

Ссылка для цитирования этой статьи:

Важдает К.В., Смирнов Н.В., Харисов Т.А. Техничко-экономическое обоснование программно-аппаратной реализации управления микроклиматом в погребах с использованием протокола Modbus RTU // Human Progress. 2026. Том 12, Вып. 6. URL: http://progress-human.com/images/2026/Tom12_6/Vazhdaev.pdf DOI 10.46320/2073-4506-2026-6a-7.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОКЛИМАТОМ В ПОГРЕБАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОТОКОЛА MODBUS RTU

Важдает Константин Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Водоснабжение и водоотведение»,
Уфимский государственный нефтяной технический университет;
доцент кафедры «Электроника и физика наноструктур»,
Уфимский университет науки и технологий,
г. Уфа, Российская Федерация

Смирнов Николай Владиславович

инженер-исследователь,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Харисов Тимур Артурович

инженер-исследователь,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Аннотация. В работе проведён анализ технологических требований к микроклимату в обоих типах погребов, определены ключевые контролируемые параметры и допустимые диапазоны их значений. Техничко-экономическое обоснование включает расчёт капитальных и эксплуатационных затрат на внедрение системы, оценку сроков окупаемости, а также сравнение с альтернативными решениями (ручное управление, применение других средств автоматизации). Продемонстрировано, что использование ОВЕН ПР205 позволяет достичь оптимального баланса между стоимостью, надёжностью и функциональностью системы. Отдельно рассмотрены преимущества решения: гибкость настройки, возможность удалённого мониторинга через облачный сервис OwenCloud, простота интеграции в существующие инженерные системы.

Результаты исследования подтверждают экономическую целесообразность внедрения предложенной системы автоматизации: снижение потерь продукции, сокращение трудозатрат

на обслуживание погребов и повышение стабильности условий хранения. Статья будет полезна инженерам, проектировщикам систем автоматизации, а также владельцам частных и коммерческих объектов, заинтересованным в эффективном управлении микроклиматом.

Описан алгоритм работы системы, включающий инициализацию, чтение аналоговых сигналов 4-20 мА от датчиков температуры, влажности и CO₂, масштабирование, сравнение с уставками и формирование управляющих воздействий. Детально рассмотрена настройка интерфейса RS-485 и протокола Modbus RTU для связи с регуляторами Гидролок. Представлены результаты тестирования программы в режиме эмуляции и при работе с реальными сигналами.

Ключевые слова: технико-экономическое обоснование, экономическая целесообразность, эффективное управление микроклиматом, алгоритм управления, автоматизация микроклимата.

Введение

Современные системы автоматизации микроклимата в сельском хозяйстве и частных домовладениях требуют не только надёжного аппаратного обеспечения, но и качественного программного обеспечения, реализующего алгоритмы управления [1], [2]. Программируемые логические контроллеры, такие как ОВЕН ПР205, поддерживают стандарт IEC 61131-3 и позволяют разрабатывать программы на нескольких языках, включая FBD (Function Block Diagram), LD (Ladder Diagram) и ST (Structured Text) [3], [4].

В научных трудах [5-8] были рассмотрены различные системы автоматизации микроклимата для помещений – овощного и винного погребов. Приведены сильные и слабые стороны схмотехнических решений автоматизации микроклимата для таких помещений и затронуты вопросы экономической эффективности.

Целью данной работы является рассмотрение технико-экономического обоснования. В работе приводится детальное описание программной части системы, включая алгоритм управления, реализацию программы на языке ST в среде CODESYS и настройку связи по протоколу Modbus RTU с регуляторами Гидролок.

Материалы и методы исследований

Алгоритм работы системы представляет собой циклический процесс, основанный на двух принципах регулирования: двухпозиционном для вентиляции и непрерывном для температуры. Алгоритм выполняется независимо для каждого из двух помещений, но с использованием единых глобальных переменных контроллера. Инициализация системы

выполняется однократно при запуске и включает настройку аналоговых входов ПЛК на режим приёма сигнала 4-20 мА, конфигурирование дискретных выходов DO1 и DO2 как выходов, инициализацию порта RS-485 (скорость 9600 бод, восемь битов данных, один стоп-бит, без контроля чётности) и присвоение начальных значений уставкам температуры, влажности и концентрации углекислого газа.

