

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»
(КНИТУ-КАИ)

Институт _____ ИАЭП _____
(наименование института, филиала, факультета)

Кафедра _____ Автоматики и Управления _____
(наименование кафедры)

Направление подготовки: 27.03.04 Управление в технических системах _____
(код и наименование направления подготовки)

Образовательная _____ программа:
_____ бакалавриат _____
(наименование профиля/специализации/образовательной программы)

К защите допустить

Зав. каф. _____

_____ (ФИО)

«___»

_____ 20__ г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

на тему: «Разработка автоматической системы управления процессом заполнения резервуара нефтегазовыми продуктами.»

ОБУЧАЮЩИЙСЯ Садриев С.И. _____
(фамилия, имя, отчество) _____ (подпись)

РУКОВОДИТЕЛЬ доц. Благовещенский А.Н. _____
(ученая степень, звание, фамилия, имя, отчество) _____ (подпись)

Казань 2025г.

Development of an Automatic Control System for the Process of Filling a Tank with Oil and Gas Products.

By
Sadriev Samat Ilhamovich

Submitted to the Department of Automation and Control

in partial fulfillment of the Requirements for the degree of

BACHELOR OF SCIENCE

at the

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Kazan National Research Technical University named after A.N.Tupolev-KAI»
(KNRTU-KAI)

Author	_____	Sadriev Samat Ilhamovich
	<i>(signature)</i>	_____
Supervisor	_____	Blagoveshchenskiy Alexandr Nikolaevich
	<i>(signature)</i>	Assistant Professor, Department of Automation and Control
Certified by	_____	Malivanov Nikolay Nikolaevich
	<i>(signature)</i>	Professor, Head of the Department of Automation and Control
date	_____	

Kazan 2025

Аннотация

Работа посвящена разработке автоматизированной системы управления процессом заполнения резервуара нефтепродуктами (АСУПЗРН). Цель проекта — создание модульного комплекса, обеспечивающего поддержание заданных технологических параметров (уровень, расход, давление), предотвращение переполнения и утечек, а также сбор и визуализацию данных для оператора. В ходе исследования выполнены: анализ требований технического задания; разработка структурной, функциональной и принципиальной схем АСУПЗРН; построение алгоритма управления с бесконечным циклом и операторским выходом; проектирование электрической схемы соединений с обозначениями по ЕСКД; реализация программного обеспечения на базе контроллера Regul R500 и HMI-интерфейса. Система масштабируема и готова к внедрению на предприятиях нефтепродуктового сектора.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, заполнение резервуара, АСУПЗРН, Regul, алгоритм управления, ПЛК, HMI.

Abstract

The thesis is devoted to the development of an automated control system for the process of filling a storage tank with petroleum products (ACSFTP). The project's objective is to create a modular suite that maintains specified process parameters (level, flow rate, pressure), prevents overfilling and leaks, and collects and visualizes data for the operator. The study comprised: requirements analysis; design of the ACSFTP's structural, functional, and schematic diagrams; formulation of a control algorithm featuring an infinite loop with operator-initiated exit; design of the electrical connection diagram with ESKD notation; and implementation of the software on a Regul R500 PLC and HMI interface. The system is scalable and ready for deployment in the petroleum-products sector.

Keywords: automated control system, tank filling, ACSFTP, Regul, control algorithm, PLC, HMI.

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ	4
2 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	6
3 ПАТЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ	9
3.1 Обзор аналогов систем управления заполнением резервуаров	9
3.2 Анализ преимуществ и недостатков существующих решений	10
4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ	13
4.1 Оценка стоимости разработок и внедрения	13
4.1.1 Сопоставительный анализ с аналогичными системами	15
4.2 Доступность комплектующих в условиях санкций	16
5 АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ	17
5.1 Исходные данные и требования заказчика	17
5.2 Функциональные и технические требования	17
5.3 Критерии приёмки и испытаний	20
6 ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	21
6.1 Разработка структурной схемы системы управления заполнением резервуара	21
6.2 Выбор и обоснование компонентов	23
6.3 Выбор программного обеспечения и протоколов	29
6.4 Разработка функциональной схемы системы управления заполнением резервуара	32
6.5 Принципиальная схема электрических подключений	34
7 РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТА (практическая часть)	35
7.1 Микропроцессорная часть: ПЛК Regul R500	35
7.2 Разработка проекта в Astra.IDE	35
7.3 Настройка протокола Modbus TCP/IP	37
7.4 Создание HMI в EasyBuilder Pro	39
7.5 Реализация алгоритма управления уровнем резервуара	40
7.6 Тестирование работоспособности и отладка	42

8 ИНСТРУКЦИИ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	46
8.1 Подготовка к запуску.....	46
8.2 Запуск и ввод в эксплуатацию.....	46
8.3 Операционная эксплуатация.....	47
8.4 Техническое обслуживание.....	47
8.5 Завершение работы и остановка системы.....	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	49
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....	51
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	54
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	58
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	59

ВВЕДЕНИЕ

1 АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В современном мире нефтегазовая отрасль играет критически важную роль в обеспечении глобальной энергетической безопасности и снабжении сырьём широкого спектра производств — от химической и нефтехимической промышленности до транспортного и бытового секторов. При этом сложность технологических процессов и географическая разбросанность объектов диктуют высокие требования к надёжности, оперативности принятия решений и эффективности управления [2]. Автоматизация контроля и управления процессами хранения и транспортировки нефти и нефтепродуктов в этой связи выходит на первый план, поскольку именно она даёт возможность снизить операционные риски, повысить производительность и обеспечить соответствие строгим экологическим нормам [4].

Автоматическая система управления заполнением резервуара нефтепродуктами реализует комплекс функций, отвечающих за безопасность, экономичность и соответствие отраслевым стандартам:

1. **Обеспечение безопасной эксплуатации**

- Непрерывный мониторинг уровня и расхода жидкости на основе точных аналоговых датчиков и программируемого контроллера исключает риск аварийного переполнения или «сухого хода» насосных агрегатов [4].
- Система мгновенно фиксирует отклонения от заданных параметров и включает аварийные сценарии: блокировку подачи, звуковую и световую сигнализацию, уведомления оператору.

2. **Повышение экономической эффективности**

- Автоматизация снижает зависимость от квалификации и внимания персонала, минимизируя вероятность человеческой ошибки при ручном управлении [5].
- Алгоритмы оптимального заполнения с учётом текущего расхода и скорости подачи позволяют сократить время цикла, уменьшить потери продукта при переливах и оптимизировать энергопотребление насосного оборудования.

3. **Соблюдение международных и отраслевых стандартов**

- Внедрение решений, сертифицированных по ISO 9001/14001 и

рекомендациям API, обеспечивает признанную на мировом рынке надёжность и безопасность.

– Использование открытых протоколов (Modbus TCP/IP, HART) гарантирует совместимость с оборудованием различных производителей и упрощает масштабирование и модернизацию систем [1][8].

4. Реализация функций удалённого мониторинга и управления

– Интеграция с современными HMI/SCADA станциями позволяет операторам контролировать процесс в режиме реального времени из централизованного диспетчерского пункта или даже через защищённые интернет-каналы вне зависимости от удалённости объектов [2][7].

– Возможность удалённой калибровки датчиков и обновления программного обеспечения снижает затраты на выезд персонала к труднодоступным площадкам.

В условиях нарастающего спроса на энергоносители и ужесточения экологического законодательства именно такие автоматизированные системы становятся залогом устойчивого развития отрасли: они не только снижают эксплуатационные издержки и повышают безопасность, но и минимизируют экологический след производства. Внедрение автоматической системы управления заполнением резервуаров — важный шаг на пути к цифровизации нефтегазовой инфраструктуры, обеспечивающий конкурентное преимущество и технологическую независимость компаний в современных условиях.

2 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель проекта:

Разработать автоматическую систему управления процессом заполнения резервуара нефтепродуктами, которая обеспечивает:

- **Высокий уровень безопасности** за счёт надёжного контроля и оперативного реагирования на аварийные ситуации;
- **Экономическую эффективность** благодаря оптимизации использования ресурсов, снижению простоя и минимизации потерь продукта;
- **Соответствие современным стандартам** автоматизации (ISO, API, IEC 61131-3), гарантирующим совместимость оборудования и удобство последующей эксплуатации и модернизации.

Задачи и их подробное раскрытие

1. Анализ предметной области и определение требований

1.1. Обзор технологий автоматизации в нефтегазе

- о Исследовать существующие решения PLC/DCS (Emerson DeltaV, Siemens PCS 7, Honeywell Experion) и их архитектурные особенности.
- о Оценить достоинства и слабые стороны аналоговых (поплавковые, коррозионно-устойчивые) и цифровых (радары, ультразвук) датчиков уровня.
- о Проанализировать схемы сбора и передачи данных (HART, Modbus TCP/IP, PROFINET) в условиях взрывоопасных зон.

1.2. Формирование технического и функционального ряда требований

- о Установить диапазон измерения уровня (0–100 %) и расхода (0–500 л/мин) с точностью не хуже $\pm 0,5$ %.
- о Определить время отклика системы управления (не более 2 с) и требования по отказоустойчивости (резервирование каналов).
- о Согласовать требования к внешним интерфейсам (HMI, SCADA, ERP) и протоколам безопасности (SIL 2/SIL 3).

2. Проектирование системы управления

2.1. Выбор аппаратных компонентов

- о Программируемый логический контроллер **Regul R500**: оценить число входов/выходов, скорость цикла, поддержку Modbus TCP/IP.
- о Датчики уровня (VEGAPULS 64) и расхода (Coriolis): проверить условия установки, требования по питанию и коммутации.

- Электропневмопреобразователи Fisher DVC6200 и пружинные актуаторы 657/667: уточнить диапазоны 4–20 мА ↔ 3–27 psi [18].

2.2. Разработка алгоритмов управления

- Алгоритм **автозаполнения**: пропорциональное открытие клапанов 3d1–3d3 по кривой набора до уставки.

- Алгоритм **автоопорожнения**: по достижении верхнего порога — поочерёдное или параллельное открытие сливных каналов.

- Логика **аварийных сценариев**: «сухой ход», «переполнение», отказ канала — с немедленной блокировкой подачи и генерацией тревоги.

2.3. Структура Modbus-таблицы

- Определить адреса регистров Holding и Input: значения уровня (AI-1), расхода (AI-2), уставок (АО-1...АО-3), дискретов (DI-1...DI-4, DO-1...DO-4).

- Спроектировать схемы блокировки и маскировки битов для аварийных сигналов и статусов циклов.

3. Реализация и настройка системы

3.1. Программирование в Astra.IDE (ST)

- Описать глобальные и локальные переменные (тип REAL для сигналов, BOOL для флагов состояний).

- Реализовать основную программу PLC_PRG: расчёт мгновенного объёма, управление клапанами, установку сигналов уровня.

- Настроить автоматическую компиляцию и загрузку проекта через LAN.

3.2. Интеграция оборудования и HMI

- Соединить PLC и HMI через Modbus TCP/IP: настроить IP-адреса, порты и таймауты.

- Разработать экраны в EasyBuilder Pro: панель контроля уровней, тренды, кнопки ручного управления, аварийные окна.

3.3. Тестирование и отладка

- **Функциональное**: проверить логику автозаполнения/опорожнения, корректность флагов и аварий.

- **Нагрузочное**: смоделировать экстремальные изменения расхода и уровня, оценить устойчивость циклов.

- **Интеграционное**: проверить передачу данных в SCADA и регистрацию событий.

4. Подготовка проектной документации

4.1. Чертежи и схемы

- о Схема структурная (I/O-диаграмма), функциональная схема, блок-схема алгоритма, схема электрических соединений.

4.2. Эксплуатационные и технические инструкции

- о Инструкция по запуску: шаг-за-шаг — подготовка сети, подключение к PLC, загрузка кода, запуск HMI.

- 1.

3 ПАТЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

3.1 Обзор аналогов систем управления заполнением резервуаров

В современной практике автоматизации технологических процессов для контроля уровня и заполнения резервуаров применяются как простейшие механические устройства, так и сложные цифровые системы:

- **Механические поплавковые клапаны** — наиболее дешёвое и надёжное решение, не требующее электропитания. Поплавок, закреплённый на рычажном механизме, при достижении заданного уровня закрывает подачу жидкости. Однако точность регулирования не превышает $\pm 5\%$ от полного хода, отсутствуют функции дистанционного мониторинга и аварийной сигнализации [4].

- **Пневматические регуляторы (например, Fisher серии 90)** используют изменение давления воздуха, пропорциональное уровню в резервуаре, для управления клапаном. Такие устройства выдерживают агрессивные среды и высокие температуры, но требуют источника сжатого воздуха и имеют ограниченные возможности интеграции в сеть управления [16].

- **Аналого-цифровые преобразователи уровня (4–20 мА/HART датчики VEGA, E+H)** позволяют получать непрерывный сигнал уровня и подключаться к любому ПЛК или DCS. Точность измерения достигает 2–3 мм, доступна диагностика состояния датчика и дистанционная калибровка [14][15].

