется автоматическим управлением двигателя шламнасоса, оснащенного частотным преобразователем, что позволяет поддерживать заданный расход за счет изменения частоты вращения. При этом в схеме предусмотрена стабилизирующая емкость — промежуточный буферный накопитель шлама, на выходе которого установлены расходомер и задвижка для точного дозирования.

Эффективность этого метода подтверждена практикой. Например, на Тимлюйском цементном заводе в ходе модернизации системы управления шламовым насосом был применен частотный преобразователь Danfoss серии VLT Automation Drive FC-302 мощностью 132 кВт. В результате была достигнута значительная экономия электроэнергии, существенно уменьшился износ насоса, трубопровода и запорной арматуры. [24]

Эффективность применения частотных преобразователей базируется на законах пропорциональности для центробежных машин, которые устанавливают зависимость между основными параметрами работы насоса и частотой вращения его рабочего колеса:

Производительность:

$$Q_1/Q_2 = n_1/n_2 \quad (2)$$

Напор:

$$H_1/H_2 = (n_1/n_2)^2 \quad (3)$$

Потребляемая мощность:

$$N_1/N_2 = (n_1/n_2)^3 \quad (4)$$

Кубическая зависимость потребляемой мощности от частоты вращения является ключевым фактором энергоэффективности. Это означает, что даже небольшое снижение частоты вращения приводит к существенной экономии электроэнергии. Так, при снижении частоты с 50 Гц до 40 Гц (всего на 20%) потребляемая мощность уменьшается примерно на 49%.

2.3.2 Корректировка задания по физико-химическим параметрам шлама

Для повышения эффективности процесса стабилизации расхода недостаточно просто поддерживать заданное значение — необходимо также корректировать само задание в зависимости от свойств шлама. Эту задачу решает патент RU 2506510 [1], в котором предусмотрена следующая система коррекции:

В блок расчета расхода шлама в печь дополнительно подаются корректирующие сигналы:

- По химическому составу шлама — рассчитывается корректирующий сигнал, характеризующий тепловой эффект клинкерообразования.
- По влажности и плотности шлама — данные параметры влияют на теплоту, необходимую для испарения влаги.
- По степени нагрева корпуса печи в зоне теплообменных устройств — на основе измеренных значений энтальпии корпуса печи вырабатывается корректирующий сигнал, характеризующий степень нагрева обжигаемого материала.

Таким образом, система не просто стабилизирует расход, но и адаптирует уставку под конкретные условия, что позволяет поддерживать оптимальный режим горения в печи.

2.3.3 Экстремальное управление подвижностью шлама

Одним из наиболее перспективных и инновационных методов является экстремальное управление подачей шлама, основанное на механическом вибрационном воздействии на шлам с целью снижения его вязкости и влажности.

В исследовании, проведенном учеными Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова [11], была разработана методика экстремального управления подвижностью шлама при механическом воздействии. Идея заключается в том, что путем приложения вибрации к шламу можно значительно увеличить его подвижность (в некоторых случаях — более чем в 11 раз), сохраняя при этом высокую плотность и низкую влажность.

Суть метода:

- а) Измерение подвижности: Непрерывно контролируется показатель "подвижность шлама" (растекаемость).
- б) Поиск экстремума: Автоматически изменяется частота вибрации в диапазоне от 10 до 35 Гц для достижения максимальной подвижности при минимально возможной влажности.
- в) Результат: Снижение влажности шлама на 5...9%, что дает двойной эффект: экономию топлива (на испарение этой воды не требуется тратить тепло) и улучшение транспортабельности шлама.

При этом, как отмечают авторы, методика позволяет не только снизить расход тепла на испарение влаги в печном агрегате, но и уменьшить количество электроэнергии, потребляемой насосами при перекачивании шлама за счет улучшения его реологических свойств.

2.3.4 Применение методов нечеткой логики для управления дозированием

Еще одним перспективным направлением является использование теории нечетких множеств, которая позволяет формализовать опыт и знания технолога-оператора в виде формальных правил управления.

В работе, посвященной применению методов нечеткой логики для управления дозированием шлама [12], предлагается следующий подход:

Сбор экспертных знаний: На основе опроса опытных операторов строится база знаний, содержащая правила управления в виде "ЕСЛИ <условие>, ТО <действие>". Например: "ЕСЛИ температура в зоне спекания ВЫШЕ нормы И влажность шлама НИЖЕ нормы, ТО слегка УВЕЛИЧИТЬ расход шлама".

Четкая методика решения задачи: Она заключается в представлении знаний об объекте управления в виде продукционных правил и в обработке этой информации при помощи методов теории нечетких множеств.

Синтез нечеткого регулятора: Построены функции принадлежности нечетких множеств на основе экспертных данных о технологических параметрах транспортирования шлама. Предложено с их использованием синтезировать систему нечеткого вывода для устройства управления углом поворота колена дозирующего патрубка.

Преимущества нечеткого подхода очевидны: возможность формализации знаний высококвалифицированных специалистов, устойчивость к изменениям параметров объекта и нелинейностям. Важно отметить, что предложенные методы не требуют значительных капиталовложений и могут быть реализованы с использованием существующего на производстве оборудования.

2.3.5 Комплексная АСУ ТП подачи шлама

Наиболее полным и эффективным решением является создание комплексной АСУ ТП, объединяющей в себе все перечисленные выше подходы. Такие системы внедряются на промышленных предприятиях.

Например, на заводе "Вольскцемент" была разработана и внедрена АСУ ТП "Шлам" [23], предназначенная для автоматического управления и сбора данных о процессе приготовления сырьевой смеси. Система управляет:

- а) Наполнением вертикальных шламбассейнов.
- б) Корректировкой химического состава шлама до заданных характеристик.
- в) Сливом готового шлама и учетом выработки и текущих запасов.

Аналогичные проекты реализованы на Себряковском цементном заводе (АСУТП приготовления шлама заданного химического состава в потоке) и на Краматорском цементном заводе "Пушка".

2.4 Сравнительный анализ и выбор направления модернизации

Для объективного выбора оптимального направления модернизации проведем сравнительный анализ рассмотренных подходов в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ

Направление	Эффективность	Капитальные затраты	Сложность внедрения	Основные преимущества
Частотное регулирование шламового насоса	Высокая	Средние	Низкая	Экономия электроэнергии (до 30-50%), плавность регулирования, снижение износа
Корректировка по физико-химическим параметрам	Средняя	Средние	Средняя	Адаптация уставки расхода под свойства сырья
Экстремальное управление подвижностью шлама	Высокая	Средние	Средняя	Снижение влажности шлама на 5-9%, экономия топлива за счет снижения влажности
Нечеткая логика (Fuzzy Logic)	Высокая	Низкие	Высокая	Системная интеграция, возможность формализации знаний оператора, устойчивость

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что оптимальным решением является комплексная модернизация системы управления подачей шлама, включающая:

- а) Базовый уровень — частотно-регулируемый электропривод. Это основа, которая обеспечивает непосредственную экономию

электроэнергии (25-50%) и плавность регулирования расхода. Частотный преобразователь должен быть выбран с учетом агрессивной среды (защита IP54) и перегрузочной способности.

- б) Контур стабилизации и коррекции — ПИД-регулятор с коррекцией. Должна быть организована двухконтурная система: внутренний контур стабилизации расхода (ПИД-регулятор по сигналу расходомера) и внешний контур коррекции задания расхода. Корректирующие сигналы должны поступать от датчиков влажности, плотности и, опционально, химического состава шлама. Это позволит адаптировать работу системы к изменениям свойств сырья.
- в) Верхний уровень — система поддержки принятия решений (экспертная или Fuzzy Logic). Для объединения всей совокупности технологических параметров (температура в зоне спекания, температура отходящих газов, состав отходящих газов и др.) и формирования оптимальных уставок должна быть разработана система с использованием методов нечеткой логики. Это позволит формализовать опыт лучших операторов и сделать процесс управления максимально эффективным.
- г) Экстремальное управление подвижностью шлама может быть рекомендовано как дополнительный модуль для предприятий, испытывающих проблемы с высокой влажностью сырья или низкой подвижностью шлама.

2.5 Критерии эффективности модернизации

Эффективность предлагаемой модернизации будет оцениваться по следующим группам критериев:

Технологические критерии:

- Стабильность расхода шлама (отклонение от заданного расхода, %).
Целевое значение: $\pm 2-3\%$.

- Стабильность температуры газов в зоне спекания (колебания градусов). Целевое значение: $\pm 10^{\circ}\text{C}$.
- Повышение качества клинкера по содержанию алита (C_3S , целевое значение: 55-60%).
- Снижение брака (недожог/пережог).

Энергетические критерии:

- Снижение расхода электроэнергии на привод шламового насоса, %.
- Снижение расхода топлива на обжиг клинкера, %.

Эксплуатационные критерии:

- Снижение износа оборудования — насосов, задвижек, трубопроводов.
- Повышение информативности процесса для оператора.
- Снижение нагрузки на персонал.

На основе проведенного в главе анализа можно сделать следующие выводы:

- а) Существующая система управления подачей шлама, основанная на дроссельном регулировании и локальных ПИД-регуляторах, не позволяет в полной мере обеспечить стабильность процесса, что приводит к нестабильности обжига клинкера, снижению качества продукции и перерасходу топлива и электроэнергии.
- б) Экономически неэффективными являются: игнорирование реологических свойств шлама и отсутствие частотного регулирования насосного оборудования. Дроссельное регулирование ведет к потерям до 30-50% от потребляемой насосом электроэнергии.
- в) Наиболее эффективным способом модернизации является комплексный подход, включающий: внедрение частотно-регулируемого электропривода шламового насоса; организацию контура стабилизации расхода с коррекцией по физико-химическим параметрам шлама; создание интеллектуальной системы верхнего уровня (с применением нечеткой логики или экспертной системы) для формирования оптимальных уставок.

- г) Дополнительным резервом повышения эффективности является внедрение системы экстремального управления подвижностью шлама, позволяющей снизить его влажность на 5-9% за счет вибрационного воздействия, что дает значительную экономию топлива на обжиге.
- д) Экономия от внедрения частотного преобразователя может составить 25% и более потребляемой электроэнергии, а снижение расхода топлива от оптимизации влажности шлама — до 5% на каждый 1% снижения влажности, что обеспечивает срок окупаемости модернизации в пределах одного года.

3 УПРАВЛЕНИЕ РАСХОДОМ ШЛАМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАКА ПОСТОЯННОГО УРОВНЯ (БУФЕРНОГО БАКА) И КОНТРОЛЬНОГО БАКА

Одним из ключевых технических решений, направленных на стабилизацию процесса подачи шлама и повышение энергоэффективности всего агрегата, является применение промежуточной буферной емкости — бака постоянного уровня и контрольного бака. Данный подход нашел широкое применение как в цементной промышленности, так и в смежных отраслях (металлургия, химическая промышленность) при работе с высоковязкими и нестабильными суспензиями.

На предприятии ООО «Горнозаводскцемент» данный метод управления расходом шлама является основным. На рисунке 3.1 представлена структурная схема управления подачи шлама в обжиговую печь.