Основной цикл выполняется бесконечно и состоит из нескольких последовательных шагов. Сначала ПЛК считывает значения тока с аналоговых входов AI1...AI6, которые преобразуются во внутренние целые числа в диапазоне от 0 до 27648. Затем выполняется масштабирование: для температуры диапазон 4-20 мА соответствует интервалу от минус 50 до плюс 50 градусов Цельсия, для влажности – от 0 до 100 процентов, а для концентрации CO₂ – от 0 до 5000 ppm. Далее следуют блоки управления температурой. Для овощного погреба при снижении температуры ниже одного градуса ПЛК отправляет регулятору Гидролок с адресом 1 команду на открытие клапана на 50 процентов, а при повышении температуры выше трёх градусов – команду на закрытие клапана (ноль процентов). Для винного погреба пороги сдвинуты: при температуре ниже десяти градусов клапан открывается на 30 процентов, а при превышении четырнадцати градусов – закрывается. Управление вентиляцией также имеет два контура. Вентилятор овощного погреба включается, если концентрация углекислого газа превышает 800 ppm, либо если влажность выходит за пределы диапазона 80–90 процентов. Вентилятор винного погреба включается при тех же 800 ppm по CO₂, но диапазон влажности составляет 65-75 процентов.

После всех вычислений ПЛК формирует команды по протоколу Modbus RTU: значение положения клапана для овощного погреба (переменная MB_CMD_OVOSH) отправляется в регистр 0x0001 устройства с адресом 1, а команда для винного погреба (MB_CMD_WINE) – в тот же регистр устройства с адресом 2. Завершает цикл задержка в 10 секунд, после чего программа возвращается к началу и повторяет все операции.

Для реализации алгоритма выбран язык ST (Structured Text) — текстовый язык высокого уровня, входящий в стандарт IEC 61131-3 [9], [10]. Выбор языка ST обусловлен следующими преимуществами:

- компактность записи по сравнению с FBD и LD;
- удобство реализации математических вычислений (масштабирование);
- простота реализации условных конструкций IF...THEN...ELSIF...ELSE...END_IF;
- лёгкость отладки и сопровождения кода.

Программа разработана в среде CODESYS V3.5 SP19 — стандартной среде программирования для контроллеров ОВЕН ПР205. CODESYS поддерживает все языки IEC 61131-3, имеет встроенный симулятор для отладки программ без подключения реального оборудования, а также поддерживает онлайн-мониторинг переменных и отладку [11].

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 1.

