

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный  
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизации и управления

Дүзбай Нұрдәулет Булатұлы

Исследование автоматизированной системы управления метода  
гравитационного обогащения хромовой руды

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

7М07101 – Автоматизация и роботизация

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

УДК 681.518.5

На правах рукописи

Дүзбай Нұрдәулет Булатұлы

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

На соискание академической степени магистра

Название диссертации

Исследование автоматизированной системы  
управления метода гравитационного обогащения  
хромовой руды

Направление подготовки

7М07101 – Автоматизация и роботизация

Научный руководитель  
канд. техн. наук, доц.,  
ассоц. проф.

 Муханов Б.К.

(подпись)

«13» июня 2025 г.

Рецензент

Доктор PhD, доцент

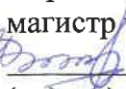
 Оракбаев Е.Ж.

(подпись)

«17» июня 2025 г.

Нормоконтроль

магистр техн. наук

 Манатов Қ. А.

(подпись)

«19» июня 2025 г.



**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой АиУ  
канд. техн. наук

 Сарсенбаев Н.С.

(подпись)

«19» июня 2025 г.

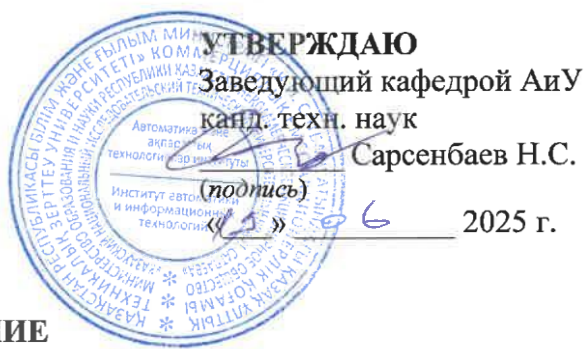
Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий  
Кафедра Автоматизации и управления

7M07101 – Автоматизация и роботизация



**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение магистерской диссертации**

Магистранту Дүзбай Н.Б.

Тема Разработка алгоритмов настройки цифровых регуляторов для автоматизированных систем

Утверждена приказом Б. Жаутикова № 548-П/Ө от «04» декабря 2023 г.

Срок сдачи законченной работы «19» июня 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: исходные данные.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

- а) литературный обзор автоматизированных систем гравитационного обогащения хромовых руд;
- б) анализ винтового сепарирования;
- в) разработка математических моделей винтового сепаратора и концентрационного стола;
- г) исследование и проектирование труб промывочной воды;
- д) исследования систем обогащения.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

*технологическая схема гравитационного обогащения хромовой руды.*

Рекомендуемая основная литература:

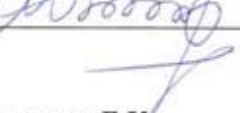
- 1 Брылин А. И. Гравитационные методы обогащения руд. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 256 с.
- 2 Мищенко Л. Н. Основы обогащения руд: гравитационные, магнитные и флотационные методы. – М.: ИКЦ Академкнига, 2014. – 342 с.
- 3 Пивоваров А. В. Системы автоматического управления технологическими процессами. – М.: Академия, 2019. – 336 с.

**ГРАФИК**  
подготовки магистерской диссертации

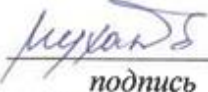
| Наименования разделов,<br>перечень<br>разрабатываемых вопросов                                | Сроки представления научному<br>руководителю | Примечание |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------|
| Аналитический раздел<br>Обзор устройств винтового<br>сепаратора и<br>концентрационного стола  | 10 марта 2024 г.                             |            |
| Технологический раздел<br>Анализ гравитационных<br>методов обогащения                         | 18 октября 2024 г.                           |            |
| Расчетный раздел<br>Разработка математических<br>моделей гравитационного<br>метода            | 6 февраля 2025 г.                            |            |
| Расчетный раздел<br>Исследования моделей<br>винтового сепаратора и<br>концентрационного стола | 22 апреля 2025 г.                            |            |

**Подписи**

консультантов и нормоконтролёра на законченную магистерскую диссертацию с  
указанием относящихся к ним разделов диссертации

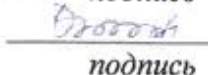
| Наименования<br>разделов  | Консультанты, И.О.Ф.<br>(уч. степень, звание)          | Дата<br>подписания | Подпись                                                                               |
|---------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Аналитический<br>раздел   | Б.К.Муханов<br>канд. техн. наук, доц.,<br>ассоц. проф. | 02.06.25           |  |
| Технологический<br>раздел | Б.К.Муханов<br>канд. техн. наук, доц.,<br>ассоц. проф. | 02.06.25           |  |
| Расчетный раздел          | Б.К.Муханов<br>канд. техн. наук, доц.,<br>ассоц. проф. | 02.06.25           |  |
| Нормоконтролер            | Қ. А. Манатов<br>магистр техн. наук                    | 19.06.25           |  |

Научный руководитель

  
подпись

Муханов Б.К.

Задание принял к исполнению обучающийся

  
подпись

Дүзбай Н.Б.

Дата

«20» 11 2023 г.

## АНДАТПА

Бұл жұмыста хром кенін гравитациялық әдіспен байыту процесін басқарудың автоматтандырылған жүйесін әзірлеу және зерттеу қарастырылады. Тақырыптың өзектілігі құнды фракцияның шығындары мен шығындарын азайта отырып, технологиялық процестің тиімділігі мен тұрақтылығын арттыру қажеттілігімен байланысты. Зерттеу гравитациялық байыту процесінің негізгі параметрлерін талдайды, кен мен жабдықтың физикалық сипаттамаларын (бұрандалы сепаратор және концентрациялық үстел) ескере отырып математикалық модель әзірленеді және SCADA жүйелері мен заманауи өлшеу құралдарына негізделген автоматтандыру тәсілдерін ұсынады. Бастапқы шикізат құрамының өзгеруіне бейімделуді қамтамасыз ететін басқару стратегиясын таңдауға ерекше назар аударылады.

## АННОТАЦИЯ

В данной работе рассматривается разработка и исследование автоматизированной системы управления процессом обогащения хромовой руды гравитационным методом. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения эффективности и стабильности технологического процесса при одновременном снижении затрат и потерь ценной фракции. В исследовании анализируются ключевые параметры процесса гравитационного обогащения, разрабатывается математическая модель с учётом физических характеристик руды и оборудования (винтового сепаратора и концентрационного стола), а также предлагаются подходы к автоматизации на основе SCADA-систем и современных средств измерения. Особое внимание уделяется выбору стратегии управления, обеспечивающей адаптацию к изменению состава исходного сырья.

## ANNOTATION

This paper discusses the development and research of an automated control system for the process of chromium ore enrichment using the gravity method. The relevance of the topic is due to the need to increase the efficiency and stability of the technological process while reducing costs and losses of valuable fractions. The study analyzes the key parameters of the gravity enrichment process, develops a mathematical model taking into account the physical characteristics of ore and equipment (screw separator and concentration table), and suggests automation approaches based on SCADA systems and modern measuring instruments. Particular attention is paid to the choice of a management strategy that ensures adaptation to changes in the composition of the feedstock.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| Введение                                        |    |
| 1 Обогащение хромовых руд                       |    |
| 1.1 Виды обогащения хромовой руды               | 8  |
| 1.2 Грохот                                      | 14 |
| 2 Физико–химический состав хвостов              |    |
| 2.1 Характеристики хвостов                      | 16 |
| 2.2 Фазовый и вещественный состав               | 16 |
| 3 Методы исследования обогащения                |    |
| 3.1 Виды обогащения                             | 19 |
| 3.2 Получение концентрата из хвостов обогащения | 22 |
| 3.3 Получение хромового концентрата             | 25 |
| 4 Выбор контроллера                             | 29 |
| 4.1 Контроллер s7–1500                          | 31 |
| 4.2 Состав аппаратуры                           | 37 |
| 4.3 Центральные процессоры s7–1500              | 41 |
| 4.4 Сигнальные модули                           | 43 |
| 4.5 Коммуникационные модули                     | 46 |
| 4.6 Ведущий модуль profibus dp                  |    |
| 5 Построение математических моделей             | 48 |
| 5.1 Расчеты моделей датчиков                    | 49 |
| 5.2 Анализ системы                              | 53 |
| 6 Написание логики на simatic step 7            |    |
| Заключение                                      | 62 |
| Список использованной литературы                | 63 |

## ВВЕДЕНИЕ

Хромовая руда является стратегически важным сырьём, широко применяемым в металлургии, химической промышленности и производстве огнеупоров. Основной компонент руды — оксид хрома ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) — используется в производстве феррохрома и нержавеющей стали. В условиях роста мирового спроса на хромосодержащую продукцию повышаются требования к эффективности процессов добычи и переработки руды, в том числе и к системам её обогащения. В этой связи особую значимость приобретает совершенствование технологий обогащения, а также внедрение автоматизированных систем управления, способных обеспечивать устойчивость и оптимальность технологического процесса в условиях переменных характеристик исходного сырья.

Гравитационные методы обогащения, в силу своей экологичности, относительной простоты и энергетической эффективности, остаются актуальными для обогащения хромовых руд, особенно при переработке крупно- и среднезернистых материалов. Наиболее распространённые устройства, применяемые при этом — винтовые сепараторы и концентрационные столы — обеспечивают разделение минеральных частиц по плотности, позволяя эффективно извлекать тяжёлую фракцию с высоким содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Однако эффективность этих процессов во многом зависит от стабильности подачи, точности регулирования параметров (угла наклона, расхода воды, кратности промывки и др.) и от характера исходной руды, что делает человеческий фактор уязвимым звеном.

Автоматизация управления процессами гравитационного обогащения позволяет устранить влияние субъективных факторов, повысить воспроизводимость результатов, адаптироваться к нестабильности качества руды и существенно повысить общий технологический выход. Внедрение средств измерения, цифровой обработки сигналов, SCADA-систем, а также применение математического моделирования и симуляции открывают новые возможности для повышения эффективности гравитационного обогащения хромовой руды.

Научный интерес представляет разработка и исследование автоматизированной системы, обеспечивающей управление процессом обогащения на основе мониторинга параметров технологического потока, с возможностью моделирования и оптимизации работы оборудования. Особую актуальность приобретает интеграция физических моделей в программные средства управления, что позволяет не только регулировать процессы в реальном времени, но и прогнозировать поведение системы при изменении входных условий.

# 1 ОБОГАЩЕНИЕ ХРОМОВЫХ РУД

## 1.1 Виды обогащения хромовой руды

На фоне стремительного развития технологий в различных отраслях промышленности возрастает потребность предприятий в новых типах сырья, применяемого для изготовления конечной продукции. При этом ключевыми факторами становятся доступность сырьевых ресурсов, экологическая безопасность, безотходность производства, а также снижение себестоимости выпускаемой продукции.

В настоящее время наблюдается рост интереса к разработке методов переработки бедных хромовых руд, а также к комплексному извлечению ценных компонентов из хвостов обогащения и горнопромышленных отвалов.

Одним из лидеров в производстве феррохрома в последние годы стал Китай, где активно внедряется технология получения феррохрома в электродуговых печах постоянного тока (DC-furnace). В отличие от традиционной технологии на переменном токе (AC-furnace), она позволяет эффективно использовать мелкодисперсные хромитовые концентраты, не требующие предварительной агломерации [3]. Крупнейшие производители хромитового сырья также ориентируются на увеличение выпуска мелких концентратов. Например, на рудниках ЮАР из отходов извлечения платиноидов пласта UG-2 получают тонкие хромовые концентраты. В Турции, одной из ведущих стран по добыче хромитов, разведанные запасы составляют 26,6 млн тонн при среднем содержании 20%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , а дополнительно около 400 млн тонн более бедных руд рассматриваются в качестве перспективных ресурсов.

В США реализуется проект «Минеральные пески Орегона» (Oregon Mineral Sands), направленный на промышленную разработку пляжевых песков на побережье Тихого океана. Основным ценным компонентом — хромшпинелид, несмотря на его невысокое содержание (до 10%). Общие запасы и ресурсы по месторождениям проекта оцениваются в 11,23 млн тонн при среднем содержании хромита около 8,1% (менее 5%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).

Хромовые руды (хромиты) представляют собой природные минеральные образования, в которых хром содержится в химических формах и концентрациях, допускающих их промышленную переработку с технической и экономической эффективностью. Из всех минералов, содержащих хром, только хромшпинелиды имеют промышленное значение и служат основным сырьём для получения хрома.

Минеральный состав хромовых руд включает, помимо хромшпинелидов, также силикаты, такие как серпентин, хлорит, а в отдельных случаях — оливин, пироксен, плагиоклаз, уваровит, хромактинолит, а также тальк, брусит, карбонаты, сульфиды и другие минералы.

В зависимости от текстурных особенностей выделяют сплошные и вкрапленные хромовые руды. Среди вкрапленных руд различают:

- густовкрапленные — с содержанием хромшпинелидов 50–80%,
- вкрапленные — 30–50%,
- редковкрапленные — 10–30%.

Цвет хромита варьируется от смоляно-чёрного до коричневатого-чёрного, а в тонких шлифах — от прозрачного до непрозрачного. Образцы с повышенным содержанием хрома характеризуются красновато-коричневым оттенком, тогда как при высоком содержании алюминия они приобретают кофейный цвет.

Хромовые руды и концентраты классифицируются на три основные категории: металлургические, огнеупорные и химические. Металлургические хромиты должны содержать не менее 48%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  при соотношении  $\text{Cr/Fe}$  не ниже 3:1. Наиболее предпочтительна твердая кусковая руда, однако в отдельных случаях в металлургии допустимо использование мягкой руды или хромитового концентрата.

Большинство хромитовых руд относятся к высококачественным, пригодным для прямого использования без предварительного обогащения. В промышленной практике обогащение применяется относительно редко, поскольку, несмотря на рост содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , оно, как правило, не улучшает соотношение  $\text{Cr/Fe}$ .

Хромовые руды обнаружены в 36 странах, а их общие ресурсы оцениваются в 15,5 млрд тонн. Основные месторождения сосредоточены в Казахстане, Индии и Южно-Африканской Республике. Подтвержденные запасы разведаны в 29 странах и составляют 3,9 млрд тонн. В общей сложности в мире известно около 300 месторождений хромитов. На стратиформные типы приходится около 87,5% подтвержденных запасов, большая часть которых залегает на значительных глубинах. Запасы, предназначенные для подземной разработки, выявлены в ЮАР, Зимбабве, Турции, России и Казахстане; для открытых горных работ — в Финляндии, Бразилии, Индии, Ираке, Пакистане, на Филиппинах, в США и других странах.

По масштабу месторождения классифицируются следующим образом:

- уникальные — сотни миллионов тонн,
- крупные — десятки миллионов тонн,
- мелкие — единицы миллионов тонн.

Порядка 90% мировой добычи товарной хромовой руды обеспечивают три страны: ЮАР (46%), Казахстан (16%) и Индия (16%). Дополнительно значительные объемы добываются в Турции, Зимбабве и Финляндии. К числу крупнейших горно-обогатительных предприятий (производительностью до 1 млн тонн и более) относятся: Донской ГОК (Казахстан), рудный комплекс Кампо-Формозу в Бразилии (штат Баия), ГОК Кеми в Финляндии, а также шахты ЮАР — Винтервельд, Крундал и Вондеркоп, расположенные в Западном хромитовом поясе вблизи города Рюстенбург.

Обогащение хромовых руд представляет собой технологический процесс получения хромового концентрата из природных руд, содержащих соединения хрома — такие как хромит, магнетитохромит, феррохромит и др. Основной целью обогащения является повышение содержания хрома в продукте за счёт удаления примесей, включая силикаты, железистые соединения и прочие порообразующие минералы. Полученные концентраты используются при производстве хромосодержащих сплавов, нержавеющей стали и другой металлопродукции.

Методика обогащения определяется минеральным составом исходной руды, её физико-химическими свойствами и требованиями к качеству конечного продукта. Наиболее распространённые технологии включают:

Флотацию, применяемую преимущественно при наличии сульфидов или других минералов, способных к избирательному всплыванию с использованием реагентов-пенообразователей. В ряде случаев флотация позволяет эффективно извлекать хромит из руды.

Гравитационные методы, основанные на различии плотностей минеральных компонентов. Для этих целей применяются спиральные сепараторы, шлюзы, вибрационные столы, центрифуги и другие установки. Эти методы особенно эффективны при переработке хромосодержащих руд с высокой плотностью полезных компонентов (например, оксидов и гидроксидов хрома).

– магнитное обогащение, целесообразное при наличии в руде магнетита и других ферромагнитных минералов. Магнитные сепараторы позволяют отделить магнитные включения, увеличивая относительное содержание хрома.

Особое внимание в данной работе уделяется гравитационным методам мокрого обогащения, которые применяются при наличии плотностного контраста между полезным компонентом и пустой породой. Эти процессы делятся на несколько групп:

– обогащение в неподвижной жидкой среде или в горизонтально движущемся растворе.

– использование сред с промежуточной плотностью, включающее технологии тяжёлых суспензий, магнитогидродинамическую и магнитогидростатическую сепарацию.

– обогащение в движущейся тяжёлой среде, совершающей круговое или винтовое движение (например, в центробежных сепараторах).

– сепарация в потоке, текущем по наклонной плоскости, реализуемая с помощью желобов, шлюзов и конусных концентраторов.

– обогащение в нисходящем потоке по винтовой поверхности, осуществляемое в винтовых сепараторах или винтовых шлюзах.

В частности, винтовые сепараторы обеспечивают эффективное разделение рудных частиц по плотности: тяжёлые (в том числе хромит) смещаются к периферии, в то время как лёгкие — к внутренней части спирали.

Аналогичный принцип используется в центрифугах, где под действием центробежной силы происходит расслоение материала по плотности.

Комплексное использование перечисленных методов позволяет достичь высокой эффективности переработки хромовых руд при соблюдении требований к качеству конечного концентрата.

В настоящее время проводятся исследования, направленные на разработку технологий комплексной переработки хромового сырья. Одним из примеров таких подходов является технология предварительной сульфатизации. В этом методе измельчённое сырьё смешивают с концентрированной серной кислотой, после чего смесь подвергают обжигу с добавлением 6,0–10,0 мас. % углерода при температуре 1023–1073 К в течение трёх часов. Полученный огарок выщелачивают водой ( $T:Ж=1:2,5$ ), фильтруют суспензию и выпаривают фильтрат для кристаллизации семиводного сульфата магния. Осадок после фильтрации разделяют с помощью гидроциклона на тонкую и крупную фракции: первая содержит оксиды железа, никеля и алюминия, вторая — хромпикотит и кремнезем. Крупную фракцию далее выщелачивают раствором едкого натра, получая раствор кремнезема и осадок, из которого получают хромитовый концентрат. Этот метод позволяет полностью выделить кремнезем и извлечь полезные компоненты без образования отходов, однако он не подходит для извлечения редкоземельных элементов.

Метод включает измельчение хромсодержащего сырья, приготовление водной суспензии и её разделение гравитационными методами после предварительного выщелачивания в серной кислоте. Такой подход позволяет повысить выход хромитового концентрата и степень извлечения  $Cr_2O_3$ , а также получить товарный магниевый продукт. Однако недостатками являются низкая селективность и трудности при гравитационном разделении в кислой среде.

В работе описывается обработка шлама хроматного производства в автоклаве при 383–433 К, начальной концентрации серной кислоты 190–200 г/дм<sup>3</sup> и давлении 0,15–0,7 МПа. Процесс длится 2–3 часа с интенсивным перемешиванием. Дополнительно проводится обработка карбонатом аммония (10–20 % от массы шлама). Недостатками являются высокая стоимость оборудования (коррозионностойкие автоклавы) и низкая селективность.

Способ используется для получения высокочистого диоксида кремния при комплексной переработке магний-хромсодержащего сырья. Он включает кислотное разложение, нейтрализацию и осаждение металлов в виде гидроксидов, обжиг нерастворимого остатка и его растворение в едком натре. Недостатки метода — технологическая сложность и потери кислот при нейтрализации.