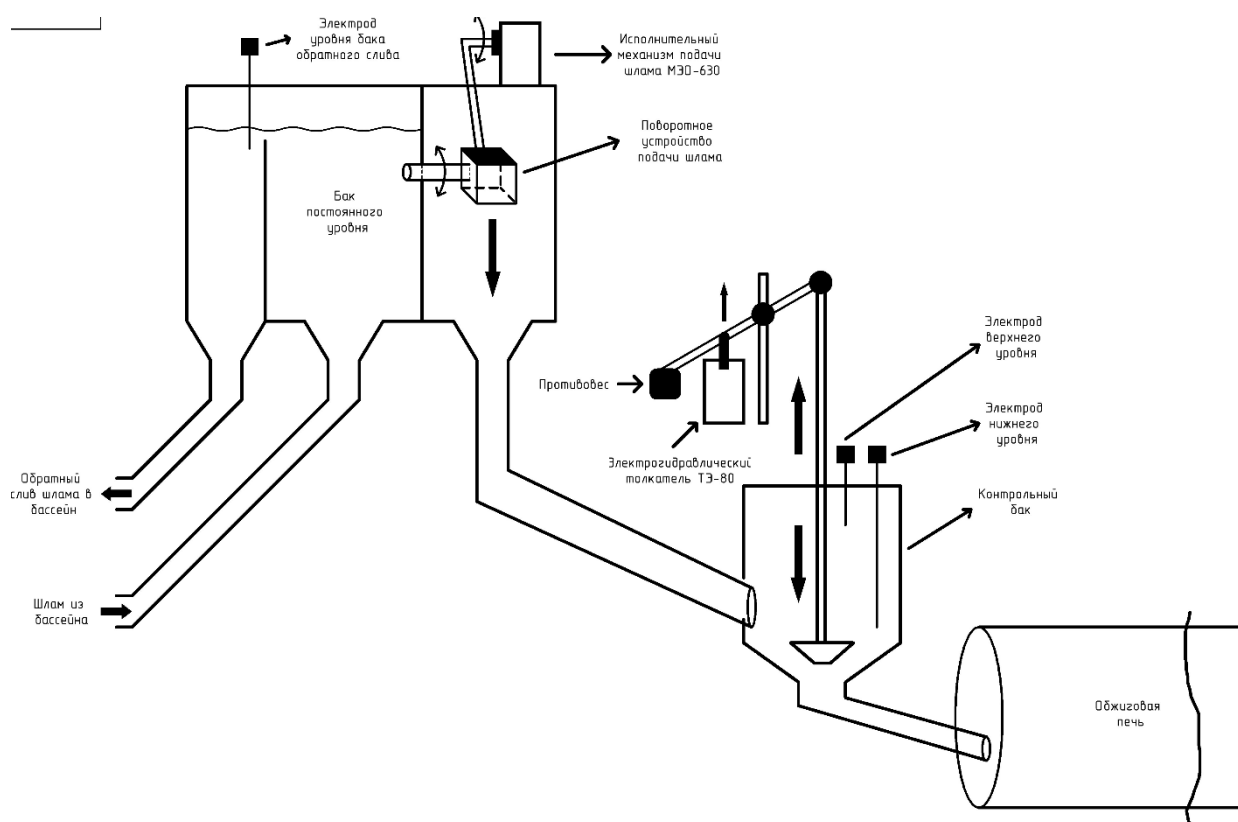


Рисунок 3.1 – Структурная схема подачи шлама в обжиговую печь

Принцип работы подачи шлама в обжиговую печь: из шламоподготовительного отделения (горизонтального шламбассейна) подготовленный шлам с помощью нагнетающего насоса подаётся через трубопровод в бак постоянного уровня, который находится в цехе «Обжиг», нагоняет его и потом возвращается через обратный слив в горизонтальный шламбассейн. Оператор цеха «Обжиг» с помощью кнопок управления приводит в действие исполнительный механизм типа МЭО-630, который опускает поворотное устройство подачи шлама, далее шлам через поворотное устройство и трубопровод поступает в контрольный бак и далее через него поступает в обжиговую печь.

Бак постоянного уровня (промежуточный буферный накопитель) и контрольный бак выполняет в технологической линии две ключевые функции: разделение технологического потока и стабилизацию входных параметров для конечного потребителя (обжиговой печи).

Традиционная схема перекачки «шламбассейн — печь» без буферной емкости имеет существенный недостаток: любые пульсации давления или изменения состава в основном резервуаре напрямую отражаются на работе печного питателя. При этом, как отмечается в технической документации, шламнасос на низких оборотах не в состоянии обеспечить необходимую подачу и создать требуемый напор.

На рисунке 3.2 изображена принципиальная схема регулирования подачи шлама в обжиговую печь, которая реализована на ООО «Горнозаводскцемент». Рассмотрим подробнее работу каждого элемента и взаимодействие между ними.

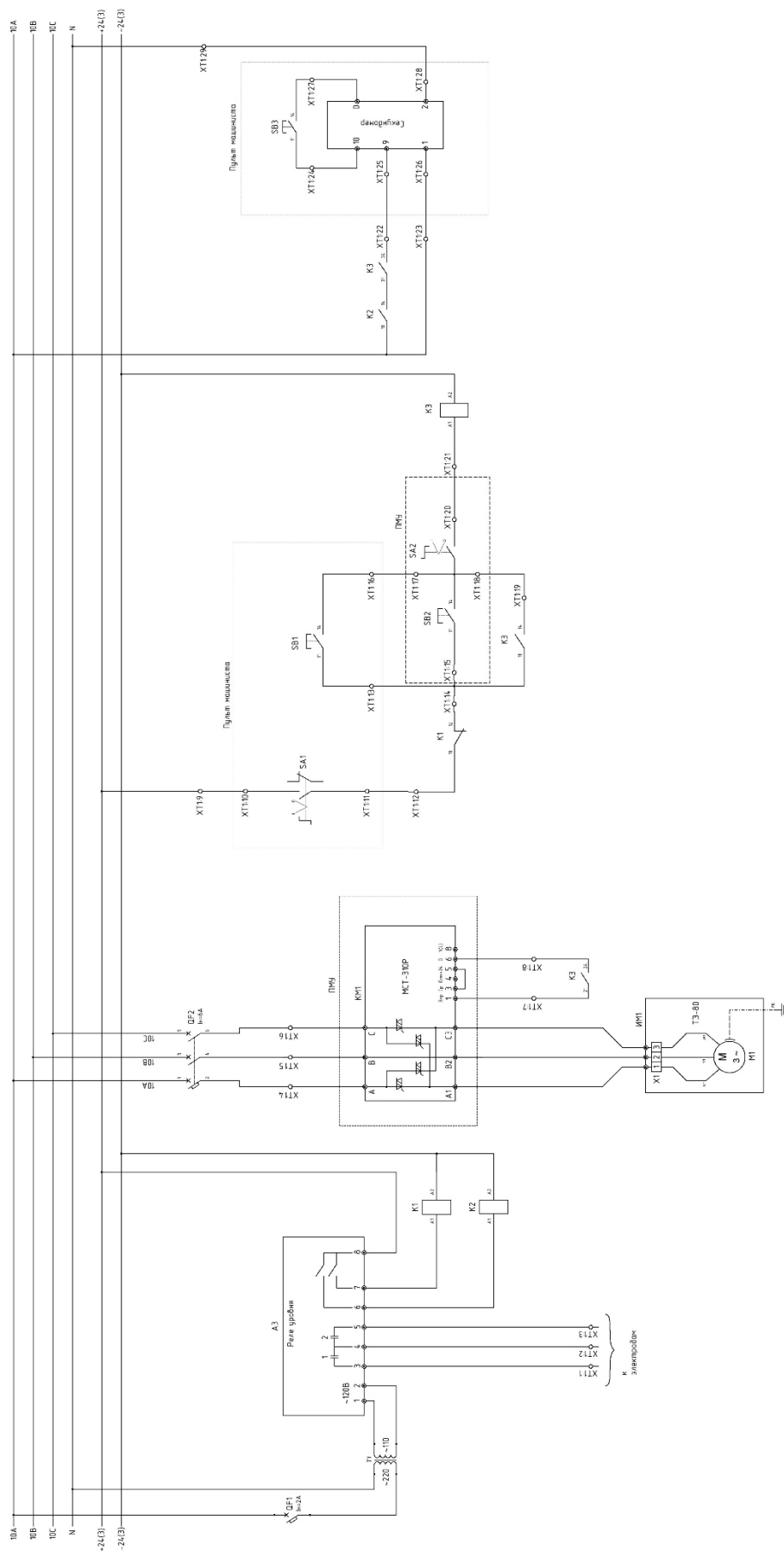


Рисунок 3.2 – Принципиальная схема работы регулирования шлама

Машинист вращающихся печей на пульте управления активирует выключатель SA1 в положение «ВКЛ» позиция №1, +24В подаётся через нормально-замкнутый контакт реле верхнего уровня K1 на кнопку начала замера SB1 на основном пульте управления (пульт машиниста) и на пульте местного управления (ПМУ), далее при нажатии кнопок SB1 либо SB2 срабатывает реле K3, которое своим нормально-разомкнутым контактом 21-24 включает бесконтактный пускатель KM1 (МСТ-310Р) что приводит к включению электрогидравлического толкателя ТЭ-80, который опускает через рычажный механизм запорную пробку в контрольном баке; далее контрольный бак начинает заполняться шламом и при достижении электрода нижнего уровня включается реле уровня А3 (6-8) и промежуточное реле K2; через контакты K2 (11-14) и K3 (31-34) включается электронный секундомер СЭЩ-10000Щ, который начинает отчитывать время в секундах; далее при достижении шламом электрода верхнего уровня включается реле уровня А3 (7-8) и промежуточное реле верхнего уровня K1, которое своим нормально-замкнутым контактом K1 (11-12) разрывает цепь питания реле K3 что приводит к выключению беспроводного пускателя KM1, электрогидравлический толкатель выключается и возвращает запорную пробку с помощью противовеса в исходное положение; секундомер СЭЩ-10000Щ останавливает отчёт времени. Машинист зная от лаборатории параметры влаги шлама (%) ориентируется по таблице питания показанному на рисунке 3.2 с какой производительностью (т/ч) работает обжиговая печь. Пример, если секундомер показал время замера 26,03 секунды, а влажность шлама составляет 32,4 %, то производительность печи, согласно таблице, будет равным 50 тонн клинкера в час (т/ч).

заполнения контрольного бака шлам сливается через нижний патрубок непосредственно в питатель вращающейся печи (на холодный конец).

3.2 Функции и преимущества двухбаковой схемы

Рассмотрим основные функции и преимущества этой схемы:

а) Стабилизация напора перед дозирующим устройством.

Наличие бака постоянного уровня гарантирует, что давление на входе в контрольный бак зависит только от геометрической высоты столба шлама (обычно 1,5–2 м) и не подвержено флуктуациям, вызванным работой насосов или изменением уровня в шламбассейне. Это обеспечивает линейную зависимость расхода от времени наполнения контрольного бака и позволяет точно дозировать шлам даже без применения расходомеров.

б) Возможность периодического (циклического) дозирования.

В классической схеме (рисунок 3.1) контрольный бак работает циклически: наполнение → слив в печь → пауза → наполнение. Частота циклов может достигать 5–10 в минуту. Такой режим, несмотря на прерывистость, дает усредненный стабильный расход, поскольку объем каждой порции известен, а время цикла жестко контролируется.

в) Упрощение измерений и управления.

Для определения текущего расхода достаточно засечь время наполнения контрольного бака. Отсутствие сложных и дорогостоящих расходомеров для абразивных суспензий (электромагнитных, ультразвуковых) снижает эксплуатационные расходы и повышает надежность.

г) Гашение возмущений по составу и плотности.

БПУ выступает как буферная емкость, где происходит частичное усреднение шлама по влажности и химическому составу. Это снижает влияние неоднородности сырья на процесс обжига.