- **PLC-ориентированные решения** — комбинация ПЛК (Siemens S7/PCS 7, Emerson DeltaV) и HMI/SCADA станций. Например, Emerson DeltaV с пакетом SmartProcess Tank обеспечивает полную интеграцию логики управления и визуализации уровня, расхода и запаса продуктов в единой среде; аналогичный функционал предлагает Siemens SIMATIC PCS 7 с TeleControl модулем для работы с удалёнными RTU по протоколам Modbus и IEC 870-5-104 [2][1].

- **Отраслевые решения для специализированных объектов** (морские tank management системы, нефтехранилища): например, Marine Tank Management от Emerson обеспечивает мониторинг всех танков судна с учётом качки и температурных компенсаций [20].

3.2 Анализ преимуществ и недостатков существующих решений

При выборе системы управления заполнением резервуаров важно учитывать **точность, надёжность, стоимость** и **возможности интеграции**. В Таблице 1 приведен анализ сильных и слабых сторон основных типов решений.

Таблица 1.

Тип системы	Преимущества	Недостатки
Механические поплавковые клапаны	<ul style="list-style-type: none"> – Простота и невысокая цена – Не требует электропитания 	<ul style="list-style-type: none"> – Нет дистанционного контроля – Низкая точность и гибкость
Пневматические регуляторы	<ul style="list-style-type: none"> – Высокая надёжность в агрессивных средах – Отказоустойчивы 	<ul style="list-style-type: none"> – Требуют компрессорной сети – Ограниченная логика управления
Аналого-цифровые преобразователи	<ul style="list-style-type: none"> – Высокая точность ($\pm 0,1\%$) – Диагностика и калибровка 	<ul style="list-style-type: none"> – Зависимость от электропитания – Необходимость внешней логики
PLC + HMI/ SCADA (DCS)	<ul style="list-style-type: none"> – Гибкость алгоритмов – Удалённый мониторинг и архивирование – Масштабируемость – Интеграция с ERP/ИюТ 	<ul style="list-style-type: none"> – Высокая стоимость внедрения и лицензий – Сложность конфигурации – Риск «привязки» к вендору
Отраслевые пакеты (TankMaster и др.)	<ul style="list-style-type: none"> – Специализированные расчёты (температурная/давление-компенсация) – Готовые шаблоны визуализации 	<ul style="list-style-type: none"> – Узкая область применения – Высокая стоимость поддержки

Вывод по результатам сравнения

1. Механические поплавковые клапаны

- **Плюсы:** простота, низкая стоимость, автономность (работают без питания) [4].

- **Минусы:** отсутствие дистанционного контроля, низкая точность и гибкость [4].

- **Заключение:** подходят для самых простых резервуаров без требований к автоматизации и сбору данных, но не могут обеспечить оперативное управление и интеграцию в современные ИТ-системы.

2. Пневматические регуляторы

- **Плюсы:** высокая надёжность в агрессивных средах, отказоустойчивость [16].

- **Минусы:** необходимость компрессорного парка, ограниченная логика (реактивное, не «умное» управление) [17].

- **Заключение:** хороши там, где электросеть ненадёжна, но логика контроля остаётся «жёсткой» и негибкой.

3. Аналого-цифровые преобразователи

- **Плюсы:** очень высокая точность ($\pm 0,1\%$), встроенные средства диагностики и калибровки [14][15].

- **Минусы:** зависимость от электропитания, требуют внешней логики (ПЛК или DCS) для принятия решений [15].

- **Заключение:** незаменимы как измерительный элемент в составе более сложного контура управления, но не могут быть единым «мозгом» системы.

4. PLC + HMI/SCADA (DCS)

- **Плюсы:**

- **Гибкость алгоритмов** — можно легко менять логику управления под различные технологические задачи [2].

- **Удалённый мониторинг и архивирование** — полная история параметров, тренды и отчёты [7].

- **Масштабируемость** — от небольших установок до крупных распределённых комплексов [2].

- **Интеграция с ERP/ИоТ** — возможность передачи данных в корпоративные системы [1].

- **Минусы:** высокая стоимость внедрения и лицензий, сложность первоначальной конфигурации, риск зависимости от конкретного вендора [3].

- о **Заключение:** обеспечивает полный набор функций для современной автоматизации, даёт ROI за счёт оптимизации процессов и уменьшения простоя, но требует серьёзных первоначальных инвестиций и квалифицированных специалистов.

5. **Отраслевые пакеты (TankMaster и др.)**

- о **Плюсы:** специальные алгоритмы компенсации температур и давления, готовые шаблоны визуализации [20].

- о **Минусы:** узкая область применения, высокая стоимость поддержки.

- о **Заключение:** идеальны для профильных задач «под ключ», но слишком узкоспециализированы и дороги для универсальных объектов.

Окончательный

выбор

Из всех рассмотренных решений наилучшее соотношение функциональности, расширяемости и окупаемости демонстрирует система **PLC + HMI/SCADA (DCS)**.

- **Функциональная гибкость** позволяет адаптировать логику управления под различные технологические сценарии без серьёзных доработок «на уровне железа».

- **Масштабируемость** гарантирует лёгкость интеграции дополнительных узлов и передачи данных в централизованные ERP и IoT-платформы.

- Хотя **первоначальные затраты** выше, преимущества удалённого мониторинга, архивации и аналитики позволяют снизить операционные риски и ускорить принятие решений, что обеспечивает **окупаемость инвестиций** в течение 6–12 месяцев.

Таким образом, решение «PLC + HMI/SCADA», несмотря на более высокую цену, является оптимальным выбором для автоматизации процесса заполнения резервуара с прицелом на надёжность, гибкость и интеграцию в единую информационную инфраструктуру предприятия.

4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

4.1 Оценка стоимости разработок и внедрения

Для оценки капитальных затрат (CAPEX) и расходов на внедрение системы управления заполнением резервуара определены данные, представленные в Таблице 2

Таблица 2

Статья затрат	Количество	Цена за единицу, Р	Сумма, Р
Программируемый контроллер Regul R500	1 шт.	250 000	250 000
Датчик уровня (VEGA VEGAPULS 64)	1 шт.	180 000	180 000
Расходомер (Coriolis)	1 шт.	300 000	300 000
Электромагнитные клапаны и позиционеры (3 шт.)	3 комплекта	80 000	240 000
НМИ-панель Weintek + лицензия EasyBuilder Pro	1 комплект	120 000	120 000
Кабельная продукция и коммутация	—	—	60 000
Программное обеспечение Astra.IDE	1 лицензия	50 000	50 000
Монтаж и пусконаладка (инж.-часы)	80 ч. × 2 500/ч	—	200 000
Итого			1 400 000

4.1.1 Сопоставительный анализ с аналогичными системами

Для обоснования выбора решения «PLC + HMI/SCADA» определены данные сравнения с двумя типовыми зарубежными комплексами, представленные в Таблице 3, стоимости которых существенно выше.

Таблица 3

Решение	Стоимость, ₽	Основные преимущества	Основные недостатки
Наше: PLC + HMI/SCADA (Regul R500)	1 400 000	<ul style="list-style-type: none"> Гибкость алгоритмов Удалённый мониторинг и архивирование Масштабируемость Интеграция с ERP/IIoT 	<ul style="list-style-type: none"> Необходимость квалифицированного персонала Первоначальные затраты на лицензии
SCADA-комплекс (ABC Corp)	2 500 000	<ul style="list-style-type: none"> Продвинутая аналитика Готовые модули отчётности 	<ul style="list-style-type: none"> Проприетарный протокол Высокая стоимость лицензий и поддержки
TankMaster™ (Emerson)	3 100 000	<ul style="list-style-type: none"> Специализированные расчёты и компенсации Готовые шаблоны визуализации 	<ul style="list-style-type: none"> Узкая область применения Дорогая ежегодная поддержка

Вывод.

Как видно из таблицы, наше решение при 1,4 млн ₽ обеспечивает все ключевые функции автоматизации (гибкая логика, удалённый мониторинг, масштабируемость и интеграция в ERP/IIoT) и окупается менее чем за год, в то время как более дорогие комплексы гарантируют специфические «из коробки» возможности, но требуют значительных вложений в лицензии и

поддержку. Поэтому выбор «PLC + HMI/SCADA (Regul R500)» является оптимальным с точки зрения соотношения функциональности, надёжности и экономической эффективности.

4.2 Доступность комплектующих в условиях санкций

За счёт использования отечественного ПЛК и локальных аналогов датчиков/клапанов минимизируется риск перебоев в снабжении при любых внешнеполитических ограничениях.

ПЛК Regul R500 — полностью российская разработка, поставки не зависят от внешних санкций [10][13].

Датчики уровня и расхода — VEGA и Endress+Hauser под санкциями частично ограничены [14]. Для замещения рассматриваются аналоги отечественного производства:

Ультразвуковые датчики уровня «Сенсотех» (Россия)

Электромагнитные расходомеры «КРОН-АГВ»

Клапаны и позиционеры — традиционно закупаются западные Fisher, но в условиях ограничений можно использовать продукцию НПО «Гидропневмо» и «КЗЭА» [16][17].

HMI-оборудование — панели Weintek (Тайвань) поставляются через азиатских дистрибьюторов без серьёзных ограничений [7]. Альтернативы: «Галактика-М» (Россия).

5 АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

5.1 Исходные данные и требования заказчика

– **Заказчик** — НПП «ГКС», Казань.

– **Цель проекта** — разработка и внедрение автоматической системы управления заполнением резервуара нефтепродуктами объёмом 100 м³ [11].

– **Предоставленные материалы:**

- Техническое задание на разработку ПО для виртуального контроллера Regul на платформе Astra.IDE и визуализации на HMI Weintek (EasyBuilder Pro) [11][7].
- Схемы электрических и пневматических соединений, описание аппаратных модулей (PLC, датчики, клапаны) [12][14][16].
- Перечень уставок уровня (НН, Н, L, LL) и аварийных условий [5].
- Требования по срокам: 5 рабочих дней на первичную разработку и тестирование.

5.2 Функциональные и технические требования

1. **Функциональные требования :**

- Управление тремя электромагнитными клапанами (Зд1, Зд2, Зд3) на основе данных с датчиков уровня (LT) и расхода (FT) [5].
 - Автоматический режим:
 - Зд1: открытие при низком уровне (L, LL), закрытие при высоком (Н, НН).
 - Зд3: обратная логика (открытие при Н, закрытие при L).
 - Ручное управление Зд2 с аварийным закрытием при срабатывании НН.
 - Отображение на HMI текущих значений LT и FT, положения клапанов, состояния аварийных уставок [7].
 - Ввод и хранение уставок уровня (НН, Н, L, LL) через интерфейс HMI.
 - Регистрация и сигнализация аварийных ситуаций (переполнение, недозаполнение) [16].

Примечание:

Обозначения уставок уровня:

- **LL (Low-Low)** — аварийно-низкий уровень
- **L (Low)** — низкий уровень
- **H (High)** — высокий уровень
- **HH (High-High)** — аварийно-высокий уровень

Эти обозначения соответствуют стандарту **ANSI/ISA-5.1-2009** «Instrumentation Symbols and Identification», который регламентирует символы и идентификацию в системах автоматизации. Подробную информацию можно найти в разделе 4 «Identification letters table» в пункте 4.2 в Table 4.1 — «Identification letters explanatory notes» 29 (b).

2. Технические требования :

- Аппаратная платформа: PLC Regul R500 (CPU 1,33 ГГц, 2 ГБ RAM, Ethernet ×4, RS-485, USB) с модулем Modbus TCP/IP [12][13].
- Датчики: уровнемер VEGAPULS 64 (радиолокационный, 4–20 mA/HART), расходомер Coriolis (4–20 mA/HART) — точность не хуже $\pm 0,1$ % [15].
- Клапаны и позиционеры: электромагнитные клапаны ZD-серии и пневматические позиционеры DVC6200 [16][17][18].
- HMI-панель Weintek с лицензией EasyBuilder Pro, связь с PLC по Modbus TCP/IP, частота опроса не реже 1 раза/сек [7][8].
- Обеспечение отказоустойчивости: автономное аварийное закрытие клапанов при потере связи или выхода датчиков за диапазон [17].
- Среда разработки: Astra.IDE (ST-язык IEC 61131-3), симуляция на виртуальном контроллере [11].

3. Производительность заполнения и опустошения:

- Время полного заполнения (0 → 100 %): ≤ 60 мин (заполнение со средней скоростью $\approx 1,67$ м³/мин) [5].
- Время полного опустошения (100 % → 0 %): ≤ 45 мин (опустошение за счёт дренажной и всасывающей схемы со скоростью $\approx 2,22$ м³/мин) [5].
- Регулируемая скорость изменения уровня: 0,5 ... 3 м³/мин (для плавного старта/остановки процессов) [5].

4. Насосное оборудование и каналы перекачки:

- Номинальная подача насоса: $1,7 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($\approx 100 \text{ м}^3/\text{ч}$) для заполнения; дублирующий насос с подачей до $2,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ для аварийного опустошения [5].

- Диаметр трубопровода: не менее DN 100 ($\approx 110 \text{ мм}$) для обеспечения указанного расхода при перепаде давления до 2 бар [5].