В методе при выщелачивании серпентинита соляной кислотой получают хлормagneзевый раствор и диоксид кремния. Далее раствор очищается от примесей, из него синтезируют карналлит. Параллельно получают никелевый концентрат путём осаждения из раствора хлорида никеля.

Способ включает кислотное разложение серпентинита, кристаллизацию, промывку и осаждение магнийсодержащих соединений с последующей термообработкой. Для осаждения используется раствор каустической соды, а осадок подвергается обработке паром.

В предлагается декарбонизирующий обжиг магнийсодержащих материалов при 993–1053 К в восстановительной атмосфере, выщелачивание кислотой, стадийная нейтрализация с осаждением примесей и последующее осаждение магния при рН 12 в виде карбоната или гидроксида. В качестве сырья используют хвосты флотации талька, обогащённые гравитационно.

Изобретение предлагает получать чистую окись магния (периклаз) из серпентинита путём кислотного разложения и карбонизации, с последующим термическим разложением карбоната магния. Процесс проводят при 363–373 К.

В предложена двухстадийная кислотная обработка магнийсодержащих материалов: на первой стадии — фильтратом предыдущей выщелачивающей пульпы, на второй — раствором серной кислоты с концентрацией 350–600 г/л. Гидролитическая очистка проводится с продувкой воздухом, термическое разложение — при 1373–1773 К.

В описан метод получения железоксидных пигментов путём выщелачивания серпентиновой смеси кислотами, с дальнейшей нейтрализацией и термообработкой осадка. Этот метод позволяет утилизировать отходы хромитового и периклазового производств.

Таким образом, анализ существующих методов переработки хромитсодержащего сырья показывает разнообразие технологий, направленных на извлечение как основного, так и сопутствующих ценных компонентов. Однако большинство методов страдают от недостатков, таких как высокая энергоёмкость, значительный расход реагентов и сложность операций.

Отличительной особенностью предлагаемой технологии является использование гравитационного обогащения с предварительной химической активацией хвостов и применение регенерируемых кислотных реагентов в гидрометаллургической переработке.

В XXI веке в условиях ускоряющегося научно-технического прогресса наблюдается стабильное увеличение объемов производства и потребления редкоземельных элементов. Многие исследователи называют эти металлы «золотом XXI века». Лантаноиды, а также скандий и иттрий находят широкое применение в космической и радиоэлектронной технике, приборостроении, атомной энергетике, машиностроении, производстве легированных сталей, химической промышленности и металлургии.

По экспертным оценкам, наиболее востребованными на рынке РЗЭ являются оксиды неодима и диспрозия — в связи с их ключевым значением в производстве магнитов. Сегодня около трети общего объема потребления РЗЭ в мире приходится на производство катализаторов, включая промышленные катализаторы и автомобильные нейтрализаторы выхлопных газов.

Церий, лантан и празеодим применяются в производстве специальных видов стекол, пропускающих инфракрасное и поглощающих ультрафиолетовое излучение. РЗЭ также используются в лазерных и оптоэлектронных устройствах. Диспрозий незаменим для гибридных автомобильных двигателей, а самарий и неодим служат основой для мощных постоянных магнитов. Современные технологии — от мобильных телефонов и жестких дисков до мониторов — немыслимы без редкоземельных компонентов.

Высокие концентрации РЗЭ, редких металлов и золота характерны для урановых месторождений, преимущественно содержащих легкие лантаноиды, такие как лантан и церий. Максимальные уровни тяжелых лантаноидов, в частности иттрия и лютеция, зафиксированы в месторождениях Заозерное и Тастыкольское Коксенгирского рудного узла. В пределах Грачевского узла выявлены значительные содержания самария, лютеция, скандия, иттрия и европия.

Высоким содержанием РЗЭ также отличаются месторождения Балхашского узла (европий, иттрий, лютеций) и Шоккарагайская группа рудопроявлений. В оловорудных зонах месторождений Донецкое и Сырымбет зафиксированы лантан, церий, самарий, европий, иттрий, лютеций и скандий. В колумбите Лосевского месторождения установлены промышленно значимые концентрации самария, иттрия и скандия.

Согласно данным Института геологических наук, помимо урановых руд, РЗЭ содержатся в следующих типах месторождений: титано-редкоземельное (Кундыбай), редкометаллические (Верхнее Кайракты, Жанет, Южный Жаур, Коктенколь, Верхнее Эспе, Йосор, Карасу), фосфоритовые (массив Каратау), а также карбонатитовые (Дубровский, Красномайский, Барчинский).

Среди цветных металлов, сопутствующих хромовой руде, присутствуют никель и кобальт.

Никель — серебристо-белый блестящий металл, открытый в 1751 году. Благодаря своим уникальным свойствам он широко применяется как в чистом виде, так и в составе различных сплавов. В природе никель встречается преимущественно в виде оксидов, сульфидов и силикатов. Его добыча ведется примерно в 20 странах, а переработка осуществляется более чем в 25. Основные формы коммерческого никеля — ферроникель, оксиды, химические соединения и металлический никель. Существенная часть никеля поступает из вторичных источников — переработки металлолома.

По оценкам специалистов, мировые запасы никеля при текущем уровне добычи рассчитаны более чем на 100 лет. Благодаря своим физико-химическим свойствам, никель используется в более чем 300 000 изделий: от военной и космической техники до строительства и транспорта. Наибольшее применение никель находит в производстве сплавов с хромом и другими металлами — в частности, для изготовления термостойких и прочных сталей.

Около 65% никеля идет на производство нержавеющей стали, 20% — на другие сплавы, включая «суперсплавы» для специализированных отраслей.

Примерно 9% используется для гальванического покрытия, а оставшиеся 6% — в производстве химикатов, батарей и монет. Мировой спрос на никель стабильно растет вместе с рынком нержавеющей стали, ежегодно увеличивающимся на 5%.

Кобальт — серебристо-белый металл с легким желтоватым или розоватым оттенком. Несмотря на широкое распространение в земной коре, его добыча затруднена из-за низкой концентрации. Поэтому он в основном извлекается как сопутствующий продукт при добыче никеля, меди или, реже, мышьяка и серебра.

## 1.2 Грохот

**Грохот** представляет собой технологическое устройство, предназначенное для разделения хромовой руды по фракциям различного размера. Он применяется на разных стадиях переработки — таких как дробление, сортировка и классификация — для получения материала, соответствующего требованиям конкретной технологической операции.

Грохоты, используемые при переработке хромовых руд, оснащаются ситами различных размеров и конфигураций, обеспечивающими разделение сырья по крупности. В процессе работы материал подаётся на вибрационную или инерционную поверхность грохота, где разделяется на фракции и направляется на последующие этапы обработки.

Благодаря высокой производительности, грохоты эффективно обрабатывают большие объёмы сырья, обеспечивая стабильное качество конечного продукта.

Бункер-дозатор, применяемый в процессах обогащения хромовой руды, служит для равномерной подачи материала в технологическую линию, например, при загрузке хромитовой руды в дробильные установки или сепараторы. Конструктивно бункеры-дозаторы изготавливаются из устойчивых к износу и коррозии материалов — чаще всего из стали или сплавов. Дозирование осуществляется с использованием винтовых, шнековых, лопастных или других механизмов, обеспечивающих точность подачи и стабильность технологического процесса.

Как и любое промышленное оборудование, бункеры-дозаторы требуют грамотного проектирования, качественного монтажа и регулярного обслуживания для обеспечения безопасности, надёжности и высокой эффективности переработки.

Активно применяются в обогатительных процессах для перемещения руды и концентратов между технологическими узлами. Они обеспечивают транспортировку материала, например, от бункеров-дозаторов к дробилкам или от сепараторов к складам и на дальнейшие стадии переработки.

Конвейеры могут быть выполнены в прямолинейной или изогнутой форме, с различными скоростями движения, углами наклона и

конструктивными особенностями. Часто они дополняются направляющими, ограничителями, отбойниками, металлодетекторами и другими вспомогательными элементами.

Эффективная организация транспортировки с помощью конвейеров — важное условие для устойчивой работы предприятия, обеспечения высокой производительности и экономической целесообразности. Ключевыми факторами успешного применения являются правильное проектирование, качественная установка и техническое обслуживание оборудования.

## **2 Физико-химический анализ хвостов**

### **2.1 Характеристики хвостов**

Физико-химические характеристики хвостов обогащения изучались с применением комплекса методов, включающих химический, рентгенофлуоресцентный, рентгенофазовый, термический, минералогический и гранулометрический анализы.

Химический состав определялся с использованием оптического эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой Optima 2000 DV (PerkinElmer, США).

Гранулометрический (ситовой) анализ проводился методом механического просеивания с применением автоматического анализатора.

Для рентгенофазового анализа использовался дифрактометр D8 Advance (Bruker AXS GmbH) с рентгеновской трубкой  $\alpha$ -Cu при напряжении 40 кВ и токе 40 мА. Обработка дифрактограмм и расчет межплоскостных расстояний осуществлялись с помощью программного обеспечения EVA, а идентификация минеральных фаз проводилась в программе Search/Match на основе базы данных ASTM.

Минералогический состав изучался с использованием микроскопа МИН-8 при увеличении до 320 $\times$ , а также микроскопа OLYMPUS при увеличениях 200 $\times$  и 400 $\times$  в проходящем свете с использованием иммерсионной жидкости. Анализ полированных шлифов в отраженном свете проводился на инвертированном микроскопе Leica, микрофотосъемка также выполнялась на этом оборудовании. Фотографии в проходящем свете снимались на OLYMPUS с увеличением 200 $\times$  и 400 $\times$  с использованием программного обеспечения Stream BasicR.

Термические свойства изучались методом синхронного термического анализа на установке STA 449 F3 Jupiter. Перед началом нагрева камера откачивалась и заполнялась инертным газом (высокоочищенный аргон). Пробы нагревались со скоростью 283 К/мин, при расходе газа в диапазоне 80–90 мл/мин, в зависимости от состава пробы. Охлаждение осуществлялось до 573 К со скоростью 288 К/мин. Полученные термограммы обрабатывались с помощью программного обеспечения NETZSCH Proteus.

### **2.2 Фазовый и вещественный состав**

Основная масса оксида хрома сосредоточена в фракции с размером частиц от 0 до 0,05 мм, на долю которой приходится 70,5 % общего содержания при средней концентрации 31,4 %. В диапазоне размеров от 0,05 до 0,71 мм содержится 12,02 % оксида хрома при аналогичном уровне концентрации — 31,8 %. В более крупных фракциях (более 0,2 мм)

содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  варьируется от 9,15 до 12,3 %, при этом потери оксида хрома составляют около 7,28 %.

Таблица 1 – Распределение хрома по классам крупности

| Наименование | Выход, % | Содержание $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , % | Распределение $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , % |
|--------------|----------|----------------------------------------|-------------------------------------------|
| +1,0         | 4,59     | 12,3                                   | 2,23                                      |
| -1,0+0,5     | 3,85     | 12,0                                   | 1,83                                      |
| -0,5+0,2     | 8,9      | 9,15                                   | 3,22                                      |
| -0,2+0,071   | 16,46    | 15,64                                  | 10,2                                      |
| -0,071+0,05  | 9,53     | 31,8                                   | 12,02                                     |
| -0,05+0      | 56,67    | 31,4                                   | 70,5                                      |
| ИТОГО        | 100      | 25,24                                  | 100,0                                     |

Таблица 2 – Химический состав хвостов обогащения

| Элемент | Содержание, % | Элемент             | Содержание, % |
|---------|---------------|---------------------|---------------|
| Cr      | 17,27         | Zn                  | 0,1           |
| Fe      | 6,37          | Co                  | 0,02          |
| Mg      | 17,64         | Cu                  | 0,008         |
| Si      | 10,05         | V                   | 0,02          |
| Al      | 1,86          | Ga                  | 0,0059        |
| Ca      | 0,54          | $\Sigma \text{PЗЭ}$ | 0,04561       |
| Ni      | 0,28          |                     |               |

Основная масса оксида хрома сосредоточена в фракции с размером частиц от 0 до 0,05 мм, на долю которой приходится 70,5 % общего содержания при средней концентрации 31,4 %. В диапазоне размеров от 0,05 до 0,71 мм содержится 12,02 % оксида хрома при аналогичном уровне концентрации — 31,8 %. В более крупных фракциях (более 0,2 мм) содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  варьируется от 9,15 до 12,3 %, при этом потери оксида хрома составляют около 7,28 %.

Для разработки эффективной технологии комплексной переработки хвостов обогащения был проведён анализ распределения сопутствующих хрому элементов по выделенным классам крупности.

Результаты гранулометрического анализа хвостов свидетельствуют о том, что наиболее перспективной фракцией для последующего обогащения является размерный класс -0,2 +0 мм. В данной фракции сконцентрировано (от общего содержания, масс. %): 78,84 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , 91,62 % ZnO, 77,6 % NiO, 86,18 %  $\text{Co}_3\text{O}_4$  и 82,7 % CuO.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что основными составляющими исследуемого материала являются соединения хрома, магния, алюминия и кремния. Присутствие магния в минералах, таких как лизардит и хромит, оказывает влияние не только на степень его извлечения, но также существенно влияет на поведение хрома, кремнезема, железа и других элементов в ходе процессов химической активации и выщелачивания. Для корректного выбора технологических режимов этих процессов необходимо предварительно изучить формы присутствия основных компонентов в хвостах обогащения.

Таблица 3 – Распределение сопутствующих элементов в хвостах обогащения по классам крупности

| Класс,<br>мм                   | Распределение, % |          |          |            |              |          |
|--------------------------------|------------------|----------|----------|------------|--------------|----------|
|                                | +1,0             | -1,0+0,5 | -0,5+0,2 | -0,2+0,071 | - 0,071+0,05 | - 0,05+0 |
| Элемент                        |                  |          |          |            |              |          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,7              | 3,6      | 7,5      | 15,0       | 10,2         | 59,0     |
| SiO <sub>2</sub>               | 5,3              | 4,8      | 10,9     | 17,9       | 8,5          | 52,6     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,7              | 2,3      | 5,0      | 12,8       | 11,5         | 64,7     |
| MgO                            | 5,1              | 4,3      | 9,6      | 16,93      | 9,3          | 54,77    |
| ZnO                            | 3,1              | 1,3      | 3,98     | 7,96       | 11,1         | 72,56    |
| NiO                            | 5,4              | 4,7      | 12,3     | 21,4       | 9,1          | 47,1     |
| Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | 3,9              | 3,3      | 6,62     | 13,2       | 9,9          | 63,08    |
| CuO                            | 4,6              | 3,5      | 9,2      | 15,0       | 9,9          | 57,8     |

### 3 Методы исследования обогащения

#### 3.1 Виды обогащения

Гравитационное обогащение хвостов класса крупности  $-0,2 +0,071$  мм проводилось с использованием концентрационного стола СКО-1, а для материала фракции  $-0,071 +0$  мм применялся центробежный концентратор «Knelson» (рисунок 1) модели KC-MD3 производства компании FLSmidth.



Рисунок 1 – Концентрационный стол СКО-1

Применение центробежных сепараторов (рисунок 2) обеспечивает практически полное извлечение тонкого полезного компонента из отходов до крупности зерен  $0,1 (0,15)$  мм.

Процесс активации осуществлялся следующим образом: в автоклав заливали  $1,5 \text{ дм}^3$  содового раствора с концентрацией  $120 \text{ г/дм}^3$ , после чего загружали  $150 \text{ г}$  шлама с крупностью менее  $0,2 \text{ мм}$ , обеспечивая требуемое соотношение твердого и жидкого в пульпе  $T:Ж = 1:10$ . Автоклав (рисунок 3) герметизировали, затем включали нагрев и одновременно запускали перемешивание. При достижении рабочей температуры в диапазоне  $373\text{--}523$ .

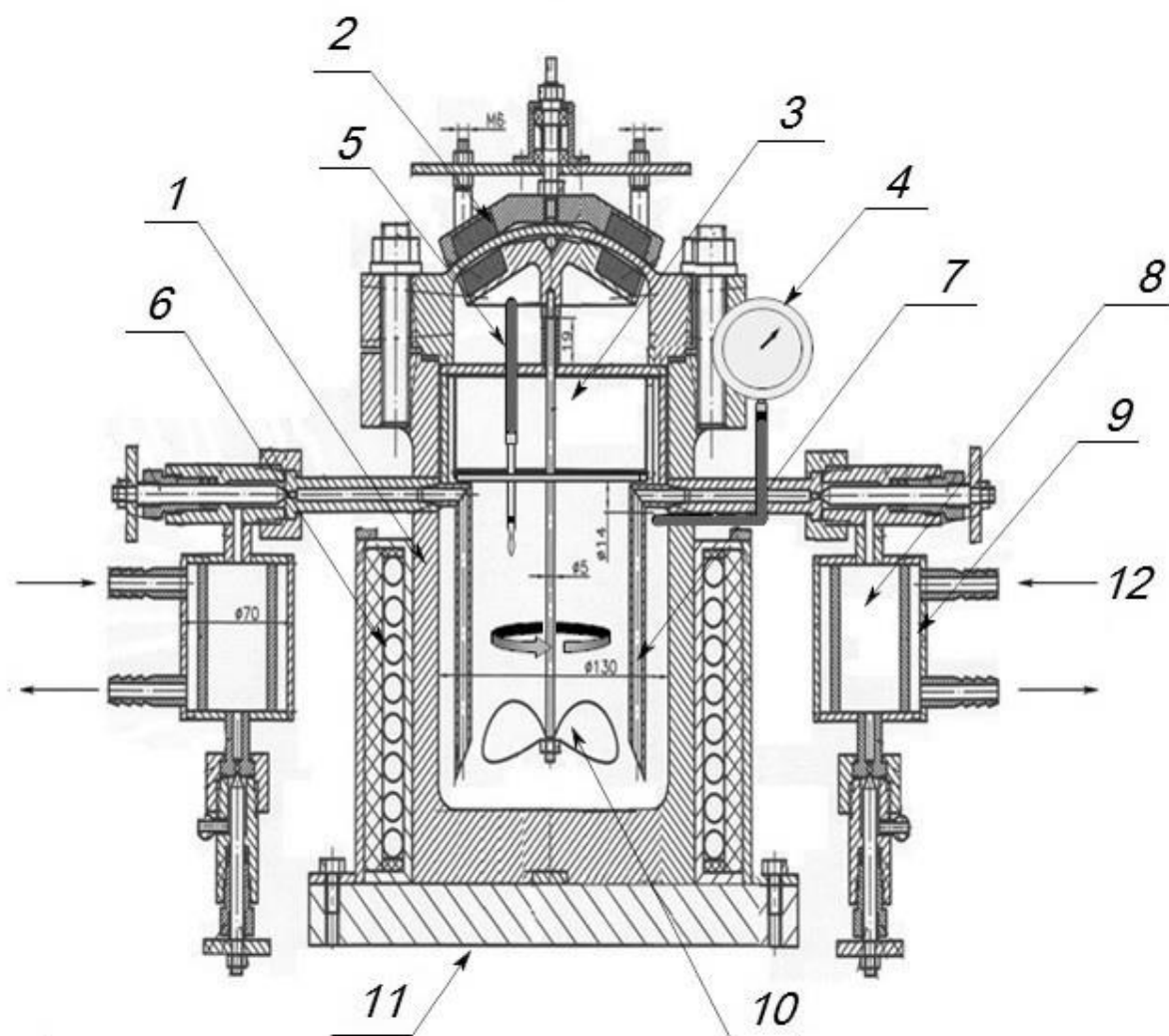
**ASCEND**



Рисунок 2 – Цетробежный сепаратор Knelson

К проводили активацию загруженного материала. Продолжительность каждого опыта составляла 90 минут. По завершении активации отключали нагрев и осуществляли воздушное охлаждение автоклава. Для контроля процесса отбор проб выполнялся через водоохлаждаемые шлюзовые камеры пробоотборников. После понижения температуры пульпы до 343 К перемешивание прекращали, автоклав разгерметизировали и выгружали. Полученную пульпу фильтровали с применением вакуумной установки, осадок промывали и вновь фильтровали. Далее активированный шлам высушивали в сушильном шкафу при температуре 378 К и отбирали усредненную пробу.