3.3 Недостатки существующей схемы на «Горнозаводскцемент»

Несмотря на указанные преимущества, схема с БПУ и контрольным баком в ее базовом исполнении (с дискретным управлением поворотным устройством) сохраняет ряд проблем, выявленных в главе 2:

- Дискретность подачи. Шлам поступает в печь порциями, что создает микро-колебания расхода. При частоте циклов 2–6 раз в минуту колебания могут достигать $\pm 5\text{--}8\%$ от среднего значения, что снижает стабильность зоны спекания.
- Отсутствие частотного регулирования насоса. Насос, подающий шлам из бассейна в БПУ, работает в номинальном режиме с дросселированием на обратном сливе. Это приводит к перерасходу электроэнергии (до 30 % от потребляемой мощности) и повышенному износу рабочего колеса и трубопроводов.
- Ручная коррекция задания. Оператор вручную изменяет время наполнения контрольного бака (уставку расхода) в зависимости от визуальной оценки факела, температуры в зоне спекания и других косвенных признаков. Такой подход не позволяет оперативно реагировать на изменения влажности шлама или химического состава.
- Отсутствие адаптации к реологии шлама. Схема не учитывает вязкость и подвижность шлама. При повышении вязкости фактический расход через контрольный бак может снижаться из-за увеличения времени опорожнения, что вносит дополнительную погрешность.

3.4 Предлагаемая модернизация существующей двухбаковой системы

На основе анализа, проведенного в разделе 2.4, предлагается сохранить положительные элементы существующей системы (бак постоянного уровня и контрольный бак) и дополнить их современными средствами автоматизации. Модернизированная схема (рисунок 3.3) включает следующие компоненты:

- Частотный преобразователь (ПЧ) для двигателя шламового насоса.
- Замена дроссельного регулирования на частотное позволяет поддерживать постоянный уровень в БПУ, изменяя скорость вращения насоса. Для этого в БПУ устанавливается датчик уровня (гидростатический или радарный) и ПИД-регулятор. Преимущество: исключение обратного слива, экономия электроэнергии (до 40 %), снижение износа трубопроводов.
- Преобразователь частоты для привода поворотного устройства (МЭО-630).
- Вместо дискретного открытия/закрытия поворотного устройства предлагается использовать сервопривод с позиционированием и управлением от аналогового сигнала 4–20 мА. Это позволит плавно регулировать расход шлама, обеспечивая его непрерывность (минимальные пульсации). Контрольный бак при этом переводится в режим измерения расхода (калибровочный) либо сохраняется как резервная емкость.
- Датчик влажности и плотности шлама (например, микроволновый или радиоизотопный) устанавливается на трубопроводе после БПУ. Сигнал используется для коррекции уставки расхода с целью оптимизации теплового режима печи.
- Система верхнего уровня на базе нечеткой логики (Fuzzy Logic).
- Программируемый логический контроллер (ПЛК) с реализованным алгоритмом нечеткого вывода получает данные:
 - а) температура в зоне спекания (пирометр);
 - б) температура отходящих газов;
 - в) содержание кислорода и СО в дымовых газах (газоанализатор);
 - г) влажность и плотность шлама;
 - д) текущий расход шлама (по времени опорожнения контрольного бака или по сигналу расходомера).

На выходе ПЛК формирует задание для частотного привода поворотного устройства (расход шлама) и, при необходимости, корректирует частоту насоса.

3.5 Алгоритм работы модернизированной системы

1) Нормальный режим.

ПЛК непрерывно вычисляет оптимальное значение расхода шлама $Q_{\text{зад}}$ на основе нечеткой базы правил, учитывающей текущие параметры обжига. Сигнал 4–20 мА поступает на ПЧ поворотного устройства, которое плавно изменяет проходное сечение. Контрольный бак находится в положении «открыто» (шлам течет непрерывно) либо используется только как датчик расхода – периодическое заполнение для поверки.

2) Стабилизация уровня в БПУ.

Независимый ПИД-регулятор (в ПЛК или в самом ПЧ) поддерживает уровень шлама в БПУ на заданной отметке, изменяя частоту вращения шламового насоса. При отклонении уровня $\pm 5\%$ выдается аварийный сигнал.

3) Адаптивная коррекция.

Если датчик влажности фиксирует увеличение влажности шлама на 1 %, ПЛК уменьшает уставку расхода на 5–7 % (чтобы компенсировать дополнительный расход тепла на испарение) или, наоборот, увеличивает уставку расхода топлива. При этом соблюдаются ограничения по допустимому диапазону температур в зоне спекания (1450 ± 20 °С).

4) Ручной режим.

Оператор может переключить систему в режим ручного управления, задавая расход шлама с пульта. Все тренды параметров сохраняются в архиве для последующего анализа.

3.6 Ожидаемые результаты модернизации на предприятии ООО «Горнозаводскцемент»

Внедрение предложенной системы на участке цеха обжига печей №6 и №7 позволит:

- Снизить колебания расхода шлама с текущих $\pm 10\text{--}15\%$ до $\pm 2\text{--}3\%$.
- Уменьшить перерасход топлива на $8\text{--}12\%$ за счет стабилизации влажности и расхода шлама.
- Сократить потребление электроэнергии приводом шламового насоса на $35\text{--}45\%$.
- Повысить содержание алита (C_3S) в клинкере с $48\text{--}52\%$ до $55\text{--}58\%$, что улучшит марку цемента.
- Снизить количество аварийных остановок печи из-за пережога или недожога материала.

4 РАЗРАБОТКА И МОДЕРНИЗАЦИЯ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗАМЕРА ШЛАМА

4.1 Обоснование в модернизации схемы управления замером шлама

4.1.1 Особенности существующей системы замера расхода шлама на предприятии ООО «Горнозаводскцемент»

В настоящее время на цехе обжига ООО «Горнозаводскцемент» измерение расхода шлама, подаваемого во вращающиеся печи №6 и №7, осуществляется «косвенным методом» с использованием контрольного бака известного объёма (500 л). Технология замера следующая:

- а) Оператор задаёт время заполнения контрольного бака;
- б) По окончании заполнения бак опорожняется в питатель печи;
- в) Расход вычисляется как частное от деления объёма бака на время его наполнения.

Такая схема имеет ряд принципиальных ограничений, которые негативно влияют на точность дозирования и стабильность обжига клинкера.

4.1.2 Недостатки существующего метода замера расхода

Дискретность и нестабильность подачи.

- Контрольный бак работает в циклическом режиме (наполнение → слив → пауза). Частота циклов обычно не превышает 6–10 в минуту. Даже при идеальной работе это создаёт пульсации расхода с амплитудой до $\pm 10\%$ от среднего значения.
- В перерывах между сливами в печь шлам не поступает, что приводит к микро-колебаниям уровня заполнения материала в печи и, как следствие, к нестабильности температурного режима в зоне спекания.
- Зависимость точности от реологических свойств шлама.
- Шлам является неньютоновской жидкостью, его вязкость и подвижность меняются в зависимости от влажности, температуры, тонины помола и химического состава.

- При повышенной вязкости время опорожнения контрольного бака увеличивается (часть шлама «зависает» на стенках, медленно стекает). Однако при традиционной методике расчёт ведётся по номинальному времени наполнения без учёта динамики опорожнения. Это вносит «систематическую погрешность» до 5–8%.
- При низкой подвижности шлама (густая консистенция) контрольный бак может опорожняться не полностью, и в следующем цикле в печь поступает заниженное количество материала.
- Отсутствие непрерывного контроля расхода.
- Оператор или регулятор не видит текущего расхода в реальном времени, а получает только усреднённое значение за цикл. Это исключает возможность быстрой реакции на возмущения (например, на изменение влажности шлама или разрежения в печи).
- Система не позволяет реализовать «каскадное регулирование» (расход шлама – температура в зоне спекания), так как сигнал расхода обновляется слишком редко и с запаздыванием.

Влияние человеческого фактора.

В настоящее время коррекция задания расхода (времени наполнения контрольного бака) часто выполняется оператором вручную на основе визуальной оценки факела и показаний термопар. Это приводит к субъективным ошибкам, перерасходу топлива и снижению качества клинкера.

Технические и экономические последствия неточного замера расхода шлама приведены в таблице 2

Таблица 2 – Последствие неточного замера расхода шлама

Последствие	Механизм	Оценочный ущерб
Перерасход топлива	Из-за дискретной подачи оператор вынужден поддерживать запас по топливу, чтобы избежать недожога	5–8% от расхода газа
Нестабильность клинкера	Колебания расхода шлама → колебания температуры в зоне спекания → неравномерное образование алита (C_3S)	Снижение марки цемента на 50–100 кгс/см ²
Перерасход электроэнергии	Для компенсации неустойчивости шлам насосы работают с избыточной частотой вращения, а излишки шлама сливаются обратно в бассейн	30–40% от потребления насоса
Аварийные остановки	Резкое изменение расхода может привести к пережогу футеровки или завалу холодного конца	Простой печи до 20 часов, убыток ~2 млн.руб

Цели модернизации системы замера расхода шлама.

Модернизация должна обеспечить:

- 1) Непрерывное, точное и воспроизводимое измерение расхода шлама с погрешностью не более $\pm 2\%$ (вместо текущих $\pm 10\%$).
- 2) Возможность использования сигнала расхода в замкнутом контуре автоматического регулирования (каскад «расход шлама – расход топлива – температура в зоне спекания»).
- 3) Адаптацию к изменению реологических свойств шлама (вязкости, плотности) без снижения точности.
- 4) Снижение нагрузки на оператора и исключение субъективного фактора при дозировании.

4.2 Предлагаемые технические решения для модернизации замера шлама

Установка электромагнитного или ультразвукового расходомера:

- Электромагнитный расходомер (например, QTLD/J, Promag 55S, Optiflux) не имеет движущихся частей, не создаёт дополнительного гидравлического сопротивления, устойчив к абразивному износу. Погрешность – 0,5%. Требуется электропроводности шлама (обычно >5 мкСм/см, что выполняется для цементного шлама).
- Ультразвуковой расходомер (время-импульсный) подходит для шламов с любыми электрофизическими свойствами, но чувствителен к газовым включениям. Может быть установлен на существующем трубопроводе без врезки (накладные датчики).

Расходомер устанавливается после бака постоянного уровня, перед поворотным устройством. Сигнал 4–20 мА поступает в ПЛК.

Сохранение контрольного бака как резервного калибратора:

Контрольный бак объёмом 500 л можно использовать для периодической поверки расходомера (например, один раз в смену). Это повышает надёжность системы без отказа от прямого метода измерения.

Внедрение частотно-регулируемого привода для поворотного устройства:

Вместо дискретного открытия/закрытия (МЭО-630 в позиционном режиме) предлагается использовать сервопривод с аналоговым управлением и частотным преобразователем. Это позволяет плавно изменять проходное сечение и поддерживать заданный расход непрерывно, а не циклами. Контрольный бак при этом переводится в режим «проток» или отключается.

Коррекция показаний по плотности и вязкости:

- Датчик плотности (радиоизотопный или вибрационный) устанавливается на том же трубопроводе. Сигнал плотности используется для пересчёта объёмного расхода в массовый, что критично при изменении влажности шлама.
- Датчик вязкости (вискозиметр) опционально позволяет дополнительно корректировать показания расходомера при работе с нестабильными суспензиями.

- Датчик влаги (влажмер, например FIZEPR-SW100.30.2.) опционально позволяет корректировать объём подаваемого шлама в зависимости от содержания влаги.

4.3 Ожидаемая эффективность от модернизации замера шлама

- а) Точность поддержания расхода повышается с $\pm 10\text{--}15\%$ до $\pm 2\text{--}3\%$, что напрямую стабилизирует температуру в зоне спекания.
- б) Экономия топлива – за счёт точного дозирования и возможности работы с более густым шламом (снижение влажности на 3–5%) экономия газа составит 5–10%, или ~80–160 тыс. м³ в год на одну печь.
- в) Экономия электроэнергии – переход на непрерывное регулирование расхода вместо циклического позволяет снизить динамические потери в приводе питателя и насосе; дополнительная экономия – 10–15% от потребления насосной группы.
- г) Срок окупаемости – при стоимости комплекта (расходомер, ПЛК, ПЧ, датчики, монтаж) около 2,5 млн руб. и годовой экономии 30–40 млн руб. (только за счёт топлива и электроэнергии) окупаемость составляет менее 1 месяца.