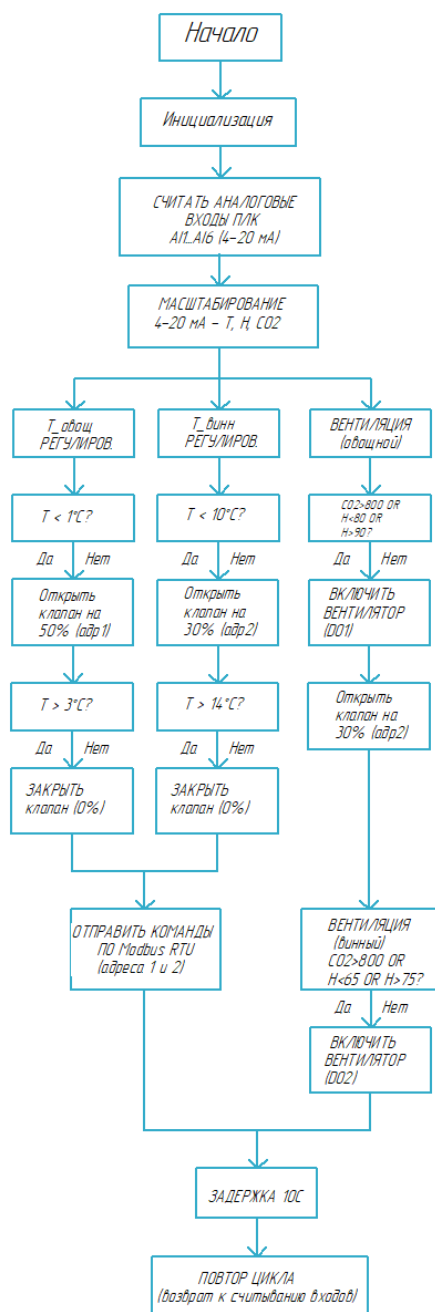


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма работы системы

Результаты исследования

Перед написанием основного кода определены глобальные переменные, соответствующие аналоговым входам ПЛК, физическим величинам, уставкам и командам управления.

Таблица 1

Глобальные переменные программы

Переменная	Тип	Назначение
AI1_RAW...AI6_RAW	INT	Сырые значения АЦП (0–27648) от датчиков 4-20 мА
T_OVOSH, H_OVOSH, CO2_OVOSH	REAL	Физические величины для овощного погреба
T_WINE, H_WINE, CO2_WINE	REAL	Физические величины для винного погреба
MB_CMD_OVOSH, MB_CMD_WINE	BYTE	Команды для регуляторов Гидролок (0–100%)
DO1_FAN_OVOSH, DO2_FAN_WINE	BOOL	Сигналы управления вентиляторами
MB_ERROR1, MB_ERROR2	WORD	Коды ошибок Modbus-обмена

Ниже представлен полный текст программы на языке Structured Text.

Листинг 1. Полный текст программы на языке ST

```
pascal
(* ===== *)
(* ПРОГРАММА УПРАВЛЕНИЯ МИКРОКЛИМАТОМ ПОГРЕБОВ *)
(* Язык: ST (Structured Text) *)
(* ПЛК: ОВЕН ПР205 *)
(* ===== *)

(* 1. МАСШТАБИРОВАНИЕ (4-20 мА → физика) *)
T_OVOSH := -50.0 + (REAL(AI1_RAW) * (100.0 / 27648.0));
H_OVOSH := REAL(AI2_RAW) * (100.0 / 27648.0);
CO2_OVOSH := REAL(AI3_RAW) * (5000.0 / 27648.0);

T_WINE := -50.0 + (REAL(AI4_RAW) * (100.0 / 27648.0));
H_WINE := REAL(AI5_RAW) * (100.0 / 27648.0);
CO2_WINE := REAL(AI6_RAW) * (5000.0 / 27648.0);

(* 2. УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРОЙ *)
IF T_OVOSH < 1.0 THEN
    MB_CMD_OVOSH := 50;
```

```
ELSIF T_OVOSH > 3.0 THEN
    MB_CMD_OVOSH := 0;
END_IF
```

```
IF T_WINE < 10.0 THEN
    MB_CMD_WINE := 30;
ELSIF T_WINE > 14.0 THEN
    MB_CMD_WINE := 0;
END_IF
```

(3. УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ *)*

```
IF (CO2_OVOSH > 800.0) OR (H_OVOSH < 80.0) OR (H_OVOSH > 90.0) THEN
    DO1_FAN_OVOSH := TRUE;
ELSE
    DO1_FAN_OVOSH := FALSE;
END_IF
```

```
IF (CO2_WINE > 800.0) OR (H_WINE < 65.0) OR (H_WINE > 75.0) THEN
    DO2_FAN_WINE := TRUE;
ELSE
    DO2_FAN_WINE := FALSE;
END_IF
```

(4. ОТПРАВКА MODBUS-КОМАНД *)*

```
ModbusRTU_Master_1(
    Execute := TRUE,
    SlaveAddr := 1,
    FuncCode := 6,
    RegAddr := 16#0001,
    RegValue := MB_CMD_OVOSH,
    Error => MB_ERROR1
);
ModbusRTU_Master_2(
    Execute := TRUE,
    SlaveAddr := 2,
    FuncCode := 6,
    RegAddr := 16#0001,
    RegValue := MB_CMD_WINE,
    Error => MB_ERROR2
);
```

Первый блок программы выполняет масштабирование аналоговых входов. Для температуры овощного погреба сырое значение AI1_RAW преобразуется в градусы Цельсия по формуле, учитывающей диапазон от минус 50 до плюс 50 градусов. Для влажности и концентрации CO₂ используются более простые линейные преобразования, поскольку их шкалы начинаются с нуля.