Процесс активации осуществлялся следующим образом: в автоклав заливали 1,5 дм<sup>3</sup> содового раствора с концентрацией 120 г/дм<sup>3</sup>, после чего загружали 150 г шлама с крупностью менее 0,2 мм, обеспечивая требуемое соотношение твердого и жидкого в пульпе Т:Ж = 1:10. Автоклав герметизировали, затем включали нагрев и одновременно запускали перемешивание. При достижении рабочей температуры в диапазоне 373–523 К проводили активацию загруженного материала. Продолжительность каждого опыта составляла 90 минут. По завершении активации отключали нагрев и осуществляли воздушное охлаждение автоклава. Для контроля процесса отбор проб выполнялся через водоохлаждаемые шлюзовые камеры пробоотборников.



1 - корпус автоклава, 2- крышка автоклава, 3 - емкости для загрузки навески, 4 - манометр, 5- чехол термопары, 6 - нагревательный элемент печи, 7 - пробоотборник, 8 - камера отбора проб, 9 - холодильник, 10 - магнитная мешалка, 11 - станина, 12 - подача воды для охлаждения

Рисунок 3 - Лабораторный автоклав, 1,8 дм<sup>3</sup>

После понижения температуры пульпы до 343 К перемешивание прекращали, автоклав разгерметизировали и выгружали. Полученную пульпу фильтровали с применением вакуумной установки, осадок промывали и вновь фильтровали. Далее активированный шлам высушивали в сушильном шкафу при температуре 378 К и отбирали усредненную пробу.

ИК-спектроскопический анализ проводился с использованием ИК-Фурье спектрометра «Avatar 370CsI» в диапазоне 4000–350 см<sup>-1</sup>. Пробы готовились в виде таблеток методом прессования смеси 2 мг образца и 200 мг KBr. В качестве контрольного использовался спектр чистого KBr. Обработка спектров выполнялась с помощью программного обеспечения Transmission E.S.P.

### 3.2 Получение концентрата из хвостов обогащения

Гравитационному обогащению подвергались хвосты с крупностью  $-0,2 + 0$  мм [49, 50, 71]. В данном классе содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  составляет 28,3 %, при извлечении 92,72 % и выходе 82,66 %. Фракция  $+0,2$  мм, содержащая 10,62 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , с извлечением 7,28 % и выходом 17,34 %, не использовалась в гравитационном обогащении, с целью оптимизации материальных потоков.

Результаты обогащения фракции  $-0,2 + 0,071$  мм на концентрационном столе представлены в таблице 4, а данные по обогащению фракции  $-0,071 + 0$  мм на центробежном сепараторе — в таблице 5.

При переработке на концентрационном столе в открытом цикле получен хромитовый концентрат с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  48,8 %, выходом 29,42 % и извлечением 73,02 %. Потери оксида хрома с хвостами составили 18,62 %, при остаточном содержании  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в них 6,5 %.

Таблица 4 – Обогащение хвостов на концентрационном столе

| Наименование   | Выход, %  |         | Содержание $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , % | Извлечение $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , % от класса | Извлечение $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , % от исх. |
|----------------|-----------|---------|----------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|
|                | от класса | от исх. |                                        |                                                  |                                                |
| Концентрат КС  | 29,42     | 4,84    | 48,8                                   | 73,02                                            | 7,45                                           |
| Промпродукт КС | 14,3      | 2,35    | 11,5                                   | 8,36                                             | 0,85                                           |
| Хвосты КС      | 56,28     | 9,27    | 6,5                                    | 18,62                                            | 1,9                                            |
| ИТОГО          | 100,0     | 16,46   | 15,64                                  | 100,0                                            | 10,2                                           |

Таблица 5 – Обогащение хвостов на центробежном сепараторе Knelson

|                                  | Выход, %  |         | Содержание $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , % | Извлечение $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , % от класса | Извлечение $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , % от исх. |
|----------------------------------|-----------|---------|----------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|
|                                  | от класса | от исх. |                                        |                                                  |                                                |
| Концентрат основной сепарации    | 48,5      | 32,1    | 42,8                                   | 66,64                                            | 55,0                                           |
| Концентрат контрольной сепарации | 13,6      | 9,02    | 32,8                                   | 14,2                                             | 11,72                                          |
| Хвосты сепарации                 | 37,9      | 25,08   | 15,75                                  | 19,16                                            | 15,80                                          |
| ИТОГО                            | 100,0     | 66,2    | 31,14                                  | 100,0                                            | 82,52                                          |

При обработке на центробежном сепараторе Knelson (также в открытом цикле) получен концентрат с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  42,8 %, выходом 48,5 % и извлечением 66,64 %. Потери оксида хрома с хвостами составили 19,16 %, при содержании  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в них 15,75 %.

Информация о содержании элементов, сопутствующих хрому, в продуктах обогащения на концентрационном столе и центробежном сепараторе.

Таблица 6 – Состав продуктов при обогащении хвостов на концентрационном столе

| Наименование            | Содержание по продуктам, % |             |        |
|-------------------------|----------------------------|-------------|--------|
|                         | Концентрат                 | Промпродукт | Хвосты |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 14,8                       | 9,69        | 12,05  |
| $\text{SiO}_2$          | 12,6                       | 28,4        | 29,0   |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 3,67                       | 1,83        | 2,4    |
| $\text{MgO}$            | 22,2                       | 34,5        | 33,13  |
| $\text{ZnO}$            | 0,051                      | 0,021       | 0,132  |
| $\text{NiO}$            | 0,207                      | 0,349       | 0,363  |
| $\text{Co}_3\text{O}_4$ | 0,039                      | 0,035       | 0,029  |
| $\text{CuO}$            | 0,006                      | 0,008       | 0,015  |
| $\text{Cr}_2\text{O}_3$ | 48,8                       | 11,5        | 6,5    |

Таблица 7 – Состав продуктов при обогащении хвостов на центробежном сепараторе

| Наименование            | Содержание по продуктам, % |                        |        |
|-------------------------|----------------------------|------------------------|--------|
|                         | Концентрат                 | Конц. контр. сепарации | Хвосты |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 11,5                       | 10,03                  | 10,12  |
| $\text{SiO}_2$          | 14,9                       | 25,9                   | 25,9   |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 3,3                        | 2,39                   | 2,3    |
| $\text{MgO}$            | 24,7                       | 33,1                   | 32,9   |
| $\text{ZnO}$            | 0,025                      | 0,026                  | 0,023  |
| $\text{NiO}$            | 0,211                      | 0,329                  | 0,318  |
| $\text{Co}_3\text{O}_4$ | 0,035                      | 0,032                  | 0,027  |
| $\text{CuO}$            | 0,007                      | 0,008                  | 0,008  |
| $\text{Cr}_2\text{O}_3$ | 42,8                       | 32,8                   | 15,75  |



Рисунок 4 – Технологическая схема обогащения гравитационными методом

Результаты гравитационного обогащения хвостов подтвердили эффективность использования концентрационного стола для переработки материала крупностью  $-0,2 +0,071$  мм, а также целесообразность применения центробежной сепарации для более мелких фракций ( $-0,071 +0$  мм).

### 3.2.1 Обогащение класса хвостов $+0,2$ мм

Для реализации комплексной переработки была подготовлена смесь хвостов, полученных после гравитационного обогащения. В её состав вошли: фракция  $-0,2 +0$  мм с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  13,64 % в объеме 61,2 % от данного класса (или 50,59 % от общего объема хвостов ДГОК), а также фракция  $+0,2$  мм с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  10,62 %, составляющая 17,34 % от хвостов ДГОК. Таким образом, в переработку было вовлечено 67,93 % от общей массы исходных хвостов. Это позволило благодаря предварительному

гравитационному обогащению и получению кондиционного хромитового концентрата сократить объем материала, направляемого на гидрометаллургическую переработку, на 32,07 %.

Фракция +0,2 мм перед смешиванием была дополнительно измельчена до крупности -0,2 +0 мм.

Таблица 8 - Оксидный состав объединенных хвостов

| Элемент                        | Содержание, % | Элемент                        | Содержание, % |
|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12,87         | ZnO                            | 0,03          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8,2           | Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | 0,026         |
| MgO                            | 36,10         | CuO                            | 0,02          |
| SiO <sub>2</sub>               | 29,60         | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,036         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,99          | Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,008         |
| CaO                            | 0,7           | ΣPЗЭ                           | 0,04711       |
| NiO                            | 0,36          |                                |               |

### 3.3 Получение хромового концентрата

В соответствии с утверждённой технологической схемой комплексной переработки объединённых хвостов было проведено выщелачивание в 10%-ном растворе NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> при температуре 373 К, соотношении жидкость:твёрдое (Ж:Т) 10:1 и продолжительности 90 минут. В результате выщелачивания были получены продукционный раствор и твёрдый остаток (кек).

Химический состав продукционного раствора, г/дм<sup>3</sup>:

- SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> — 83,0
- MgO — 30,83
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0,59
- Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0,026
- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0,04
- CaO — 0,05
- SiO<sub>2</sub> — 0,06
- Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0,0038
- V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — 0,016
- ΣPЗЭ — 0,0347

Состав кека после выщелачивания, масс. %:

- Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 20,9
- MgO — 8,6
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 7,18
- SiO<sub>2</sub> — 48,2

- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 13,3
- $\text{CaO}$  — 0,05
- $\text{Ga}_2\text{O}_3$  — 0,007
- $\text{V}_2\text{O}_5$  — 0,032
- $\text{NiO}$  — 0,15
- $\text{Co}_3\text{O}_4$  — 0,021
- $\text{ZnO}$  — 0,02
- $\text{CuO}$  — 0,015
- $\Sigma\text{PЗЭ}$  — 0,039
- Потери при прокаливании — 1,575 %.

Таблица 9 – Фазовый состав кека выщелачивания объединенных хвостов

| Наименование | Формула                                                                            | %    |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Хромит       | $(\text{Fe}_{0,52}\text{Mg}_{0,48})(\text{Cr}_{0,72}\text{Al}_{0,28})_2\text{O}_4$ | 79,8 |
| Лизардит-1М  | $(\text{Mg,Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$                               | 15,7 |
| Кварц        | $\text{SiO}_2$                                                                     | 4,5  |
| Нордстрандит | $\text{Al}(\text{OH})_3$                                                           | 1,5  |

Для получения хромового концентрата твёрдый остаток после выщелачивания (кек) был подвергнут обработке щелочным раствором, содержащим  $240 \text{ г/дм}^3 \text{ Na}_2\text{Оку}$ , при температуре 473 К, соотношении жидкость:твёрдое (Ж:Т) = 3:1 и продолжительности обработки 2 часа [68].

В результате щелочной обработки были получены хромовый концентрат и щелочной раствор.

Состав щелочного раствора,  $\text{г/дм}^3$ :

- $\text{Na}_2\text{O}$  — 239,8
- $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 14,6
- $\text{SiO}_2$  — 152,8
- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 0,03
- $\text{CaO}$  — 0,05
- $\text{SO}_3$  — 0,24
- $\text{V}_2\text{O}_5$  — 0,015
- $\text{Ga}_2\text{O}_3$  — 0,003

Извлечение редких металлов в раствор при щелочной обработке составило:

- $\text{Ga}_2\text{O}_3$  — 14,0 %
- $\text{V}_2\text{O}_5$  — 15,0 %

Химический состав полученного хромового концентрата, мас. %:

- $\text{Cr}_2\text{O}_3$  — 50,49
- $\text{MgO}$  — 14,37
- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 13,96
- $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 6,44
- $\text{Na}_2\text{O}$  — 0,426

- $\text{SiO}_2$  — 7,821
- $\text{V}_2\text{O}_5$  — 0,025
- $\text{Ga}_2\text{O}_3$  — 0,01
- $\Sigma\text{PЗЭ}$  — 0,0078
- Потери при прокаливании — 6,458 %.

### 3.3.1 Технологическая схема комплексной переработки объединенных хвостов

На основе выполненных исследований по комплексной переработке объединённых хвостов была разработана и утверждена соответствующая технологическая схема. Предложенная схема направлена на повышение степени извлечения ценных компонентов и снижение объёмов хвостов, подлежащих дальнейшему хранению или захоронению (рисунок 5 показан на следующей странице).

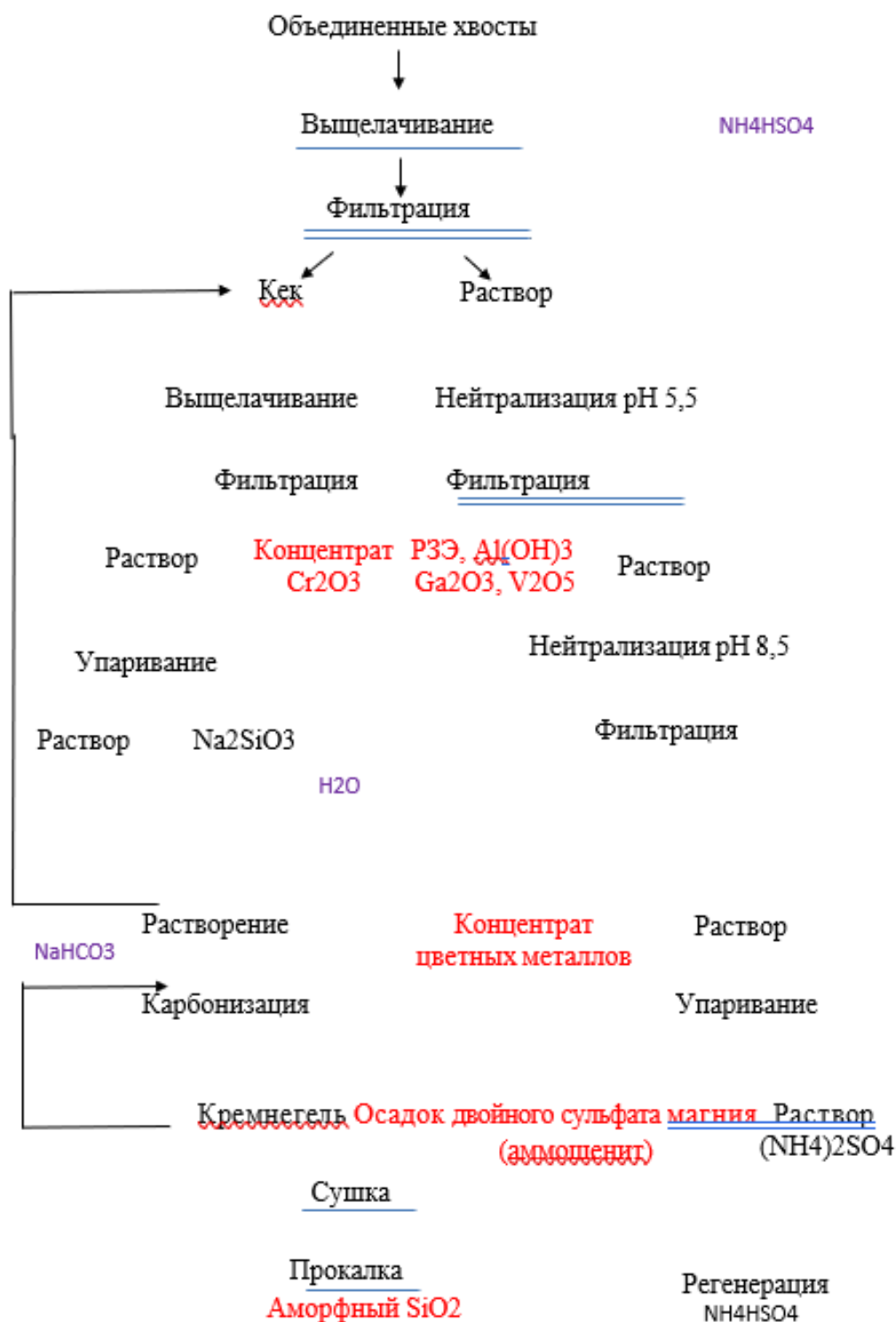


Рисунок 5 – Технологическая схема комплексной переработки объединенных хвостов

## 4 Выбор контроллера

### 4.1 Контроллер S7–1500

Для построения автоматизированной системы управления гравитационным обогащением хромовой руды была выбрана программно-аппаратная платформа компании Siemens на базе контроллера SIMATIC S7-1500.

Данный контроллер относится к семейству промышленных ПЛК нового поколения, обеспечивающих высокую производительность, гибкость и надежность работы в условиях сложных технологических процессов, характерных для обогатительных производств.

Причины выбора S7-1500:

- высокая скорость обработки команд (время выполнения инструкций логики – до 1 нс), что позволяет реализовать точное и устойчивое регулирование параметров процесса (вибрации, подачи пульпы, наклона стола).
- встроенные средства безопасности (Fail-Safe CPU), повышающие устойчивость системы к аварийным ситуациям.
- поддержка промышленных протоколов — Profinet, Profibus, Modbus TCP/RTU — позволяет интегрировать широкий спектр датчиков и исполнительных устройств.
- нативная поддержка SCADA-системы WinCC, которая обеспечивает реализацию визуализации, архивирования, тревог и удаленного мониторинга процесса.
- модульность конструкции, позволяющая масштабировать систему в зависимости от количества задействованного оборудования (насосы, вибростолы, дозаторы, сепараторы и т.д.).
- наличие встроенных аналоговых и дискретных входов/выходов, а также приближенного ПИД-регулятора, упрощающих реализацию САР без дополнительных внешних устройств.

Контроллер S7-1500 используется как центральное управляющее устройство. Сигналы от датчиков температуры, давления, расхода, положения и вибрации поступают на соответствующие аналоговые и дискретные модули ввода. Исполнительные механизмы — частотно-регулируемые насосы, виброприводы, электроприводы дозаторов и регулируемые наклонные механизмы — управляются через модули вывода.

Передача данных и интеграция с HMI и SCADA осуществляется через промышленную сеть Profinet. Все параметры визуализируются на операторской панели Siemens HMI Comfort Panel и на верхнем уровне SCADA WinCC.

Для обеспечения энергонезависимого хранения рецептов, архивов и аварийных данных используется встроенная SD-карта.

Разработка управляющих алгоритмов и логики автоматизации производилась в среде TIA Portal, предоставляющей единый интерфейс для конфигурации оборудования, написания программ, настройки сетей и отладки.

Логика работы включает:

- автоматический режим работы по заданным уставкам
- ручной режим для пуска-наладки
- система сигнализации и защиты
- ПИД-регулирование подачи и вибрации
- ведение архива измеренных параметров и аварий

Контроллер нового поколения с модульной архитектурой предназначен для автоматизации циклических процессов в различных отраслях промышленности. Он отличается высокой производительностью, гибкой масштабируемой структурой и широкими возможностями интеграции с системами локального и распределённого ввода-вывода. Поддержка широкого спектра функций на уровне операционной системы центрального процессора, устойчивость к электромагнитным и механическим воздействиям, а также возможность эксплуатации без принудительного охлаждения делают его эффективным решением для построения надёжных и экономичных систем промышленной автоматизации.

Использование интегрированной инженерной среды TIA Portal при разработке проектов позволяет существенно повысить продуктивность проектирования, эффективно применять новые языковые средства и функциональные возможности оборудования. Это также значительно упрощает настройку взаимодействия с устройствами человеко-машинного интерфейса (HMI), приводами, системами управления нагрузкой и защитной аппаратурой, сокращая общее время и трудозатраты при реализации проектов.

Программируемые логические контроллеры серии S7-1500 поддерживают разнообразные конфигурации центральных процессоров, как общего назначения, так и специализированных. В зависимости от типа применяемого процессора, устройства можно классифицировать следующим образом:

S7-1500 со стандартными CPU оснащаются центральными процессорами с различными уровнями производительности, что позволяет эффективно решать широкий спектр задач автоматизации различной сложности. Контроллеры этой серии обладают модульной архитектурой, обеспечивая гибкость при выборе сигнальных, функциональных и коммуникационных модулей, в том числе для построения систем локального и распределённого ввода-вывода. Они легко интегрируются в различные промышленные сети, поддерживают современные протоколы связи и не требуют дополнительных затрат на обслуживание за счёт естественного

охлаждения и отсутствия буферных батарей. Модульность системы позволяет легко модернизировать и масштабировать её под изменяющиеся производственные условия.