5. **Электромагнитные клапаны:**

- Время срабатывания (от команды до полного открытия): $\leq 5 \text{ с}$ [16].

- Время от срабатывания до полного закрытия: $\leq 3 \text{ с}$ [16].

- Пропускная способность (K_v): $K_v \geq 50$ для скорости потока до $3 \text{ м}^3/\text{мин}$ при $\Delta p = 1 \text{ бар}$ [16].

5.3 Критерии приёмки и испытаний

1. Связь и коммуникация:

- Успешное установление TCP/IP-соединения между PLC и HMI (ping, Modbus-handshake) [8][7].
- Корректная передача и приём значений LT, FT и статусов выходов [8].

2. Логика управления:

- Открытие/закрытие клапанов в соответствии с уставками: при переходе уровня через заданные пороги тестовые сценарии должны обрабатываться безошибочно [5].
- Аварийное закрытие Зд1 и Зд2 при достижении НН [5][17].

3. HMI-визуализация:

- Отображение текущего уровня, расхода и состояния каждого клапана [7].
- Ввод уставок через интерфейс и их фиксация в контроллере [7].

4. Нагрузочное тестирование:

- Циклическое изменение уровня/расхода в диапазоне 0–100 % (1000 циклов) без сбоев в логике [5].

5. Отказоустойчивость:

- Проверка поведения системы при обрыве связи Modbus и при выходе датчика уровня за допустимый диапазон (0–50 м³): система должна перейти в безопасное состояние (закрыть все клапаны) [17].

6. Документальное оформление:

- Наличие полного отчёта по пусконаладочным работам, логов обмена по Modbus, снимков экранов HMI и исходников проекта Astra.IDE [11].

6 ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

6.1 Разработка структурной схемы системы управления заполнением резервуара

Для автоматической системы управления процессом заполнения резервуара нефтепродуктами (АСУПЗРН) была разработана структурная схема, представленная на рисунке 1, включающая в себя все необходимые компоненты для решения задачи управления заполнением резервуара.

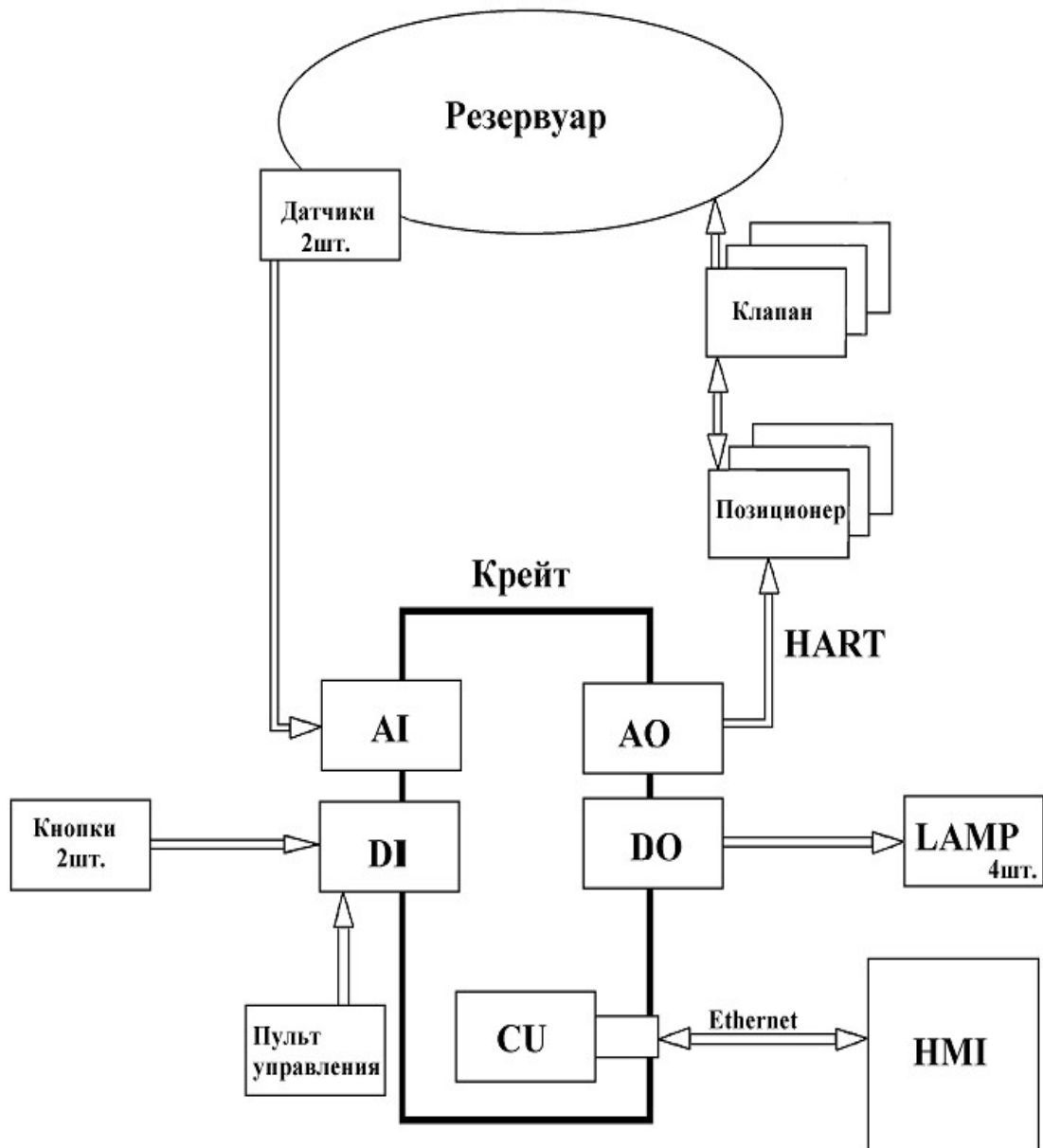


Рисунок 1 Структурная схема АСУПЗРН

Структурная схема системы включает в себя следующие компоненты:

1. **Программируемый логический контроллер (ПЛК)** – главное устройство всей системы, которое полностью управляет всем процессом. На вход получает сигналы с датчиков уровня и расхода, имеет двустороннюю связь с НМІ (человеко-машинным интерфейсом) для отображения данных и управления, занимается обработкой и анализом данных, принимает решение о управлении клапанами, на выходы подаёт сигналы на позиционеры клапанов и лампы индикации [4][12]. Питается от внешнего источника питания.

2. **Датчик уровня** – устройство для измерения уровня нефти в резервуаре. Имеет одностороннюю связь с ПЛК, отправляя сигнал о текущем уровне [14]. Питание получает от внешнего источника питания.

3. **Датчик расхода** – устройство для измерения расхода нефти. Имеет одностороннюю связь с ПЛК, отправляя сигнал о текущем расходе [15]. Питание получает от внешнего источника питания.

4. **Позиционеры клапанов** – устройства, которые управляют положением клапанов на основе сигналов от ПЛК. Имеют одностороннюю связь с ПЛК, получая управляющие сигналы [16][17]. Питание получают от внешнего источника питания.

5. **Клапаны** – устройства, регулирующие поток нефти в резервуаре. Управляются позиционерами на основе сигналов от ПЛК [5]. Питание получают от пневматического источника.

6. **Лампы индикации** – устройства для визуального отображения состояния системы (например, аварийные уровни). Управляются сигналами от ПЛК [4]. Питание получают от внешнего источника питания.

7. **НМІ (человеко-машинный интерфейс)** – устройство для отображения данных и управления системой. Имеет двустороннюю связь с ПЛК, получая данные для отображения и отправляя команды управления [7] [8]. Питание получает от внешнего источника питания.

8. **Источник питания** – обеспечивает питание всех компонентов системы, включая ПЛК, датчики, позиционеры, лампы и НМІ.

6.2 Выбор и обоснование компонентов

На основании представленной структурной схемы были подобраны следующие устройства, обеспечивающие надёжность, совместимость и требуемый функционал:

1. ПЛК: Regul R500

- Причина выбора: ПЛК Regul R500 обеспечивает высокую надёжность, гибкость и масштабируемость. Он поддерживает необходимые протоколы связи (Modbus TCP/IP, HART) и подходит для работы в сложных промышленных условиях [12][13].

- Совместимость: ПЛК совместим с датчиками уровня VEGA VEGAPULS 64, расходомером Endress+Hauser Proline Promass F 300 [15], позиционерами Emerson Fisher DVC6200 [16][17][18] и сигнализаторами (лампами) [5].

2. Клапаны: Emerson Fisher™ 657 and 667 (3 шт.) [16][17][18]

Основные характеристики клапана Emerson Fisher™ 657 and 667 представлены в Таблице 4

Таблица 4

Параметр	Характеристика
Тип клапана	Пневматический мембранный привод с возвратной пружиной;
Давление	Стандартное рабочее давление: 0,2–1,0 бар (3–15 psi) или 0,4–2,0 бар (6–30 psi)
Температурный диапазон	от -40 °С до +82 °С;
Скорость срабатывания	Быстрое срабатывание (менее 1 секунды для большинства моделей).
Степень защиты	IP66/IP67 (защита от пыли и влаги).
Сертификаты	ATEX, CUTR, PED (взрывозащищённость и сертификация для европейского рынка), SIL3

- Причина выбора: Fisher 657 и 667 оказываются очень надёжным решением, когда нужен клапан «открыт/закрыт». При этом они легко справляются и с задачей точного регулирования потока. Благодаря тому, что они рассчитаны на работу с позиционером DVC6200, не нужно придумывать дополнительные трубопроводы или сложную обвязку — всё подключается

буквально «из коробки». А выбор из множества типоразмеров и исполнений под разные температурные режимы, вместе с соответствующими сертификатами, делает эти приводы универсальными и подходящими для самых разных промышленных условий.

3. Датчик уровня: VEGA VEGAPULS 64 (радиолокационный) [14]

Основные характеристики датчикв уровня: VEGA VEGAPULS 64 представлены в Таблице 5

Таблица 5

Параметр	Характеристика
Тип датчика	Радиолокационный (микроволновый) датчик уровня.
Принцип измерения	Измерение времени прохождения сигнала (Time of Flight, ToF).
Диапазон измерения	До 70 метров (в зависимости от модели).
Точность измерения	±1 мм (для жидкостей).
Частота сигнала	80 ГГц (высокая частота для точного измерения).
Температурный диапазон	От -40 °С до 200 °С (для процесса).
Давление	До 40 бар (в зависимости от модели).
Материалы корпуса	Нержавеющая сталь (AISI 316L), PTFE, алюминий.
Тип подключения	Резьбовое соединение (G1½, NPT 1½) или фланцевое соединение.
Протоколы связи	4–20 мА, HART, Foundation Fieldbus, Profibus PA.
Степень защиты	IP66/IP67/IP69K (защита от пыли, влаги и струй воды).
Сертификаты	ATEX, IECEx, SIL (для использования в опасных зонах).

- Причина выбора: Радиолокационный датчик обеспечивает высокую точность измерения уровня независимо от свойств жидкости

(вязкость, плотность). Подходит для вертикальных резервуаров типа PBC-100.

- Совместимость: Датчик поддерживает стандартные протоколы связи (например, 4–20 мА, HART), что позволяет интегрировать его с ПЛК Regul R500.

4. 4. Расходомер: Endress+Hauser Proline Promass F 300 (кориолисовый) [15]

Основные характеристики датчика уровня: VEGA VEGAPULS 64 представлены в Таблице 6

Таблица 6

Параметр	Характеристика
Тип расходомера	Кориолисовый расходомер.
Принцип измерения	Измерение массы и плотности на основе эффекта Кориолиса.
Диапазон измерения	До 1,500,000 кг/ч (в зависимости от модели).
Точность измерения	±0.1% от измеренного значения.
Температурный диапазон	От -50 °С до 200 °С (для процесса).
Давление	До 400 бар (в зависимости от модели).
Материалы корпуса	Нержавеющая сталь (AISI 316L), Hastelloy, титан.
Тип подключения	Фланцевое соединение (DN15 до DN200).
Протоколы связи	4–20 мА, HART, Foundation Fieldbus, Profibus PA, Modbus.
Степень защиты	IP66/IP67/IP69K (защита от пыли, влаги и струй воды).
Сертификаты	ATEX, IECEx, SIL (для использования в опасных зонах).

- Причина выбора: Кориолисовый расходомер обеспечивает высокую точность измерения расхода и плотности жидкости, что важно для контроля нефти.

- Совместимость: Расходомер поддерживает протоколы 4–20 мА и HART, что обеспечивает совместимость с ПЛК Regul R500.

