

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Г.Ф. МОРОЗОВА»

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К АВТОМАТИЗАЦИИ, РОБОТИЗАЦИИ
И УПРАВЛЕНИЮ В ТЕХНИЧЕСКИХ,
ОРГАНИЗАЦИОННЫХ, ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей
и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции
студентов и молодых ученых

Воронеж, 19 и 26 марта 2026 г.

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER EDUCATION
«VORONEZH STATE UNIVERSITY OF FORESTRY AND TECHNOLOGIES
NAMED AFTER G.F. MOROZOV»

INNOVATIVE APPROACHES TO AUTOMATION,
ROBOTIZATION AND MANAGEMENT IN TECHNICAL,
ORGANIZATIONAL, ECONOMIC SYSTEMS

Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Lecturers and
Specialists and the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students
and Young Scientists

Voronezh, March 19 and 26, 2026

Voronezh 2026

УДК 681.5+001.895

И66

И66 Инновационные подходы к автоматизации, роботизации и управлению в технических, организационных, экономических системах : материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых, Воронеж, 19 и 26 марта 2026 г. / отв. ред. Ю. С. Никитина ; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛУ». – Воронеж, 2026. – 264 с. – URL: <https://vgltu.ru/nauka/konferencii/2026/innovacionnye-podhody-k-avtomatizacii-robotizacii-i-upravleniyu-v-tehnicheskikh-organizacionnyh-ekonomicheskikh-sistemah/>. – Текст : электронный.

ISBN 978-5-7994-1252-4

В сборнике представлены материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов, а также студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы автоматизации, роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах», прошедшие в г. Воронеже 19 и 26 марта 2026 года.

Материалы конференций предназначены для специалистов в области автоматизации производственных процессов, научных сотрудников, аспирантов и студентов вузов.

УДК 681.5+001.895

ISBN 978-5-7994-1252-4

© ФГБОУ ВО «ВГЛУ», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1. Инновации в автоматизации технологических процессов и производств

Акиньшин Е.В. Поляков С.И. Автоматизация сушки керамического кирпича в туннельной сушилке	6
Акиньшин Е.В. Поляков С.И. Система управления сушкой керамического кирпича в туннельной сушилке.....	22
Белоус Д.В., Щербакова И.В. Анализ данных телеметрии для прогнозирования выхода из строя подшипников конвейера.....	37
Бронников Е.С. Автоматизация системы освещения производственного цеха на основе датчиков присутствия.....	44
Волошин Д.В., Никитина Ю.С. Разработка универсального шлюза для управления энергопотреблением в системе «умный дом».....	49
Горлов Д.А., Стариков А.В. Разработка автоматического терморегулятора с использованием платформы ARDUINO	54
Грибанов А.А., Гетманская О.С., Мещерякова А.А., Иванченко А.В. Исследование и разработка методов автоматизации процессов калибрования и тестирования электронных компонентов на производстве.....	73
Захаров Д.А., Поляков С.И. Автоматизация процесса дозирования компонентов при производстве строительных смесей.....	83
Ковун Д.А., Стариков А.В. Методы и средства автоматизированного экологического мониторинга на промышленных предприятиях.....	91
Кодацкая А.С., Грибанов А.А., Мещерякова А.А. Оптимизация расхода лакокрасочных материалов при роботизированной окраске крупногабаритных конструкций.....	105
Кузнецов Д.Н. Информационное моделирование покрытий криволинейного очертания при проектировании круглых в плане зданий.....	114
Лискин Д.С., Попов О.В., Щербакова И.В. Оценка экономической эффективности внедрения систем оптической сортировки пиломатериалов в контексте Индустрии 4.0.....	120

Мещерякова А.А. Разработка рекомендаций по созданию автоматизированной системы управления процессом смешивания древесной стружки со связующим на основе методов неразрушающего контроля.....	128
Михута Я.А., Писарева С.В. Управление деформациями древесины при ЧПУ-обработке: комплексный подход на основе стабилизации влажности и алгоритмической компенсации.....	133
Очеретяный А.С., Грибанов А.А., Мещерякова А.А., Исследование и разработка автоматизированной системы управления технологическими процессами газораспределительной станции.....	138
Ряполова Т.В., Иванов С.А., Лобанов Д.В. Поляков С.И., Сидоркин О.А. Критерии выбора датчика уровня для различных сред и условий эксплуатации.....	144
Сазин Д.И., Мещерякова А.А., Грибанов А.А. Исследование и оптимизация систем автоматического регулирования параметров контактной сварки для повышения качества сварных соединений.....	154
Сапрыкин М.Ю., Мещерякова А.А., Грибанов А.А. Анализ и совершенствование методики и автоматизированных средств технологического процесса дозирования компонентов асфальтобетонной смеси.....	160
Сафонова Ю.А. Методика проектирования систем супервизорного управления (НЦУ) ленточными сушильными установками.....	167
Терентьевский Р.В., Грибанов А.А., Мещерякова А.А. Исследование и разработка системы мониторинга и управления внутрипроизводственными транспортными процессами на промышленном предприятии.....	173
Щербаков Е.Ю., Щербакова И.В. Применение преобразования Фурье в обработке музыкальных композиций.....	180
Узунов К.А., Щербакова И.В. Двухконтурное адаптивное управление процессом фрезерования древесины на основе анализа сигнала мощности шпинделя.....	192
Хади И., Мещерякова А.А., Грибанов А.А. Повышение эффективности хлебопекарного производства путем автоматизации участка формования теста.....	196
Ходарев С.Р., Щербакова И.В. Проектирование системы удаленного мониторинга и интеллектуального управления сушильными камерами пиломатериалов.....	201