S7-1500C с компактными CPU эти модели объединяют в себе функции центрального процессора и встроенных каналов ввода-вывода, что делает их оптимальным решением для компактных систем управления. При этом полностью сохраняются все функциональные возможности стандартных CPU, а также поддерживается расширение системы за счёт подключения дополнительных модулей S7-1500.

S7-1500F с безопасными CPU (F-CPU) предназначены для построения отказоустойчивых систем управления с функциями промышленной безопасности. Эти контроллеры обеспечивают реализацию как стандартных, так и защитных функций управления, поддерживают работу с модулями PROFIsafe и могут использоваться в распределённых системах ввода-вывода на базе сетей PROFIBUS DP и PROFINET IO. Они соответствуют требованиям безопасности SIL1–SIL3 (IEC 61508) и PLa–PLe (ISO 13849), что позволяет применять их в критически важных технологических процессах.

S7-1500T с технологическими CPU (T-CPU) эти контроллеры оптимизированы для решения задач управления движением и технологическими процессами, обеспечивая поддержку расширенных функций по стандарту PLCopen. Поддержка технологических операций осуществляется непосредственно на уровне операционной системы центрального процессора, что обеспечивает высокую точность и надёжность управления.

## 4.2 Состав аппаратуры

Программируемый логический контроллер **S7-1500** имеет модульную архитектуру, что позволяет гибко настраивать его конфигурацию в зависимости от требований конкретного технологического процесса. В состав контроллера могут входить следующие компоненты:

Центральный процессор (CPU) — основной модуль системы, обеспечивающий выполнение пользовательской программы, управление остальными модулями контроллера, а также координацию работы распределённых устройств ввода-вывода.

Сигнальные модули (SM) — предназначены для приёма и передачи дискретных и аналоговых сигналов с различными электрическими и временными характеристиками, что обеспечивает гибкость взаимодействия с технологическим оборудованием.

Технологические модули (TM) — применяются для выполнения специализированных задач, таких как высокоскоростной счёт,

позиционирование, генерация импульсов, взвешивание и других операций, требующих высокой точности и быстродействия.

Коммуникационные модули (CM/CP) — расширяют количество доступных интерфейсов для подключения к промышленным сетям (например, PROFINET, Industrial Ethernet, PROFIBUS) и позволяют осуществлять обмен данными через последовательные интерфейсы или сетевые соединения.

Блоки питания системы (PS) — обеспечивают подачу питания на электронные компоненты модулей через внутреннюю шину контроллера, особенно в случаях, когда встроенный блок питания CPU не справляется с нагрузкой.

Блоки питания нагрузки (PM) — преобразуют напряжение питающей сети (например, ~120/230 В) в стабильное выходное напряжение постоянного тока 24 В, необходимое для питания внешних устройств и исполнительных механизмов.

Сигнальные и коммуникационные модули S7-1500 представлены в нескольких функциональных классах:

BA (Basic) — базовые модули с минимальным функционалом, не поддерживающие диагностику, подходящие для простых приложений.

ST (Standard) — модули со встроенными средствами диагностики на уровне всего модуля или групп каналов. Аналоговые модули этого класса имеют точность измерения порядка 0,3 %.

HF (High Feature) — модули с расширенной функциональностью, включая диагностику на уровне каждого канала, более высокой точностью (до 0,1 %), усиленной изоляцией и улучшенной защитой от электромагнитных помех.

HS (High Speed) — модули, отличающиеся минимальными задержками при фильтрации сигналов и быстрым временем преобразования, применяются в системах, требующих высокой скорости обработки данных.

Также следует отметить, что большинство модулей контроллера S7-1500, включая сигнальные, технологические и некоторые коммуникационные (например, CM PtP), могут быть интегрированы в состав распределённой станции ввода-вывода ET 200MP, обеспечивая тем самым широкие возможности масштабирования и гибкости построения системы автоматизации.

Конструктивные особенности контроллера S7-1500 обеспечивают его высокую адаптивность, надёжность и удобство эксплуатации (рисунок).

Все модули монтируются на профильную шину S7-1500 и надёжно фиксируются с помощью встроенных винтов. Нижняя часть профильной шины совместима с 35-миллиметровыми DIN-рейками, что позволяет использовать её для установки дополнительного оборудования, такого как автоматические выключатели, реле или контакторы.

В модулях (за исключением блоков питания нагрузки, PM) предусмотрены участки внутренней системной шины. Соединение между

модулями осуществляется с помощью U-образных шинных перемычек, устанавливаемых на заднюю сторону корпуса. Эти соединители входят в комплект всех модулей, кроме центральных процессоров и блоков питания нагрузки.

Подключение внешних цепей к сигнальным модулям осуществляется через съёмные фронтальные разъёмы на 40 контактов. Это упрощает монтаж, позволяет выполнять замену модулей без отключения внешней проводки и минимизирует время простоя оборудования. При этом фронтальный разъём может быть зафиксирован в промежуточном положении — установлен физически, но без электрического контакта.

При первом подключении разъёма автоматически срабатывает механическая кодировка, которая предотвращает его установку на несовместимый модуль, тем самым исключая ошибки при техническом обслуживании или замене.

Все модули имеют одинаковую глубину корпуса. Кабельные соединения размещаются в специальных каналах и закрываются защитными крышками, что обеспечивает безопасность и аккуратную прокладку проводки.

Модули могут быть установлены в произвольном порядке в монтажной стойке, за исключением модулей питания и CPU, для которых зарезервированы фиксированные позиции.

Конструкция контроллера допускает естественное охлаждение в температурном диапазоне от 0 до 60 °С при горизонтальном размещении. Возможна как горизонтальная, так и вертикальная установка. Однако при вертикальной ориентации ухудшается теплоотвод, поэтому верхний предел допустимой температуры эксплуатации снижается до 40 °С.

Для правильного подбора компонентов системы рекомендуется использовать специализированное программное обеспечение TIA Selection Tool, которое учитывает все требования по совместимости и конфигурации аппаратной платформы S7-1500.



Рисунок 6 – Контроллер S7–1500

Центральные процессоры контроллера S7-1500 обеспечивают поддержку как локальной, так и распределённой системы ввода-вывода. Локальные модули устанавливаются непосредственно в основную монтажную стойку вместе с CPU, образуя локальную систему. Распределённая система ввода-вывода реализуется за счёт подключения внешних периферийных устройств через промышленные сети PROFINET IO и/или PROFIBUS DP.

Общая структура контроллера может включать до 32 различных модулей, включая модуль центрального процессора и модули ввода-вывода, функциональные и коммуникационные модули.

Для расширения возможностей ввода-вывода рекомендуется использовать станции ET 200MP, подключаемые к контроллеру по сети PROFINET IO. Эти станции обеспечивают установку до 31 модуля S7-1500, включая сигнальные, технологические и коммуникационные модули, и являются удобным решением для создания распределённой архитектуры системы управления.

Механизмы обеспечения информационной безопасности и функциональные возможности контроллера

Защита данных и программного обеспечения

Контроллеры серии S7-1500 оснащены многоуровневыми механизмами защиты от несанкционированного доступа и копирования:

Реализована парольная защита, ограничивающая доступ к конфиденциальным программным блокам, предотвращая их несанкционированное чтение и изменение.

Обеспечена аппаратная защита от копирования путём привязки программных компонентов к конкретной карте памяти, что исключает возможность запуска программы с другой карты.

Предусмотрены четыре уровня доступа пользователей к системе управления. Новый, четвёртый уровень защиты предусматривает обязательное использование пароля для выполнения критически важных операций, таких как подключение HMI-интерфейсов, загрузка проектов, обновление встроенного ПО и т.п.

При применении коммуникационного модуля CP 1543-1 реализуются дополнительные функции безопасности, включая:

- встроенный межсетевой экран (firewall);
- шифрование трафика с использованием VPN-соединения (поддерживается начиная с TIA Portal версии V12 SP1).

Функции дисплея центрального процессора

ЦП контроллера оснащён дисплеем, позволяющим:

- просматривать серийные и заказные номера всех модулей, а также версии их встроенного ПО;
- настраивать IP-адрес и другие сетевые параметры, устанавливать дату и время, а также блокировать возврат к заводским настройкам — всё это без подключения к ПК;

- анализировать диагностические сообщения в удобном текстовом формате, что способствует снижению простоев;
- выбрать два языка отображения меню, включая русский (при использовании ПО версии V1.5 и выше и проекта TIA Portal от V13 и выше);
- обеспечить защищённый доступ к дисплею через пароль.

#### Встроенная системная диагностика

Контроллеры S7-1500 обеспечивают унифицированное отображение диагностической информации на всех уровнях: встроенный дисплей, HMI-панели, TIA Portal и Web-интерфейс. Причём данные остаются доступными даже при переходе ЦП в режим STOP.

Диагностика встроена в операционную систему контроллера и не требует дополнительной настройки.

Все новые модули автоматически включаются в систему диагностики.

Состояние оборудования может быть оценено напрямую из пользовательской программы.

#### Работа с данными и рецептами

Контроллеры используют SIMATIC Memory Card для:

- загрузки программ в ЦП;
- обновления встроенного программного обеспечения;
- хранения проектов, включая символьные имена, комментарии, вспомогательную документацию, а также архивов и рецептов в формате CSV;
- резервного копирования конфигураций SIMATIC Basic Panel, что упрощает замену панелей без повторной настройки;
- интеграции с офисными приложениями через SD-картридер — обеспечивается двусторонний обмен данными.

#### Встроенный Web-интерфейс

Встроенный веб-сервер предоставляет возможность удалённого доступа к производственным данным и конфигурационным параметрам посредством стандартного веб-браузера, что упрощает мониторинг и управление системой.

#### Коммуникационные возможности контроллеров S7-1500

Программируемые логические контроллеры серии S7-1500 (рисунок) обладают широкими возможностями организации промышленного обмена данными, что делает их эффективным элементом в распределённых автоматизированных системах управления. Они обеспечивают:

Обмен данными с другими контроллерами, ПК, измерительными приборами и системами человеко-машинного интерфейса посредством промышленных сетей, включая PROFINET, Industrial Ethernet, MODBUS TCP/IP и PROFIBUS.

Поддержку распределённого ввода-вывода через сети PROFINET IO и PROFIBUS DP. При необходимости, с использованием коммуникационных шлюзов и периферийных модулей возможно расширение системы для работы с сетями PROFIBUS PA, AS-Interface и IO-Link.

Организацию последовательной связи через интерфейсы RS-232C, RS-422 и RS-485, с возможностью реализации пользовательских протоколов, а также поддержкой стандартных протоколов 3964(R), MODBUS RTU и USS.

Удалённое программирование контроллера через промышленные сети PROFINET, Industrial Ethernet и PROFIBUS, что позволяет гибко управлять системой без необходимости физического присутствия на объекте.

Возможность проведения удалённой диагностики посредством сетей PROFINET, Industrial Ethernet, PROFIBUS, а также через встроенный веб-сервер центрального процессора, что значительно облегчает техническое обслуживание и сокращает время отклика на неисправности.

Аппаратная поддержка коммуникаций

Для построения коммуникационной инфраструктуры контроллеры S7-1500 включают следующие компоненты:

Интерфейс PROFINET IO IRT, встроенный во все центральные процессоры, оснащённый двухпортовым коммутатором. Он обеспечивает высокоскоростной обмен данными в режиме реального времени, необходимый для точной синхронизации и взаимодействия с другими устройствами системы.

Коммуникационные модули, обеспечивающие подключение к промышленным сетям PROFIBUS и Industrial Ethernet (а также PROFINET — в зависимости от конфигурации и версии).

Модули для подключения к последовательным линиям связи RS-232C, RS-422 и RS-485, позволяющие реализовать обмен данными с широким классом оборудования, в том числе устаревшими или специализированными устройствами.

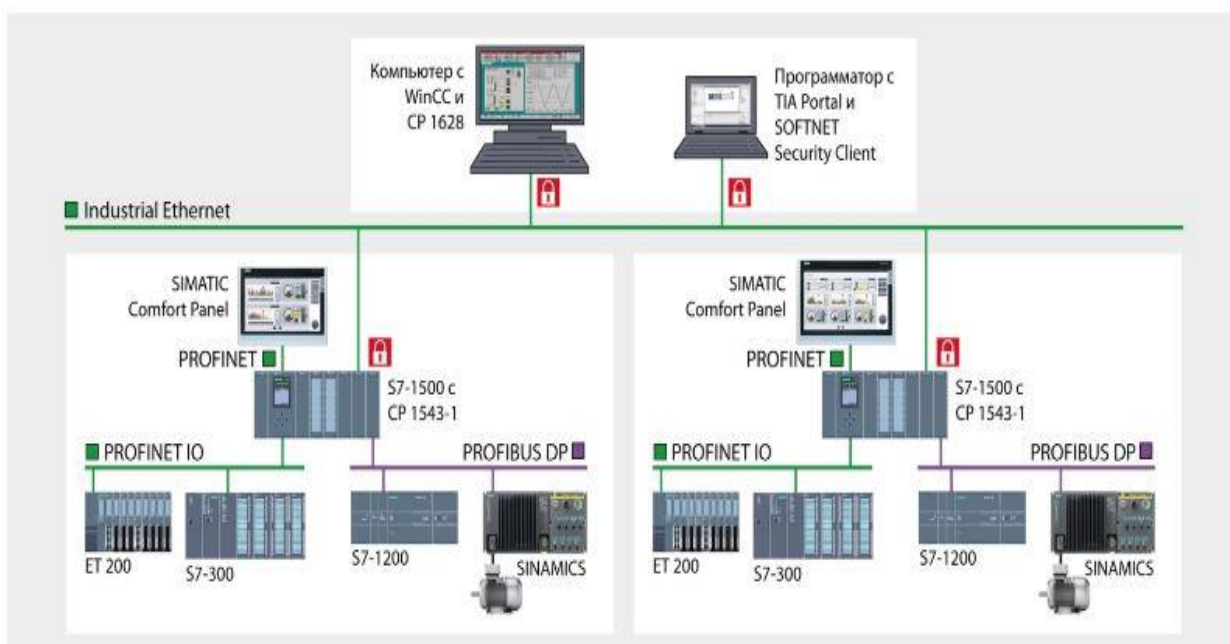


Рисунок 7 – Системы ввода и вывода на основе Profibus и Profinet

### 4.3 Центральные процессоры S7-1500

Центральные процессоры серии S7-1500 не оснащены встроенной загрузочной памятью. Эту функцию выполняет специальная карта памяти SIMATIC Memory Card, которая приобретается отдельно. Без данной карты центральный процессор не способен функционировать.

SIMATIC Memory Card представляет собой SD-карту, предварительно отформатированную в файловой системе FAT32, что обеспечивает её совместимость с операционной системой Windows. Чтение и запись данных на карту могут осуществляться через стандартные SD-картридеры, включая те, что встроены в обычные компьютеры и инженерные станции. Для работы с файлами можно использовать, например, Проводник Windows (Windows Explorer).

Карты SIMATIC Memory Card выпускаются в различных объёмах и предназначены для следующих задач:

- перенос и хранение проектных и технологических данных;
- использование в качестве загрузочного носителя для контроллеров S7-1200 и S7-1500;
- обновление встроенного программного обеспечения оборудования.

Следует отметить, что использование обычных коммерческих SD-карт в контроллерах не допускается — это может привести к сбоям в работе и нарушению требований системы.

В среде STEP 7 имеется возможность защитить программные блоки, привязав их к уникальному серийному номеру карты памяти SIMATIC Memory Card. Для этого в свойствах нужного блока необходимо активировать параметр “Bind to serial number of the SIMATIC memory card”. После выполнения этой операции запуск такого блока будет возможен только с карты памяти, имеющей соответствующий серийный номер.



Рисунок 8 – Конструкция контроллера

Правила извлечения карты памяти удаление карты памяти из контроллера следует производить только при отключённом питании либо после перевода центрального процессора в режим STOP. Если используется режим STOP, необходимо убедиться, что в текущий момент не осуществляется запись или считывание данных с карты. Это может потребовать предварительного отключения всех активных коммуникационных соединений, чтобы исключить потерю данных.

При извлечении карты памяти из компьютера или программатора нужно обязательно использовать команду “Eject” для безопасного удаления.

Удаление данных с карты

Очистка содержимого карты SIMATIC Memory Card возможна двумя способами:

- удаление через Проводник Windows (Windows Explorer) позволяет удалить все файлы, кроме системных (LOG и crdinfo.bin), которые необходимы контроллеру для работы с картой. Если удалить эти файлы, контроллер больше не сможет использовать карту до её повторного форматирования в STEP 7.

- форматирование средствами STEP 7 этот способ обеспечивает корректную подготовку карты к работе с контроллером. Форматирование с помощью стандартных инструментов Windows недопустимо, так как приводит к невозможности использования карты в системах S7-1200/1500.

Сигнальные модули контроллера S7-1500 обеспечивают адаптацию оборудования к конкретным требованиям автоматизируемого процесса. Они предназначены для приёма и передачи дискретных и аналоговых сигналов и включают следующие типы:

- модули дискретного ввода SM 521 на 16 и 32 канала;
- модули дискретного вывода SM 522 с 8, 16 или 32 каналами;
- универсальные модули SM 523, содержащие по 16 каналов дискретного ввода и вывода;
- аналоговые модули ввода SM 531 с 4 или 8 каналами;
- аналоговые модули вывода SM 532 также с 4 или 8 каналами;
- комбинированный аналоговый модуль SM 534, включающий 4 канала ввода и 2 канала вывода.

Классификация модулей производится по уровню функциональности и точности:

- а) класс BA (Basic) простые и экономичные модули, не поддерживающие диагностику;

- б) класс ST (Standard) обеспечивают диагностику на уровне модуля. Для аналоговых модулей точность составляет 0,3 %;

- в) класс HF (High Feature) поддерживают диагностику на каждом канале. Аналоговые модули этого класса обладают точностью 0,1 %;

г) класс HS (High Speed) отличаются высокой скоростью обработки сигналов — например, аналоговый модуль с преобразованием сигнала за 125 мкс на 8 каналов.

Все сигнальные модули выполнены в прочных пластиковых корпусах и могут использоваться как в контроллерах S7-1500, так и в распределённых станциях ET 200MP. Они поддерживают обновление встроенного программного обеспечения. На передней панели каждого модуля расположены светодиодные индикаторы, отображающие состояние самого модуля и его каналов. Количество и функции светодиодов зависят от конкретного типа модуля.

Подключение внешних цепей осуществляется через съёмный фронтальный соединитель, который закрывается изолирующей защитной крышкой. В крышку вставляется маркировочная вставка, на которой указываются обозначения подключаемых цепей. Эти обозначения расположены на одном уровне с соответствующими индикаторами каналов, обеспечивая удобную идентификацию. Маркировочная вставка входит в комплект поставки модуля.

На внутреннюю поверхность крышки нанесена схема подключения. Крышка может фиксироваться в двух положениях: для монтажа с проводами в тонкой или толстой изоляции. Это обеспечивает удобство при подключении и защите кабелей.

Фронтальные соединители позволяют упростить подключение и заменить модуль без необходимости отсоединять внешние провода. Все сигнальные модули используют 40-контактные соединители. При монтаже соединитель можно зафиксировать в промежуточном положении — он при этом удерживается на модуле, но не подключён к его электронике.

Для модулей шириной 35 мм фронтальные соединители заказываются отдельно и могут быть как с винтовыми, так и с пружинными (отжимными) контактами. Модули шириной 25 мм комплектуются фронтальными соединителями с отжимными контактами по умолчанию.

При первом подключении фронтального соединителя происходит его автоматическая механическая кодировка, после чего он может использоваться только с модулями данного типа. Это предотвращает ошибки и повышает безопасность при замене оборудования.

При необходимости на нижнюю часть фронтального соединителя можно установить специальные элементы для заземления экранировки соединительных кабелей.

Каждый сигнальный модуль оснащён встроенным сегментом внутренней шины контроллера. Соединение модулей в общую систему осуществляется с помощью U-образных шинных соединителей, которые монтируются на задней стороне модулей. Эти соединители входят в стандартный комплект поставки каждого модуля.