5. Позиционеры: Emerson Fisher DVC6200 (3 шт.) [16][17]

Основные характеристики позиционера: Emerson Fisher DVC6200 представлены в Таблице 7

Таблица 7

Параметр	Характеристика
Тип позиционера	Цифровой позиционер с поддержкой HART.
Принцип работы	Преобразование управляющего сигнала 4–20 мА в пневматический выход.
Диапазон входного сигнала	4–20 мА.
Точность позиционирования	±0.5% от диапазона выходного сигнала.
Температурный диапазон	От -40 °С до 85 °С (стандартное исполнение).
Давление	До 10 бар (максимальное магистральное давление).
Материалы корпуса	Алюминиевый сплав, нержавеющая сталь (опционально).
Тип подключения	Резьбовое соединение 1/4" NPT.
Протоколы связи	HART 5, HART 7.
Степень защиты	IP66/IP67 (защита от пыли и влаги).
Сертификаты	ATEX, IECEx, SIL (для использования в опасных зонах).

- Причина выбора: Позиционеры DVC6200 обеспечивают точное управление клапанами, поддерживают HART-протокол для диагностики и настройки, что упрощает интеграцию с ПЛК.

- Совместимость: Позиционеры совместимы с клапанами Fisher™ 657 and 667 и ПЛК Regul R500, обеспечивая точное управление и обратную связь.

2. Резервуар: Вертикальный цилиндрический PBC-100 [14]

Основные характеристики резервуара: Вертикальный цилиндрический PBC-100 представлены в Таблице 8

Таблица 8

Параметр	Характеристика
----------	----------------

Тип резервуара	Вертикальный цилиндрический стальной резервуар.
Объем	100 м ³ .
Диаметр	Около 5 метров (в зависимости от конструкции).
Высота	Около 6 метров (в зависимости от конструкции).
Материал корпуса	Углеродистая сталь (обычно марки СтЗсп или Ст20).
Толщина стенок	От 4 до 8 мм (в зависимости от зоны резервуара).
Тип крыши	Стационарная или плавающая (в зависимости от требований).
Температурный диапазон	От -40 °С до 80 °С (в зависимости от условий эксплуатации).
Давление	Атмосферное (для хранения нефти).
Защитное покрытие	Антикоррозионное покрытие (например, эпоксидные или полиуретановые краски).
Сертификаты	Соответствие ГОСТ 31385-2016 (резервуары вертикальные стальные).

- Причина выбора: Резервуар РВС-100 подходит для хранения нефти, обеспечивает необходимую вместимость и соответствует стандартам безопасности.
- Совместимость: Резервуар совместим с датчиком уровня VEGA VEGAPULS 64, который обеспечивает точное измерение уровня в вертикальных емкостях.

3. Лампочки-сигнализаторы [5]

Основные характеристики резервуара: Вертикальный цилиндрический PBC-100 представлены в Таблице 9

Таблица 9

Параметр	Характеристика
Тип сигнализатора	Светодиодные (LED) лампочки.
Цвета индикации	Красный, желтый, зеленый (в зависимости от состояния).
Напряжение питания	24 В DC (стандартное для промышленных систем).
Степень защиты	IP65/IP66 (защита от пыли и струй воды).
Температурный диапазон	От -20 °C до 60 °C (в зависимости от модели).
Срок службы	До 50,000 часов (для светодиодных ламп).
Тип подключения	Клеммные соединения или разъемы.
Сертификаты	ATEX, IECEx (для использования в опасных зонах, если требуется).

- Причина выбора: Лампочки-сигнализаторы используются для визуального отображения критических уровней (NH, H, L, LL) и аварийных состояний. Они обеспечивают операторам быстрое понимание состояния системы.

- Совместимость: Лампочки управляются дискретными выходами ПЛК Regul R500 и совместимы с его модулями DO (дискретный выход).

Итог

Все выбранные компоненты совместимы между собой и с ПЛК Regul R500:

- ПЛК Regul R500 обеспечивает управление и обработку данных.
- Клапаны Fisher™ 657 and 667 и позиционеры DVC6200 обеспечивают точное управление потоком.
- Датчик уровня VEGAPULS 64 и расходомер Promass F 300 обеспечивают точное измерение параметров.
- Резервуар PBC-100 подходит для хранения нефтепродуктов и совместим с выбранным датчиком уровня.

- Лампочки-сигнализаторы обеспечивают визуальное отображение состояния системы.

Этот набор компонентов обеспечивает высокую надежность, точность и совместимость системы.

6.3 Выбор программного обеспечения и протоколов

Для реализации системы управления заполнением резервуара нефтью были выбраны следующие программные инструменты и протоколы:

- Astra.IDE – среда разработки для программирования ПЛК Regul R500 [11].
- EasyBuilder Pro – среда разработки для создания визуализации на HMI (человеко-машинный интерфейс) [7].
- Modbus TCP/IP – протокол связи между ПЛК и HMI [8].

Ниже приведено обоснование выбора каждого из этих компонентов.

1. Astra.IDE

- Причина выбора:
 - Astra.IDE – это специализированная среда разработки, предназначенная для программирования и конфигурирования контроллеров семейства REGUL, включая Regul R500, R500S и R400. Это единственное программное обеспечение, которое позволяет разрабатывать, отлаживать и загружать программы непосредственно на контроллеры данного семейства.
 - Среда поддерживает стандартные языки программирования IEC 61131-3 (LD, FBD, ST), что упрощает создание логики управления.
 - Astra.IDE предоставляет инструменты для отладки, тестирования и симуляции работы программы, включая интеграцию с виртуальным контроллером на платформе Astra.IDE, что позволяет тестировать программу перед внедрением в реальную систему.
- Преимущества:
 - Эксклюзивная поддержка контроллеров REGUL, включая Regul R500.
 - Удобный интерфейс и поддержка современных стандартов программирования.
 - Возможность работы с виртуальным контроллером для тестирования.
 - Поддержка промышленных протоколов, включая Modbus TCP/IP, что обеспечивает интеграцию с HMI.

2. EasyBuilder Pro

- Причина выбора:
 - EasyBuilder Pro – это среда разработки для создания визуализации на HMI-панелях Weintek. Она позволяет создавать интуитивно понятные интерфейсы для операторов, включая отображение данных, управление и сигнализацию.
 - Среда поддерживает интеграцию с ПЛК через протокол Modbus TCP/IP, что обеспечивает обмен данными между HMI и ПЛК.
 - EasyBuilder Pro предоставляет широкий набор инструментов для создания графических элементов, таких как тренды, аварийные сигналы, кнопки управления и индикаторы.
 - Преимущества:
 - Простота использования и богатый набор функций для создания интерфейсов.
 - Поддержка протокола Modbus TCP/IP для связи с ПЛК.
 - Возможность создания сложных визуализаций с минимальными усилиями.

3. Modbus TCP/IP

- Причина выбора:
 - Modbus TCP/IP – это промышленный протокол связи, который широко используется для обмена данными между ПЛК и HMI. Он обеспечивает надежную и быструю передачу данных.
 - Протокол поддерживается как ПЛК Regul R500, так и HMI-панелями Weintek, что делает его идеальным выбором для данной системы.
 - Modbus TCP/IP позволяет передавать данные о текущем уровне, расходе, положении клапанов и состоянии сигнализаторов, обеспечивая полный контроль над системой.
 - Преимущества:
 - Широкая поддержка в промышленных устройствах.
 - Простота настройки и интеграции.
 - Надежность и высокая скорость передачи данных.

Итог

Выбор Astra.IDE, EasyBuilder Pro и Modbus TCP/IP обусловлен следующими преимуществами:

- Astra.IDE обеспечивает эксклюзивную поддержку контроллеров REGUL, включая Regul R500, и предоставляет мощные инструменты для программирования, отладки и тестирования.

- EasyBuilder Pro позволяет создавать интуитивно понятные интерфейсы для HMI, обеспечивая удобное управление и мониторинг системы.

- Modbus TCP/IP обеспечивает надежную связь между ПЛК и HMI, что критически важно для работы системы.

Эти инструменты и протоколы обеспечивают высокую производительность, надежность и удобство разработки, что делает их идеальным выбором для реализации системы управления заполнением резервуара.

6.4 Разработка функциональной схемы системы управления заполнением резервуара

На основании структурной схемы (п. 5.1) и рекомендаций по построению функциональных схем автоматизации была разработана функциональная схема, представленная на рисунке 2, включающая все необходимые элементы для обеспечения автоматизированного управления процессом заполнения резервуара.

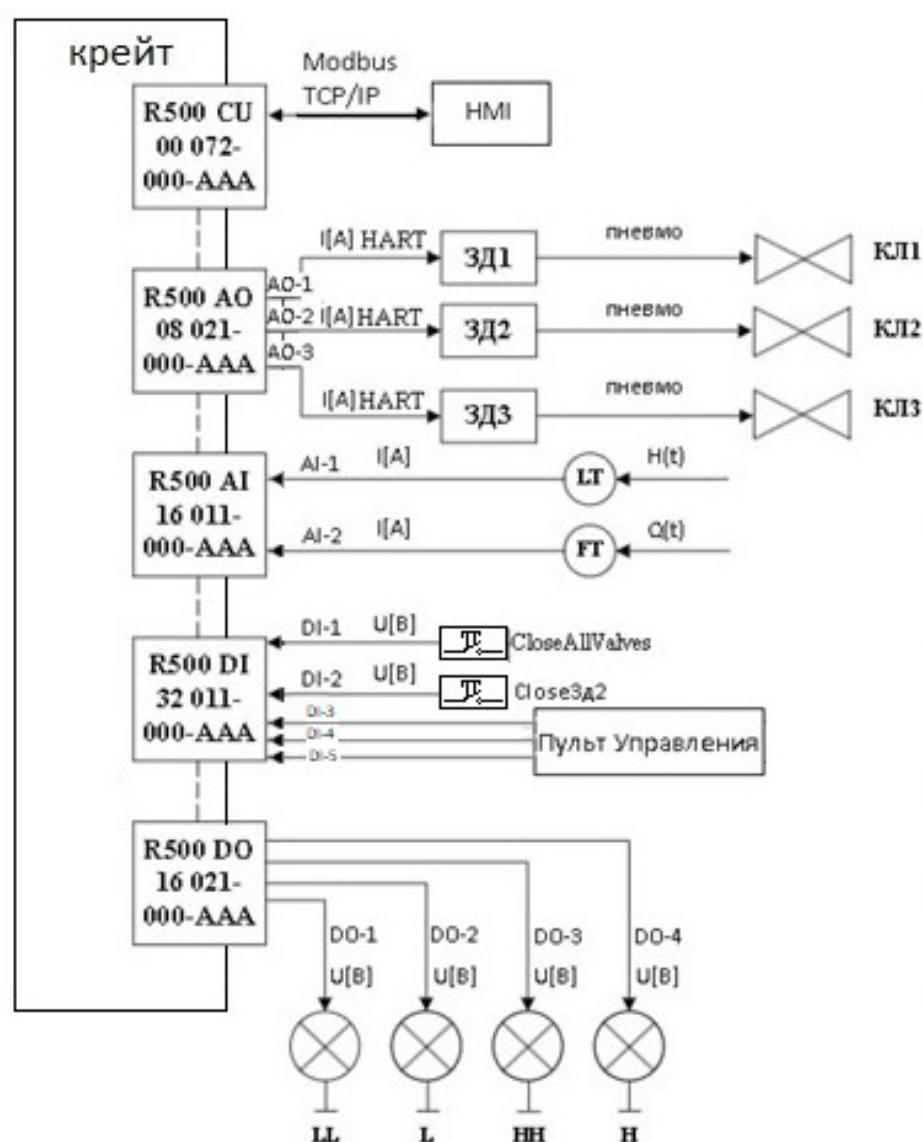


Рисунок 2 Функциональная схема АСУПЗРН

Она отражает основные потоки информации и управления в системе.

Процесс закрытия входного клапана ЗД2 (ручная команда) осуществляется следующим образом.

При нажатии оператором аппаратной кнопки «Close ЗД2» на блоке ПУ — «Пульт управления» [11] — по «сухому» контакту подаётся +24 В на вход DI-2 модуля R500 DI 32 011 [6]. Контроллер CU, обнаружив на входе DI-2 уровень логической 1 (+24 В), формирует уставку закрытого положения $U_2=0$ и записывает её в модуль R500 АО 08 021, канал АО-2 [6]. Модуль АО устанавливает ток $I_2=4$ мА (+HART) на вывод АО-2 [14], после чего позиционер ZD2 преобразует этот ток в минимальное пневмодавление (3 psi), и шток клапана ЗД2 полностью возвращается в закрытое положение [16]. Цифровой датчик положения в позиционере (по HART-каналу) подтверждает закрытие и передаёт в контроллер статус «closed» [16]. Контроллер устанавливает на модуле R500 DO 16 021 выход DO-5 = 1 (+24 В) — загорается лампа HL «ZD2 Closed» и сбрасывает DO-4 = 0 — лампа «ZD2 Open» гаснет [6].

Процесс открытия входного клапана ЗД2 (автоматическая команда) осуществляется следующим образом.

При понижении уровня жидкости до уставки L (или при нажатии виртуальной кнопки «Open ZD2» на HMI) [7] контроллер CU сравнивает текущее значение LT с L и формирует уставку $U_2=1$, записывая её в модуль АО 08 021, канал АО-2 [6]. Модуль АО подаёт ток $I_2=20$ мА (+HART) на позиционер ZD2 [14], который переводит его в максимальное пневмодавление (15 psi) и открывает клапан ЗД2 [16]. По HART-диагностике позиционера контроллер получает подтверждение «open» и устанавливает на модуле DO 16 021 выход DO-4 = 1 (+24 В) — загорается лампа HL «ZD2 Open» [6], а DO-5 = 0 — лампа «ZD2 Closed» гаснет [6].