Второй и третий блоки реализуют управление температурой с помощью регуляторов Гидролок. В обоих случаях используется условный оператор IF...ELSIF...ELSE, который проверяет текущее значение температуры и формирует соответствующую команду для клапана. Для овощного погреба команда составляет 50 процентов открытия при понижении температуры, для винного – 30 процентов, что обусловлено более низкой тепловой инерцией винного погреба и необходимостью более плавного регулирования.

Четвёртый и пятый блоки управляют вентиляцией. Здесь также используются условные операторы, но с более сложным условием, объединяющим три критерия с помощью логической операции OR (логическое ИЛИ). Вентилятор включается, если выполняется хотя бы одно из условий: превышение концентрации CO₂, слишком низкая влажность или слишком высокая влажность.

Шестой блок обеспечивает отправку команд по протоколу Modbus RTU. Функциональный блок ModbusRTU_Master настраивается на запись одного регистра (функция 06) в регистр положения клапана (0x0001). Для каждого регулятора указывается свой адрес (1 для овощного погреба, 2 для винного), а значение команды берётся из соответствующих переменных MB_CMD_OVOSH и MB_CMD_WINE.

Для организации обмена данными между ПЛК и регуляторами Гидролок выполнены как аппаратные, так и программные настройки. На корпусе каждого регулятора с помощью DIP-переключателей задаётся уникальный Modbus-адрес: адрес 1 для регулятора в овощном погребе и адрес 2 для регулятора в винном погребе. Параметры последовательного порта RS-485 в проекте CODESYS настроены следующим образом: скорость передачи 9600 бит в секунду, восемь битов данных, один стоп-бит, контроль чётности отсутствует, таймаут составляет 1000 миллисекунд. Контроль корректности обмена осуществляется с помощью переменных MB_ERROR1 и MB_ERROR2. Если значение этих переменных равно нулю, обмен выполняется успешно; если оно отлично от нуля, необходимо проверить подключение витой пары, правильность назначения адресов и настройки порта.

Обсуждение

Важным параметром программы является период опроса датчиков. Задержка в 10 секунд после каждого цикла выбрана с учётом тепловой инерции погреба: изменения температуры в подвальных помещениях происходят в течение часов, поэтому более частый опрос не даёт преимуществ в точности регулирования, но увеличивает нагрузку на процессор ПЛК, количество переключений реле и трафик по сети RS-485. Выбор порогов срабатывания основан на литературных данных. Для овощного погреба выбраны пороги температуры 1 и 3 градуса при целевом значении 2 градуса, а диапазон влажности составляет 80-90 процентов. Для винного погреба пороги температуры сдвинуты в область более высоких значений (10 и 14 градусов при цели 12 градусов), а диапазон влажности сужен до 65-75 процентов, что соответствует рекомендациям виноделов.

В представленной версии программы гистерезис отсутствует, то есть пороги срабатывания и отключения совпадают. При колебаниях параметров около пороговых значений это может приводить к частому переключению реле. Решение этой проблемы – добавление гистерезиса, когда, например, вентилятор включается при CO₂ выше 800 ppm, а выключается только при снижении ниже 700 ppm. В среде CODESYS такое поведение легко реализовать с помощью стандартного функционального блока HYSTERESIS. Сравнение с альтернативными реализациями показывает, что язык ST имеет ряд преимуществ перед FBD и LD. Код на ST более компактен: разработанная программа занимает около 40 строк, тогда как аналогичная по функциональности схема на FBD потребовала бы более 150 графических блоков. Кроме того, ST проще модифицировать и переносить на другие платформы ПЛК. Однако для демонстрации логики неспециалистам FBD остаётся более наглядным.