Установка всех модулей производится на стандартную монтажную (профильную) шину S7-1500. Фиксация модулей в нужном положении осуществляется встроенными винтами. Расположение модулей на шине допускается в произвольном порядке.

Все параметры сигнальных модулей настраиваются программно с помощью инструментов пакета STEP 7 Professional, начиная с версии V12. С их помощью можно задать времена фильтрации входных сигналов, выбрать диапазоны измерения для входов и формирования выходных аналоговых сигналов, настроить параметры аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования, задать поведение модулей при остановке центрального процессора, включить поддержку прерываний, активировать диагностические функции и другое. Конкретный перечень доступных настроек зависит от типа используемого модуля.

По умолчанию физические адреса входов и выходов сигнальных модулей определяются их положением в монтажной стойке. При конфигурации оборудования STEP 7 Professional автоматически резервирует по 4 байта адресного пространства на каждый модуль. При необходимости эту адресацию можно изменить вручную. Также доступ к каналам может осуществляться по символическим именам, присвоенным в процессе настройки.

В программируемых контроллерах серии S7-1500 и в распределённых периферийных станциях ET 200MP допускается использование следующих типов аналоговых входных модулей SM 531:

- AI 4x U/I/RTD/TC ST Четырёхканальный модуль, предназначенный для приёма унифицированных аналоговых сигналов по току и напряжению, а также для измерения температуры с помощью термопар и термометров сопротивления. Обеспечивает 16-битное разрешение и точность измерений  $\pm 0,3$  %. Все входы объединены в одну потенциально связанную группу, при этом допускается синфазное напряжение до 10 В. Модуль поддерживает аппаратные и диагностические прерывания, настройку до четырёх порогов отслеживания параметров, а также выполняет калибровку без прерывания работы. Ширина устройства — 25 мм.

- AI 8x U/I/RTD/TC ST Восьмиканальный аналог предыдущего модуля, с теми же характеристиками по разрешению, точности и поддерживаемым типам сигналов. Все каналы входят в одну общую потенциальную группу, допускается 10 В синфазного напряжения. Имеется возможность настройки диагностик, порогов мониторинга и онлайн-калибровки. Ширина модуля — 35 мм.

- AI 8x U/I HS Высокоскоростной восьмиканальный модуль для измерения унифицированных аналоговых сигналов тока и напряжения. Имеет разрешение 16 бит, точность  $\pm 0,3$  %, одну группу входов с общим потенциалом и синфазным напряжением до 10 В. Особенность модуля — высокая скорость преобразования: 125 мкс на все 8 каналов, наличие

изохронного режима и возможность калибровки во время работы. Ширина корпуса — 35 мм.

Аналоговые входные модули подразделяются на два класса в зависимости от уровня функциональности:

- ST (Standard) — модули с диагностикой на уровне модуля, точность измерений составляет 0,3 %.
- HS (High Speed) — модули с ускоренной обработкой сигналов за счёт низкой задержки фильтрации и быстрого преобразования.

#### 4.4 Сигнальные модули

Модули серии SM 532 (рисунок) выполняют преобразование цифровых данных, формируемых внутри контроллера, в аналоговые выходные сигналы.

Основные особенности модулей SM 532:

- Выпускаются модели с 2, 4 и 8 выходными каналами, представленные в классах ST и HS.
- Обеспечивают быстрое цифро-аналоговое преобразование.
- Позволяют адаптировать систему ввода-вывода контроллера под конкретные задачи управления.
- Совместимы с ПЛК S7-1500 и распределёнными станциями ET 200MP.
- Поддерживают программную настройку рабочих параметров.
- Обеспечивают возможность обновления встроенного ПО.
- Работают с 16-битным разрешением.

Модуль высокоскоростного счёта предназначен для обработки импульсов 24 В от инкрементальных датчиков с частотой до **200 кГц**. В зависимости от выбранной конфигурации, полученные значения могут интерпретироваться как скорость перемещения, частота или период следования импульсов.



Рисунок 9 – Сигнальные модули

Благодаря наличию встроенных входов и выходов, модуль обеспечивает быструю реакцию системы на измеренные значения. Гибкие параметры настройки позволяют точно адаптировать его под специфические требования задачи.

Внутренние счётчики могут сравниваться с двумя заданными программно пороговыми значениями. Результаты таких сравнений используются для управления двумя дискретными выходами на каждом канале.

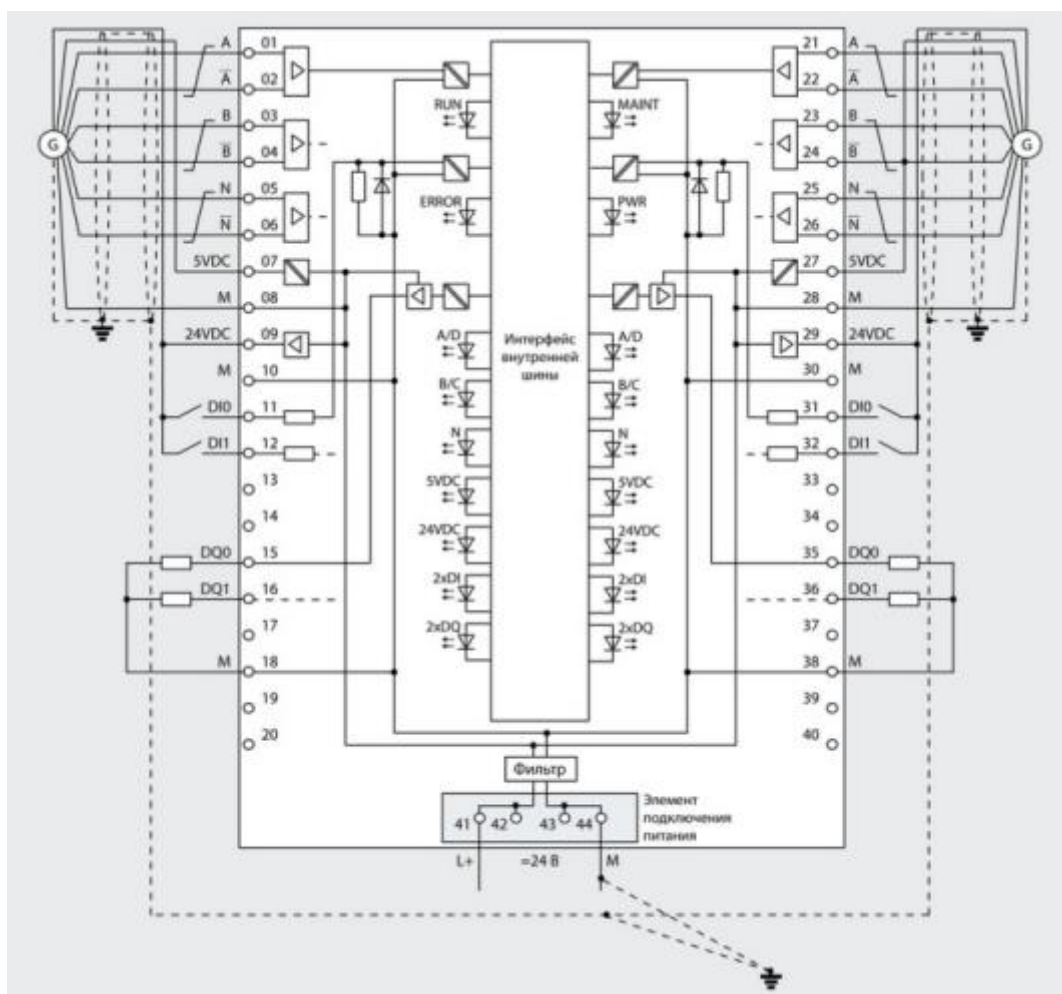


Рисунок 10 – Технологическая схема модуля

Помимо счётных входов, каждый канал оснащён тремя дополнительными дискретными входами. Они могут применяться для захвата текущего значения счётчика, а также для получения сигналов о достижении конечных положений исполнительного механизма. Эти сигналы могут оказывать воздействие на дискретные выходы соответствующего канала.

– Монтаж осуществляется на профильную шину S7-1500 с фиксацией в рабочем положении с помощью винта, встроенного в корпус модуля.

- подключение внешних цепей выполняется через съёмный фронтальный 40-полюсный разъём, рассчитанный на проводники сечением от 0,25 до 1,5 мм<sup>2</sup> (AWG24...AWG16).

- предусмотрено промежуточное положение установки фронтального разъёма, при котором он закреплён на корпусе, но не подключён электрически к электронике модуля.

На лицевой стороне модуля и защитной крышке размещается следующая информация:

- обозначение типа модуля;
- заказной артикул;
- версия аппаратного обеспечения и встроенного ПО;
- маркировочная этикетка для внешних цепей;
- схема подключения внешних цепей.

Модули оснащены стандартным комплектом светодиодной индикации:

- светодиод состояния модуля (зелёный — норма, красный — ошибка);
- индикаторы каналов: выключенный — неактивный, зелёный — активный, красный — ошибка канала;
- индикация наличия питания.

В комплект поставки входят:

- сам модуль;
- маркировочная этикетка для внешних подключений;
- U-образный шинный разъём;
- элементы для заземления экранов кабелей;
- защитная крышка.

## 4.5 Коммуникационные модули

Коммуникационный процессор CP 1543-1 служит для подключения программируемых контроллеров серии S7-1500 к сети Industrial Ethernet. Устройство обеспечивает безопасную передачу данных через сеть, применяя встроенный межсетевой экран с механизмом глубокой инспекции пакетов (SPI) и шифрование с использованием FTPS и SNMP V3. Кроме того, модуль поддерживает интеграцию контроллера в IPv6-сети.

Один процессор CP 1543-1 обеспечивает защиту доступа к данным как самого контроллера S7-1500, так и внешнего оборудования, подключённого к нему через другие промышленные сети.

Параметры коммуникационного процессора конфигурируются в среде STEP 7 Professional версии V12 и выше (TIA Portal).

Функциональные возможности CP 1543-1 включают:

- поддержка PG/OP-коммуникации;
- S7-коммуникация;

- открытый обмен данными по Industrial Ethernet с использованием команд SEND/RECEIVE и FETCH/WRITE;

IT-функции:

- протоколы FTP и FTPS для доступа к файловой системе и блокам данных ЦПУ с функциями клиента или сервера;

- отправка email-сообщений через SMTP или ESMTP с поддержкой SMTP Auth (для IPv6).

Функции безопасности:

- межсетевой экран уровня 3/4 с полной проверкой трафика (SPI);

- журнал событий с возможностью просмотра и отправки на удалённый сервер логирования;

- безопасная передача файлов по FTPS;

- безопасная синхронизация времени через NTP;

- сетевой мониторинг по протоколу SNMP версии 3.

IPv6-поддержка включает:

- обмен данными с помощью FETCH/WRITE (роль сервера);

- работа в режиме FTP-сервера;

- работа в режиме FTP-клиента, управляемого пользовательской программой;

- отправка email-сообщений под управлением пользователя.

Коммуникационный процессор CP 1543-1 предназначен для подключения контроллера S7-1500 к сети Industrial Ethernet и обеспечивает безопасный обмен данными. Благодаря встроенному микропроцессору модуль самостоятельно обрабатывает коммуникационные задачи, тем самым снижая нагрузку на основной центральный процессор контроллера и предоставляя дополнительные сетевые интерфейсы.

С помощью CP 1543-1 возможен обмен данными:

- с программаторами, офисными и промышленными компьютерами;

- с устройствами диспетчеризации и мониторинга;

- с системами автоматизации SIMATIC S7/S5.

Применение данного модуля позволяет надёжно защитить контроллер S7-1500 от несанкционированного доступа через Ethernet-сеть. Он поддерживает безопасное удалённое подключение к контроллеру через локальную сеть, а также защищённый обмен данными между различными устройствами и сегментами сети, исключая возможность несанкционированного вмешательства, подмены данных или промышленного шпионажа.

Коммуникационный процессор CP 1543-1 выполнен в компактном пластиковом корпусе, соответствующем формату модулей S7-1500, и обладает следующими характеристиками:

Оснащён встроенным разъёмом RJ45 для подключения к сети Industrial Ethernet, защищённым специальной крышкой. Поддерживается автоматическое определение и настройка скорости передачи данных. Сетевое

подключение может осуществляться как через штекер IE FC RJ45 Plug 180 с прямым отводом кабеля, так и с помощью готового патч-корда.

Электропитание подаётся через внутреннюю шину контроллера. На корпусе расположены светодиодные индикаторы, отображающие состояние модуля, наличие ошибок, питание и активность сетевого интерфейса (индикатор активности находится под защитной крышкой). Модуль устанавливается на стандартную DIN-рейку системы S7-1500 с фиксацией с помощью встроенного винта. Может устанавливаться в любом слоте монтажной рамы. Подключение к шине контроллера осуществляется через U-образный шинный соединитель, входящий в комплект.

Охлаждение осуществляется естественным способом, без применения вентиляторов или буферных батарей. Возможна замена модуля без необходимости повторной настройки параметров связи.

Коммуникационный модуль CM 1542-1 (рисунок) выполнен в компактном пластиковом корпусе, совместимом с форматами модулей S7-1500, и обладает следующими характеристиками:

Оснащён встроенным двухпортовым коммутатором Industrial Ethernet с двумя разъёмами RJ45 для подключения к сети PROFINET, обеспечивающей скорость передачи данных 10/100 Мбит/с в полнодуплексном или полудуплексном режиме. Автоматическое определение скорости соединения и автоматическая настройка параметров передачи данных. Поддержка функции авто-MDI/MDIX (автоматическая кроссировка проводов).

Возможность подключения с помощью разъёма IE FC RJ45 Plug 180 с осевым кабельным выводом или через стандартный патч-корд. Питание подаётся через системную шину контроллера.

Оснащён светодиодами диагностики, отображающими текущее состояние модуля, наличие ошибок и питание, а также двумя индикаторами активности сетевых интерфейсов (LINK/ACTIVITY), расположенными за защитной дверцей.

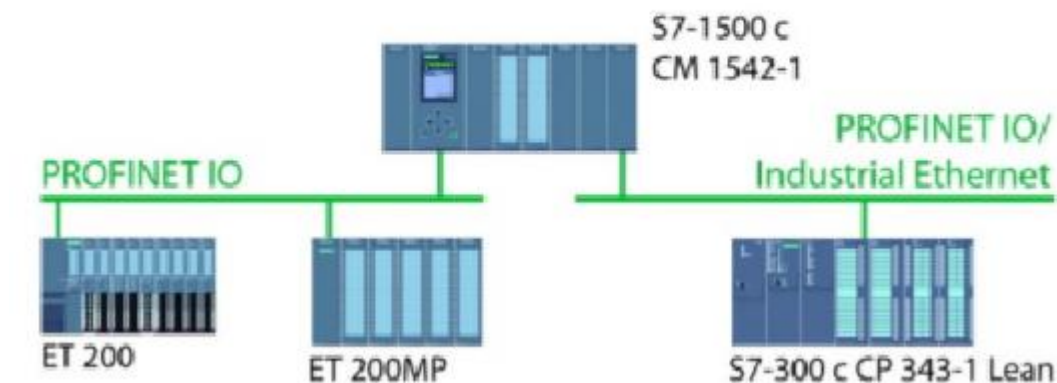


Рисунок 11 – Коммуникационные модели

Устанавливается на стандартную DIN-рейку системы S7-1500 с фиксацией в рабочем положении с помощью встроенного винта.

Допускается установка в любой слот монтажной рамы. Подключается к системной шине через U-образный шинный соединитель, входящий в комплект поставки.

Обеспечивает пассивное (естественное) охлаждение, не требует использования буферных батарей.

Возможна замена модуля без необходимости повторной настройки сетевых параметров.

#### **4.6 Ведущий модуль PROFIBUS DP**

Коммуникационный процессор CP 1542-5 функционирует в режиме ведущего устройства DP-V1, обрабатывая задачи передачи данных автономно и обеспечивая подключение до 32 ведомых устройств по сети PROFIBUS DP. В качестве ведомых устройств могут использоваться, например, контроллеры S7-1200 с модулями CM 1242-5, станции ET 200 и другие совместимые устройства.

В режиме DP-V1 Master, процессор CP 1542-5 поддерживает как циклический, так и асинхронный обмен данными, включая обработку аварийных сообщений. Также реализованы функции SYNC, FREEZE и поддержка заданного временного цикла шины.

Процессор может активировать и деактивировать ведомые устройства в процессе эксплуатации, что значительно упрощает пошаговый ввод в эксплуатацию системы.

CP 1542-5 эффективно взаимодействует с диагностическими повторителями PROFIBUS DP, включая возможность идентификации топологии в повторителе. Такие повторители обеспечивают мониторинг состояния линий связи в режиме реального времени, выявляют ошибки и предоставляют детализированные сведения о повреждениях.

По части настройки и программирования CP 1542-5 аналогичен встроенным интерфейсам PROFIBUS в контроллерах S7-1500. В распределённых системах ввода-вывода он обеспечивает минимальные времена отклика.

Функции PG/OP позволяют выполнять удалённое программирование и обслуживание всех подключённых по сети S7-станций. Благодаря S7-маршрутизации возможна межсетевой передача данных, обеспечивающая доступ ко всем станциям S7 через сети, обслуживаемые контроллерами SIMATIC S7.

Связь по S7-протоколу функции S7-коммуникации позволяют организовать обмен данными:

- с программаторами и инженерными станциями (PG/OP),
- с панелями оператора и интерфейсными устройствами (OP).

#### Синхронизация времени

Процессор CP 1542-5 обеспечивает синхронизацию времени по всей сети предприятия. Он может передавать текущее время с центрального процессора S7-1500 в сеть PROFIBUS, делая его доступным для других устройств. Поддерживается:

- передача текущего времени;
- автоматический переход между зимним и летним временем;
- синхронизация времени по сети.

С помощью STEP 7 Professional (TIA Portal) начиная с версии V12 SP1, доступны расширенные диагностические функции:

- отображение текущего состояния коммуникационного процессора;
- общее диагностическое состояние и статистика;
- диагностика активных соединений;
- анализ статистики работы сети;
- буфер аварийных сообщений;
- поддержка взаимодействия с диагностирующими повторителями PROFIBUS.

Для настройки всех функций CP 1542-5 требуется использование пакета STEP 7 Professional (TIA Portal) версии V12 SP1 или выше.

Конфигурационные параметры коммуникационного процессора сохраняются во внутренней памяти центрального процессора, что обеспечивает возможность быстрой замены неисправного модуля без необходимости повторной настройки коммуникационной системы.

При установке нового модуля все необходимые параметры конфигурации автоматически загружаются из центрального процессора, обеспечивая его готовность к работе.

Кроме того, конфигурирование и программирование всех сетевых устройств SIMATIC S7 возможно выполнять удалённо по сети, что облегчает обслуживание и модернизацию системы.

## 5 Построение математических моделей

### 5.1 Расчеты моделей датчиков

Передающая функция датчика положения:

$$W_D(p) = \frac{k}{(T_p + 1)} \quad (1)$$

Коэффициент передачи датчика положения:

$$k = \frac{\Delta I}{\Delta P} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{0,6} = 8,3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{А}}{\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}} \quad (2)$$

где  $\Delta I$  — максимальное значение выходного токового сигнала;  
 $\Delta P$  — максимальное давление.

Постоянную времени можно определить как постоянную времени мембраны, используя следующую формулу:

$$T_M = f/c \quad (3)$$

где  $f = 101 \cdot 10^{-8}$  — коэффициент вязкого трения,

$$c = \frac{2 \cdot E \cdot h^3 \cdot (1 + \alpha)(3 + \alpha)}{3 \cdot (1 - \frac{\kappa^2}{2}) \cdot R^4 \cdot [1 - ((\frac{\alpha + 1}{\alpha - 1}) \cdot \rho)]} \quad (4)$$

Жесткость мембраны определяется следующими параметрами:

$R = 30$  мм — рабочий радиус мембраны,

$h = 0,35$  мм — толщина мембраны,

$E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па — модуль упругости материала,

$r = 0,2$  — относительный радиус жесткого центра,

$\alpha = 3,64$  — коэффициент формы.