Существующая на ООО «Горнозаводскцемент» схема управления замером расхода шлама с помощью контрольного бака морально устарела, не обеспечивает необходимой точности и непрерывности измерения, вносит существенные динамические погрешности из-за реологических свойств шлама и дискретности работы. Модернизация, включающая внедрение электромагнитного расходомера, частотно-регулируемого привода питателя и коррекцию по плотности, позволит:

- повысить стабильность технологического процесса обжига;
- снизить расход топлива и электроэнергии;
- улучшить качество клинкера;
- создать основу для полноценной автоматизированной системы управления печью.

Таким образом, модернизация схемы управления замером шлама является технически обоснованной, экономически целесообразной и должна быть реализована в первоочередном порядке.

4.4 Разработка модернизированной схемы управления замера шлама

Непрерывный и точный контроль влажности шлама критически важен для стабильности последующих технологических процессов (помол, сушка, классификация) и качества конечной продукции. Традиционный гравиметрический (весовой) метод дает высокую точность, но он дискретен и требует значительных временных затрат, что не позволяет оперативно управлять процессом.

Предлагаемая модернизация направлена на создание автоматической системы управления, которая в реальном времени измеряет текущую влажность и расход шлама (рисунок 4.1).

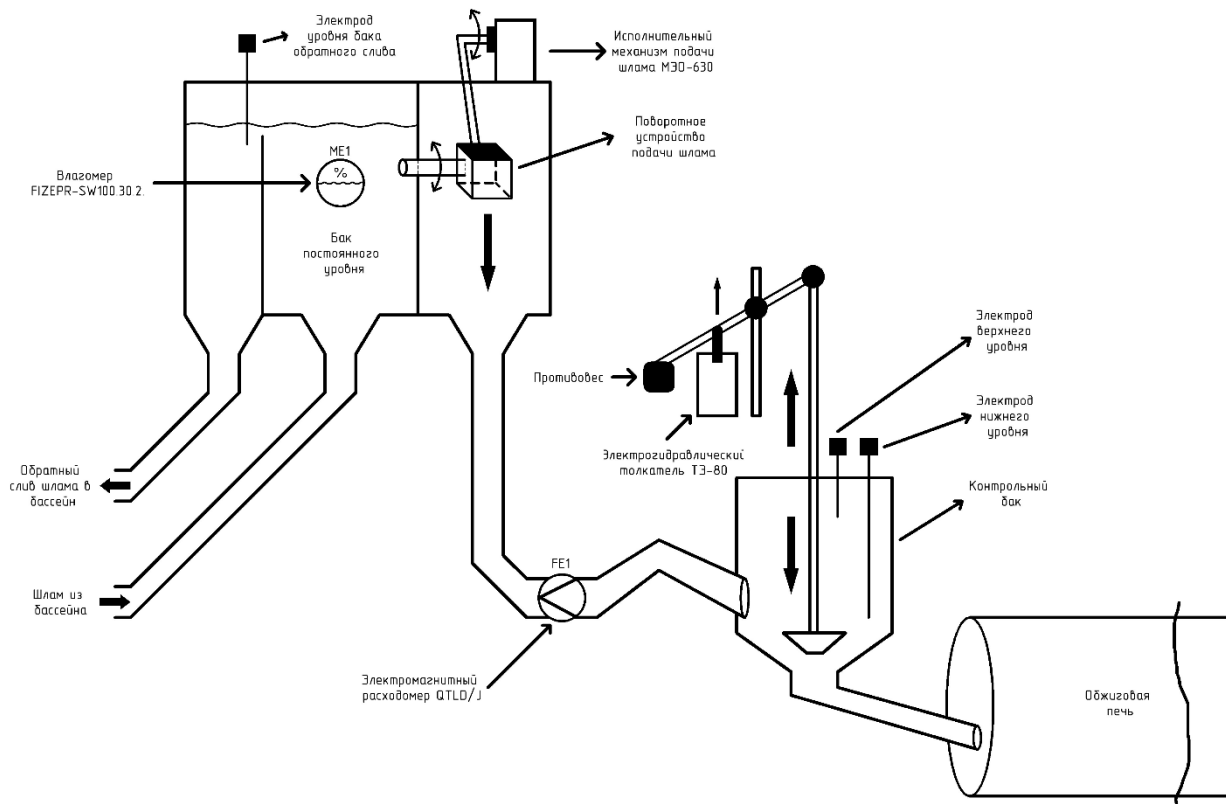


Рисунок 4.1 – Изменённая схема подачи шлама

На данном рисунке показана изменённая структурная схема подачи шлама в обжиговую печь. В бак постоянного уровня монтируется влагомер марки FIZEPR-SW100.30.2. с условием его дальнейшего обслуживания даже во время непрерывной работы при постоянной подаче шлама в обжиговые печи. Так же в эту систему после бака постоянного уровня шлама монтируется электромагнитный расходомер марки QTLД/J. Данное решение потребует минимальных затрат по механической части, а так же части материальных средств и имеет возможность монтирования данных устройств без привлечения подрядных организаций силами ремонтной службы предприятия ООО «Горнозаводсцемент».

По технологии ведения обжиговой печи машинист контролирует количество подаваемого материала (шлама) при помощи контрольного бака методом измерения временного интервала. Замер машинистом временного интервала должен по технологической инструкции производиться каждые 15-20 минут в течении всей рабочей смены. Для оптимизации производственного процесса были внесены изменения в существующую принципиальную схему подачи и контроля подаваемого шлама в обжиговые печи (рисунок 4.2).

В данной схеме был добавлен программируемый логический контроллер (ПЛК) и модуль ввода аналоговый производства отечественной фирмы Овен. На данной схеме появилась возможность управлять замером как в ручном режиме так и в автоматическом в с интервалом каждые 15 минут. Рассмотрим подробнее работу каждого элемента и взаимодействие между ними.

При ручном режиме машинист вращающихся печей на пульте управления активирует выключатель SA1 в положение «ВКЛ» позиция №1, +24В подаётся через нормально-замкнутый контакт реле верхнего уровня K1 на кнопку начала замера SB1 на основном пульте управления (пульт машиниста) и на пульте местного управления (ПМУ), далее при нажатии кнопок SB1 либо SB2 срабатывает реле K3, которое своим нормально-разомкнутым контактом 21-24 включает бесконтактный пускатель KM1 (МСТ-310Р) что приводит к включению электрогидравлического толкателя

ТЭ-80, который опускает через рычажный механизм запорную пробку в контрольном баке; далее контрольный бак начинает заполняться шламом и при достижении электрода нижнего уровня включается реле уровня АЗ (6-8) и промежуточное реле К2; через контакты К2 (11-14) и К3 (31-34) включается электронный секундомер СЭЩ-10000Щ, который начинает отчитывать время в секундах; далее при достижении шламом электрода верхнего уровня включается реле уровня АЗ (7-8) и промежуточное реле верхнего уровня К1, которое своим нормально-замкнутым контактом К1 (11-12) разрывает цепь питания реле К3 что приводит к выключению беспроводного пускателя КМ1, электрогидравлический толкатель выключается и возвращает запорную пробку с помощью противовеса в исходное положение; секундомер СЭЩ-10000Щ останавливает отчёт времени.

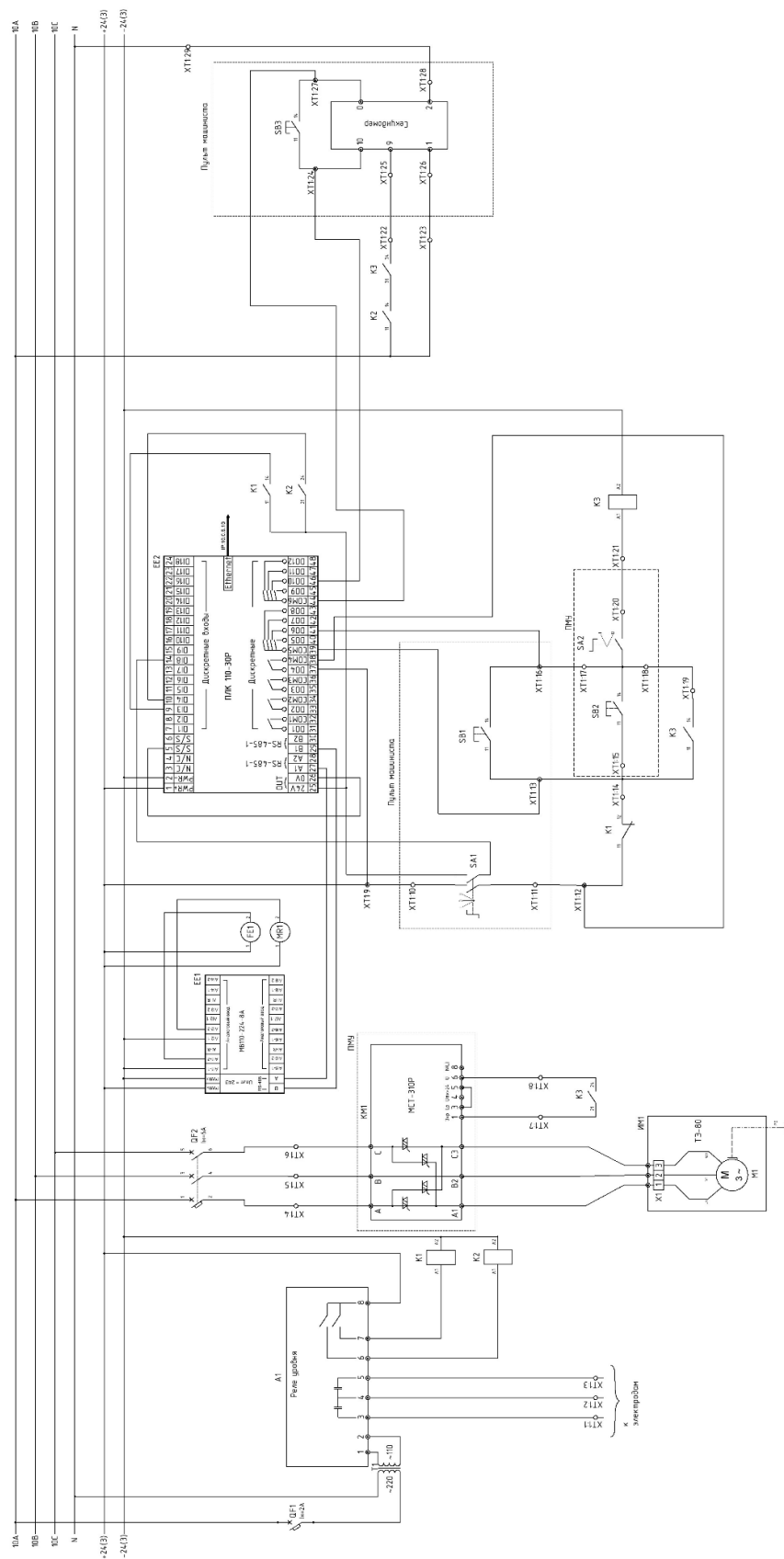


Рисунок 4.2 – Изменённая принципиальная схема подачи шлама

Через нормально-разомкнутые контакты К1 (11-14) и К2 (21-24) подаётся дискретный сигналы +24В на дискретные входы ПЛК DI3 и DI4, ПЛК согласно написанной программе, измеряет временной интервал между данными сигналами и выводит информацию на АРМ машиниста в секундах (рисунок 4.3).