Секция 2. Робототехнические комплексы и автономные мобильные платформы нового поколения

Богданов И.В., Мещерякова А.А., Мельников А.В. Методика построения навигационного комплекса для автономной снегоуборочной техники в условиях нестабильной атмосферной среды.....	207
Васильев В.В., Афоничев Д.Н., Аксенов И.И. Усовершенствованная телескопическая штанга беспилотного летательного аппарата – амфибии.....	214
Казаковцев А.С., Калков Д.Ю. Применение беспилотных воздушных судов в поисково-спасательных операциях.....	221
Кожемякин А.Е., Сушко Т.И. Разработка и управление полетом беспилотного летательного аппарата малой грузоподъемности.....	227
Копенкин К.Н., Поляков С.И., Проектирование мехатронного модуля в составе системы вентиляции «умного дома».....	232
Локтионов А.С., Стариков А.В., Мельников А.В. Использование автономных мобильных роботов в городских условиях.....	239
Черных М.Е., Руссу А.В., Щербакова И.В. Гибридная архитектура промышленного интернета вещей: интеграция сушильных камер с системами SCADA/MES посредством протоколов OPC UA и MQTT.....	253
Шаназаров М.Б., Поляков С.И. Мехатронное устройство для автоматизации управления рулонными шторами на основе двигателя и микропроцессорной системы.....	259

СЕКЦИЯ 1.
ИННОВАЦИИ В АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

DOI: 10.58168/IAARMT2026_6-21

УДК 658.827

АВТОМАТИЗАЦИЯ СУШКИ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА
В ТУННЕЛЬНОЙ СУШИЛКЕ
AUTOMATION OF CERAMIC BRICK DRYING IN A TUNNEL
DRYER

Акиньшин Е.В., студент

Поляков С. И., к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

poliakov1960@mail.ru

Akinshin E.V., Student

Polyakov S.I., PhD (Engineering), Associate professor

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Аннотация: В статье рассматривается автоматизация сушки кирпича с использованием современных систем управления. Обсуждаются преимущества применения основных положений теории автоматического управления и алгоритмического обеспечения для управления процессами сушки. Алгоритм управления разрабатывался специально для управления электроприводами задвижки туннельной сушилки. Алгоритм таким образом может переключать технологическое оборудование по обслуживанию исполнительными органами туннельной сушилки в автоматическое, ручное и дистанционное управление. В результате реализации данных автоматизированных технологий достигается высокое качество и надёжность процесса сушки, что способствует снижению производственных затрат, а также увеличивает общую экономическую эффективность предприятия.

Abstract. The article discusses the automation of brick drying using modern control systems. It discusses the advantages of using the basic principles of automatic control theory and algorithmic support for controlling drying processes. The control algorithm was specifically developed for controlling the electric drives of the tunnel dryer's gate. This algorithm allows for the automatic, manual, and remote control of the tunnel dryer's process equipment. By implementing these automated technologies, the quality and reliability of the drying process are improved, leading to reduced production costs and increased overall economic efficiency for the enterprise.

Ключевые слова: автоматизация, сушка, керамический кирпич, системы управления, теплоноситель, передаточная функция, структурная схема, частотная характеристика, алгоритмическое обеспечение, электрозадвижки, открытие, закрытие, термометр

Keywords: automation, drying, ceramic bricks, control systems, heat carrier, transfer function, block diagram, frequency response, algorithmic software, electric valves, opening, closing, thermometer

Глиняный строительный кирпич является древнейшим искусственным строительным материалом, выдержал испытание временем в течение 5000 лет и в настоящее время продолжает оставаться преобладающим стеновым материалом. Это объясняется рядом причин: повсеместным распространением кирпичных глин, возможностью использования любых видов топлива для обжига кирпича, его твердостью, водостойкостью и огнестойкостью, а также его экологичностью.

По назначению кирпич может быть конструктивным – для рядовой кладки под штукатурку или последующую облицовку и лицевым – для кладки под расшивку.

Водопоглощение кирпича должно быть не менее 6% и не более 28% от массы этих изделий, высушенных до постоянной массы.

Кирпичи-камни имеют форму прямоугольного параллелепипеда с равными гранями на лицевых поверхностях. На лицевой поверхности кирпича не должно быть отколов, трещин, известковых включений, пятен, выцветов и других дефектов, видимых на расстоянии 10 м на открытой площадке при дневном свете. Цвет, рисунок рельефа и другие показатели внешнего вида изделия должны соответствовать утвержденному образцу-эталону.

В производстве глиняного кирпича исходным сырьем для производства керамического кирпича служат суглинки.

Туннельная сушилка представляет собой рабочую камеру, где горячий воздух подается с одного конца длинного туннеля и движется по нему к противоположному концу, где удаляется вентиляторами. Сушильные изделия размещаются на вагонетках, поезд которых перемещается внутри туннельной сушилки. Подача вагонеток производится с противоположного конца сушилки навстречу потоку теплоносителя.