Передающая функция датчика:

$$W_D(p) = \frac{k}{(T_p + 1)} = \frac{8,3 \cdot 10^{-3}}{(4,3 \cdot 10^{-12}p + 1)} \quad (5)$$

Описание электронного усилителя дифференциальным уравнением:

$$T \frac{dU_2}{dt} + U_2 = \kappa_2 U_1 \quad (6)$$

Двигатель:

Выбираем двигатель ДАУ-25.

Таблица 10 – Характеристики двигателя ДАУ-25

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| Мощность двигателя      | 25Вт  |
| Напряжение питания      | 220В  |
| Момент нагрузки на валу | 40Н*м |
| Число полюсов           | 12    |

Передаточная функция двигателя:

$$W_{дв}(p) = \frac{k}{p(Tp+1)}, \quad (7)$$

$$k = 0,14 \frac{N_{дв} \cdot n}{M_H} = 1,05, \quad (8)$$

$$T = 3,3 \frac{N_{дв}}{n \cdot U_{П}} = 0,031 \quad (9)$$

Передаточная функция исполнительного механизма:

$$W_{им}(p) = \frac{5,04 \cdot 10^{-3}}{p(0,031p+1)} \quad (10)$$

Передаточная функция объекта управления:

$$W_{op} = 2/((61p + 1)) \quad (11)$$

## 5.2 Анализ системы

Анализ системы регулирования обычно включает оценку ее эффективности, стабильности и способности поддерживать желаемые цели или уровни.

### 5.2.1 Расчет системы на устойчивость

Передаточная характеристика разомкнутой системы:

$$W_p(p) = \frac{0,445}{p \cdot (0,031p+1)(61p+1)} \quad (12)$$

Передаточная характеристика замкнутой системы:

$$W_3(p) = \frac{0,445 \cdot (43p + 10^{13})}{(2,62 \cdot 10^3 p^3 + 6,1 \cdot 10^{14} p^2 + 10^{13} p + 3,69 \cdot 10^{12})} \quad (13)$$

Подставим вместо  $p$   $jw$ :

$$W_3(p) = \frac{0,445j \cdot (43jw + 10^{13})}{(2,62 \cdot 10^3 w^3 + 6,1 \cdot 10^{14} jw^2 + 10^{13} w + 3,69 \cdot 10^{12} j)} \quad (14)$$

Построим годограф Найквиста: Он представляет собой графическое отображение частотной характеристики системы на комплексной плоскости и применяется для оценки её устойчивости. Поскольку точка  $(-1, j0)$  не попадает в область, охватываемую годографом, можно сделать вывод, что система устойчива. Под устойчивостью системы понимается её способность сохранять корректную работу и стабильное поведение при воздействии внешних возмущений, изменений параметров или шумов. Это ключевая характеристика, обеспечивающая надёжность функционирования системы в различных условиях.

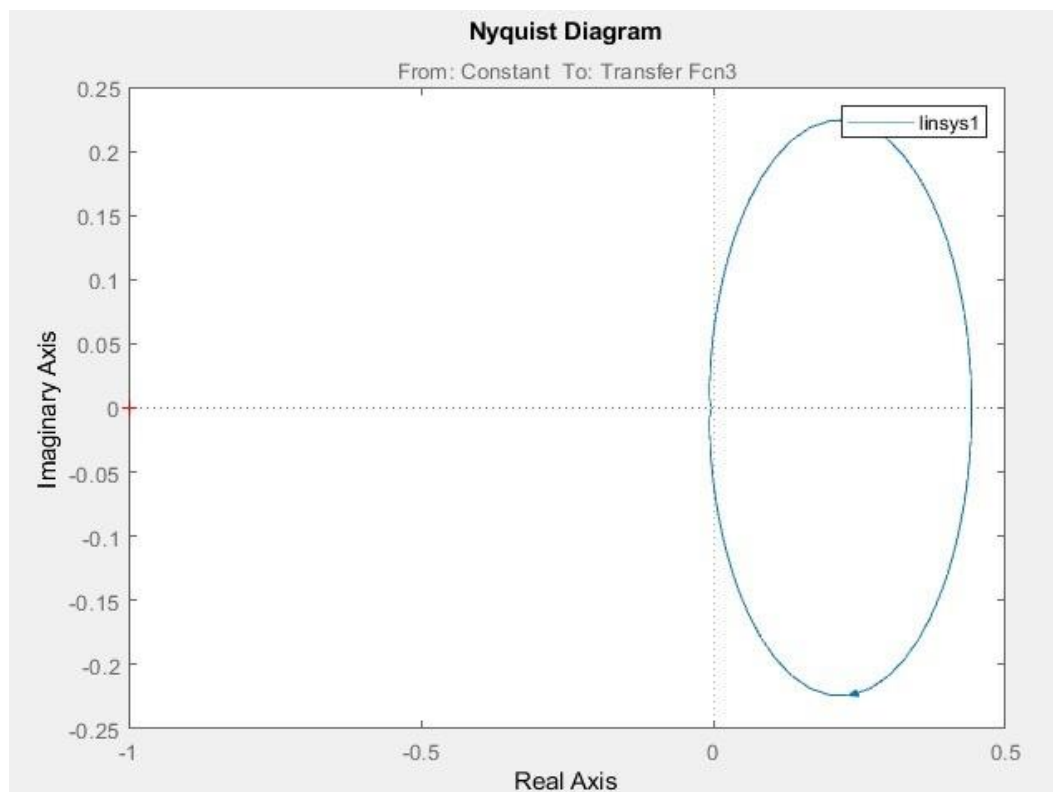


Рисунок 12 – Годограф Найквиста

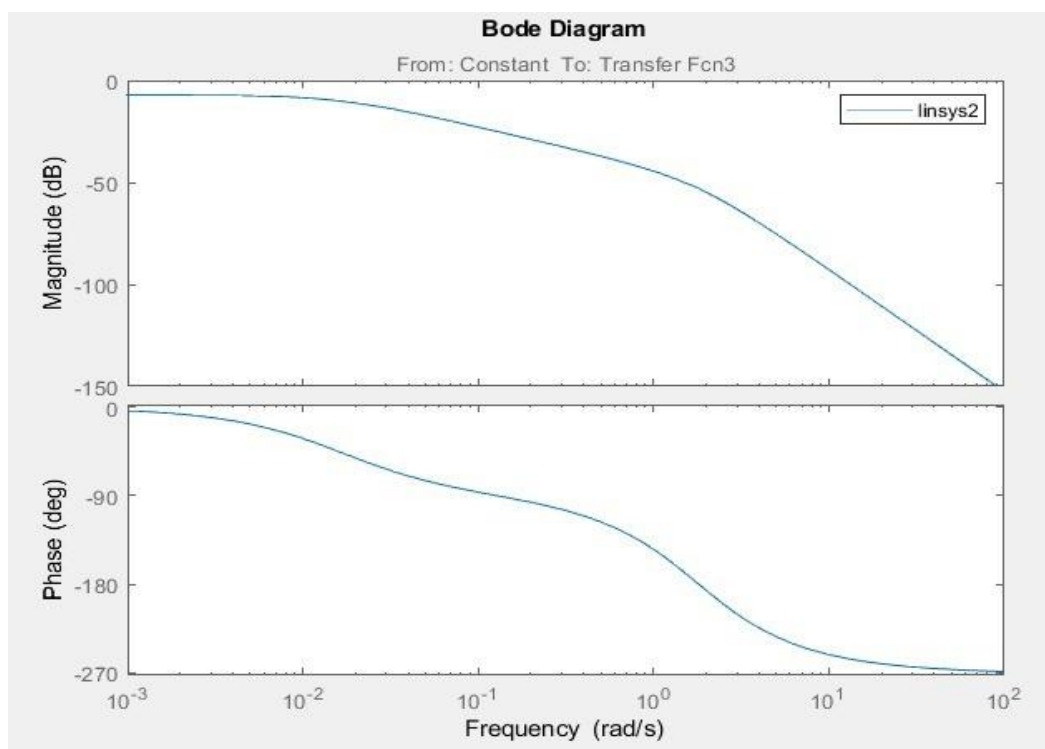


Рисунок 13 – ЛАЧХ и ФЧХ разомкнутой системы

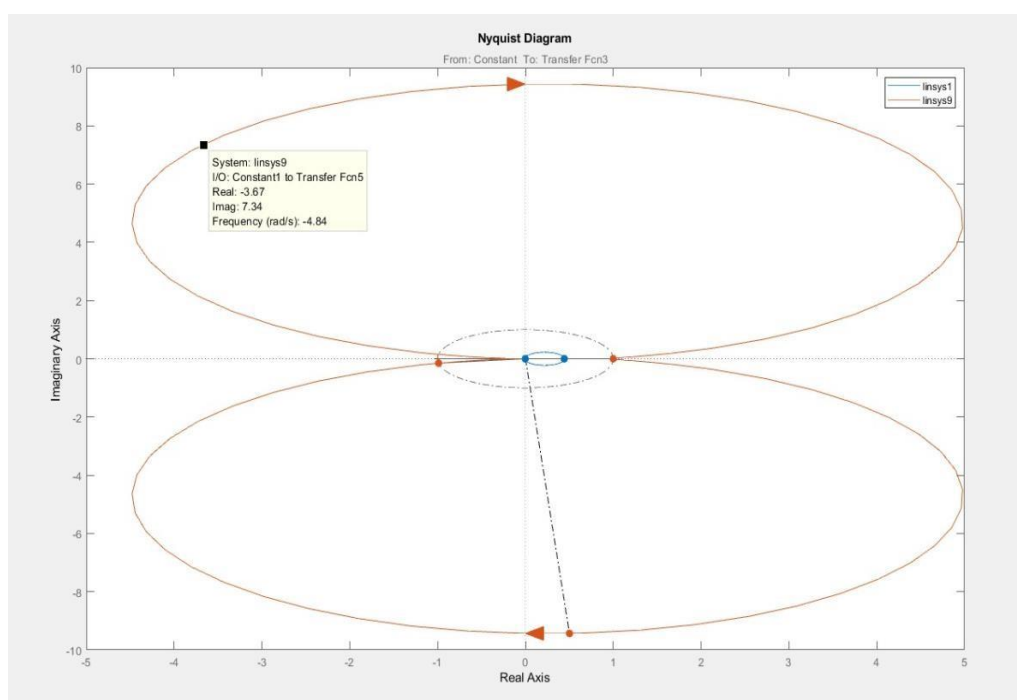


Рисунок 14 – Годограф Найквиста разомкнутой системы

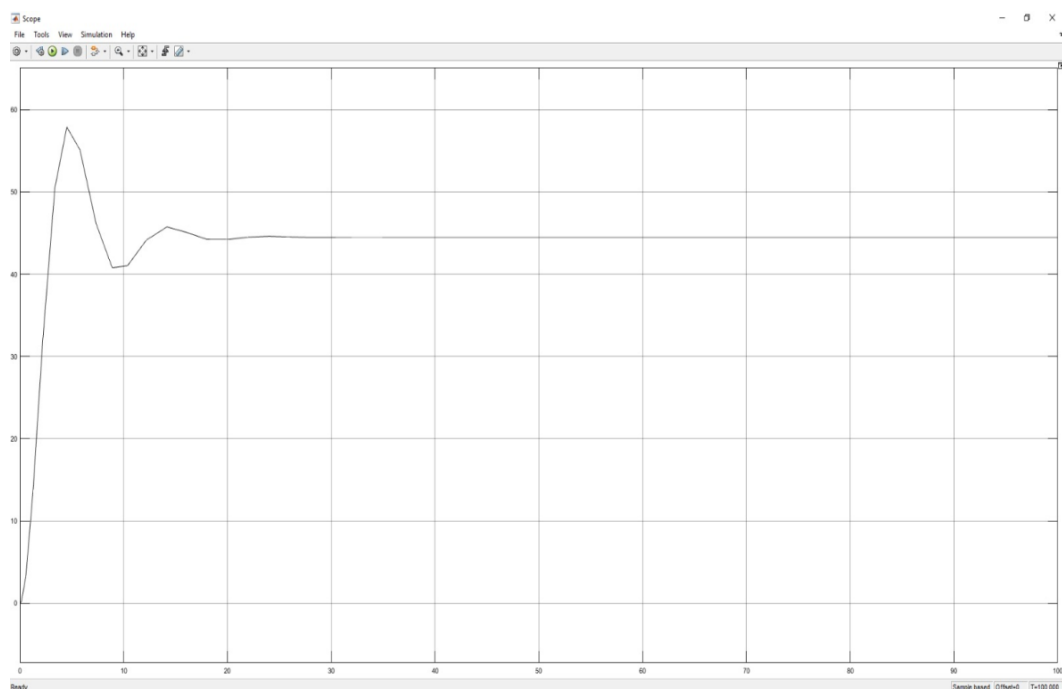


Рисунок 15 – Переходной процесс скорректированного устройства

## 6 НАПИСАНИЕ ЛОГИКИ НА SIMATIC STEP 7

В данной работе была реализована логическая часть системы гравитационного обогащения, охватывающая этапы от выгрузки руды из бункера-дозатора до стадии промывки.

На рисунке 16 представлено окно симулятора, в котором осуществляется задание управляющих сигналов для различных контактов. В процессе моделирования используются входные биты с адресами от 124 до 127, которые соответствуют таким элементам, как концевые выключатели, клапаны, системы сигнализации, элементы контроля, люк и другие датчики.

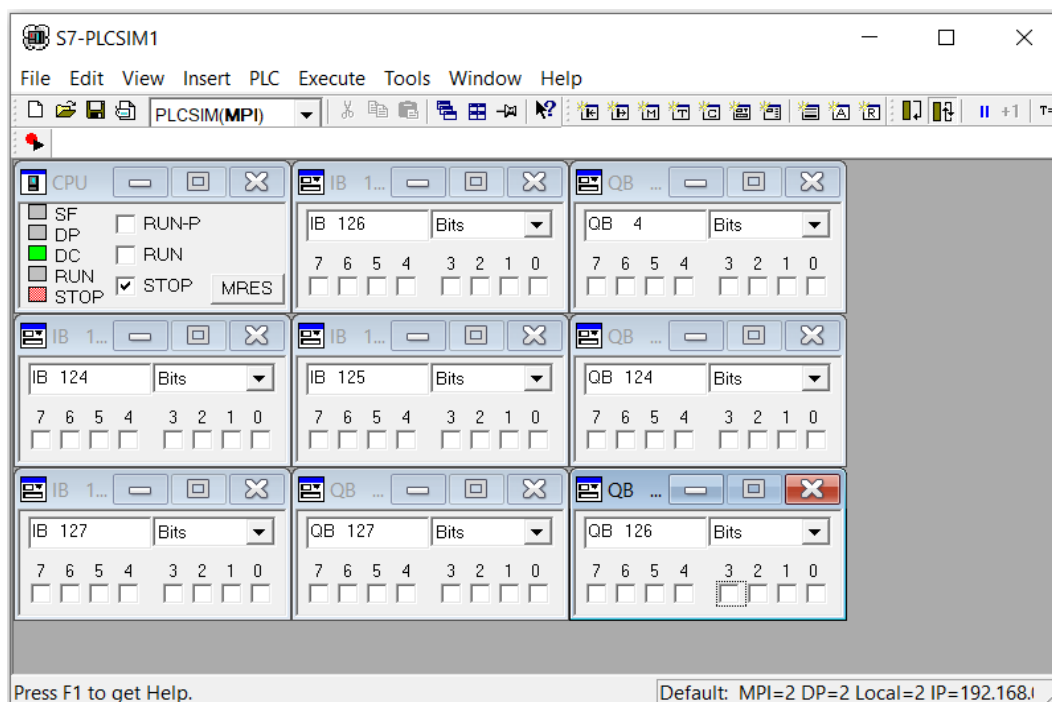


Рисунок 16 – Окно запуска симулятора

Это устройство позволяет задавать различные режимы работы оборудования, отключать от электропитания отдельные компоненты системы, управлять освещением и отслеживать положение определённых объектов.

Концевые выключатели различных типов могут выполнять следующие функции:

- обнаружение присутствия объектов;
- подсчёт количества проходящих предметов;
- определение зоны перемещения объекта;
- отключение оборудования для его защиты;
- контроль достижения крайних положений при перемещении.

Если подвижные элементы оборудования имеют ограниченный диапазон перемещения, необходимо реализовать функцию автоматического отключения привода при достижении граничных позиций. Для этого концевой выключатель размещается таким образом, чтобы движущийся элемент обязательно взаимодействовал с его исполнительным механизмом в момент достижения заданного положения. В результате срабатывания выключателя происходит отключение двигателя и остановка движения (рисунок 17).

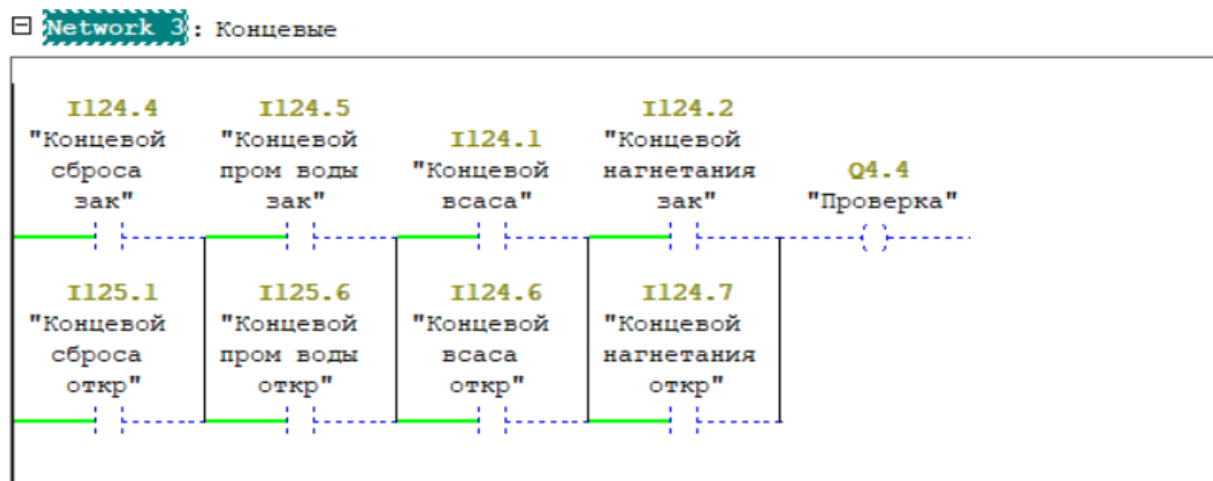


Рисунок 17 – Концевые датчики, когда сигнал к ним не поступает

Для подключения концевого выключателя (см. рисунок 8) необходимо определить точку контакта и установить датчик таким образом, чтобы его срабатывание происходило строго в заданной позиции. Положение датчика при монтаже можно корректировать — это позволяет точно настроить момент срабатывания за счёт смещения через крепёжные отверстия или выбора другого места установки. Кроме того, при наличии соответствующей конструкции можно дополнительно отрегулировать чувствительность срабатывания, изменяя положение или форму рычага.

Срабатывание концевого выключателя отличается высокой точностью: при сравнении с размерами объектов и пройденными ими расстояниями, допуск составляет лишь доли процента. Зона перехода от отсутствия контакта к его наличию измеряется в долях миллиметра — зачастую в пределах 0,5 мм, 0,2 мм и даже меньше.

Такой уровень чувствительности позволяет точно определять положение контролируемых элементов. Дополнительным преимуществом является возможность настройки чувствительности и характера срабатывания посредством выбора различных типов актуаторов (исполнительных элементов) в конструкции выключателя.