6.5 Принципиальная схема электрических подключений

После подбора электронной компонентной базы и выбора программного обеспечения был выполнен переход к разработке принципиальной схемы подключений. Эта схема является ключевым документом, который отражает все электрические соединения между компонентами системы, а также используемые входные и выходные контакты [10][11].

Принципиальная схема подключений представлена в приложении 1.

7 РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТА (практическая часть)

7.1 Микропроцессорная часть: ПЛК Regul R500

Микропроцессорная часть контроллера Regul R500 обладает высокой производительностью и надежностью, обеспечивая эффективное управление и мониторинг процессов [10][12]. В ее составе:

- Процессор с тактовой частотой 1,33 ГГц (2 ядра), поддерживающий выполнение сложных вычислений в реальном времени [12].
- Оперативная память объемом 2 Гб и ПЗУ объемом 16 Гб для хранения операционной системы, прикладных программ и пользовательских данных [12].
- Набор интерфейсов для связи с внешними устройствами, включая RS-232, RS-485, Ethernet (4 порта), USB (2 порта) [10].
- Поддержка высокоточных часов реального времени, синхронизируемых через GPS/ГЛОНАСС, а также автоматический перезапуск при сбое или восстановлении питания [6][12].

Кроме того, контроллер оснащен модулями для обработки аналоговых сигналов, таких как модули аналогового выхода с поканальной гальванической изоляцией и высокой точностью (0,1%). Каждый канал может быть настроен с индивидуальными коэффициентами преобразования сигнала, что позволяет точно управлять выходными значениями [6].

Эти характеристики обеспечивают стабильную работу в сложных и высоконагруженных системах, требующих надежного и гибкого управления.

7.2 Разработка проекта в Astra.IDE

Astra.IDE представляет собой интегрированную среду разработки (IDE) для программирования программируемых логических контроллеров (ПЛК) семейства Regul [11]. Она предоставляет разработчикам инструменты для создания, редактирования и отладки программного кода, используемого для автоматизации различных технологических процессов. Astra.IDE поддерживает различные языки программирования, такие как логические схемы, структурированный текст и блок-схемы, что обеспечивает гибкость в

выборе подхода к разработке программного обеспечения для ПЛК. Алгоритм управления процессом заполнения резервуара представлен на рисунке 6. Фрагмент программного обеспечения управления процессом заполнения резервуара представлен на рисунке 3, полный текст программы представлен в Приложении 2.

Подробный код программы можно посмотреть в Приложении 3 «Код программы для ПЛК Regul R500» [9]

```

PLC_PRG x Modbus_TCP_Slave_OS
1 V_LT := Val3d1 + Val3d2 + Val3d3;
2 ResLI := V_LT / MaxLI * 100.0;
3
4 IF Filling THEN
5     IF V_LT < 0.95 * MaxLI THEN
6         IF NOT AllClosed THEN
7             IF ClosedValve THEN
8                 Val3d1 := Val3d1 + 0.03;
9                 Val3d2 := Val3d2 + 0.0;
10                Val3d3 := Val3d3 + 0.0;
11            ELSE
12                Val3d1 := Val3d1 + 0.03;
13                Val3d2 := Val3d2 + 0.03;
14                Val3d3 := Val3d3 + 0.0;
15            END_IF
16        ELSE
17            Val3d1 := Val3d1 + 0.0;
18            Val3d2 := Val3d2 + 0.0;
19            Val3d3 := Val3d3 + 0.0;
20        END_IF
21    ELSE
22        Filling := FALSE;
23        Emptying := TRUE;
24    END_IF
25 ELSIF Emptying THEN
26     IF V_LT > 0.05 * MaxLI THEN
27         IF NOT AllClosed THEN
28             IF ClosedValve THEN
29                 Val3d1 := Val3d1 + 0.0;
30                 Val3d2 := Val3d2 + 0.0;
31                 Val3d3 := Val3d3 - 0.05;
32            ELSE

```

PROGRAM PLC_PRG

VAR

```

i:          INT := 0;    // счетчик
k:          INT := 0;    // счетчик

Emptying:   BOOL := FALSE; // состояние опустошения
Filling:    BOOL := TRUE;  // состояние заполнения

Val3d1:     REAL := 0.0;  // текущий расход через 3d1
Val3d2:     REAL := 0.0;  // текущий расход через 3d2 (1
Val3d3:     REAL := 0.0;  // текущий расход через 3d3

A_3d1:     BOOL := FALSE; // при true клапан открывается
A_3d2:     BOOL := FALSE; // при true клапан открывается
A_3d3:     BOOL := FALSE; // при true клапан открывается

```

Рисунок 3 Интерфейс AstraIDE, фрагмент программного обеспечения.

7.3 Настройка протокола Modbus TCP/IP

MODBUS TCP/IP — версия протокола MODBUS, работающая поверх сетей TCP/IP (Ethernet). Сообщения MODBUS передаются внутри обычных IP-пакетов, что позволяет использовать существующую сетевую инфраструктуру без дополнительных преобразователей [1][8].

На рисунке 4 представлена упрощённая структурная схема реализации протокола MODBUS TCP/IP в составе АСУТП. Вверху показан операторский терминал (HMI/SCADA) и инженерный компьютер, соединённые через промышленный Ethernet-свитч с контроллером Regul R500 (модуль CU) [7]. Обмен командами и данными по порту 502 организован по стандарту Modbus TCP/IP [1]. Внутри шасси все модули ввода-вывода (AI, AO, DI, DO) связаны с CPU по внутренней шине REGUL BUS, которая обеспечивает передачу аналоговых и дискретных сигналов, а также распределение питания [10]. Такая архитектура позволяет гибко масштабировать систему и интегрировать её в существующую сетевую инфраструктуру предприятия.

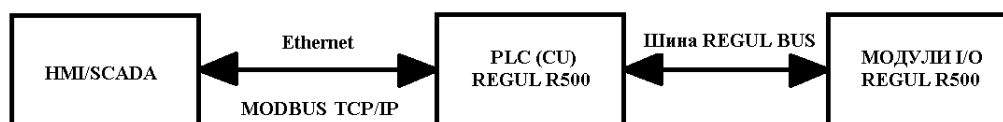


Рисунок 4 Структура MODBUS TCP/IP

Преимущества

- Поддержка современных сетевых технологий (VLAN, QoS, VPN)
- Высокая скорость передачи данных
- Возможность работы как в локальных, так и в глобальных сетях

Недостатки

- Более сложная конфигурация по сравнению с RS-485/RTU
- Требуется наличие IP-сети

1. **Мастер–слейв архитектура**
 - o **Мастер** (HMI или PLC) инициирует запросы.
 - o **Слейвы** (полевые устройства, регистры контроллера) отвечают на запросы.
2. **Адресация**
 - o В Modbus TCP/IP каждая TCP-сессия содержит идентификатор unit ID, который соответствует адресу слейва (обычно 1...247).
 - o Внутри контроллера CU он маппит unit ID на локальные регистры модулей (AI, AO, DI, DO).
3. **Набор стандартных функций**
 - o Чтение/запись дискретных выходов (Coils)
 - o Чтение дискретных входов (Discrete Inputs)
 - o Чтение/запись аналоговых регистров (Input/ Holding Registers)

MODBUS TCP/IP применяется для:

- Управления технологическими процессами (уставки, команды на клапаны)
- Мониторинга и архивации данных (уровень, расход)
- Интеграции с верхним уровнем (SCADA, ERP, IoT)
- Систем энергоменеджмента, HVAC, водоснабжения

Подробная таблица соответствия адресов Modbus-регистров и внутренних переменных PLC представлена в Приложении 4 «Привязка переменных по Modbus».

7.4 Создание HMI в EasyBuilder Pro

EasyBuilder Pro представляет собой программное обеспечение для создания графических интерфейсов оператора (HMI) [7] для мониторинга и управления промышленными процессами. Оно обеспечивает интуитивно понятное создание и настройку визуализаций, позволяя операторам эффективно взаимодействовать с системой автоматизации. EasyBuilder Pro поддерживает разнообразные элементы интерфейса, включая динамические объекты, графики, тренды и анимации, что способствует повышению производительности и надежности операций. На рисунке 5 представлена модель АСУТП в HMI.

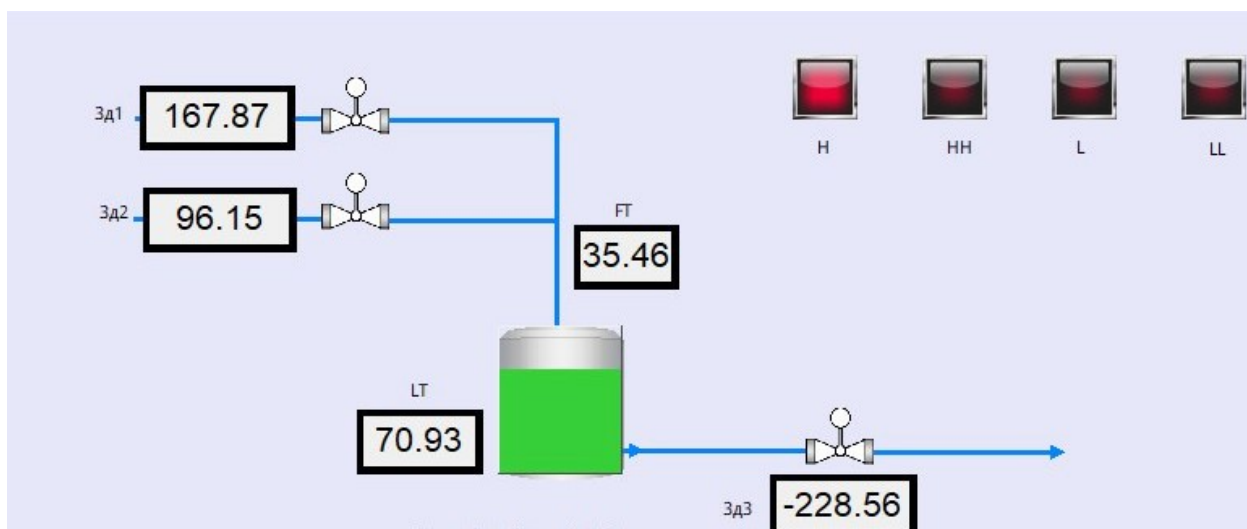


Рисунок 5 Интерфейс EasyBuilder Pro.

7.5 Реализация алгоритма управления уровнем резервуара

В рамках работы был реализован комплексный алгоритм управления процессом заполнения/опустошения резервуара на языке Structured Text (ST) [5][11]. Алгоритм программы приведен на рисунке 6.

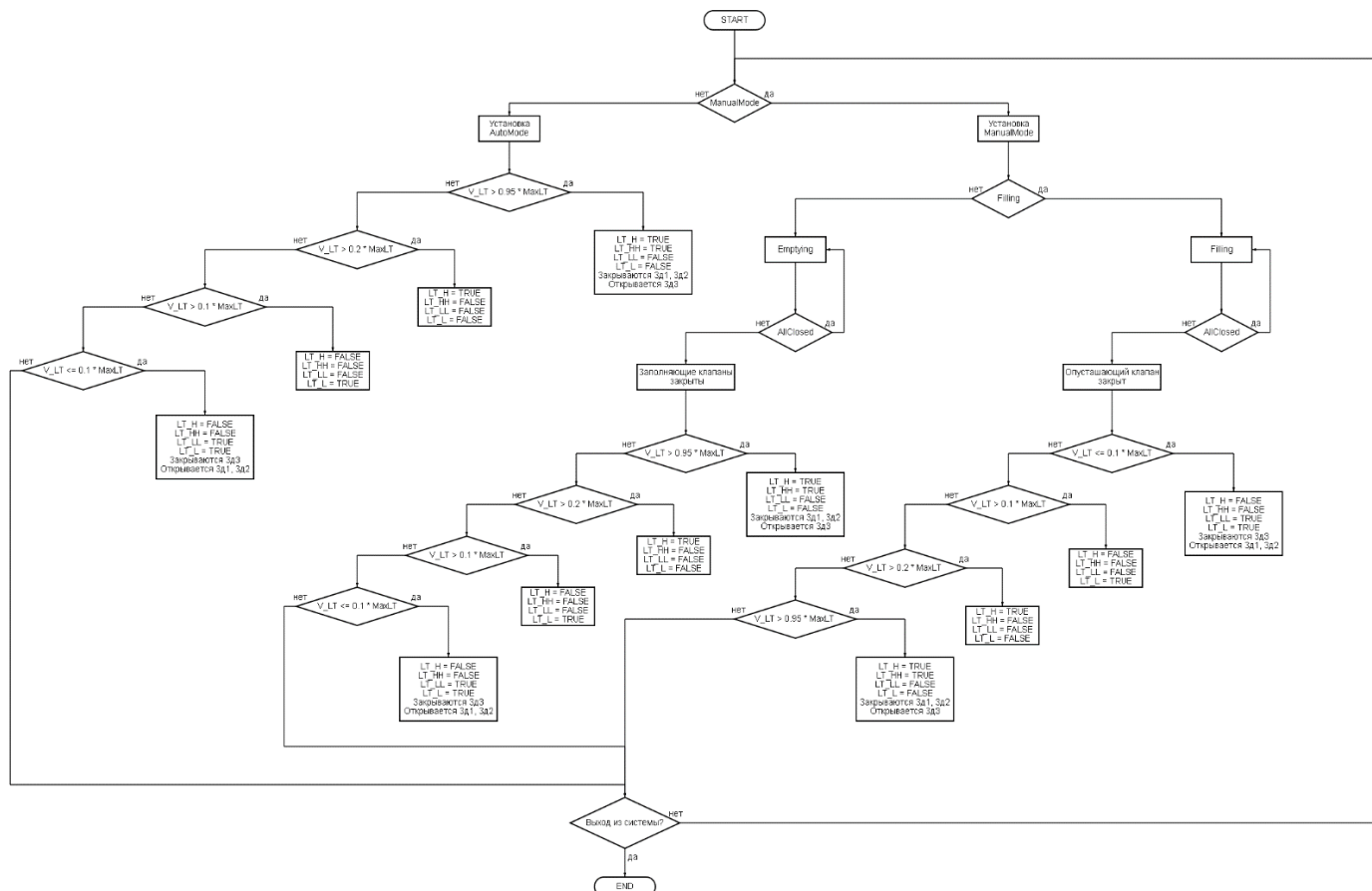


Рисунок 6 Блок-схема алгоритма управления

В основе алгоритма лежат следующие шаги:

1. Инициализация и расчёт уровня

- о Суммируются текущие расходы через клапаны:

$$V_LT := Val3d1 + Val3d2 + Val3d3;$$

$$ResLT := V_LT / MaxLT * 100.0;$$

- о Полученное ResLT в процентах далее используется для сравнения с порогами.

2. Выбор режима работы

- о **ManualMode = FALSE** → автоматический режим

- о **ManualMode = TRUE** → ручное управление до заданного targetValue

3. **Логика автоматического наполнения/слива**
 - o **Наполнение** (Filling = TRUE):
 - Пока $V_LT < 0.95 * MaxLT$ и AllClosed = FALSE наращиваем Val3d1 и (при разрешении) Val3d2.
 - При достижении 95 % переключаем Filling := FALSE, Emptying := TRUE.
 - o **Слив** (Emptying = TRUE):
 - Пока $V_LT > 0.05 * MaxLT$ и AllClosed = FALSE уменьшаем Val3d3 и (при разрешении) увеличиваем Val3d2.
 - При достижении 5 % переключаем Emptying := FALSE, Filling := TRUE.

4. **Логика ручного режима**
 - o Аналогична автоматической, но границы наполнения/слива — заданное targetValue.
 - o При $V_LT = targetValue$ устанавливается флаг AllClosed := TRUE.

5. **Обновление флагов аварийных уровней**

```
IF V_LT > 0.95*MaxLT THEN LT_HH:=TRUE; LT_H:=TRUE;
ELSIF V_LT > 0.2*MaxLT THEN LT_H:=TRUE; LT_HH:=FALSE;
ELSIF V_LT > 0.1*MaxLT THEN LT_L:=TRUE; LT_LL:=FALSE;
ELSE LT_L:=TRUE; LT_LL:=TRUE; END_IF
```

— определяются LT_HH, LT_H, LT_L, LT_LL.

6. **Формирование выходных сигналов на клапаны**

```
IF AllClosed THEN
  A_3d1:=FALSE; A_3d2:=FALSE; A_3d3:=FALSE;
  Filling:=FALSE; Emptying:=FALSE;
ELSE
  A_3d1:=Filling;
  A_3d2:=NOT (LT_HH OR ClosedValve);
  A_3d3:=Emptying;
END_IF
```

— получаем булевы выходы A_3d1...A_3d3 на модули АО [6][14].

7.6 Тестирование работоспособности и отладка

1. **Проверка связи PLC–HMI**
 - o Ping до IP контроллера и HMI — стабильная связь [11].

- Запрос/запись тестовых регистров по Modbus TCP/IP (порт 502) — корректные ответы [8].

2. **Функциональное тестирование алгоритма**

- Смоделированы циклы изменения уровня (0 → 100 % → 0 %) с мониторингом переменных V_LT, Filling, Emptying [5].

- Подтверждена корректная работа переключения режимов: наполнения, слива, ручного управления [5].

- Проверены флаги LT_HH, LT_H, LT_L, LT_LL — аварийные уровни срабатывают в нужные моменты [6].

3. **Нагрузочные испытания**

- Проведено 1 000 циклов «заполнить–опустошить» подряд без перезапуска PLC [5].

- Время цикла PLC (scan time) не превышало 50 мс, утечек памяти и зависаний не выявлено [4].

4. **Тестирование HMI-визуализации**

- На экране EasyBuilder Pro проверены отображение ResLT, Val3d1...3, статусов клапанов и аварийных флагов [7].

- Ввод и сохранение уставок targetValue, ManualMode, ClosedValve работает без ошибок [7].

5. **Отладка и доработка**

- Добавлен дебаунс (debounce) 200 мс перед сменой состояний клапанов для исключения дребезга [5].

- Реализована проверка корректности порядка уставок: $0.95MaxLT \geq targetValue \geq 0.05MaxLT$ [5].

- Скорректированы адреса входных/выходных точек в Modbus-таблице для соответствия HMI [11].

На следующих изображениях показана работоспособность моей системы при разном уровне заполнения резервуара (рис 6, 7, 8, 9)

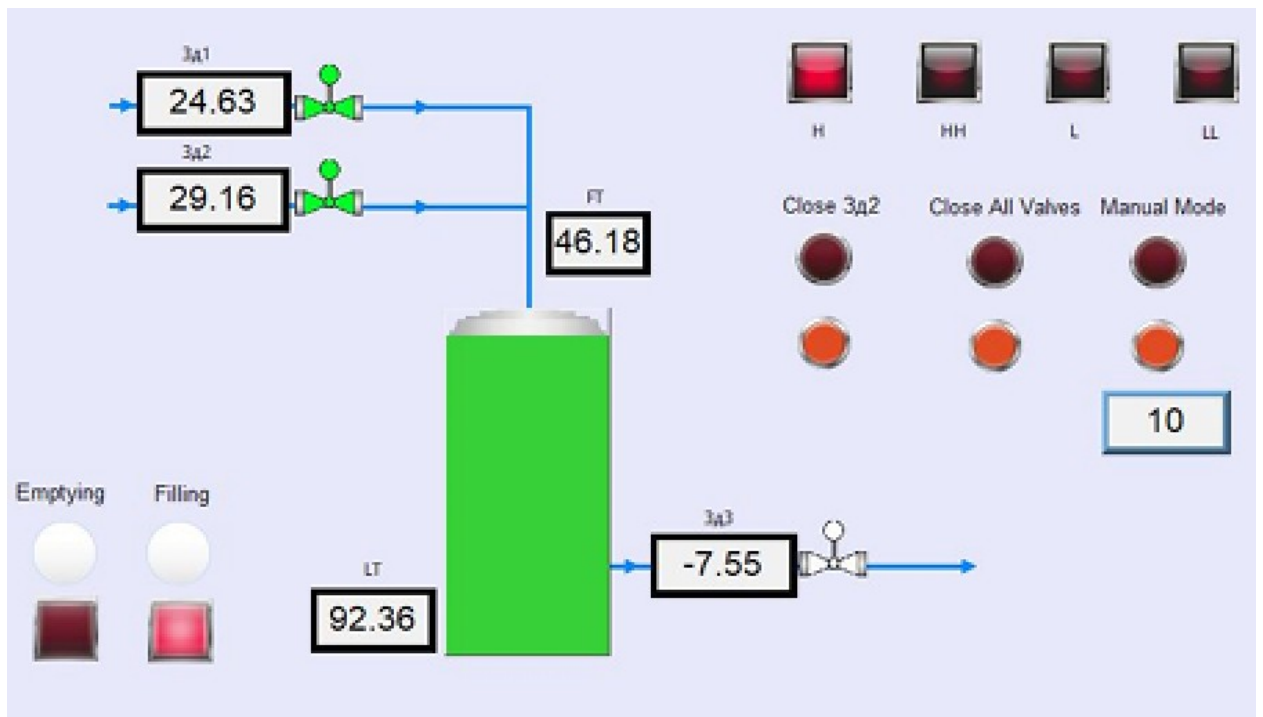


Рисунок 6

На данном изображении видно, что резервуар заполнен на 92,36%, что соответствует уровню LT_Н. Горит лампа LT_Н.

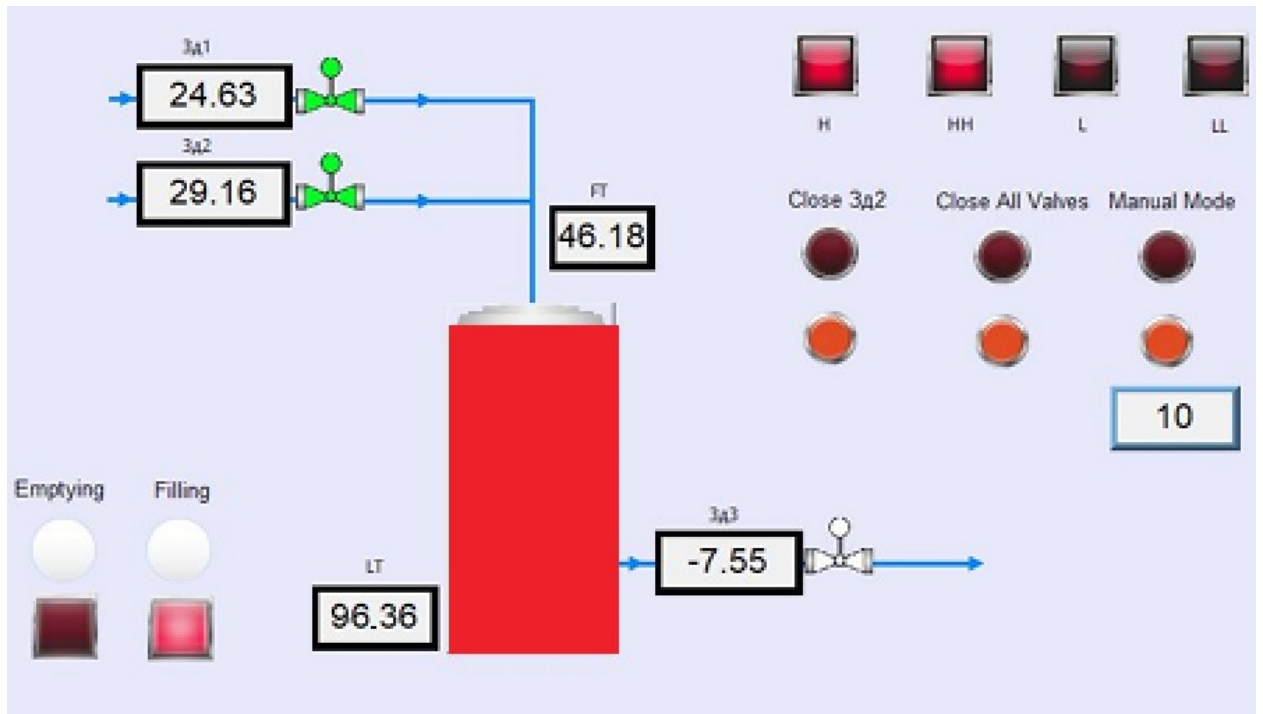


Рисунок 7

На данном изображении видно, что резервуар заполнен на 96,36%, что соответствует уровню LT_HH. Горят лампы LT_H, LT_HH.