Теплоноситель от обжиговых печей подается навстречу поезду вагонеток, обеспечивая досушивание кирпича, по мере перемещения по туннелю постепенно его температура понижается, а влажность наоборот растет. Тем самым осуществляется щадящий режим сушки в начальной его стадии в момент загрузки вагонеток в сушилку с кирпичем-сырцом.

Получение кирпича с наилучшими показателями и механическими свойствами невозможно без строгого соблюдения режимов тепловой обработки, то есть сушки и обжига. В связи с этим необходима автоматизация процесса сушки керамического кирпича.

Туннельная сушилка представляет собой рабочую камеру, где горячий воздух подается с одного конца длинного туннеля и движется по нему к противоположному концу, где удаляется вентиляторами. Сушильные изделия размещаются на вагонетках, поезд которых приводится в действие гидравлическими толкателями в направлении противоположном подачи сушильного агента.

Доминирующим показателем, влияющим на качество сушки керамического кирпича, является температура теплоносителя.

Структурная схема автоматического регулирования температуры теплоносителя представлена на рисунке 1.[1]

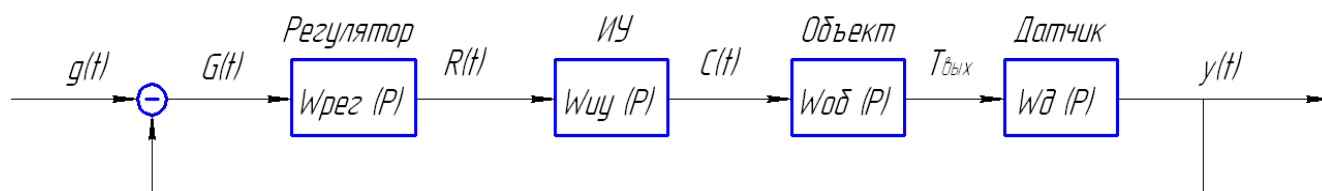


Рисунок 1 – Структурная схема АСР без гибкой положительной обратной связи

Объект регулирования – температура теплоносителя в туннельной сушилке, представляющая собой апериодическое звено 2-ого порядка так как сушилка является двухёмкостным объектом (первая ёмкость – газовые горелки, вторая ёмкость – сушилка).

Передаточная функция объекта

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{(T_{суш}P + 1)(T_{газ}P + 1)}, \quad (1)$$

$k_{об}$ – коэффициент усиления объекта;

$T_{суш}$ – постоянная времени сушиллки;

$T_{газ}$ – постоянная времени газовых горелок;

P – оператор Лапласа, который при нулевых начальных условиях отождествляется с оператором дифференцирования $\frac{d}{dt}$.

Регулятор – контроллер, работающий по ПИД - закону регулирования с передаточной функцией:

$$W_{рег}(P) = k_{рег} + \frac{k_{рег}}{t_u \cdot P} + k_{рег} \cdot t_{np} \cdot P, \quad (2)$$

где $k_{рег}$ – коэффициент усиления регулятора;

t_u – время изодрома;

t_{np} – время предварения.

Исполнительное устройство – задвижка, регулирующая подачу газа (воздуха) в газовые горелки, передаточная функция которой для усилительного звена имеет вид:

$$W_{uy}(p) = k_{uy}, \quad (3)$$

k_{uy} – коэффициент усиления исполнительного устройства.

Датчик – термометр сопротивления, предназначенный для измерения температуры в сушиллке. Так как инерционность датчика в сотни раз меньше инерционности туннельной сушиллки, то для расчётов его можно использовать в виде усилительного звена:

$$W_{\partial}(p) = K_{\partial}, \quad (4)$$

k_{∂} – коэффициент усиления датчика температуры.

Выход на рабочий режим туннельной сушилки по температуре достаточно длителен и составляет не менее 5 минут, в связи, с чем необходимо снизить инерционность сушилки по температуре путём введения к стандартному закону ПИД - регулирования дифференцирующего звена (гибкой положительной обратной связи), обеспечивающего форсированное введение в закон регулирования значения температуры теплоносителя. Передаточная функция представляет собой дифференцирующее звено 1-ого порядка:

$$W_{oc}(p) = K_{oc} \cdot p, \quad (5)$$

k_{oc} – коэффициент усиления звена обратной связи.

На основе анализа процесса сушки керамического кирпича пиломатериалов в ЗАО «Семилукский комбинат строительных материалов» для синтеза АСУТП были выбраны следующие параметры передаточных функций, звеньев АСР температуры теплоносителя. [2]

Коэффициенты усиления звеньев:

$k_{об}$ - коэффициент усиления объекта; $k_{об} = 0,7$,

k_{uy} - коэффициент усиления исполнительного устройства; $k_{uy} = 1$,

k_{δ} - коэффициент усиления датчика; $k_{\delta} = 1$,

k_{oc} - коэффициент усиления звена обратной связи; $k_{oc} = 10$.

Постоянные времени звеньев:

$T_{сушилки} = 400\text{с}$, $T_{газгорелки} = 200\text{с}$.