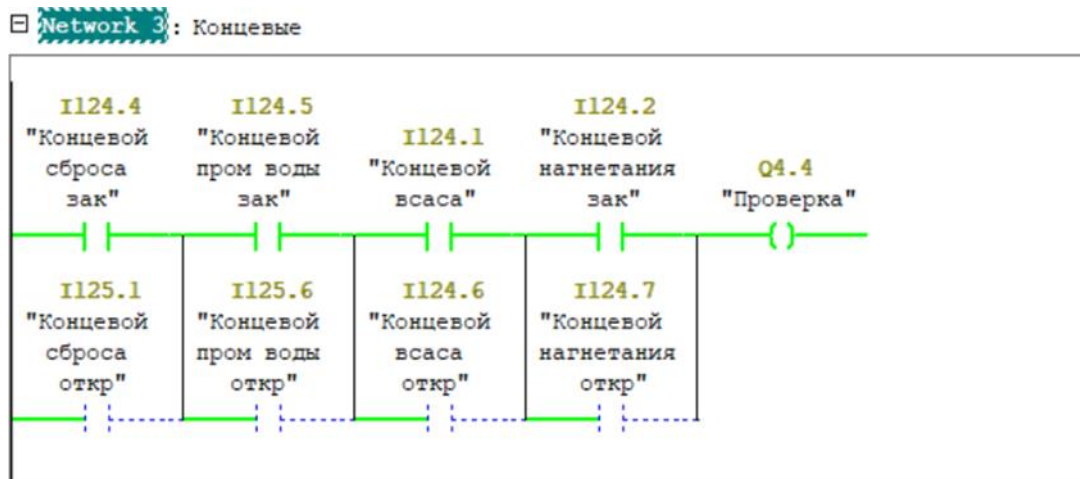


Рисунок 18 – Концевые датчики при закрытых клапанах

Перед началом работы необходимо убедиться в исправности клапанов, поскольку именно через них осуществляется подача воды для промывки. На рисунке 9 показан процесс проверки, в ходе которого подтверждается работоспособность клапанов.

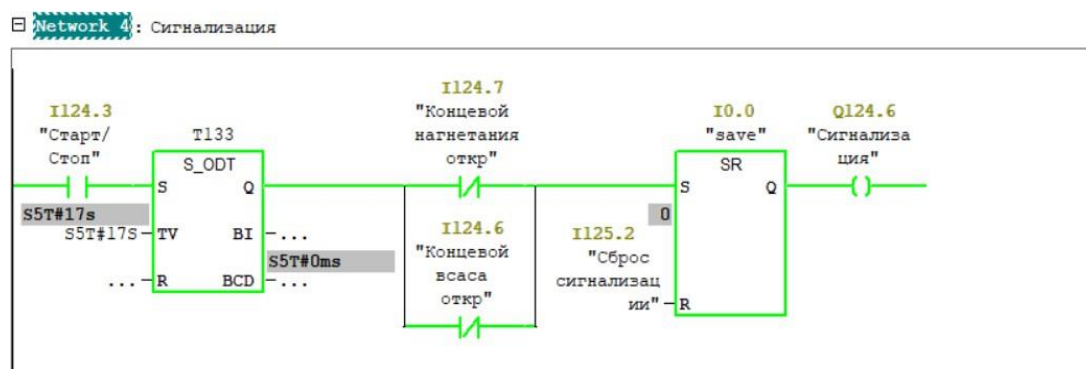


Рисунок 19 – Открывание клапанов всаса и нагнетания

Основное назначение всасывающего клапана (рисунок 19) заключается в его автоматическом открытии для создания и поддержания стабильного давления, а также в автоматическом закрытии для предотвращения обратного потока при остановке насоса. Помимо этого, клапан выполняет дополнительную, часто недооцениваемую функцию — способствует снижению энергопотребления. Также он играет важную роль в защите насосной системы и трубопровода от резких скачков давления, возникающих, например, при внезапном закрытии потока.

Проектировщики насосных станций нередко сталкиваются с проблемой резкого закрытия клапана, вызванного обратным током. Чтобы избежать подобных ситуаций, клапан должен иметь механизм быстрого или регулируемого замедленного закрытия, например, с применением демпфирующих устройств, таких как гидравлический амортизатор.

Клапан сброса (рисунок 11) используется для отвода использованной воды после промывки. Он также выполняет функцию предохранительного устройства, открывающегося при превышении установленного предела давления. Клапан работает за счет энергии рабочей среды: при достижении установленного значения давления ( $P_{nr}$ ) он автоматически сбрасывает избыточную среду в отводящий трубопровод.

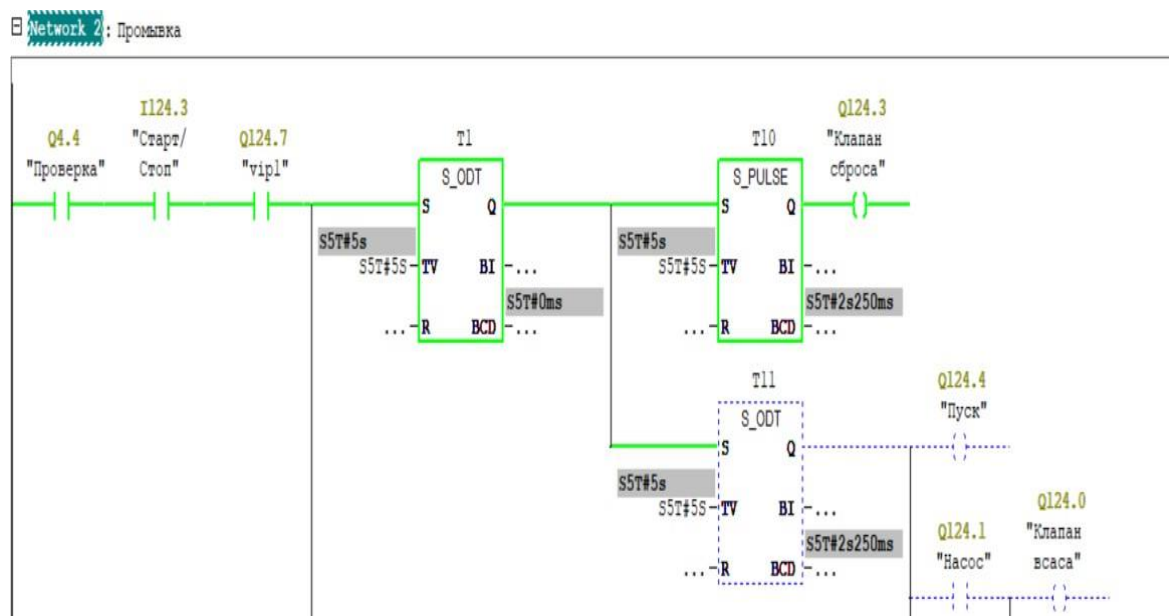


Рисунок 20 – Работа клапана сброса

Промывочный клапан (рисунок 20) предназначен для взмучивания осадка, предотвращая его накопление на дне приёмного резервуара, а также образование плавающей корки. Регулярное использование промывки способствует поддержанию чистоты в резервуаре и насыщению сточных вод кислородом, что, в свою очередь, снижает интенсивность неприятных запахов на насосной станции.

Применение промывочного клапана значительно уменьшает затраты на техническое обслуживание резервуара. Его работа осуществляется исключительно за счёт давления, создаваемого насосом, и не требует подключения к электросети или использования дополнительного электронного оборудования.

При включении насоса (рисунок 23) и начале перекачивания жидкости клапан находится в открытом состоянии. Вода, проходя через клапан, формирует мощную промывочную струю, которая создаёт зону пониженного давления в расположенной за ним камере. В течение нескольких секунд давление поднимает мембрану, перемещая шар вверх — ближе к выходному отверстию. Этот процесс можно регулировать, изменяя скорость перетекания масла из верхней камеры в нижнюю, под мембраной.

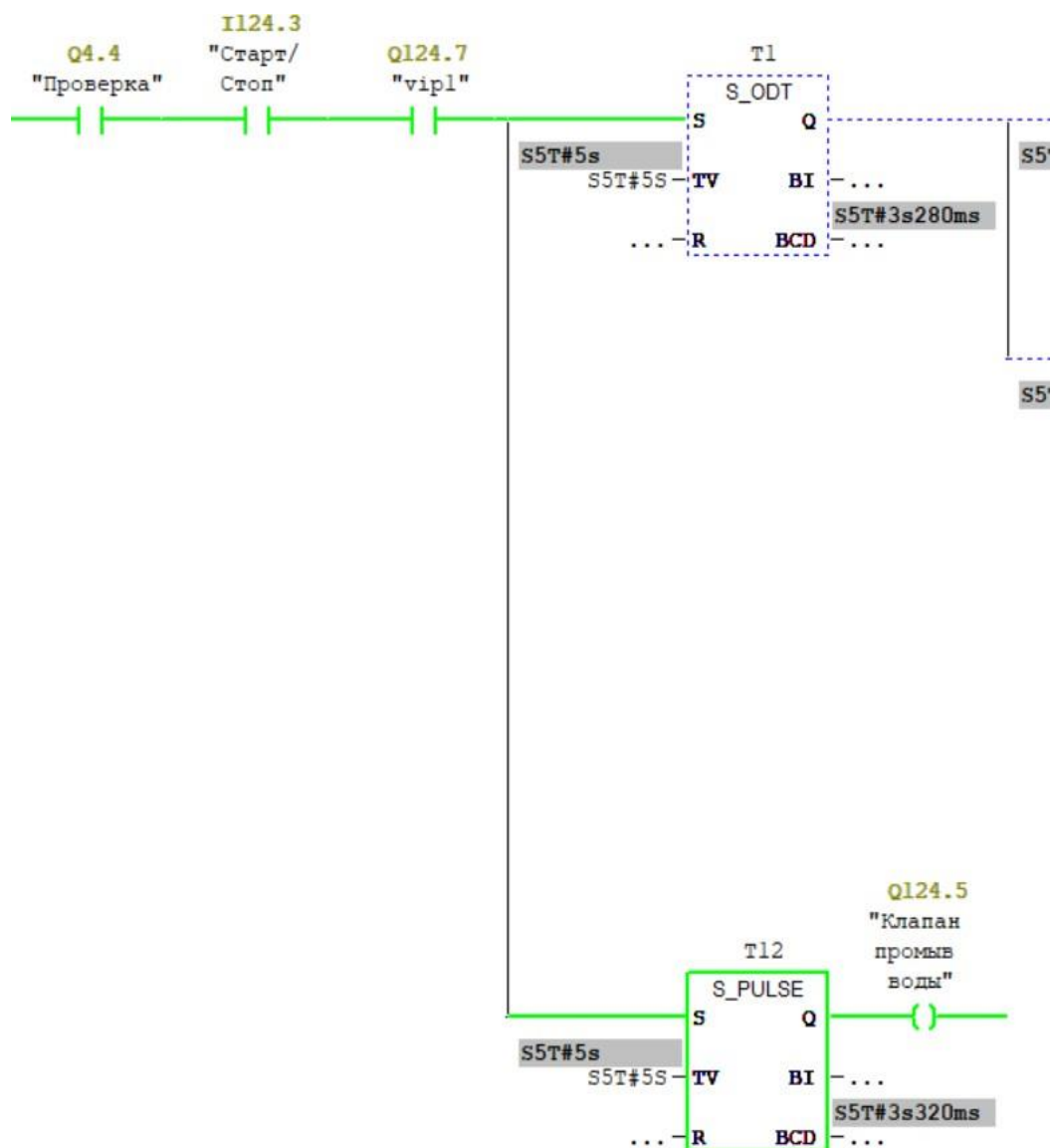


Рисунок 21 – Работа клапана промывочной воды

Как только шар достигает необходимой высоты, поток воды прижимает его к выходу, перекрывая канал и закрывая клапан. С этого момента насос начинает работать в режиме подачи в трубопровод. Повышенное давление воздействует на мембрану, возвращая её в исходное положение. После остановки насоса шар опускается в нижнюю камеру, клапан снова открывается

и готов к следующему циклу работы.

Network 4: Сигнализация



Рисунок 22 – Сброс сигнализации

Network 1: Насос

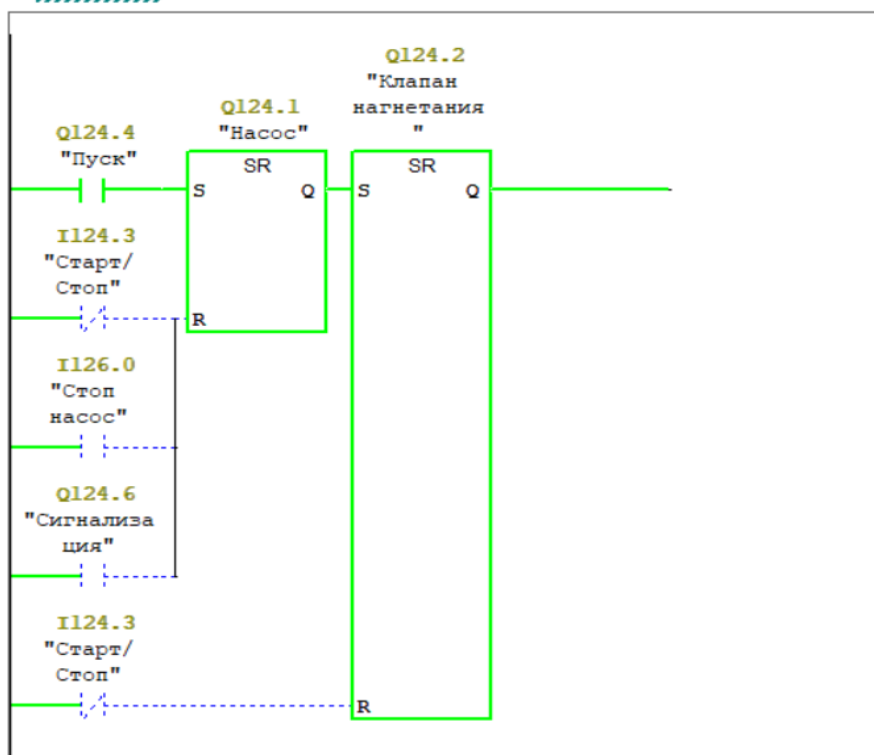


Рисунок 23 – Включение насоса

При включении насоса открываются клапаны всаса и нагнетания и по трубам идет промывочная вода.

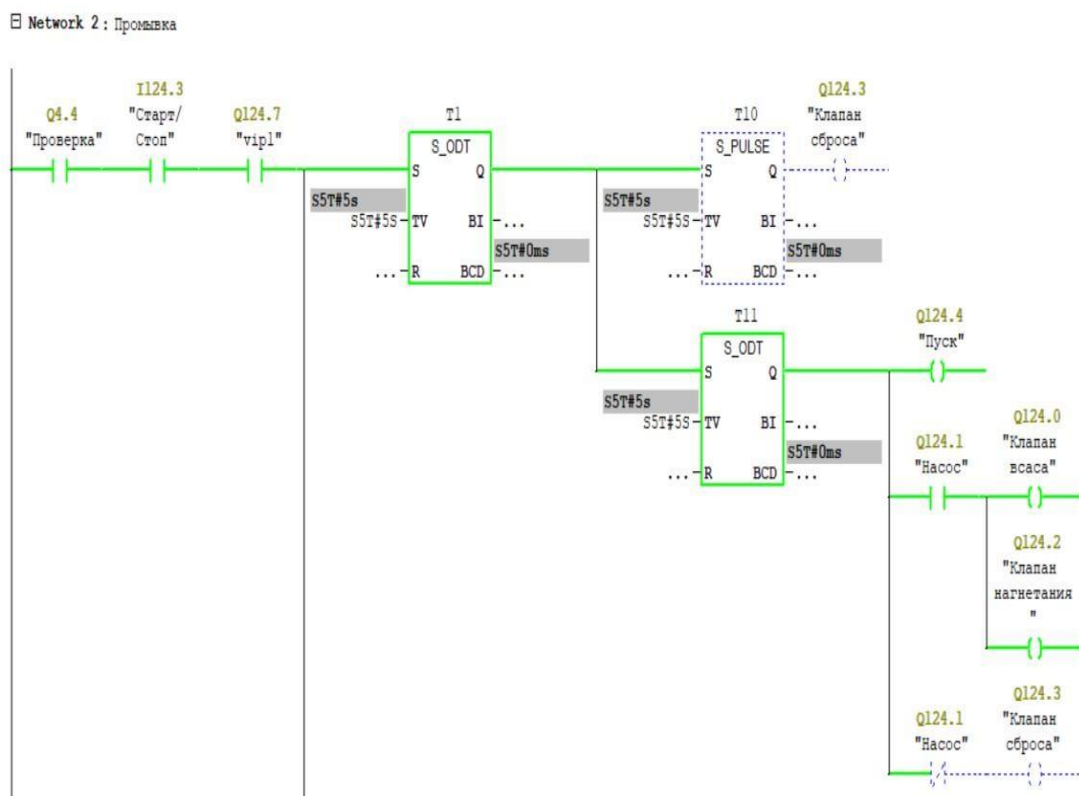


Рисунок 24 – Открытие клапанов всаса и нагнетания



Рисунок 25 – Оценка от датчиков уровня

Принцип действия датчика уровня (рисунок 25) основан на законе Архимеда, согласно которому на всякое тело, погружённое в жидкость, действует выталкивающая сила. При установке датчика в резервуар, поплавков контактирует с поверхностью жидкости и под действием выталкивающей силы поднимается. Его положение изменяется в зависимости от уровня жидкости, позволяя точно отслеживать высоту её столба.