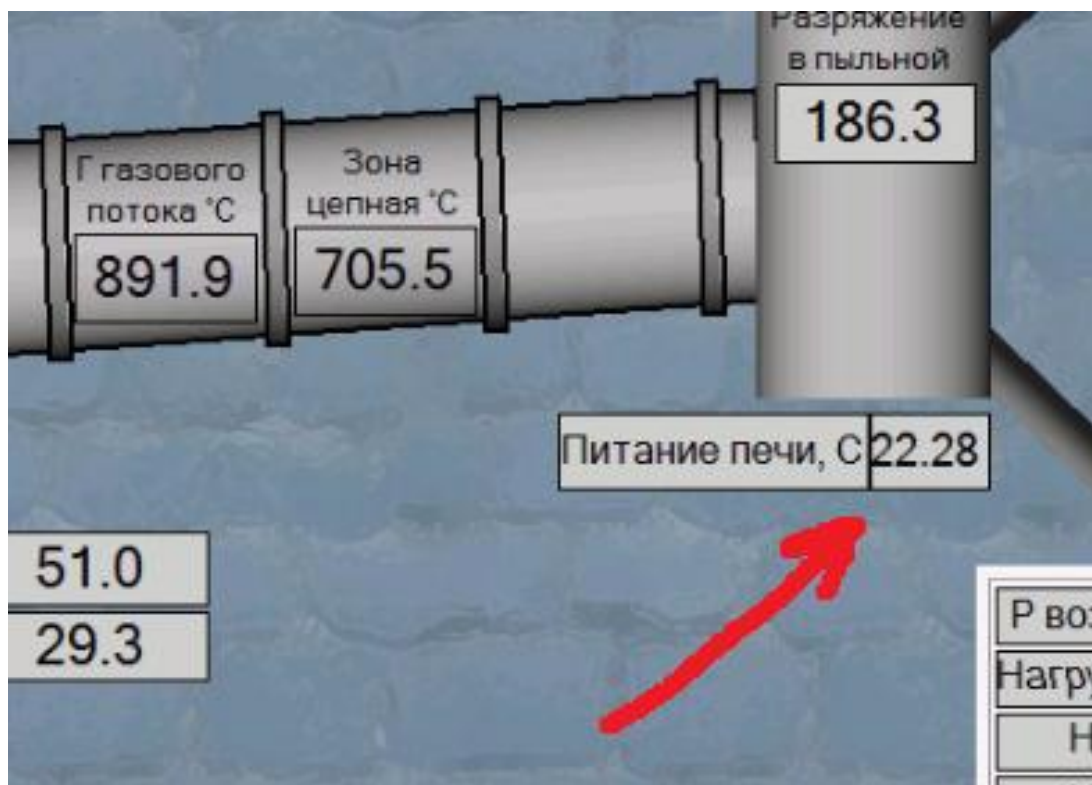


Рисунок 4.3 – Вывод информации временного замера шлама на АРМ машиниста

Для включения автоматического режима замера шлама в машинист вращающихся печей на пульте управления активирует выключатель SA1 в положение «ВКЛ» позиция №2, +24В подаётся на дискретный вход ПЛК DI8, что является стартовым сигналом для включения автоматического режима; следующим шагом является подача управляющего сигнала +24В через дискретный выход DO4-COM4 на нормально-замкнутый контакт К1 (11-12); далее согласно написанной программе через дискретный выход COM6-DO10, который подключен параллельно кнопке SB3, происходит обнуление секундомера СЭЩ-10000Щ, затем происходит срабатывание дискретного

выхода ПЛК COM5-DO6, которое подключено параллельно кнопке SB1. Далее происходит задержка в течении 15 минут и цикл начинается заново.

Так же в эту схему добавлены модуль ввода аналоговый EE1, к аналоговым входам которого подключены влагомер MR1 и расходомер FE1, сам модуль подключен к программируемому логическому контроллеру.

4.5 Подбор оборудования для модернизации

Для реализации предложенной в дипломном проекте системы автоматического управления подачей шлама в обжиговую печь, была выбрана и обоснована следующая конфигурация оборудования на базе российской компании «ОВЕН». Ключевым требованием при подборе являлось обеспечение необходимого количества сигналов для управления оборудованием (пуск/остановка насоса, управление задвижками, контроль аварийной сигнализации), а также сбор всех необходимых технологических параметров для реализации закона управления и визуализации процесса для оператора.

4.5.1 Обоснование выбора программируемого логического контроллера (ПЛК)

В качестве центрального устройства управления была выбрана модель ПЛК110-220.30.P-M (Рисунок 4.4) [22].



Рисунок 4.4 – Программируемый логический контроллер модель ПЛК110-220.30.P-M

Критерии выбора: основными критериями стали достаточное количество встроенных входов/выходов, наличие необходимых интерфейсов для связи с SCADA-системой и управляющим оборудованием, а также надежность, подтвержденная опытом применения в промышленности.

Обоснование выбора: данный контроллер принадлежит к линейке ПЛК110, которая позиционируется производителем как решение для создания систем автоматизации среднего уровня и распределенных систем управления. Он обладает оптимальным соотношением производительности и функциональности для локальной автоматизации такого технологического узла, как узел подачи шлама.

Технические характеристики:

Процессор: Контроллер построен на высокопроизводительном RISC-процессоре архитектуры ARM9 с тактовой частотой 200 МГц, что обеспечивает быстрое выполнение алгоритмов управления.

Память: Оснащен оперативной памятью SDRAM объемом 8 МБ, флеш-памятью на 4 МБ и энергонезависимой памятью для хранения переменных (до

16 КБ), что достаточно для хранения и выполнения сложной программы управления.

Встроенные порты: Поддерживает работу со SCADA-системами (например, MasterSCADA 4D) и другими устройствами по протоколам OPC UA и Modbus через встроенные интерфейсы, что критически важно для интеграции в единую систему диспетчеризации (АРМ оператора).

Количество встроенных сигналов: Контроллер имеет 30 точек ввода/вывода, распределенных как 18 дискретных входов (DI) и 12 релейных выходов (DO), что является базовым для управления насосом и задвижками.

Питание: Возможно два варианта питания: от сети переменного тока 90...265 В или от сети постоянного тока 18...29 В, что упрощает интеграцию в существующие электроциты. Потребляемая мощность не превышает 10 Вт, что является очень экономичным показателем.

4.5.2 Обоснование выбора модулей аналогового ввода

Для сбора аналоговых технологических сигналов (уровень в контрольном баке, расход шлама, температура в зоне спекания, влажность шлама и т.д.) был выбран модуль расширения MB110-224.8A (Рисунок 4.5) [22].



Рисунок 4.5 – Модуль расширения MB110-224.8A

Критерии выбора: поддержка широкого спектра сигналов от различных датчиков, количество каналов и высокая точность измерений.

Обоснование выбора: данный модуль был выбран для обеспечения возможности подключения разнообразных датчиков с различными типами выходных сигналов, что полностью покрывает потребности системы.

Технические характеристики:

Модуль MB110-224.8A имеет 8 универсальных аналоговых входов (AI) и способен принимать следующие типы сигналов без использования дополнительных внешних преобразователей:

Унифицированные сигналы: 0...5 мА, 0(4)...20 мА, ± 50 мВ, 0...1 В.

Термосопротивления: Поддерживается подключение 19 различных типов (Pt100, Pt1000 и др.).

Термопары: Поддерживается подключение 13 различных типов (К, J, S, R и др.).

Сопротивление: 0...5000 Ом.

Точность и скорость:

Класс точности: погрешность для унифицированных сигналов — $\pm 0,25$ %; для термопар — $\pm 0,5$ %.

Разрядность АЦП — 16 бит.

Время опроса одного входа для унифицированных сигналов не превышает 0,6 с.

Коммуникация и конфигурация:

Интерфейс для связи с контроллером — RS-485, поддерживаемые протоколы: Modbus RTU, Modbus ASCII, OVEN, DCON. Скорость обмена данными от 2400 до 115200 бит/с.

Универсальное питание, как и у ПЛК: ~ 230 В или ~ 24 В. Потребляемая мощность не более 6 ВА.

Для каждого канала доступна индивидуальная конфигурация типа сигнала.

4.5.3 Обоснование выбора датчика влажности шлама

Для реализации интеллектуальной системы коррекции расхода шлама, основанной на его физико-химических свойствах, критически важным является непрерывный контроль влажности. Как было показано в аналитической части работы, снижение влажности шлама на 1% приводит к экономии топлива на обжиг до 5%, что делает этот параметр ключевым для оптимизации.

В качестве устройства измерения выбран анализатор влажности (влажномер) FIZEPR-SW100.30.2 (Рисунок 4.6) [20]. Выбор обусловлен его метрологическими характеристиками, адаптированностью к вязким и абразивным средам, а также положительным опытом применения в цементной промышленности, подтверждённым испытаниями, в частности, на ОАО «Новоросцемент».



Рисунок 4.6 – Влагомер FIZEPR-SW100.30.2

Принцип действия и конструкция.

Влагомеры серии FIZEPR-SW100 являются измерителями диэлектрической проницаемости (диэлькометрами). Метод измерения основан на зависимости диэлектрической проницаемости материала от содержания в нём воды. Измерения производятся путём зондирования среды радиоволнами в диапазоне 2...750 МГц. Влагомер вычисляет коэффициент замедления электромагнитной волны в материале, по которому с учётом температуры рассчитывает массовую долю воды.

Модель FIZEPR-SW100.30.2 является лабораторным вариантом, по своим характеристикам соответствующим поточным влагомерам серии, что подтверждает корректность выбранной технологии для промышленного применения. Датчик влагомера выполнен в виде кюветы размерами 200×100×100 мм, хотя следует отметить, что для промышленных измерений могут применяться иные модификации, включая прямоточные и погружные.

Таблица 3 - Технические характеристики влагомера FIZEPR-SW100.30.2

Параметр	Значение
Диапазон измерений массовой доли влажности	0...100%
Диапазон измеряемой диэлектрической проницаемости	1...100 (действительная составляющая)
Диапазон измеряемого тангенса диэлектрических потерь	0...0,4
Объем контролируемой пробы	1,8 л
Период измерения	1 секунда
Степень защиты датчика (IP)	IP67
Диапазон рабочих температур (датчик)	0...80 °С
Диапазон рабочих температур (электронный блок)	0...70 °С

Интеграция в систему автоматизации.

Принципиальным преимуществом прибора является наличие стандартных интерфейсов связи, что упрощает его интеграцию в АСУ ТП. Влагомер имеет следующие выходные возможности:

- а) аналоговый выход 4-20 мА, пропорциональный измеренному значению влажности, что позволяет подключать прибор непосредственно к модулю аналогового ввода контроллера (ранее выбранному MB110-224.8A),
- б) цифровой интерфейс MODBUS RTU, что позволяет организовать обмен данными с ПЛК и SCADA по протоколу последовательной связи (RS-485), получая не только значение влажности, но и данные о состоянии прибора.

Обоснование выбора.

Выбор FIZEPR-SW100.30.2 обусловлен:

- Соответствием задаче: обеспечивает прямое измерение влажности шлама в необходимом диапазоне 0...100%.
- Возможностью адаптации: Калибровочные таблицы могут быть загружены для конкретного типа материала (шлама), что гарантирует точность измерений.
- Надёжностью: Конструкция из нержавеющей стали и высокий класс защиты (IP67) обеспечивают работоспособность в условиях цементного производства.
- Лёгкостью интеграции: Наличие унифицированных выходных сигналов (4-20 мА) и цифрового интерфейса MODBUS позволяет легко включить влагомер в единую систему с выбранным контроллером.

4.5.4 Обоснование выбора электромагнитного расходомера

Вторым ключевым компонентом в контуре точного дозирования шлама является расходомер, обеспечивающий обратную связь по расходу. Для измерения расхода абразивного и электропроводящего шлама оптимальным решением является электромагнитный расходомер.