Передаточная функция АСР в разомкнутом состоянии получена путём перемножения передаточных функций динамических звеньев, образующих контур регулирования:

$$W_{раз}(P) = W_{рез}(P) \cdot W_{uy}(P) \cdot W_{об}(P) \cdot W_{\delta}(P), \quad (6)$$

$$W_{раз}(P) = k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{t_u P} + t_{np} P\right) \cdot k_{uy} \cdot \frac{K_{об}}{(T_{суш} P + 1) \cdot (T_{газ} P + 1)} \cdot k_{\delta} \quad (7)$$

Проведя необходимые преобразования, получим:

$$W_{раз}(P) = k_p \cdot (t_u P + 1 + t_{np} P^2 \cdot t_u) \cdot k_{uy} \cdot k_{об} \cdot \frac{k_{\delta}}{(T_{суш} P + 1) \cdot (T_{газ} P + 1) \cdot t_u P}. \quad (8)$$

В замкнутом состоянии с отрицательной обратной связью:

$$W_{зам}(P) = \frac{k_p \cdot (t_u P + 1 + t_{np} P^2 \cdot t_u) \cdot k_{uy} \cdot k_{об} \cdot \frac{k_o}{(T_{суш} P + 1) \cdot (T_{газ} P + 1) \cdot t_u P}}{1 + (k_p \cdot (t_u P + 1 + t_{np} P^2 \cdot t_u) \cdot k_{uy} \cdot k_{об} \cdot \frac{k_o}{(T_{суш} P + 1) \cdot (T_{газ} P + 1) \cdot t_u P})} \quad (9)$$

Для снижения инерционности туннельной сушилки и колебательности переходного процесса по температуре, в контур АСР вводят гибкую положительную обратную связь (рисунок 2).

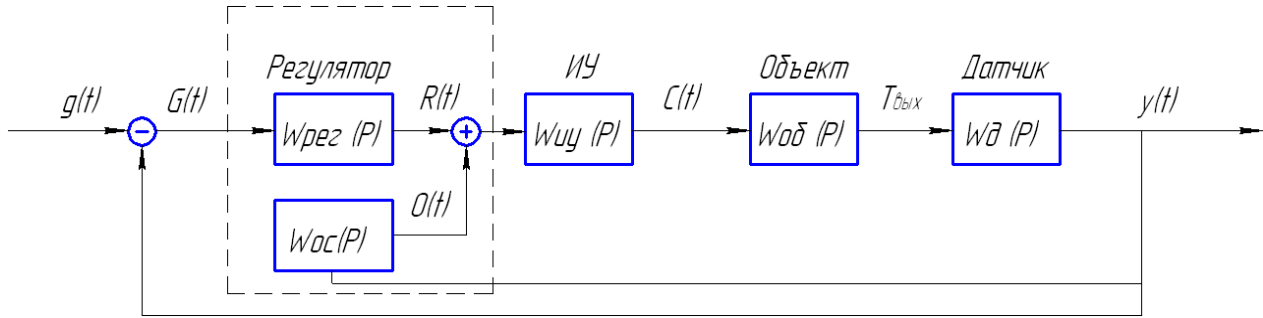


Рисунок 2 – Структурная схема АСР с гибкой положительной обратной связью

Передаточная функция в разомкнутом состоянии с гибкой положительной обратной связью:

$$W_{раз(oc)}(P) = \frac{W_{раз}(P)}{1 - W_{раз}(P) \cdot W_{oc}(P)}, \quad (10)$$

$$W_{раз(oc)}(P) = \frac{k_p \cdot (t_u P + 1 + t_{np} P^2 \cdot t_u) \cdot k_{uy} \cdot k_{об} \cdot \frac{k_o}{(T_{об1} P + 1) \cdot (T_{об2} P + 1) \cdot t_u P}}{1 - [k_p \cdot (t_u P + 1 + t_{np} P^2 \cdot t_u) \cdot k_{uy} \cdot k_{об} \cdot \frac{k_o}{(T_{об1} P + 1) \cdot (T_{об2} P + 1) \cdot t_u P}] \cdot k_{oc} P} \quad (11)$$

Проведя необходимые преобразования, получим:

$$W_{раз(oc)}(P) = k_o k_p \cdot (t_u P + 1 + t_{np} P^2 \cdot t_u) \cdot k_{uy} \otimes \otimes \frac{k_{об}}{(t_u T_{суш} P^2 \cdot T_{газ} + t_u T_{суш} P + t_u T_{газ} P + t_u + k_p k_{uy} k_{об} k_o k_{oc} t_u P + k_p k_{uy} k_{об} k_o k_{oc} + k_p k_{uy} k_{об} k_o k_{oc} t_{np} P^2 \cdot t_u) \cdot P} \quad (12)$$

В замкнутом состоянии с отрицательной обратной связью:

$$W_{зам}(P) = \frac{W_{раз(oc)}(P)}{1 + W_{раз(oc)}(P)} \quad (13)$$

$$W_{зам}(P) = \frac{\frac{k_\delta k_p (t_u P + 1 + t_{np} P^2 t_u) k_{uy} k_{об}}{(t_u T_{cym} P^2 T_{zaz} + t_u T_{cym} P + t_u T_{zaz} P + t_u + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_u P + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_{np} P^2 t_u) P}}{1 + \left[\frac{k_\delta k_p (t_u P + 1 + t_{np} P^2 t_u) k_{uy} k_{об}}{(t_u T_{cym} P^2 T_{zaz} + t_u T_{cym} P + t_u T_{zaz} P + t_u + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_u P + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_{np} P^2 t_u) P} \right]} \quad (14)$$