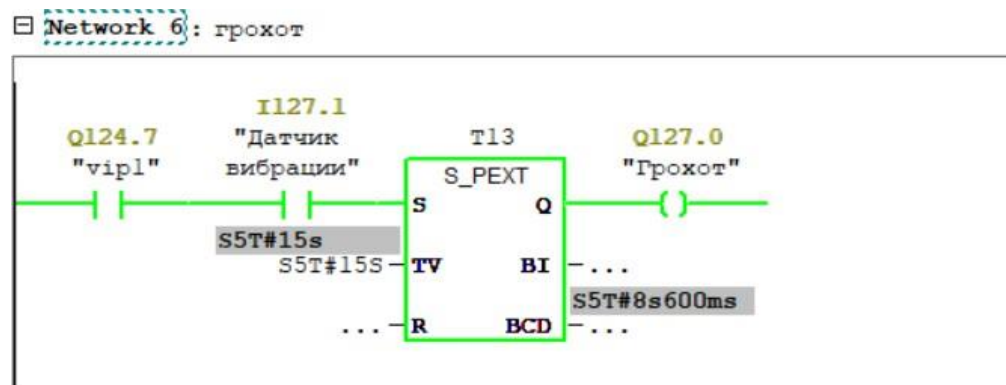


Рисунок 26 – Логика грохота

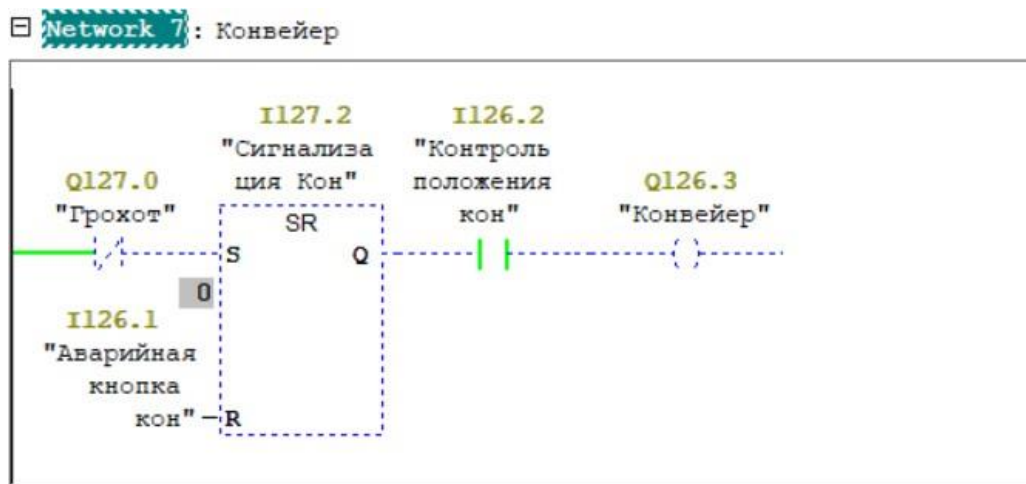


Рисунок 27 – Конвейер при выключенном состоянии

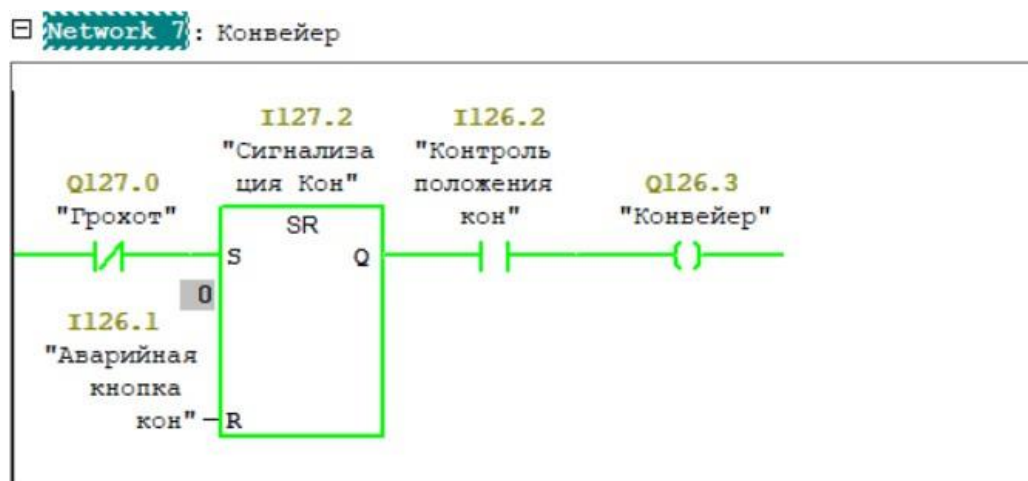


Рисунок 28 – Логика работы конвейера

Network 8: Бункер-дозатор

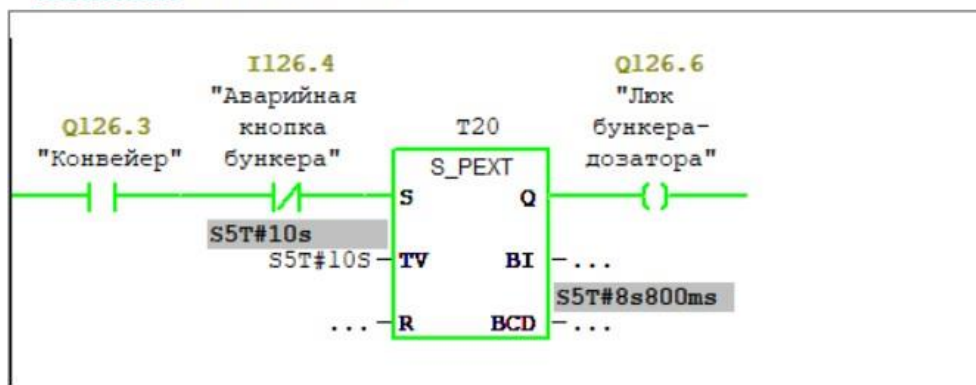


Рисунок 29 – Открытие люка бункера-дозатора

Network 8: Бункер-дозатор

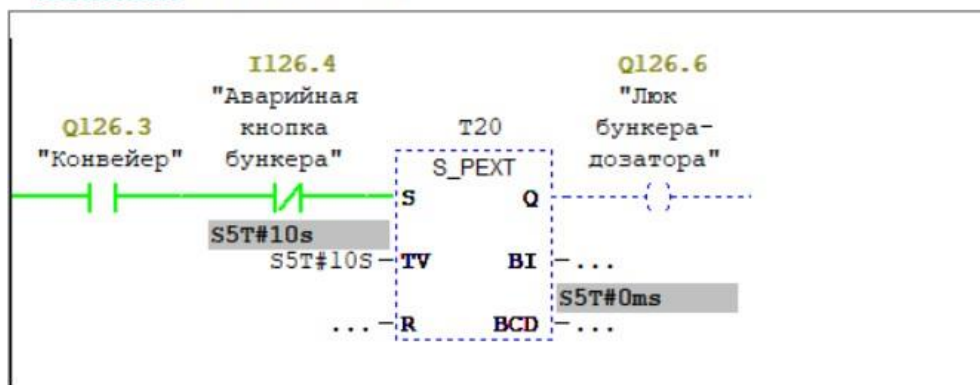


Рисунок 30 – Закрытие люка бункера-дозатора

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном дипломном проекте была разработана система автоматического управления участком обогащения хромовой руды тонких и мелких классов с применением ПЛК. Осуществлен выбор соответствующих компонентов системы, а также расчет их передаточных функций. Проведена проверка устойчивости системы и внесены корректировки с использованием последовательного корректирующего устройства для оптимизации работы и усиления мощности сигнала. Оценка показателей качества показала, что система не требует дополнительной коррекции, так как рассчитанные параметры удовлетворяют необходимым условиям. Также была разработана логика работы на Simatic Step 7, с помощью данной дипломной можно всю технологию обогащения. В работе также представлен список использованной литературы. В ходе проведенного исследования была разработана и проанализирована автоматизированная система гравитационного обогащения хромовой руды, учитывающая особенности технологического процесса, современные средства автоматизации и критерии эффективности переработки минерального сырья.

На основании обзора технологических решений и теоретических положений по гравитационным методам обогащения был выбран наиболее подходящий способ для переработки хромосодержащих руд с учетом их физико-механических свойств. Особое внимание уделено этапу промывки и классификации, а также управлению работой сепараторов и концентрационных столов.

В рамках работы была разработана логическая модель системы управления, реализованная в среде TIA Portal с использованием контроллеров Siemens S7-1500, а также создана визуализация процессов с помощью SCADA-средств. Проведено моделирование основных процессов в среде Simulink, что позволило оценить влияние различных параметров на эффективность обогащения и устойчивость системы управления.

Экспериментальные данные подтвердили работоспособность предложенной схемы автоматизации. Система показала высокую точность дозирования, стабильность регулирования потоков материала и воды, а также способность к диагностике состояния оборудования, что повышает надежность эксплуатации обогатительного узла.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации обогатительных фабрик, перерабатывающих хромовые руды, а также при внедрении цифровых решений на горнорудных предприятиях. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются интеграция интеллектуальных алгоритмов управления, применение машинного зрения и анализ данных в реальном времени для повышения эффективности обогащения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Волков С. М. Технология обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 2016. – 328 с.
- 2 Брылин А. И. Гравитационные методы обогащения руд. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 256 с.
- 3 Кузнецов А. Н. Обогащение полезных ископаемых: учебник. – М.: Академия, 2018. – 400 с.
- 4 Мищенко Л. Н. Основы обогащения руд: гравитационные, магнитные и флотационные методы. – М.: ИКЦ Академкнига, 2014. – 342 с.
- 5 Коровин А. Н., Плотников И. Н. Хромовые руды: геология, разработка и обогащение. – СПб.: ГИРД, 2017. – 214 с.
- 6 Коротеев В. В. Автоматизация технологических процессов в горной промышленности. – М.: Горная книга, 2015. – 288 с.
- 7 Пивоваров А. В. Системы автоматического управления технологическими процессами. – М.: Академия, 2019. – 336 с.
- 8 Емельянов С. В. Теория автоматического управления. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2020. – 416 с.
- 9 Семенов Н. М. SCADA-системы в автоматизации промышленных объектов. – СПб.: Питер, 2018. – 320 с.
- 10 Мартынов С. А. Автоматизация обогатительных фабрик. – М.: Недра, 2016. – 268 с.

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Дүзбай Нұрдәулет Булатұлы

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Магистерская диссертация

**Название работы:** Исследование автоматизированной системы управления метода гравитационного обогащения хромовой руды

**Научный руководитель:** Бахыт Муханов

**Коэффициент Подобия 1:** 3.6

**Коэффициент Подобия 2:** 3.3

**Микропробелы:** 0

**Знаки из других алфавитов:** 271

**Интервалы:** 28

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

☐ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

*Дата*



проверяющий эксперт

## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Дүзбай Нұрдәулет Булатұлы

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Магистерская диссертация

**Название работы:** Исследование автоматизированной системы управления метода гравитационного обогащения хромовой руды

**Научный руководитель:** Бахыт Муханов

**Коэффициент Подобия 1:** 3.6

**Коэффициент Подобия 2:** 3.3

**Микропробелы:** 0

**Знаки из других алфавитов:** 271

**Интервалы:** 28

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

- ☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- ☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- ☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- ☐ Обоснование:

Дата



Заведующий кафедрой

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті  
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

**Автор: Дүзбай Нұрдәулет Булатұлы**

**Тақырыбы: Исследование автоматизированной системы управления метода  
гравитационного обогащения хромовой руды**

**Жетекшісі: Бахыт Муханов**

**1-ұқсастық коэффициенті (30): 3.6**

**2-ұқсастық коэффициенті (5): 3.3**

**Дәйексөз (35): 0.2**

**Әріптерді ауыстыру: 271**

**Аралықтар: 28**

**Шағын кеңістіктер: 0**

**Ақ белгілер: 0**

**Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :**

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

**Негіздеме:**

*Күні*



*Кафедра меңгерушісі*

## ОТЗЫВ

### НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ на магистерскую диссертацию Дүзбай Нұрдәулет Булатұлы

на тему: *«Исследование автоматизированной системы управления  
метода гравитационного обогащения хромовой руды»*

Магистерская диссертация Дүзбай Нұрдәулет Булатұлы посвящена исследованию автоматизированной системы управления методом гравитационного обогащения хромовой руды. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения эффективности и надёжности управления технологическими процессами в горно-обогатительной промышленности, особенно при работе с минеральным сырьём, требующим комплексной переработки.

В первой главе автором обосновано выбранное направление исследований, приведён анализ современных методов переработки хромовых руд, включая гравитационные и гидрометаллургические технологии. Вторая глава содержит физико-химический анализ хвостов обогащения, что позволило сформулировать пути их рационального использования.

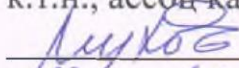
В третьей главе представлена практическая часть работы, включающая разработку технологии получения хромитового концентрата с применением гравитационного обогащения и предварительной химической активации. Автором также проведены термодинамические расчёты и предложена модель алгоритма цифрового регулирования, обеспечивающего адаптивное управление процессом.

Магистрант проявил высокий уровень самостоятельности, инициативности и владения как теоретическими знаниями, так и прикладными инструментами в области автоматизированных систем управления. Все поставленные задачи решены, структура работы логична, оформление выполнено в соответствии с установленными требованиями.

Считаю, что магистерская диссертация Дүзбай Нұрдәулет Булатұлы соответствует требованиям, предъявляемым к выпускным квалификационным работам по образовательной программе 7М07101 – *Автоматизация и роботизация*, и её автор достоин присуждения степени магистра технических наук.

**Научный руководитель**

к.т.н., асс-т кафедры «Автоматизация и управление»

 Муханов Б.К.

«19» 06 2025 г.

## РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию  
Дүзбай Нұрдәулет Булатұлы  
7M07101 – Автоматизация и роботизация

На тему: Исследование автоматизированной системы управления метода гравитационного обогащения хромовой руды

Выполнено:

- а) презентация на 23 слайдах
- б) пояснительная записка на 58 страницах

## ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Магистерская диссертация посвящена актуальной задаче автоматизации процессов в горнорудной отрасли, в частности, обогащению хромосодержащих руд гравитационными методами. Работа включает в себя исследование, разработку и моделирование автоматизированной системы, а также внедрение современных средств измерения, управления и визуализации.

В первой части диссертации представлен обзор существующих методов гравитационного обогащения, рассмотрены особенности физико-химических свойств хромовой руды и применяемые обогатительные технологии. Выделены преимущества винтовых сепараторов и концентрационных столов в контексте переработки бедных руд.

Во втором разделе автором разработана структурная схема автоматизации, произведен выбор датчиков и оборудования, в частности контроллера Siemens S7-1500 и сигнальных модулей для интеграции с объектом управления. Осуществлена логическая разработка системы в среде TIA Portal, реализован алгоритм управления, а также смоделирована работа отдельных компонентов системы.

В третьем разделе представлены результаты моделирования в среде MATLAB/Simulink, а также разработана SCADA-визуализация. Обоснован выбор параметров регулирования, выполнен расчет показателей устойчивости и эффективности, что подтверждает корректность построенной модели.

Особенностью данной работы является комплексный подход: от анализа исходного сырья и оборудования до реализации цифрового двойника системы. Проведенная работа демонстрирует высокий уровень подготовки автора, владение современными инструментами автоматизации и прикладного моделирования.

Графическая и текстовая часть оформлена в соответствии с требованиями ГОСТ, все схемы, таблицы и иллюстрации логично встроены в структуру работы

## Оценка работы

Учитывая вышеизложенное, считаю, что магистерская диссертация заслуживает оценки « 80 » ( \_\_\_\_\_ ), а магистрант Дүзбай Нұрдәулет Булатұлы присвоения академической степени магистра технических наук по специальности 7M07101 – Автоматизация и роботизация.

### Рецензент

Доктор PhD \_\_\_\_\_  
Кафедры «Автоматизация и управление»  
Алматынского университета энергетики и  
связи

Оракбаев Е.Ж.

« 20 » \_\_\_\_\_ 2025 г.

## ЕҢБЕКТЕР ЖИНАҒЫ

Халықаралық ғылыми-тәжірибелік конференциясының  
«ТАУ-КЕН МЕТАЛЛУРГИЯ САЛАСЫНДАҒЫ ТҰРАҚТЫ ДАМУ  
ЖӘНЕ ЗАМАНАУИ КЕШЕНДІ, РЕСУРСТАРДЫ ҮНЕМДЕЙТІН  
ЖӘНЕ ЭНЕРГИЯ СЫЙЫМДЫЛЫҚТЫ ТЕХНОЛОГИЯЛАР»

22 қараша 2024 жылғы, Алматы

## СБОРНИК ТРУДОВ

Международной научно-практической конференции  
«УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ,  
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ И ЭНЕРГОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ»

22 ноября 2024 года, Алматы

## PROCEEDINGS

International Scientific and Practical Conference  
« SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND MODERN INTEGRATED,  
RESOURCE-SAVING AND ENERGY-INTENSIVE TECHNOLOGIES  
IN THE MINING AND METALLURGICAL INDUSTRY »

November 22, 2024, Almaty

|                                                                                                                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Дүзбай Н.Б., Муханов Б.К. ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДА ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ ХРОМОВОЙ РУДЫ.....</b>                                             | <b>288</b> |
| <b>Кутняков Д.И., Ширяева О.И. РАЗРАБОТКА СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОТЛОАГРЕГАТАМИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНО ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ (МРС).....</b>                                      | <b>291</b> |
| <b>Жандин С.В., Ширяева О.И. РАЗРАБОТКА СИСТЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ (АДС) ПРОЦЕССАМИ НА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОМ ПРЕДПРИЯТИИ.....</b>                                          | <b>295</b> |
| <b>Кайрат А.А., Ширяева О.И. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ СЛОЖНЫХ (ММО) СИСТЕМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ.....</b>                                                     | <b>300</b> |
| <b>Свичкарь А.С., Ширяева О.И. РАЗРАБОТКА МНОГОМЕРНОЙ И МНОГОСВЯЗНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТИ.....</b>                                 | <b>303</b> |
| <b>Шукенов Ж.Е., Омирбекова Ж.Ж. ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРЕДИКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ В УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОСЕТАМИ КАЗАХСТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РС КОНТРОЛЛЕРОВ.....</b>   | <b>308</b> |
| <b>Калашев А.М., Омирбекова Ж.Ж. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ НАСТРОЙКИ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ.....</b>                                                         | <b>311</b> |
| <b>Kereibekkyzy A., Omirbekova Z.Z. DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A PREDICTIVE DIAGNOSTIC SYSTEM FOR OPTIMIZING THE MANAGEMENT OF KAZAKHSTAN'S COMBINED HEAT AND POWER PLANTS.....</b> | <b>314</b> |
| <b>Жанғали Б.Д., Жусупбеков С.С. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ ШАХТ.....</b>                                                                        | <b>317</b> |
| <b>Хожамбергенова Ж.О., Жусупбеков С.С. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОЧИСТКИ ГАЗОВ.....</b>                                                         | <b>323</b> |
| <b>Кумаргалиева А.А. РАЗРАБОТКА САУ РЕАКТОРНОГО ПРОЦЕССА.....</b>                                                                                                                    | <b>327</b> |
| <b>Орынбасаров Н.О., Абжапаров К.А. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА 6-СТЕПЕННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОГО СИМУЛЯТОРА ВЕЛОСИПЕДА.....</b>                                                  | <b>330</b> |
| <b>Ханкелдиева Г.Э., Абжапаров К.А. МОБИЛЬДІ РОБОТТЫҢ ҚОЗҒАЛЫСЫН БАҒДАРЛАУ ЖҮЙЕСІ.....</b>                                                                                           | <b>334</b> |
| <b>Тукенов И.Е., Муратбеков М.М. ОБЗОР И СРАВНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ АНАЛИЗА СЕТЕВОГО ТРАФИКА.....</b>                                                                        | <b>339</b> |
| <b>Женисулы И.Ж., Абжанова Л.К. МЕТАЛЛУРГИЯ ӨНДІРІСІНДЕГІ ГАЗДАРДЫ ІРІКТЕУ ПРОЦЕСТЕРІН БАСҚАРУ.....</b>                                                                              | <b>344</b> |

- 10 Крылов И. П., Маликов Е. В. Разработка архитектуры IoT для умных зданий // Информатика и управление. – 2022. – № 8. – С. 34–40.
- 11 Anderson, J. "Real-time Monitoring of HVAC Systems" // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, No. 3. – P. 255–263.
- 12 Kumar, P., Sharma, R., & Verma, D. "AI and IoT in Climate Control Systems" // Journal of Engineering Applications. – 2021. – Vol. 30, No. 7. – P. 87–93.
- 13 Johnson, L. "Emerging Trends in Smart Heating Systems" // IoT World. – 2022. – Vol. 9, No. 2. – P. 18–26.
- 14 Williams, K. "Integration of Solar Energy with Smart Buildings" // Renewable Energy Journal. – 2020. – Vol. 54, No. 8. – P. 315–322.
- 15 Clarke, D. "Privacy and IoT in Building Automation" // Data Security. – 2023. – Vol. 7, No. 1. – P. 56–62.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДА ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ ХРОМОВОЙ РУДЫ

**Н.Б. Дүзбай, Б.К. Муханов**

Казахский Национальный Исследовательский Технический Университет имени К. И. Сатпаева, г.Алматы, Казахстан

**Аннотация.** Исследование автоматизированной системы управления метода гравитационного обогащения хромовой руды представляет собой ключевой аспект в области горнодобывающей промышленности. Данное исследование направлено на оценку эффективности и потенциала автоматизации процесса обогащения хромовой руды с использованием гравитационных методов.

Целью исследования является анализ технических и технологических параметров системы управления, разработка и оптимизация алгоритмов автоматизации, а также оценка выгод от внедрения автоматизированной системы в сравнении с традиционными методами обогащения.

Необходимо совершенствовать технологии переработки как добываемого, так и техногенного сырья, которое является возобновляемым ресурсом и не требует дополнительных затрат на добычу и первичную обработку. Обогащение имеющегося техногенного сырья и качественная переработка добываемого материала могут способствовать экологическому восстановлению территорий, подвергшихся негативному воздействию деятельности горнодобывающей и горноперерабатывающей промышленности. Более того, в некоторых случаях содержание ценных компонентов в техногенных отходах превышает их концентрацию в естественных месторождениях, что делает их переработку выгодной с экономической точки зрения. Необходимость в полной переработке руды и сокращении объема отходов, образующихся в процессе обогатительного производства, становится все более актуальной.

Производительность обогатительных аппаратов определяется показателями обогащения, такими как концентрация ценного компонента в итоговом продукте (концентрате) и содержание ценного компонента в отходах производства (хвостах).

Результаты исследования позволят сделать выводы о целесообразности внедрения автоматизированной системы управления метода гравитационного обогащения хромовой руды в промышленное производство. Это может привести к улучшению качества продукции, повышению эффективности производства и сокращению затрат на персонал и оборудование [1].