В качестве измерительного прибора выбран электромагнитный расходомер QTLD/J производства Q&T Instrument Co., Ltd (КНР) [21]. Данный прибор включён в Государственный реестр средств измерений РФ (регистрационный номер 92021-24) [21], что подтверждает его метрологическую легитимность и допускает использование в коммерческих и технологических учётах на территории РФ.

Принцип действия и конструкция

Принцип работы расходомеров QTLD основан на законе электромагнитной индукции: в электропроводящей жидкости, движущейся в магнитном поле, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости потока. Измеренное значение ЭДС преобразуется электронным блоком в значение объёмного расхода и суммарного объёма прошедшей среды.

Исполнение J (Slurry) специально оптимизировано для работы с абразивными пульпами и шламами. Расходомеры данной модификации имеют ряд ключевых особенностей, делающих их пригодными для цементной промышленности:

- Специальный преобразователь устраняет помехи, вызванные шумом от твёрдых частиц в потоке, обеспечивая стабильные показания.
- Применимость для высоких концентраций твердых веществ: Концентрация суспензии может достигать 55%, что перекрывает типичные значения для цементного шлама.
- Метод возбуждения: Для повышения стабильности измерений используется 4-вида прямоугольной волны с выбором частоты 25 или 30 Гц.

Технические характеристики расходомера QTLD/J показаны в таблице 4.

Таблица 4 - Технические характеристики расходомера QTLD/J

Параметр	Значение
Номинальный диаметр (DN), мм	от 3 до 3000 (подбор под трубопровод)
Погрешность измерения	$\pm 0,5\%$ от показаний (при скорости $\geq 0,5$ м/с)
Диапазон скоростей потока	0,1...15 м/с
Воспроизводимость	$\leq 0,17\%$
Проводимость среды	> 5 мкСм/см (обеспечивается шламом)
Температура измеряемой среды	Компактное исполнение: $-20...+80$ °C, раздельное: $-20...+120$ °C
Давление среды	до 4 МПа
Футеровка (облицовка)	Полиуретан, неопрен, PTFE (в зависимости от агрессивности среды)
Материал электродов	SS316L, Hastelloy C, титан, тантал (под агрессивность среды)

Продолжение таблицы 4

Выходные сигналы	4-20 мА (нагрузка до 750 Ом), частотный/импульсный, 2 сигнала «Авария» (открытый коллектор)
Интерфейс связи	RS485 MODBUS (опционально HART, PROFIBUS)
Питание	85...250 В AC, 20...36 В DC
Потребляемая мощность	<20 Вт
Степень защиты	Преобразователь: IP65 (опционально IP67), датчик: IP65 (до IP68 погружной)

Интеграция в систему автоматизации.

Для целей управления достаточно основного аналогового выхода 4-20 мА, который будет подан на свободный вход модуля аналогового ввода MB110-224.8A для получения текущего значения расхода $Q_{расх}(t)$ в ПЛК. Цифровой интерфейс RS485 MODBUS может быть использован для дополнительного контроля параметров (накопленный объём, диагностика).

Обоснование выбора.

Выбор QTLД/J обусловлен:

- а) Государственной регистрацией в РФ: Прибор внесён в Госреестр, что подтверждает его соответствие требованиям и гарантирует возможность поверки на территории страны.
- б) Применимостью для шламов: Специализированное исполнение «J» гарантирует корректную работу на суспензиях с содержанием твёрдых частиц до 55%.
- в) Высокой точностью: Погрешность $\pm 0,5\%$ достаточна для стабилизации расхода, а опциональная точность $\pm 0,2\%$ позволит применять его и для коммерческого учёта, если потребуется.
- г) Гибкостью: Возможность выбора подходящих материалов футеровки и электродов позволяет адаптировать прибор к любому типу шлама (нейтральному, агрессивному).

д) Лёгкостью интеграции: Наличие унифицированных выходных сигналов 4-20 мА и цифрового интерфейса MODBUS полностью соответствует требованиям, заложенным в аппаратной части проекта.

4.5.5 Итоговая спецификация оборудования для узла управления

С учётом ранее выбранных ПЛК ПЛК110-220.30.Р-М и модуля MB110-224.8А, полный состав оборудования для модернизированной системы управления подачей шлама выглядит следующим образом (см таблицу 5):

Таблица 5 – Состав оборудования для модернизации

Компонент	Модель (Производитель)	Ключевые параметры	Назначение в системе
Программируемый логический контроллер (ПЛК)	ПЛК110-220.30.Р-М (ОВЕН)	18DI, 12DO (реле), 200 МГц, 8 МБ RAM	Центральное управление, логика, связь с SCADA
Модуль аналогового ввода	MB110-224.8А (ОВЕН)	8 AI, 16 бит, поддержка 0(4)...20 мА	Сбор сигналов с датчиков расхода, уровня, влажности
Влагомер (датчик влажности)	FIZEPR-SW100.30.2 (КБ «Физэлектронприбор»)	0...100%, выход 4-20 мА/RS-485, IP67	Измерение влажности шлама для коррекции уставки расхода
Расходомер	QTLD/J (Q&T Instrument Co., Ltd)	DN..., $\pm 0,5\%$, 4-20 мА, RS485 MODBUS	Измерение фактического расхода шлама в печь

Выбранные и обоснованные в данном подразделе средства измерения — влагомер FIZEPR-SW100.30.2 и электромагнитный расходомер QTLD/J — в совокупности с ранее определёнными ПЛК ПЛК110-220.30.Р-М и модулем ввода MB110-224.8А образуют законченную систему автоматического управления.

Такое техническое решение:

- обеспечивает все необходимые измерения: позволяет контролировать ключевые параметры — влажность шлама, его текущий расход, уровень в буферной ёмкости и температуру в печи;
- интегрируется в существующую инфраструктуру: благодаря наличию унифицированных аналоговых выходов 4-20 мА и цифровых интерфейсов связи подобранное оборудование легко сопрягается с выбранным ПЛК и вписывается в концепцию модернизации;
- гарантирует надёжность и метрологическую состоятельность: применение оборудования, пригодного для работы с вязкими и абразивными средами (FIZEPR-SW100.30.2) и внесённого в Госреестр (QTLD/J), минимизирует риски отказов и простоев;
- создаёт фундамент для интеллектуального управления: прямой замер влажности и расхода позволяет реализовать алгоритм коррекции уставки подачи шлама, заложенный в техническом задании, и добиться существенного снижения расхода топлива на обжиге.

5 РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ПОДАЧИ ШЛАМА

Для подтверждения целесообразности предлагаемых технических решений выполним технико-экономический расчет для условий ООО «Горнозаводскцемент» на примере одной вращающейся печи (№6) производительностью 850 тыс. тонн клинкера в год (таблица 6)

Таблица 6 - Исходные данные

Параметр	Значение	Обозначение
Годовая производительность печи по клинкеру	850 000 т	$Q_{кл}$
Удельный расход электроэнергии на перекачку шлама (до модернизации)	5,2 кВт·ч/т шлама	$e_{эл.баз}$
Расход шлама на 1 т клинкера	1,62 т/т	$k_{шл}$
Стоимость электроэнергии	6,0 руб/(кВт·ч)	$Ц_э$
Удельный расход топлива (природный газ) на обжиг клинкера (до модернизации)	215 м³/т	$q_{т.баз}$
Стоимость природного газа	4 500 руб/1000 м³	$Ц_г$
Капитальные затраты на модернизацию (ПЧ, датчики, ПЛК, монтаж)	3 800 000 руб	K
Годовые эксплуатационные расходы на обслуживание (10% от кап. затрат)	380 000 руб/год	$C_{эксп}$

5.1 Расчет экономии электроэнергии

При внедрении частотного регулирования шламового насоса снижение потребляемой мощности, согласно зависимостям (2)–(4), принимаем равным 38 % (среднее значение для центробежных насосов при работе с переменной производительностью).

Годовой расход шлама:

$$M_{шл} = Q_{кл} \cdot k_{шл} = 850000 \times 1,62 = 1377000 \text{ т/год.}$$

Годовое потребление электроэнергии насосом до модернизации:

$$E_{баз} = M_{шл} \cdot e_{эл.баз} = 1377000 \times 5,2 = 7160400 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Экономия электроэнергии:

$$\Delta E = 0,38 \times E_{\text{баз}} = 0,38 \times 7160400 \approx 2720952 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Денежная экономия:

$$\Delta C_{\text{эл}} = \Delta E \times C_{\text{э}} = 2720952 \times 6,0 \approx 16325712 \text{ руб/год.}$$

5.2 Расчет экономии топлива

Снижение влажности шлама за счет экстремального управления подвижностью (вибрационное воздействие) или за счет стабилизации режима и возможности работы с более густым шламом принимаем равным 4 % (от начальной влажности 34 % до 30 %). Согласно технологическим нормативам, снижение влажности шлама на 1 % уменьшает расход топлива на 5 %.

Снижение расхода топлива составит:

$$\Delta q_{\text{т}} = q_{\text{т.баз}} \times (0,05 \times 4) = 215 \times 0,20 = 43 \text{ м}^3/\text{т клинкера.}$$

Годовая экономия газа:

$$\Delta V_{\text{г}} = \Delta q_{\text{т}} \times Q_{\text{кл}} = 43 \times 850000 = 36550000 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Денежная экономия:

$$\Delta C_{\text{г}} = \Delta V_{\text{г}} \times \frac{C_{\text{г}}}{1000} = 36550000 \times 4,5 = 164475000 \text{ руб/год.}$$

5.3 Суммарный годовой экономический эффект

Годовая экономия без учета эксплуатационных затрат:

$$\Delta C_{\text{год}} = \Delta C_{\text{эл}} + \Delta C_{\text{г}} = 16325712 + 164475000 = 180800712 \text{ руб/год.}$$

С учетом дополнительных эксплуатационных затрат:

$$\Delta C_{\text{год.нетто}} = \Delta C_{\text{год}} - C_{\text{эксп}} = 180800712 - 380000 = 180420712 \text{ руб/год.}$$

5.4 Срок окупаемости

Простой срок окупаемости (без дисконтирования):

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\Delta C_{\text{год.нетто}}} = \frac{3800000}{180420712} \approx 0,021 \text{ года} \approx 7,7 \text{ дня.}$$

Даже при многократном завышении капитальных затрат (например, включении стоимости дополнительного оборудования, проектных работ) срок

окупаемости не превысит 1–2 месяцев, что подтверждает высокую эффективность модернизации.

5.5 Оценка дополнительных качественных эффектов

Помимо прямого экономического эффекта, следует учитывать:

- Увеличение срока службы футеровки печи на 15–20 % за счет стабилизации теплового режима (экономия на ремонтах – ориентировочно 1,2 млн руб/год).
- Снижение аварийных простоев (по статистике аналогичных заводов – на 40...60 %).
- Уменьшение выбросов пыли и CO₂ за счет оптимизации горения.
- Возможность перехода на более дешевое альтернативное топливо при стабильном управлении расходом шлама.

6 ОХРАНА ТРУДА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧЕЙ ШЛАМА

Модернизация системы управления подачей шлама в обжиговую печь направлена на повышение эффективности и надежности технологического процесса. Однако внедрение любого нового оборудования, в особенности автоматизированных систем, электрических приводов и контрольно-измерительных приборов, требует тщательного анализа и обеспечения безопасности труда обслуживающего персонала.

В соответствии со ст. 212 Трудового кодекса РФ, работодатель обязан обеспечить безопасные условия труда, соответствующие государственным нормативным требованиям охраны труда. При проектировании и эксплуатации модернизированной системы управления подачей шлама необходимо руководствоваться следующими основными нормативно-правовыми актами:

- Федеральный закон от 28.12.2013 № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» [9];
- Правила устройства электроустановок (ПУЭ), издание 7, утвержденные приказом Минэнерго РФ от 08.07.2002 № 204 [7];
- Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП) [8];
- Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (ПОТЭУ) [8];
- ГОСТ 12.2.003-74 «ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности» [5];
- ГОСТ 12.3.002-75 «ССБТ. Процессы производственные. Общие требования безопасности» [6].