Проведя необходимые преобразования, получим:

$$W_{зам}(P) = \frac{k_\delta k_p (t_u P + 1 + t_{np} P^2 t_u) k_{uy} k_{об}}{(t_u T_{cym} P^3 T_{zaz} + t_u T_{cym} P^2 + t_u P + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_u P^2 + P k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_{np} P^3 t_u - k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_u P - k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_{np} P^2 t_u)} \quad (15)$$

В каждом конкретном случае для исследования устойчивости рассматриваемым методом Найквиста необходимо иметь передаточную функцию АСР в разомкнутом состоянии:

$$W_{раз(oc)}(P) = \frac{-k_\delta k_p \cdot (t_u P + 1 + t_{np} P^2 \cdot t_u) \cdot k_{uy} k_{об}}{(t_u T_{cym} P^2 \cdot T_{zaz} + t_u T_{cym} P + t_u T_{zaz} P + t_u + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_u P + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_{np} P^2 \cdot t_u) \cdot P} \quad (16)$$

сделать переход в частотную область заменой $P = j\omega$. Получим АФЧХ системы в разомкнутом состоянии

$$U(\omega) = k_p k_{uy} k_{об} k_\delta - k_p k_{uy} k_{об} k_\delta t_{np} t_u \omega^2 \frac{-t_u T_{cym} \omega^2 - t_u T_{zaz} \omega^2 + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_u \omega^2}{(-t_u T_{cym} \omega^2 - t_u T_{zaz} \omega^2 + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_u \omega^2)^2 + (t_u T_{cym} \omega^3 \cdot T_{zaz} - t_u \omega + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} \omega - k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_{np} t_u \omega^3)^2} +$$

$$+ k_p k_{uy} k_{об} k_\delta t_u \omega \frac{t_u T_{cym} \omega^3 T_{zaz} - t_u \omega + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} \omega - k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_{np} t_u \omega^3}{-t_u T_{cym} \omega^2 - t_u T_{zaz} \omega^2 + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_u \omega^2)^2 + (t_u T_{cym} \omega^3 \cdot T_{zaz} - t_u \omega + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} \omega - k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_{np} t_u \omega^3)^2} \quad (17)$$

$$V(\omega) = k_p k_{uy} k_{об} k_\delta t_u \omega \frac{-t_u T_{cym} \omega^2 - t_u T_{zaz} \omega^2 + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_u \omega^2}{(-t_u T_{cym} \omega^2 - t_u T_{zaz} \omega^2 + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_u \omega^2)^2 + (t_u T_{cym} \omega^3 \cdot T_{zaz} - t_u \omega + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} \omega - k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_{np} t_u \omega^3)^2} -$$

$$- k_p k_{uy} k_{об} k_\delta - k_p k_{uy} k_{об} k_\delta t_{np} t_u \omega^2 \frac{t_u T_{cym} \omega^3 T_{zaz} - t_u \omega + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} \omega - k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_{np} t_u \omega^3}{-t_u T_{cym} \omega^2 - t_u T_{zaz} \omega^2 + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_u \omega^2)^2 + (t_u T_{cym} \omega^3 \cdot T_{zaz} - t_u \omega + k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} \omega - k_p k_{uy} k_{об} k_\delta k_{oc} t_{np} t_u \omega^3)^2} \quad (18)$$

Задаваясь значениями частот входных воздействий, например, $\omega = 0; 0,001; 0,01; 0,1; 10; 100; 1000; 10000; 100000; 1000000; \dots; \infty$, необходимо для каждой частоты вычислять значения вещественной $U(\omega)$ и мнимой части $jV(\omega)$ АФЧХ системы в разомкнутом состоянии. После чего построить эту АФЧХ (рисунок 3)[3]

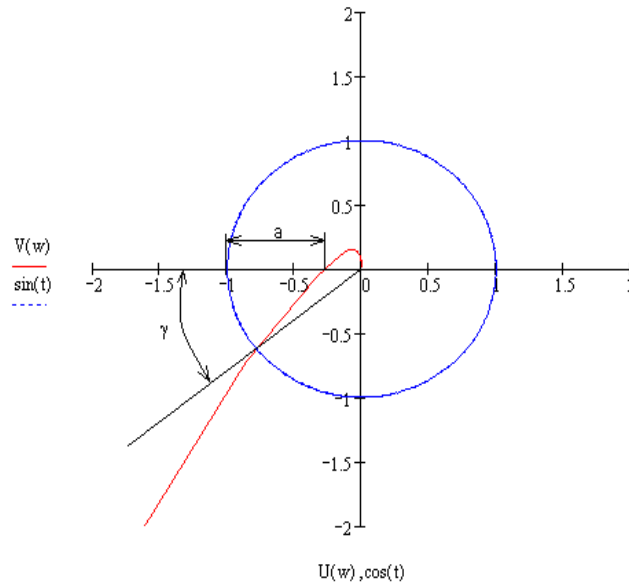


Рисунок 3 – АФЧХ АСР температуры теплоносителя в разомкнутом состоянии

Из графика следует, что система является устойчивой с запасом по амплитуде $a=0,75$ и по фазе $\gamma = 40^\circ$.

При синтезе систем автоматического регулирования нужно стремиться к повышению запасов устойчивости.