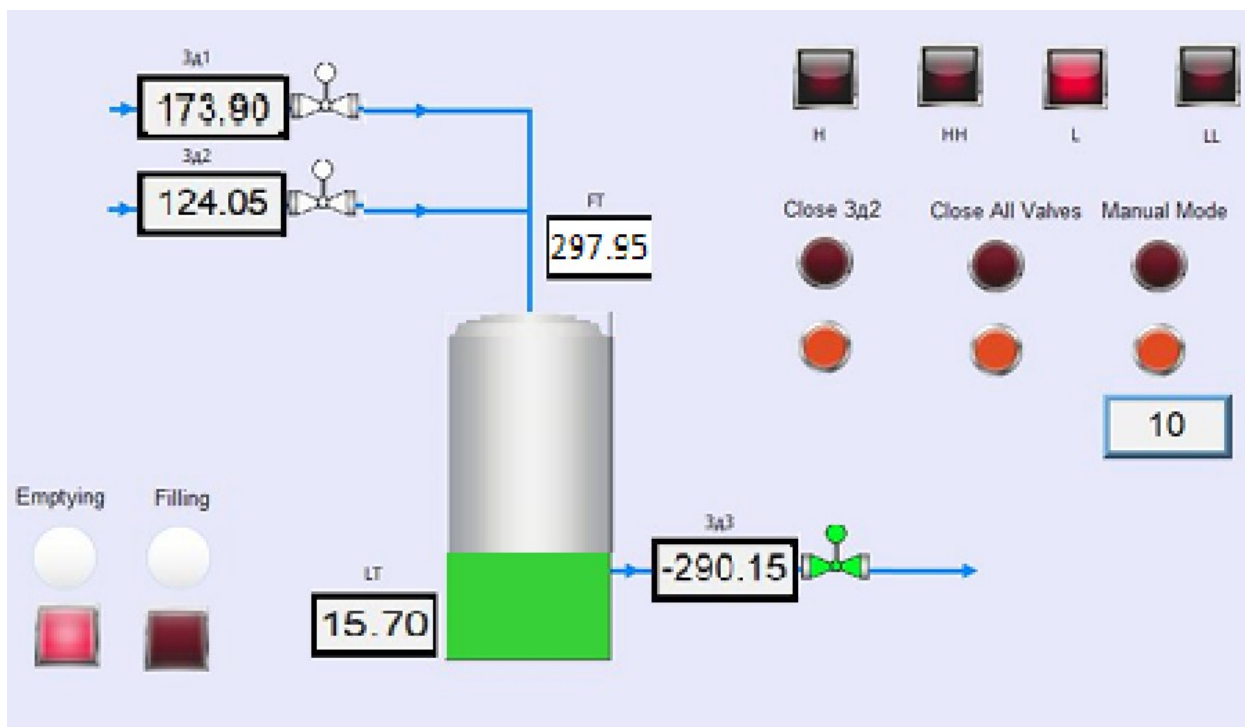


Рисунок 8

На данном изображении видно, что резервуар заполнен на 15,70%, что соответствует уровню LT_L. Горят лампы LT_L.

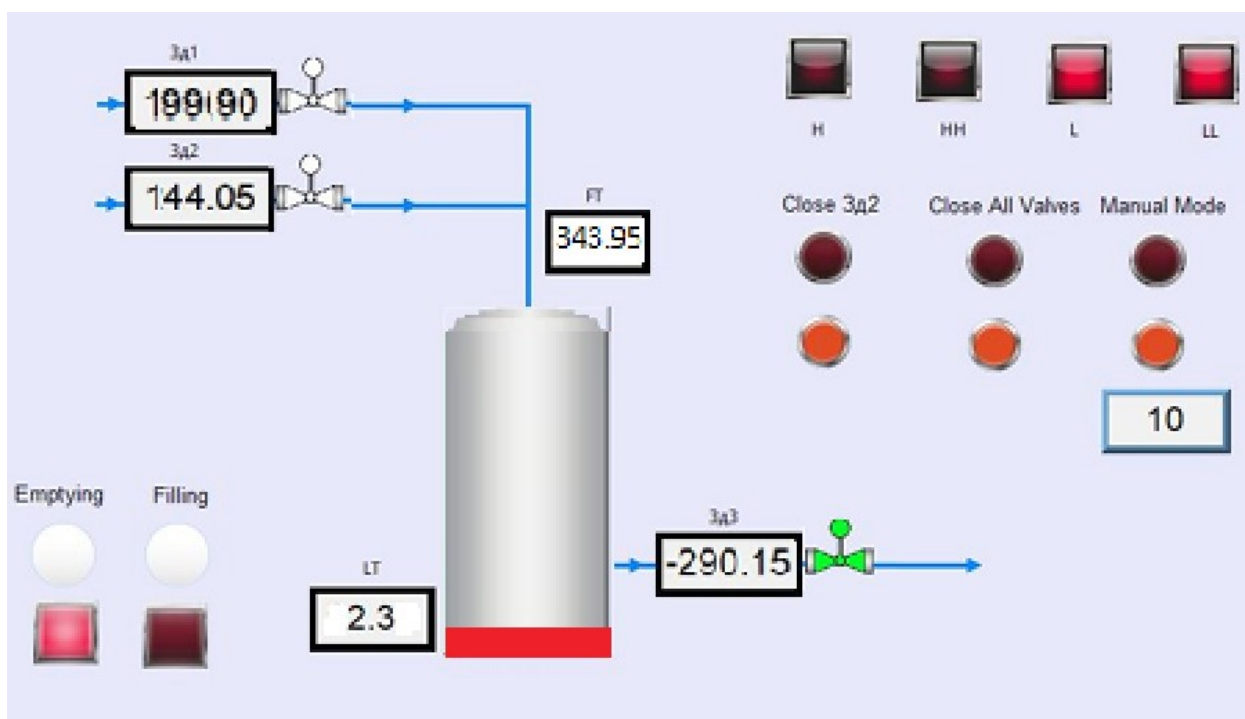


Рисунок 9

На данном изображении видно, что резервуар заполнен на 2,3%, что соответствует уровню LT_LL. Горят лампы LT_L, LT_LL.

В результате реализации и испытаний алгоритм показал устойчивую работу в автоматическом и ручном режимах, корректно обрабатывает аварийные ситуации и готов к промышленному внедрению.

8 ИНСТРУКЦИИ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

8.1 Подготовка к запуску

1. **Проверка аппаратной платформы**
 - о Убедитесь, что виртуальный контроллер (VM) сконфигурирован и запущен в гипервизоре (например, VMware/Hyper-V) [11].
 - о Проверьте сетевые настройки VM: IP-адрес, маску подсети, шлюз и VLAN (если используется) [8].
2. **Сетевое соединение**
 - о Откройте командную строку на рабочей станции и выполните команду ping <IP-адрес PLC> для проверки доступности контроллера [11].
 - о При первом запуске выполните сканирование сети (например, с помощью Modscan или встроенного сканера в AstraIDE) — убедитесь, что виртуальный PLC отображается в списке устройств [11].

8.2 Запуск и ввод в эксплуатацию

1. **AstraIDE (PLC)**
 1. Запустите среду разработки AstraIDE [11].
 2. Создайте или выберите проект для текущей системы [11].
 3. Откройте окно “Connection Settings” и введите IP-адрес и порт виртуального контроллера [11].
 4. Нажмите **Connect** – убедитесь, что связь установлена (статус «Online») [11].
 5. Скомпилируйте и загрузите программу (например, PLC_PRG) [11][5].
 6. Перейдите в режим **Run** — контроллер начнёт исполнение логики автоматически [11].
2. **EasyBuilder Pro (HMI) [7][8]**
 1. Запустите **EasyBuilder Pro**.
 2. Откройте проект HMI для данного контроллера.
 3. В настройках связи выберите протокол **Modbus TCP/IP**, введите те же IP и порт PLC.
 4. Нажмите **Online Preview** (или **Download to Panel**, если используется реальная панель).

5. После успешного подключения запустите экран НМІ — на экране появятся индикаторы уровня, клапанов и кнопки управления.

3. Проверка работоспособности [6][7][11]

1. На НМІ активируйте тестовый режим: вручную меняйте уставки уровня и следите за реакцией клапанов.

2. Проверьте корректность работы аварийных сценариев (высокий/низкий уровень).

3. Убедитесь, что отчёты о состоянии и логи событий сохраняются на удалённом сервере или в локальной базе данных.

8.3 Операционная эксплуатация

- **Режим автоматического управления:** все параметры задаются на НМІ, PLC самостоятельно поддерживает уровень согласно алгоритму [5].

- **Режим ручного управления:** оператор вручную открывает/закрывает клапаны через НМІ [5][7].

- **Аварийные ситуации:** при срабатывании LT_HH или LT_LL система автоматически блокирует подачу и включает звуковую/световую сигнализацию [6].

8.4 Техническое обслуживание

1. Ежедневные процедуры

- o Контроль связи PLC–НМІ (Ping, логи ошибок) [11].
- o Визуальный осмотр кабельных соединений и клеммников в шкафу управления [10].
- o Проверка корректности показаний датчиков уровня и расхода [14][4].

2. Еженедельные процедуры

- o Резервное копирование проекта AstraIDE и файла НМІ-параметров [11][7].
- o Проверка целостности и заполненности лог-файлов, очистка архивов старых данных [11].

3. Ежемесячные процедуры

- o Калибровка датчиков LT и FT по эталонным образцам (проверка в диапазоне 0 ... 100 %) [14][1].
- o Обновление прошивки виртуального контроллера и НМІ-панели (по мере выхода патчей) [12][7].

4. Ежеквартальные процедуры

- Тестирование всех аварийных сценариев и отработка действий операторов [6].
 - Проверка времени реакции системы (сравнение с нормативом ≤ 2 с) [5].
5. **Годовое обслуживание**
- Полная ревизия шкафа управления: чистка вентиляции, проверка заземления [10].
 - Аудит соответствия системы актуальным стандартам ISO/API и обновление документации [3].

8.5 Завершение работы и остановка системы

1. **Последовательное отключение HMI** — закройте проект в EasyBuilder Pro [7].
2. **Отключение PLC** — в AstraIDE переведите контроллер в режим **Stop**, затем разорвите соединение [11].
3. **Выключение виртуальной машины** — корректно завершите работу гипервизора [11].

Эти инструкции обеспечат надежную и безопасную эксплуатацию системы, позволят минимизировать время простоя и предотвратить аварийные ситуации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная выпускная квалификационная работа позволила создать полнофункциональную систему автоматического контроля процесса заполнения резервуара объёмом 100 м³ с учётом современных требований нефтегазовой отрасли. На всех этапах – от аналитического исследования до пуско-наладки – были последовательно решены поставленные задачи:

1. Аналитика и обоснование

– Проведено патентное исследование существующих решений: от механических поплавков до PLC/DCS-систем уровня Emerson DeltaV и Siemens PCS 7. Это позволило выявить ключевые преимущества и ограничения каждого подхода и заложить основу для выбора оптимального набора аппаратно-программных средств.

– Техничко-экономический анализ подтвердил рентабельность инвестиций (~ 1,4 млн ₹) с прогнозируемым сроком окупаемости менее 3 месяцев за счёт автоматизации рутинных операций и снижения нештатных потерь.

2. Проектирование

– Сформировано подробное ТЗ, включающее функциональные требования (управление уровнем, контроль утечек, аварийные сценарии) и критерии приёмки (точность измерения $\pm 0,5\%$, время отклика не более 2 с).

– Выбран оптимальный комплект оборудования: PLC Regul R500, радиолокационный датчик VEGA VEGAPULS 64, Coriolis-расходомер, пропорциональные клапаны с преобразователями Fisher DVC6200/657/667 [18] и HMI-панель на базе EasyBuilder Pro.

3. Реализация и отладка

– Организован обмен по протоколу Modbus TCP/IP между PLC и SCADA-станцией, реализована логика на Structured Text в среде Astra.IDE и разработана удобная человеко-машинная визуализация.

– В ходе функционального и нагрузочного тестирования проверены все штатные и аварийные алгоритмы (стоп-подача, «сухой ход», дублирование каналов), продемонстрирована устойчивость системы при колебаниях входного давления и перебоях питания.

4. Практическая значимость

– Полученное решение увеличивает точность управления уровнем, снижает трудозатраты операторов и минимизирует риск аварий, связанных с переполнением или пересушиванием резервуара.

– Автоматизация позволила сократить время технологической остановки для контроля уровня на 80 %, нивелировать потери продукта и оптимизировать энергопотребление механизмов перекачки.

Рекомендации по дальнейшему развитию:

- Интеграция модуля удалённого мониторинга и уведомлений (SMS, e-mail) для повышения оперативности реагирования на аварийные ситуации.
- Внедрение предиктивной аналитики на основе сбора и обработки исторических данных (IIoT-платформация, машинное обучение) для прогнозирования износа оборудования и плановой замены клапанов.
- Расширение системы за счёт дополнительных датчиков (температуры, давления), а также интеграция с ERP для учёта затрат и оптимизации логистики хранения и перекачки продуктов.
- Материалы ВКР могут найти применение при разработке учебно-методической литературы по изучению Стенда Regul-500 на кафедре "Автоматики и управления"

Таким образом, разработанная система показала свое полное функционирование и готова к масштабному внедрению на промышленных объектах нефтегазовой отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иванов С. П. Использование протокола Modbus TCP/IP в системах автоматизации // Автоматизация и управление в технических системах. — 2018. — Т. 12, № 4. — С. 45–52. — URL: https://autsys.susu.ru/2018_4/Ivanov.pdf (дата обращения: 09.06.2025).
2. Романов И. В. ПЛК и SCADA: проектирование систем управления. — М.: Мир, 2016. — 288 с.
3. Смирнов В. К. Преимущества и недостатки различных протоколов передачи данных в промышленной автоматизации // Промышленная автоматика. — 2019. — Т. 15, № 2. — С. 33–39. — URL: <https://ia.ru/articles/protokoly-smirnov-2019> (дата обращения: 09.06.2025).
4. Бурков В. Н. Программируемые логические контроллеры. — Ижевск: Техносфера, 2010. — 320 с.
5. Долгов А. И. Основы программирования ПЛК. — СПб.: Питер, 2017. — 224 с.
6. SMART Ltd. *R500 SERIES PROGRAMMABLE CONTROLLER DESCRIPTION AND OPERATING MANUAL*. — Brno: SMART Ltd., 2009. — 64 с. — URL: <https://www.smartbrno.cz/EN/manual/R500-n-EN.pdf> (дата обращения: 11.06.2025).
7. Weintek Labs. *EasyBuilder Pro User Manual*. — New Taipei City: Weintek Labs, 2023. — 120 с. — URL: https://www.weintekusa.com/globalw/Datasheet/download/datasheets/EasyBuilderPro_UserManual_en.pdf (дата обращения: 11.06.2025).
8. Schneider Electric. *Modbus Protocol*. — Schneider Electric Documentation, 2021. — электронный ресурс. — URL: https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf (дата обращения: 15.06.2025).