По сравнению с использованием готовых SCADA-решений разработанная программа имеет очевидное преимущество в стоимости: она не требует приобретения дорогих лицензий. В то же время она выполняет все необходимые функции автоматизации микроклимата в двух помещениях и может быть легко адаптирована под конкретные условия. Программа прошла несколько этапов тестирования. Сначала в режиме онлайн в CODESYS отслеживались значения аналоговых входов: при изменении температуры рукой значения плавно менялись, что подтвердило корректность подключения датчиков. Затем принудительной установкой переменных DO1 и DO2 в TRUE проверялось срабатывание реле – визуально по щелчку и свечению светодиодов. Далее изменением переменных AI1_RAW...AI6_RAW вручную имитировались различные режимы работы: норма, низкая температура, высокая влажность, превышение CO₂. Во всех случаях наблюдались ожидаемые срабатывания дискретных выходов и отправка Modbus-команд. С помощью программы-эмулятора Modbus Slave

подтверждена корректность передачи команд регуляторам. Наконец, система проработала в непрерывном режиме 48 часов без сбоев; утечек памяти не обнаружено.

Ограничения текущей версии программы связаны с отсутствием защиты от «дребезга» реле при колебаниях параметров около пороговых значений, а также с отсутствием аварийной сигнализации при обрыве датчиков. Кроме того, если по техническому заданию в системе не предусмотрен увлажнитель, то при падении влажности ниже нижнего порога система может только включить вентилятор, что не повышает влажность. Для регионов с сухим климатом требуется соответствующая доработка.

Заключение

В работе рассмотрено технико-экономическое обоснование. Приводится детальное описание программной части системы, включая алгоритм управления, реализацию программы на языке ST в среде CODESYS и настройку связи по протоколу Modbus RTU с регуляторами Гидролок.

В результате проведённых исследований разработана программа управления системой автоматического поддержания микроклимата в овощном и винном погребах на базе ПЛК ОВЕН ПР205. Разработан алгоритм работы системы, включающий инициализацию, чтение 6 аналоговых сигналов 4-20 мА, масштабирование, сравнение с уставками и формирование управляющих воздействий (вентиляция – двухпозиционное регулирование, клапаны отопления – пропорциональное регулирование). Программа реализована на языке ST в среде CODESYS V3.5 SP19. Приведён полный листинг программы, включающий масштабирование, условные операторы и отправку Modbus-команд. Выполнена настройка интерфейса RS-485 и протокола Modbus RTU для связи с двумя регуляторами Гидролок (адреса 1 и 2, функция 0x06, регистр 0x0001).

Перспективы дальнейшего развития программы включают добавление гистерезиса для устранения «дребезга» реле, добавление аварийной сигнализации при обрыве датчиков, реализация ПИД-регулятора для точного поддержания температуры в винном погребе, добавление возможности удалённого мониторинга через Ethernet (обмен данными с SCADA или облачным сервисом OwenCloud).

Список литературы

1. Трисвятский Л.А. Хранение зерна, плодов, овощей и винограда. М.: Колос, 2008. 352 с.
2. Монастырский О.А., Тарасенко В.П. Автоматизация технологических процессов в сельском хозяйстве. М.: КолосС, 2010. 328 с.