Описана разработка алгоритмов управления существующими электроприводами задвижек. Алгоритмы разрабатываются для существующей системы управления электроприводных задвижек, построенной на базе ПЛК.

В соответствии с процедурой алгоритма, работа оборудования протекает в следующей последовательности:

- Выполняется инициализация показаний датчика;
- Проверка в блоке условного перехода на обрыв линии, при наличии сигнала меньше 4 мА вывод сообщения «Обрыв линии», в противном случае переход на следующий блок;
- Проверка в блоке условного перехода на наличие короткого замыкания,

при наличии сигнала больше 20 мА вывод сообщения «Короткое замыкание», в противном случае переход на следующий блок;

- Выполняется инициализация величин уставок датчика на минимально предупредительную уставку, максимально предупредительную уставку, минимально аварийную уставку и максимально аварийную уставку.

- Проверка соответствия уставкам в блоке условного перехода на минимально предупредительную уставку, при наличии переход на следующий блок условного перехода минимальной аварийной уставки, иначе переход на блок условного перехода максимально предупредительной уставки;

- Если сигнал меньше MINA, то вывод аварийного сигнала о снижении давления, в противном случае вывод предупреждающего сигнала о снижении давления;

- Проверка в блоке условного перехода на максимально предупредительную уставку, при наличии переход на следующий блок условного перехода максимально аварийной уставки, иначе переход на блок перевода значения в единицы измерения в кПа;

- Если сигнал больше МАХА, то вывод аварийного сигнала о превышении давления, в противном случае вывод предупреждающего сигнала о превышении давления;

- Переход на блок вывода значения в единицы измерения в °С;

- Останов выполнения.

Алгоритм управления разрабатывался специально для управления электроприводами задвижки туннельной сушилки.

При организации процесса управления вводятся основные показатели работы приводного электрооборудования, к которым относится: достижение крайнего положения в режиме открыто, достижение крайнего положения исполнительным органом в режиме закрыто, а также неопределенное состояние, противоречащее нормальной работе задвижек в режиме не определено.

Соответственно трем основным положениям исполнительных органов электрозадвижек на панели оператора высвечивается сообщение, соответствующее открытому состоянию, закрытому состоянию, и состоянию при нахождении задвижки в промежуточном положении. Кроме приведенного выше нормального режима работы задвижек, может сформироваться и так называемый ненормальный режим, например, в случае отказа исполнительного механизма. В этом случае высвечивается сообщение о срабатывании защитной аппаратуры – муфты предельного момента.

Алгоритм таким образом может переключать технологическое оборудование по обслуживанию исполнительными органами туннельной сушилки в автоматическое, ручное управление, дистанционное ручное и местное ручное управление. По сигналу управления предусматривается останов регулирующего органа в любом положении открытия-закрытия.

Структурная схема алгоритма реализует интуитивно понятный механизм по обработке технологической информации от программируемого логического контроллера и выработке управляющих воздействий на исполнительные органы.[4]

Для контроллера OMRON SYSMAC CXP2 входными сигналами является состояние нормально-открытых и нормально-закрытых контактов, срабатывающих при достижении исполнительными органами крайних положений – полного открытия и закрытия, а также при необходимости и промежуточных состояний при необходимой по условиям технологического процесса сушки остановки привода задвижки. Управляющие воздействия в соответствии с алгоритмом контроллер выдает в качестве выходных сигналов на электропривод задвижки, запускающий механизм в работу или останавливающий его. Здесь реализуется собственно пуск, останов, реверсирование, изменение скорости движения механизма по необходимости, а также изменение мощности привода.