В данной главе рассматриваются требования безопасности, предъявляемые к модернизированной системе: общие требования охраны

труда, требования электробезопасности согласно ПУЭ и ПТЭЭП, требования безопасности при эксплуатации шламовых насосов, правила работы с КИПиА, меры пожарной безопасности и организационные мероприятия по обеспечению безопасной эксплуатации.

6.1 Общие требования охраны труда

Согласно типовым отраслевым нормам, опасными и вредными производственными факторами при производстве цемента являются:

- а) Физические факторы: движущиеся машины и механизмы; подвижные части производственного оборудования; повышенный уровень шума и вибрации; повышенная запыленность воздуха рабочей зоны; повышенная температура оборудования и окружающей среды; электрический ток.
- б) Химические факторы: цементная пыль (цементная пыль — основной поражающий фактор цементного производства, которая несет за собой ряд заболеваний легких в результате вдыхания пыли, а также может вызывать раздражение кожи и слизистых оболочек глаз); газообразные выбросы, образующиеся при обжиге клинкера (оксиды азота, серы, углерода), обладающие токсичным действием.
- в) Психофизиологические факторы: возможность поскальзывания, спотыкания и падения; необходимость подъема тяжестей и физическое перенапряжение; монотонность труда; необходимость принятия оперативных решений в условиях дефицита времени.

К работе по обслуживанию системы управления подачей шлама допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие:

- Медицинский осмотр (предварительный при приеме на работу и периодические) для подтверждения отсутствия противопоказаний к работе в условиях воздействия вредных и опасных факторов.
- Обучение безопасным методам и приемам выполнения работ (вводный и первичный инструктаж на рабочем месте, обучение по

охране труда, стажировка на рабочем месте, проверка теоретических знаний и практических навыков).

- Проверку знаний по электробезопасности с присвоением соответствующей группы допуска (для персонала, обслуживающего электрооборудование, не ниже II группы).
- Проверку знаний по пожарной безопасности.

Здоровые и безопасные условия труда обеспечиваются: соответствием производственного оборудования, технологических процессов и сырья требованиям стандартов безопасности труда; своевременным проведением профилактических и ремонтных работ; применением средств индивидуальной и коллективной защиты; осуществлением контроля за соблюдением требований безопасности.

6.2 Требования электробезопасности согласно ПУЭ и ПТЭЭП

Электробезопасность — один из важнейших аспектов при проектировании и эксплуатации модернизированной системы. В модернизированной системе управления подачей шлама присутствует следующее электрооборудование:

- Электродвигатель шламового насоса (напряжение 380 В, мощность до 200 кВт).
- Частотный преобразователь (напряжение 380 В).
- Программируемый логический контроллер ПЛК110-220.30.Р-М и модуль расширения MB110-224.8А (напряжение питания ~230 В или =24 В).
- Электромагнитный расходомер QTLD/J (напряжение питания 85...250 В АС или 20...36 В DC, потребляемая мощность <20 Вт).
- Влагомер FIZEPR-SW100.30.2 (питание от сети ~220 В через встроенный блок питания, потребляемая мощность не более 10 Вт).
- Датчики уровня, давления, температуры (питание 24 В DC).

- Электрифицированные задвижки с электроприводами (напряжение 380 В).
- Щиты управления и распределительные устройства.
- Силовые и контрольные кабельные линии.

При проектировании, монтаже и эксплуатации перечисленного электрооборудования должны соблюдаться требования ПУЭ (7-е издание) и ПТЭЭП.

6.2.1 Общие положения ПУЭ

Устройство электроустановок должно соответствовать требованиям правил устройства электроустановок [7], строительных норм и правил, государственных стандартов, правил безопасности труда и другой нормативно-технической документации. ПУЭ-7 включает в себя требования к прокладке кабелей, выбору аппаратов защиты, системам заземления, молниезащите и электробезопасности. Раздел 1 содержит главы: общая часть, электроснабжение и электрические сети, заземление, защитные меры электробезопасности, нормы приемо-сдаточных испытаний, изоляция электроустановок.

В действующих электроустановках требования ПУЭ рекомендуется применять, если модернизация направлена на обеспечение требований безопасности.

6.2.2 Классификация помещений по электробезопасности и взрывопожароопасности

При проектировании необходимо классифицировать помещения, в которых размещается оборудование модернизированной системы.

По опасности поражения электрическим током в соответствии с ПУЭ [7] помещения подразделяются на три категории:

- а) помещения с повышенной опасностью, характеризующиеся наличием одного из следующих условий: сырость (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%); токопроводящая пыль;

токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные); высокая температура (постоянно или периодически выше $+35^{\circ}\text{C}$); возможность одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования — с другой.

- б) особо опасные помещения, характеризующиеся наличием особой сырости (относительная влажность воздуха близка к 100%); химически активной или органической среды; одновременно двух или более условий повышенной опасности.
- в) помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют вышеперечисленные условия.

Большинство производственных помещений цементного завода (включая зону размещения шламового насоса и пульта оператора) относятся к помещениям с повышенной опасностью из-за наличия токопроводящей цементной пыли и высокой температуры.

Класс взрывоопасной зоны, в соответствии с которым выбирается электрооборудование, определяют технологи совместно с электриками проектной или эксплуатирующей организации. ПУЭ устанавливает следующие классы взрывоопасных зон:

- В-I — зоны, расположенные в помещениях, в которых при нормальной эксплуатации выделяются горючие газы или пары ЛВЖ.
- В-Ia — зоны, в которых при нормальной эксплуатации горючие газы или пары ЛВЖ не выделяются, а возможно их выделение только при авариях или неисправностях.
- В-II — зоны, расположенные в помещениях, в которых выделяются переходящие во взвешенное состояние горючие пыли или волокна.
- В-IIa — зоны, в которых горючие пыли не выделяются, а возможно их выделение только при авариях или неисправностях.

- В-Iг — пространства у наружных установок: технологических, содержащих горючие газы или ЛВЖ.

При выборе электрооборудования для работы во взрывоопасных зонах необходимо руководствоваться соответствующими таблицами ПУЭ (7.3.10 — 7.3.12). РУ до 1 кВ и выше с электрооборудованием общего назначения (без средств взрывозащиты) запрещается сооружать непосредственно во взрывоопасных зонах любого класса. К эксплуатации во взрывоопасных зонах допускается электрооборудование, которое изготовлено в соответствии с требованиями государственных стандартов на взрывозащищенное электрооборудование.

6.2.3 Система заземления и защитные меры

Заземление и защитные меры электробезопасности регламентируются главой 1.7 ПУЭ [7]. Согласно ПУЭ-7 [7], в электроустановках напряжением до 1 кВ должны быть выполнены следующие защитные меры:

- а) заземление металлических корпусов всего электрооборудования — шкафов управления, щитов, корпусов электродвигателей, частотного преобразователя, плк, расходомера, датчиков,
- б) зануление — в сетях с глухозаземленной нейтралью (система tn) корпуса электрооборудования должны быть соединены с заземленной нейтралью источника питания. в цементном производстве широко распространена система tn-c-s (нейтраль глухозаземлена, функции нулевого защитного и нулевого рабочего проводников совмещены в одном проводнике на участке от подстанции до ввода в здание, а далее разделены),
- в) устройство защитного отключения (узо) с током утечки не более 30 ма для защиты от поражения электрическим током при косвенном прикосновении в помещениях с повышенной опасностью. для цепей управления (питание 24 в dc) обязательно применение

разделительных трансформаторов или блоков питания с гальванической развязкой,

- г) выравнивание потенциалов — соединение всех доступных одновременному прикосновению открытых проводящих частей стационарного оборудования и посторонних проводящих частей (трубопроводов, металлоконструкций здания) между собой для снижения напряжения прикосновения и шага.

Сопротивление заземляющего устройства для электроустановок напряжением до 1 кВ должно быть не более 4 Ом. Металлические части трубопроводов шлама должны быть заземлены не менее чем в двух точках.

Частотный преобразователь должен быть заземлен в соответствии с применимыми стандартами безопасности. При монтаже преобразователя частоты должны использоваться крепежные винты с шайбами. Преобразователь должен быть установлен на поверхность из негорючего материала (например, металла), запрещается размещать вблизи преобразователя легковоспламеняющиеся вещества.

6.2.4 Требования к кабельным линиям и электропроводкам

Согласно ПУЭ [7], кабельные линии и электропроводки должны:

- прокладываться открыто по лоткам, коробам, в кабельных каналах и эстакадах, обеспечивающих свободный доступ для ремонта и обслуживания,
- иметь защиту от механических повреждений (в местах возможного воздействия) — применять бронированные кабели или прокладку в стальных трубах,
- иметь маркировку, соответствующую проектной документации.
- выполняться с использованием кабелей с медными жилами сечением не менее: для силовых цепей — 2,5 мм², для цепей управления и кппиа — 0,75 мм²,

- защищаться автоматическими выключателями от токов короткого замыкания и перегрузки,
- иметь раздельную прокладку силовых кабелей (создающих электромагнитные помехи) и кабелей кппа (чувствительных к помехам). расстояние между силовыми и контрольными кабелями должно быть не менее 200 мм, а при параллельной прокладке на больших расстояниях — не менее 500 мм.,
- экраны кабелей кппа должны быть заземлены с одной стороны (со стороны щита управления) для исключения образования замкнутых контуров, являющихся источником наводок.

Запрещается прокладка электропроводов с горючей изоляцией по сгораемым основаниям (плинтусам, дверным коробкам, перегородкам, полу и т.п.).

6.2.5 Требования безопасности при работе с контрольно-измерительными приборами и автоматикой (КИПиА)

Модернизированная система управления подачей шлама включает значительное количество КИПиА: датчики уровня, расхода, влажности, давления, температуры, а также контроллер, модули ввода/вывода и SCADA-систему.

Основные требования безопасности:

- надежность и резервирование: система автоматизации должна обеспечивать автоматическое поддержание рабочего состояния кппа при кратковременных колебаниях или исчезновении напряжения, а также автоматическую защиту оборудования при аварийном отклонении технологических параметров. для ответственных цепей (контроль уровня в контрольном баке, аварийная остановка насоса) должна предусматриваться установка дублирующих датчиков,
- защита от ложных срабатываний: входные цепи кппа должны быть защищены от электромагнитных помех (экранирование кабелей,

- применение фильтров, отдельная прокладка цепей) для исключения ложных срабатываний, способных привести к аварийной ситуации,
- аварийное отключение: система должна обеспечивать автоматическое и дистанционное отключение оборудования при возможных аварийных ситуациях. кнопки аварийного останова должны быть легкодоступны, окрашены в красный цвет и защищены от случайного нажатия (грибовидная форма, ограждающее кольцо),
 - защита от несанкционированного вмешательства: доступ к настройкам контроллера и scada-системы должен быть разграничен (пароли, уровни доступа). изменение уставок и параметров регулирования должно производиться только уполномоченным персоналом,
 - ручное дублирование: на период замены элементов системы контроля или управления предусматриваются меры и средства, обеспечивающие безопасное проведение процесса в ручном режиме. не допускается ручное деблокирование в системах автоматического управления технологическими процессами. для аварийного управления насосом должна быть предусмотрена схема шунтирования пч с прямым пуском двигателя от сети (на период ремонта пч), сопровождающаяся соответствующими блокировками,
 - периодическая поверка и калибровка: все средства измерений должны проходить периодическую поверку в аккредитованных организациях в установленные сроки. калибровка датчиков и настройка регуляторов должна выполняться квалифицированным персоналом службы КИП И А.