3. ОВЕН. ПЛК ПР200. Руководство по эксплуатации. М.: ОВЕН, 2024. 85 с.
4. CODESYS: от основ программирования до промышленной автоматизации. М.: Инфра-Инженерия, 2022. 408 с.
5. Ключев С., Пшеченков К.А., Мальцев С.В. Система климат-контроль в овощехранилище // Автоматизация в промышленности. 2012. № 2. С. 32-35.
6. Бодров М.В. Эффективность применения вихревых воздухоохладителей в овощехранилищах // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 8(620). С. 66-71.
7. Бобров В.И., Соргутов И.В. Автоматизация овощехранилищ при помощи холодильных установок // Вестник науки. 2024. № 6. С. 111-116.
8. Иванов И.И., Петров А.А. Развитие цифровой экономики в России // Вестник экономики. 2025. № 4. С. 112-125.
9. IEC 61131-3:2013. Programmable controllers – Part 3: Programming languages. Geneva: ISO, 2013. 350 p.
10. Modbus Application Protocol Specification V1.1b3. Modbus Organization, Inc., 2012. 50 p.
11. Гидролок Professional BS RS-485. Руководство по эксплуатации. ООО «Гидролок», 2023. 28 с.

FEASIBILITY STUDY OF THE SOFTWARE AND HARDWARE IMPLEMENTATION OF MICROCLIMATE CONTROL IN CELLARS USING THE MODBUS RTU PROTOCOL

Vazhdaev Konstantin Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Head of the Department of «Water Supply and Sanitation»,
Ufa State Petroleum Technological University Russian Federation;
Associate Professor of the Department of «Electronics and Physics of Nanostructures»,
Ufa University of Science and Technology,
Ufa, Russian Federation

Smirnov Nikolay Vladislavovich

Research engineer,
Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation

Kharisov Timur Arturovich

Research engineer,
Ufa State Petroleum Technological University,
Ufa, Russian Federation

Abstract. The paper analyzes the technological requirements for the microclimate in both types of cellars, identifying key control parameters and acceptable ranges for their values. The feasibility study includes calculating capital and operating costs for system implementation, assessing payback periods, and comparing them with alternative solutions (manual control, other automation tools). It is demonstrated that the use of the Owen PR205 system allows for an optimal balance between cost, reliability, and system functionality. The advantages of the solution are discussed separately: flexible configuration, remote monitoring via the OwenCloud cloud service, and ease of integration into existing engineering systems.

The study results confirm the economic feasibility of implementing the proposed automation system: reduced product loss, reduced labor costs for cellar maintenance, and improved stability of storage conditions. This article will be useful for engineers, automation system designers, and owners of private and commercial properties interested in effective microclimate management. The system's operating algorithm is described, including initialization, reading 4-20 mA analog signals from temperature, humidity, and CO₂ sensors, scaling, comparison with setpoints, and generating control actions. Configuring the RS-485 interface and Modbus RTU protocol for communication with Hydrolock controllers is covered in detail. The results of testing the program in emulation mode and with real signals are presented.

Key words: feasibility study, economic feasibility, effective microclimate management, control algorithm, microclimate automation.

References

1. Trisvyatskiy L.A. Storage of grain, fruits, vegetables and grapes. Moscow: Kolos, 2008. 352 p.
2. Monastyrsky O.A., Tarasenko V.P. Automation of technological processes in agriculture. Moscow: KolosS, 2010. 328 p.
3. OWEN. PLC PR200. Operation manual. Moscow: OWEN, 2024. 85 p.
4. CODESYS: from programming basics to industrial automation. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2022. 408 p.

5. Klyuev S., Pshechenkov K.A., Maltsev S.V. Climate control system in vegetable storage // Automation in industry. 2012. № 2. P. 32-35.
6. Bodrov M.V. Efficiency of using vortex air coolers in vegetable storages // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Construction. 2010. № 8(620). P. 66-71.
7. Bobrov V.I., Sorgutov I.V. Automation of vegetable storages using refrigerating units // Bulletin of Science. 2024. № 6. P. 111-116.
8. Ivanov I.I., Petrov A.A. The development of the digital economy in Russia // Bulletin of Economics. 2025. № 4. P. 112-125.
9. IEC 61131-3:2013. Programmable controllers – Part 3: Programming languages. Geneva: ISO, 2013. 350 p.
10. Modbus Application Protocol Specification V1.1b3. Modbus Organization, Inc., 2012. 50 p.
11. Hidrolock Professional BS RS-485. Operation manual. Hidrolock LLC, 2023. 28 p.