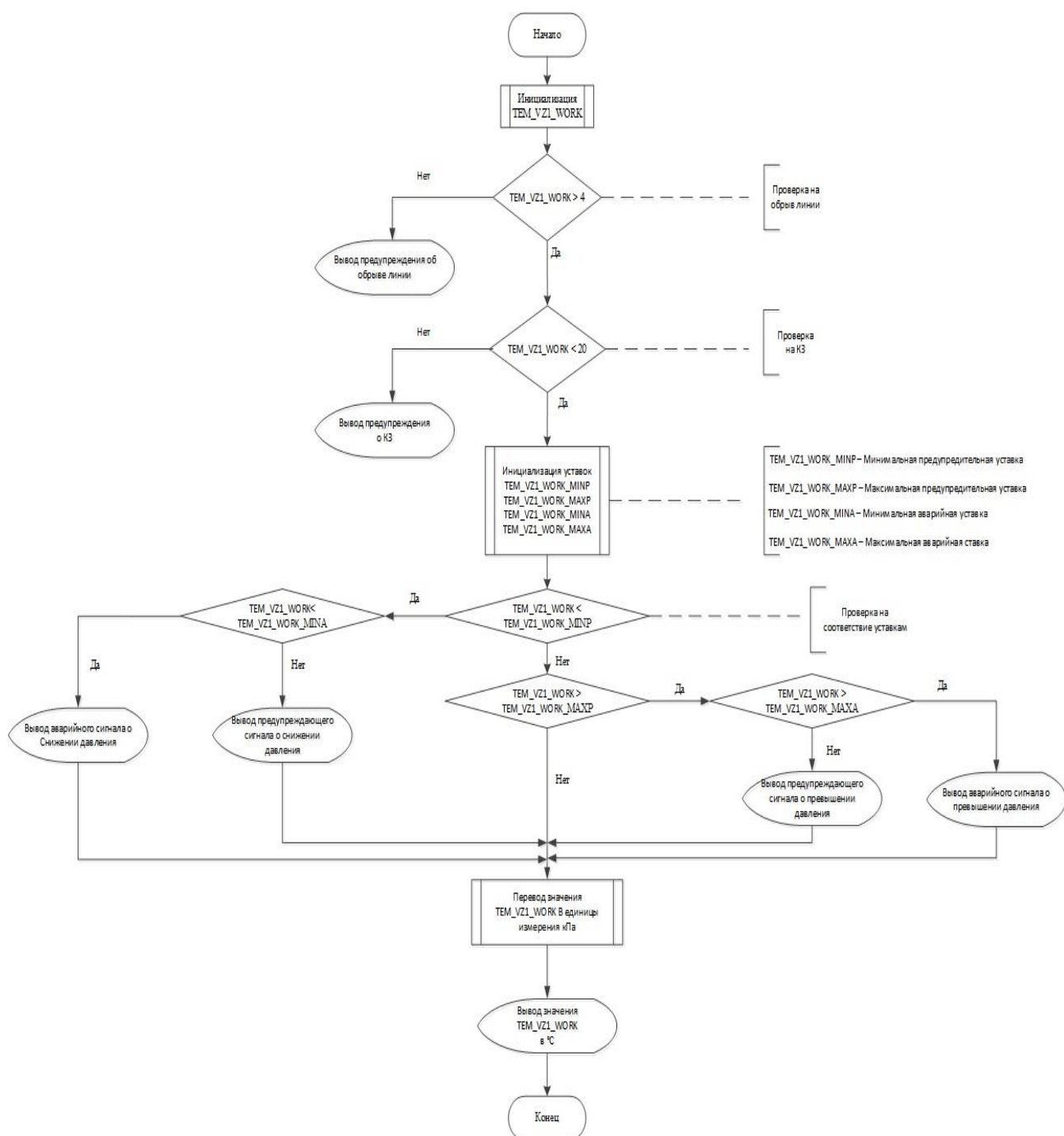


Рисунок 4 – Алгоритм сбора данных

Представленный ниже алгоритм может быть полностью адаптирован и реализован указанным выше контроллером и для него разработана программа управления на языке лестничных диаграмм или релейно-контактных схем идеально подходящая для решения задач подобного типа. В состав программы помимо входных, выходных сигналов, включены функциональные блоки, без которых управление не реализуемо, к таким блокам относятся таймеры, реверсивные и нереверсивные счетчики, блоки сохранения состояния, а также включения и отключения.

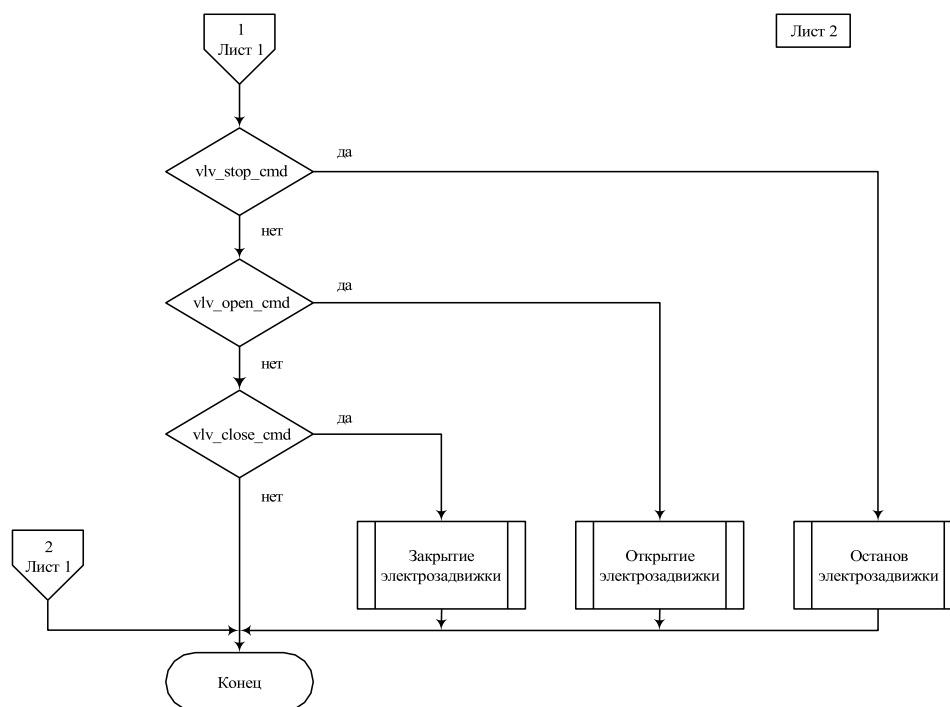


Рисунок 6 – Блок-схема обработки состояния электрозадвижки (лист 2 из 2)

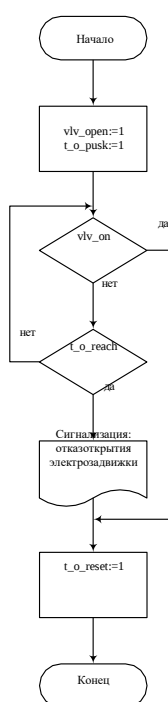


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма
открытия электрозадвижки
(подпрограмма
«Открытие электрозадвижки»)