6.3 Меры пожарной безопасности

Цементное производство характеризуется повышенной пожарной опасностью из-за наличия горючих материалов (угольная пыль, мазут,

кабельная продукция с горючей изоляцией, смазочные масла), высоких температур и значительного количества электрооборудования.

Основные меры пожарной безопасности при эксплуатации модернизированной системы:

- система оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ) 3 типа: в зданиях и сооружениях цементного завода должна быть предусмотрена система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре, соответствующая требованиям Федерального закона № 123-ФЗ [10] «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»,
- обеспечение пожарного риска: максимальная расчетная величина пожарного риска на цементных заводах не должна превышать допустимых значений, установленных законодательством РФ (для производственных объектов — 10^{-6} в год). Проведение регулярных расчетов пожарного риска и их корректировка после проведения модернизации являются обязательными,
- первичные средства пожаротушения: в помещениях, где размещено электрооборудование (щитовые, насосные станции, пультовые), должны быть установлены углекислотные (ОУ) или порошковые (ОП) огнетушители из расчета не менее 2 на 100 м² площади. Использование водяных и пенных огнетушителей в электроустановках под напряжением запрещено,
- предотвращение распространения пожара: кабельные проходки через стены и перекрытия должны быть заделаны негорючими материалами (огнеупорной монтажной пеной, кабельным герметиком). Открытая прокладка кабелей по сгораемым конструкциям запрещается,
- управление при пожаре: оперативный персонал должен быть обучен действиям при пожаре: отключение электрооборудования (обесточивание насоса, задвижек, щитов управления), вызов

- пожарной охраны, применение первичных средств пожаротушения, организация эвакуации,
- регулярные проверки: не реже одного раза в квартал должна проверяться работоспособность систем автоматической пожарной сигнализации, наличие и состояние первичных средств пожаротушения, исправность отключающих устройств (рубильников) для снятия напряжения при пожаре.

6.4 Организационные мероприятия по обеспечению безопасной эксплуатации

Для обеспечения безопасной эксплуатации модернизированной системы управления подачей шлама необходимо разработать и внедрить следующие организационные мероприятия:

- Разработка эксплуатационной документации:
 - а) Инструкция по эксплуатации системы управления подачей шлама.
 - б) Инструкция по охране труда для оператора и ремонтного персонала.
 - в) Инструкция по пожарной безопасности.
 - г) Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту оборудования (насоса, ПЧ, КИПиА).
 - д) План ликвидации аварий.
- Обучение и инструктаж персонала:
 - а) Персонал должен пройти вводный и первичный инструктаж на рабочем месте по охране труда и пожарной безопасности.
 - б) Операторы и ремонтный персонал должны пройти обучение по электробезопасности с присвоением соответствующей группы (не ниже II).
 - в) Персонал должен быть обучен безопасным приемам работы с частотным преобразователем, КИПиА и SCADA-системой.

г) Не реже 1 раза в 3 года должна проводиться периодическая проверка знаний по электробезопасности (для персонала, обслуживающего электроустановки до и выше 1000 В).

– Назначение ответственных лиц:

а) Приказом по предприятию назначаются лица, ответственные за безопасную эксплуатацию электроустановок (ПТЭЭП п. 1.2.4).

б) Ответственный за исправное состояние и безопасную эксплуатацию грузоподъемных механизмов (при их наличии в составе оборудования).

в) Ответственный за пожарную безопасность.

– Медицинские осмотры:

а) Предварительный медицинский осмотр при приеме на работу.

б) Периодические медицинские осмотры (1 раз в 2 года) для контроля состояния здоровья в условиях воздействия цементной пыли и вибрации.

– Контроль соблюдения требований безопасности:

а) Регулярные проверки состояния защитных ограждений, заземления, исправности блокировок и аварийной сигнализации.

б) Ведение журналов осмотра и проверки оборудования.

в) Расследование и анализ причин аварий и инцидентов.

При эксплуатации электроустановок до 1000 В персонал должен использовать средства индивидуальной защиты: диэлектрические перчатки, диэлектрический коврик, указатель напряжения, инструмент с изолированными ручками. Лица, эксплуатирующие электроустановки, обязаны строго соблюдать правила пожарной безопасности, знать места расположения первичных средств пожаротушения, а также отключающих устройств (рубильников) для снятия напряжения.

В результате анализа требований охраны труда и техники безопасности при эксплуатации модернизированной системы управления подачей шлама в обжиговую печь можно сделать следующие выводы:

- На цементном производстве присутствует широкий спектр вредных и опасных производственных факторов: движущиеся машины и механизмы, цементная пыль, высокий уровень шума и вибрации, электрический ток, высокие температуры. Основным поражающим фактором является цементная пыль, вызывающая заболевания органов дыхания.
- Модернизированная система включает значительное количество электрооборудования: электродвигатель насоса, частотный преобразователь, ПЛК, датчики, расходомер, влагомер, электрозадвижки, КИПиА. Все это требует строгого соблюдения требований ПУЭ и ПТЭЭП.
- Основные требования электробезопасности включают: надежное заземление всего оборудования, применение УЗО (ток утечки ≤ 30 мА), установку преобразователя частоты на негорючее основание, отдельную прокладку силовых и контрольных кабелей, защиту кабельных линий от механических повреждений и перегрузок.
- При эксплуатации шламового насоса необходимо обеспечить: защитное ограждение вращающихся частей, контроль герметичности уплотнений, защиту от «сухого хода» (по датчику нижнего уровня), контроль вибрации и температуры подшипников, а также плавные пуски и остановки через частотный преобразователь.
- Система КИПиА должна быть надежной, с защитой от электромагнитных помех, резервированием ответственных датчиков, возможностью ручного дублирования на период ремонта и разграничением доступа к настройкам.
- Пожарная безопасность обеспечивается системой оповещения и управления эвакуацией, первичными средствами пожаротушения (углекислотные или порошковые огнетушители), заделкой кабельных проходок негорючими материалами и регулярными проверками работоспособности систем.

- Организационные мероприятия включают разработку инструкций, обучение персонала, назначение ответственных лиц, проведение медицинских осмотров и контроль соблюдения требований безопасности.
- При эксплуатации электроустановок до 1000 В обязательно применение средств индивидуальной защиты (диэлектрические перчатки, коврик, указатель напряжения, инструмент с изолированными ручками) и знание порядка отключения оборудования при пожаре.

Таким образом, при условии соблюдения всех изложенных требований по охране труда, электробезопасности, пожарной безопасности и организации безопасной эксплуатации, модернизированная система управления подачей шлама может эксплуатироваться безопасно, обеспечивая защиту жизни и здоровья персонала, а также надежность и эффективность технологического процесса обжига клинкера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был проведен анализ системы управления подачей шлама во вращающиеся печи №6 и №7 цеха обжига ООО «Горнозаводскцемент». Выявлены основные недостатки существующей схемы: дроссельное регулирование насоса, дискретность дозирования через контрольный бак, отсутствие адаптации к влажности и вязкости шлама, что приводит к повышенному расходу электроэнергии (на перекачку), топлива (на испарение избыточной влаги) и снижению стабильности клинкерообразования.

На основе анализа современных подходов (частотное регулирование, экстремальное управление подвижностью шлама, нечеткая логика, комплексные АСУ ТП) предложена модернизация, сохраняющая полезные элементы двухбаковой системы (бак постоянного уровня, контрольный бак) и дополняющая их частотно-регулируемыми приводами, датчиками влажности/расхода и интеллектуальным контроллером с нечетким регулятором.

Технико-экономический расчет показал, что капитальные затраты в размере 3,8 млн рублей окупаются менее чем за один месяц за счет экономии электроэнергии (более 16 млн руб/год) и природного газа (свыше 164 млн руб/год). Дополнительными преимуществами являются повышение качества клинкера, увеличение межремонтного ресурса печи и улучшение экологических показателей.

Разработанные технические решения могут быть рекомендованы к внедрению на предприятии «Горнозаводскцемент», а также на других цементных заводах, работающих по мокрому способу производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Патент RU 2506510 С2. Способ автоматизированного управления процессом подачи шлама в цементную печь / С.Н. Тихонов, А.Г. Павлов, Д.В. Зуев. – Опубл. 27.10.2011. – Бюл. № 22.
2. Патент SU 827936 А1. Шламовый питатель вращающейся печи / Г.Ф. Головин, А.И. Калашников, А.Г. Парусов. – 1981.
3. Патент SU 159758. Способ непрерывного автоматического контроля и регулирования процесса загрузки пульпой / В.И. Кравченко, А.А. Шапошников. – 1963.
4. ГОСТ 26449.4-85. Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Методы химического анализа накипи и шламов. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 23 с.
5. ГОСТ 12.2.003-74. ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 10 с.
6. ГОСТ 12.3.002-75. ССБТ. Процессы производственные. Общие требования безопасности. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 8 с.
7. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Издание 7. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2002. – 480 с.
8. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП). – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2003. – 160 с.
9. Федеральный закон от 28.12.2013 № 426-ФЗ. О специальной оценке условий труда. – Собрание законодательства РФ, 2013, № 52, ст. 6991.
10. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности. – Собрание законодательства РФ, 2008, № 30 (ч. 1), ст. 3579.
11. Андрущак С.В., Беседин П.В., Алексеев С.В. Разработка экстремальной системы управления подачей шлама в цементную печь // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 6. – С. 122-129.

12. Андрущак С.В., Козлов В.К. Методы нечеткой логики в задачах управления дозированием шлама // Цемент и его применение. – 2014. – № 6. – С. 94-97.
13. Лысенко В.М., Лысенко В.В. Энергосбережение в цементной промышленности // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – № 4. – С. 13-18.
14. Семенов А.В., Петров И.В. Современные методы автоматизации процесса обжига цементного клинкера // Автоматизация в промышленности. – 2017. – № 5. – С. 24-29.
15. Кузнецов Ю.С., Морозов В.П. Влияние реологических свойств шлама на процесс обжига цементного клинкера // Известия вузов. Строительство. – 2015. – № 9. – С. 45-52.
16. Харитонов В.П., Сидоренко В.Ф. Частотно-регулируемый электропривод в цементной промышленности // Электротехника. – 2016. – № 8. – С. 11-16.
17. Хомяков П.В. Частотно-регулируемый электропривод шламового насоса на цементном производстве: дипломный проект / Томский политехнический университет. – Томск, 2018. – 86 с.
18. Иванов А.В. Автоматизация процесса подачи шлама во вращающуюся печь: дис. ... канд. техн. наук. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. – 145 с.
19. Частотный преобразователь DANFOSS VLT AutomationDrive FC 302. Техническая документация. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://drives.ru>.
20. Анализатор влажности FIZEPR-SW100. Техническая документация / КБ «Физэлектронприбор». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fizepr.ru>.
21. Электромагнитный расходомер QTLD/J. Техническая документация / Q&T Instrument Co., Ltd. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://qtmeter.com>.

22. Программируемый логический контроллер ПЛК110-220.30.P-M. Техническая документация / ОВЕН. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://owen.ru>
23. АСУ ТП «Шлам» на ОАО «Вольскцемент» / Проекты компании «ПромАвтоматика». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://promauto.kz>.
24. Модернизация системы управления шламовым насосом за счет внедрения преобразователей частоты «Данфосс» / Проекты компании «ТЭТ-РС». – 9 сентября 2019 г. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://drives.ru>.
25. Trace Mode 6. SCADA-система для цементной промышленности / AdAstra Research Group. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.adastra.ru>.
26. Ключев А.С., Глазов Б.В., Дубровский А.Х. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: справочное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2014. – 640 с.
27. Бельдюгин С.В. Автоматизация технологических процессов цементного производства: учебное пособие. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 168 с.
28. Козлов В.К., Федосеев В.Б. Технология цемента: учебник. – М.: Стройиздат, 2015. – 320 с.