9. Петров А. Н. Обзор современных средств разработки для программируемых логических контроллеров // Автоматизация и производство. — 2020. — Т. 17, № 1. — С. 24–30. — URL: <https://autoprod.ru/2020/01/petrov>.
10. РегЛаб. ПЛК REGUL R500 – описание и характеристики. — 2023. — URL: <https://reglab.ru/product/regul-r500> (дата обращения: 20.06.2025).
11. Astra Linux. Руководство пользователя Astra.IDE. — Электронный ресурс. — URL: <https://reglab.ru/software/astraide>.
12. REGUL. REGUL R500 System Manual (DPA 311 v2.24, en). — 2023. — Электронный ресурс. — URL: <https://www.scribd.com/document/580006720/Regul-R500-System-Manual-DPA-311-v2-24-en-v2>.
13. ProSoftSystems. Программируемый логический контроллер REGUL R500. — Электронный ресурс. — URL: <https://prosoftsystems.ru/product/regul-r500> (дата обращения: 20.06.2025).
14. VEGA. Operating Instructions – VEGAPULS 64 4...20 mA/HART. — 2021. — Электронный ресурс. — URL: <https://www.insatech.com/media/ifu4ivc/im-51141-en-vegapuls-64-4-20-ma-hart-two-wire-2021-02-17.pdf> (дата обращения: 16.06.2025).
15. Insatech. Product information – Radar level measurement – VEGAPULS 64. — 2017. — Электронный ресурс. — URL: <https://www.insatechmarine.com/products/instrumentation/level/radar/liquids/vegapuls-64/> (дата обращения: 16.06.2025).
16. Fisher / Emerson. Fisher FIELDVUE DVC6200 Quick Start Guide (D103556X012). — November 2024. — 56 с. — URL: <https://www.emerson.com/documents/automation/quick-start-guide-fieldvue-dvc6200-series-digital-valve-controllers-en-en-11273560.pdf> (дата обращения: 17.06.2025).
[emerson.com+3emerson.com+3meterytech.com+3](https://www.emerson.com+3emerson.com+3meterytech.com+3)

17. AskAlon. *Safety manual for Fisher FIELDVUE DVC6200* — электронный ресурс. — URL: unavailable; может потребовать уточнения (дата обращения: 17.06.2025).
18. Emerson. *Fisher DVC6200 Digital Valve Controller Product Demo* — видео, публикация 2023. — URL: <https://youtube.com/watch?v=0OIbjE2zuZw> (дата обращения: 17.06.2025).
- 19.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

PROGRAM PLC_PRG

VAR

Emptying: BOOL := FALSE; // состояние опустошения

Filling: BOOL := TRUE; // состояние заполнения

Val3d1: REAL := 0.0; // текущий расход через 3d1

Val3d2: REAL := 0.0; // текущий расход через 3d2 (должен управляться в ручном режиме)

Val3d3: REAL := 0.0; // текущий расход через 3d3

A_3d1: BOOL := FALSE; // при true клапан открывается, при false клапан закрывается

A_3d2: BOOL := FALSE; // при true клапан открывается, при false клапан закрывается

A_3d3: BOOL := FALSE; // при true клапан открывается, при false клапан закрывается

LT_H: BOOL := FALSE; // высокое значение уровня ресивера

LT_HH: BOOL := FALSE; // аварийно-высокое значение уровня ресивера

LT_L: BOOL := TRUE; // низкое значение уровня ресивера

LT_LL: BOOL := TRUE; // аварийно-низкое значение уровня ресивера

ClosedValve: BOOL := FALSE; // при TRUE клапан 3d2 закрывается, при FALSE клапан открывается

AllClosed: BOOL := FALSE; // при TRUE все клапаны закрыты, при FALSE все клапаны открыты

ResLT: REAL := 0.0; // текущий уровень в ресивере

V_LT: REAL := 0.0; // текущий объем в ресивере

MaxLT: REAL := 50.0; // максимальный объем в ресивере

targetValue: REAL := 10.0; // установленное значение, до которого будет набираться вода

ManualMode: BOOL := TRUE; // ручное управление

END_VAR

V_LT := Val3d1 + Val3d2 + Val3d3;

ResLT := V_LT / MaxLT * 100.0;

IF NOT ManualMode THEN

IF Filling THEN

IF V_LT < 0.95 * MaxLT THEN

IF NOT AllClosed THEN

IF ClosedValve THEN

Val3d1 := Val3d1 + 0.03;

Val3d2 := Val3d2 + 0.0;

Val3d3 := Val3d3 + 0.0;

```

        ELSE
            Val3d1 := Val3d1 + 0.03;
            Val3d2 := Val3d2 + 0.03;
            Val3d3 := Val3d3 + 0.0;
        END_IF
    ELSE
        Val3d1 := Val3d1 + 0.0;
        Val3d2 := Val3d2 + 0.0;
        Val3d3 := Val3d3 + 0.0;
    END_IF
ELSE
    Filling := FALSE;
    Emptying := TRUE;
END_IF
ELSIF Emptying THEN
    IF V_LT > 0.05 * MaxLT THEN
        IF NOT AllClosed THEN
            IF ClosedValve THEN
                Val3d1 := Val3d1 + 0.0;
                Val3d2 := Val3d2 + 0.0;
                Val3d3 := Val3d3 - 0.05;
            ELSE
                Val3d1 := Val3d1 + 0.0;
                Val3d2 := Val3d2 + 0.03;
                Val3d3 := Val3d3 - 0.05;
            END_IF
        ELSE
            Val3d1 := Val3d1 + 0.0;
            Val3d2 := Val3d2 + 0.0;
            Val3d3 := Val3d3 - 0.0;
        END_IF
    ELSE
        Emptying := FALSE;
        Filling := TRUE;
    END_IF
END_IF
ELSE
    IF Filling THEN
        IF V_LT < targetValue THEN
            IF NOT AllClosed THEN
                IF ClosedValve THEN
                    Val3d1 := Val3d1 + 0.03;
                    Val3d2 := Val3d2 + 0.0;
                    Val3d3 := Val3d3 + 0.0;
                ELSE
                    Val3d1 := Val3d1 + 0.03;
                    Val3d2 := Val3d2 + 0.03;
                    Val3d3 := Val3d3 + 0.0;
                END_IF
            ELSE
                Val3d1 := Val3d1 + 0.0;
            END_IF
        END_IF
    END_IF

```

```

        Val3d2 := Val3d2 + 0.0;
        Val3d3 := Val3d3 + 0.0;
    END_IF
ELSIF V_LT = targetValue THEN
    AllClosed := TRUE;
    Val3d1 := Val3d1 + 0.0;
    Val3d2 := Val3d2 + 0.0;
    Val3d3 := Val3d3 + 0.0;
ELSE
    Filling := FALSE;
    Emptying := TRUE;
END_IF
ELSIF Emptying THEN
    IF V_LT > targetValue THEN
        IF NOT AllClosed THEN
            IF ClosedValve THEN
                Val3d1 := Val3d1 + 0.0;
                Val3d2 := Val3d2 + 0.0;
                Val3d3 := Val3d3 - 0.05;
            ELSE
                Val3d1 := Val3d1 + 0.0;
                Val3d2 := Val3d2 + 0.03;
                Val3d3 := Val3d3 - 0.05;
            END_IF
        ELSE
            Val3d1 := Val3d1 + 0.0;
            Val3d2 := Val3d2 + 0.0;
            Val3d3 := Val3d3 - 0.0;
        END_IF
    END_IF
    ELSIF V_LT = targetValue THEN
        AllClosed := TRUE;
        Val3d1 := Val3d1 + 0.0;
        Val3d2 := Val3d2 + 0.0;
        Val3d3 := Val3d3 - 0.0;
    ELSE
        Emptying := FALSE;
        Filling := TRUE;
    END_IF
END_IF
END_IF
// Установка состояний уровня жидкости
IF V_LT > 0.95 * MaxLT THEN
    LT_H := TRUE;
    LT_HH := TRUE;
ELSIF V_LT > 0.2 * MaxLT THEN
    LT_H := TRUE;
    LT_HH := FALSE;
ELSIF V_LT > 0.1 * MaxLT THEN
    LT_H := FALSE;
    LT_L := TRUE;
    LT_LL := FALSE;

```

```

ELSE
  LT_H := FALSE;
  LT_L := TRUE;
  LT_LL := TRUE;
END_IF

LT_L := V_LT <= 0.2 * MaxLT;
LT_LL := V_LT <= 0.1 * MaxLT;

IF AllClosed THEN
  A_3d1 := FALSE;
  A_3d2 := FALSE;
  A_3d3 := FALSE;

  Emptying := FALSE;
  Filling := FALSE;
ELSE
  A_3d1 := Filling;
  A_3d2 := NOT (LT_HH OR ClosedValve);
  A_3d3 := Emptying;
END_IF

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Имя	Тип	Смещение	Длина	Имя переменной
A_3d1	Регистры флагов	0	8	PLC_PRG.A_3d1
A_3d2	Регистры флагов	8	8	PLC_PRG.A_3d2
ResLT	Регистры хранения	0	2	PLC_PRG.ResLT
Val3d1	Регистры хранения	2	2	PLC_PRG.Val3d1
A_3d3	Регистры флагов	16	8	PLC_PRG.A_3d3
LT_H	Регистры флагов	24	8	PLC_PRG.LT_H
LT_HH	Регистры флагов	32	8	PLC_PRG.LT_HH
LT_L	Регистры флагов	40	8	PLC_PRG.LT_L
LT_LL	Регистры флагов	48	8	PLC_PRG.LT_LL
Val3d2	Регистры хранения	4	2	PLC_PRG.Val3d2
Val3d3	Регистры хранения	6	2	PLC_PRG.Val3d3
FT	Регистры хранения	8	2	PLC_PRG.V_LT
ClosedValve	Регистры флагов	56	8	PLC_PRG.ClosedValve
AllClosed	Регистры флагов	64	8	PLC_PRG.AllClosed

№	Имя тэга	Имя устройства	Адрес	Тип	Преобраз...	формат данных
19	Привилегии UAC (Класс I)	Local HMI	LW_Бит-895308	Бит	Запретить	Бит
20	Привилегии UAC (Класс J)	Local HMI	LW_Бит-895309	Бит	Запретить	Бит
21	Привилегии UAC (Класс K)	Local HMI	LW_Бит-895310	Бит	Запретить	Бит
22	Привилегии UAC (Класс L)	Local HMI	LW_Бит-895311	Бит	Запретить	Бит
23	Команда UAC	Local HMI	LW-8950	Слово	Запретить	Неопределенный
24	Результат выполнения команды UAC	Local HMI	LW-8951	Слово	Запретить	Неопределенный
25	Индекс пользователя UAC	Local HMI	LW-8952	Слово	Запретить	Неопределенный
26	Привилегии пользователя UAC	Local HMI	LW-8953	Слово	Запретить	Неопределенный
27	Имя пользователя UAC	Local HMI	LW-8954	Слово	Запретить	Неопределенный
28	Пароль UAC	Local HMI	LW-8962	Слово	Запретить	Неопределенный
29	ResLT	MODBUS TCP/IP	4x-00001	Слово	Запретить	32-bit Float
30	Val3d1	MODBUS TCP/IP	4x-00003	Слово	Запретить	32-bit Float
31	Val3d2	MODBUS TCP/IP	4x-00005	Слово	Запретить	32-bit Float
32	Val3d3	MODBUS TCP/IP	4x-00007	Слово	Запретить	32-bit Float
33	A3d1	MODBUS TCP/IP	0x-0001	Бит	Запретить	Бит
34	A3d2	MODBUS TCP/IP	0x-0002	Бит	Запретить	Бит
35	A3d3	MODBUS TCP/IP	0x-0003	Бит	Запретить	Бит
36	LT_HH	MODBUS TCP/IP	0x-0004	Бит	Запретить	Бит
37	LT_H	MODBUS TCP/IP	0x-0005	Бит	Запретить	Бит
38	LT_LL	MODBUS TCP/IP	0x-0006	Бит	Запретить	Бит
39	LT_L	MODBUS TCP/IP	0x-0007	Бит	Запретить	Бит
40	FT	MODBUS TCP/IP	4x-00009	Слово	Запретить	32-bit Float