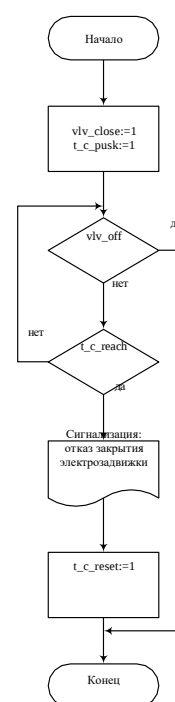


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма
закрытия электрозадвижки
(подпрограмма
«Закрытие электрозадвижки»)

Автоматизированная система управления технологическими процессами может быть выполнена на микроконтроллерных средствах фирмы Овен.

Определяющим в пользу использования этих технических средств являются следующие обстоятельства.

1. В распределённых многоуровневых АСУТП средства Овен, дополнительно к перечисленным функциям, осуществляют обмен информацией между уровнями систем управления, обмен данными между подсистемами в распределённых АСУТП, включая ПК, организацию исполнения получаемых директив.

2. Возможность проведения сушки малоквалифицированным персоналом. Это, возможно, потому что после включения системы оператор только наблюдает за ходом процесса и вносит необходимые корректировки с силового пульта управления.

3. В процессе проектирования был заложен принцип модульности, то есть каждая камера имеет свою систему управления.

Такой подход позволит повысить надежность работы, упростить процесс составления и отладки программного обеспечения, уменьшить стоимость системы. Комплекс Овен играет управляющую и регулирующую роль. Сигналы от технологического оборудования через датчики поступают на измеритель-регулятор, после соответствующей обработки с микроконтроллера сигналы поступают на исполнительные механизмы.

В соответствии с целями и задачами проектирования по разработанной ранее схеме автоматизации, с учетом контролируемых параметров выбираем соответствующие датчики. Технические средства автоматизации выбираются с учетом диапазона измерения, типа сигнала, условия эксплуатации и некоторых других требований (габаритные размеры, место установки и так далее).

Для измерения температуры в камерах сушки периодического действия нам понадобятся средства измерения температуры, применяются следующие приборы: термометры, основанные на расширении и измерении давления рабочего вещества – жидкостные стеклянные термометры, манометрические термометры; электрические термометры – термометры сопротивления; термоэлектрические термометры; термометры излучения.

Промышленностью выпускается термопреобразователи сопротивления из медной и платиновой проволоки. С их помощью обеспечивается контроль температуры в диапазоне от -260 до $+600$ °С. Принцип их действия основан, на свойствах металла изменять свое сопротивление с изменением температуры.

Для измерения в области высоких температур используются термоэлектрические преобразователи – диапазон измерения от -250 до $+1950$ °С. принцип его действия основан на возникновении термо ЭДС в слое разнородных металлов при их нагреве. Манометрические термометры являются механическими приборами прямого измерения, предназначенными для дистанционного измерения температуры газов, паров и жидкостей. Принцип их действия заключается в измерении давления при изменении температуры. В зависимости от заполнения термосистемы изготавливают газовые, жидкостные и парожидкостные манометрические термометры. В качестве бесконтактных средств измерения температуры в ГСП используются различные устройства на оптических методах измерения температуры.

Список литературы

1. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления: линейные системы. Нелинейные системы. Импульс. системы. Цифровые и адаптив. системы. Критерии устойчивости. Случайные процессы / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2004. – 747 с. – ISBN: 5-93913-035-6.
2. Веревкин, А. П. Модели в задачах разработки автоматизированных систем управления технологическими объектами / А. П. Веревкин, Т. М. Муртазин. – Вологда: Издательство «Инфра-Инженерия», 2025. – 196 с. – ISBN: 978-5-9729-2517-9.
3. Клепиков, В. В. Автоматизация производственных процессов: учеб. пособие / В. В. Клепиков, Н. М. Султан-заде, А. Г. Схиртладзе. – Москва: ИНФРА-М, 2025. – 208 с. – ISBN: 978-5-16-013871-8.
4. Поляков, С. И. Автоматика и автоматизация производственных процессов : учеб. пособие / С. И. Поляков ; Фед. агентство по образованию, ГОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2008. – 372 с. – ISBN 978-5-7994-0273-0.

References

1. Besekersky, V. A. Theory of automatic control systems: linear systems. Nonlinear systems. An impulse. the system. Digital and adaptive. the system. Sustainability criteria. Random processes / V. A. Besekersky, E. P. Popov. – 4th ed., revised. and add. – St. Petersburg: Professiya, 2004. – 747 p. – ISBN: 5-93913-035-6.
2. Verevkin, A. P. Models in the Tasks of Developing Automated Control Systems for Technological Objects / A. P. Verevkin, T. M. Mur-tazin. – Vologda: Pub-

lishing House Infra-Engineering, 2025. – 196 p. – ISBN: 978-5-9729-2517-9.

3. Klepikov, V. V. Automation of Production Processes: Textbook. / V. V. Klepikov, N. M. Sultan-zade, A. G. Skhirtladze. – Moscow: INFRA-M, 2025. – 208 p. – ISBN: 978-5-16-013871-8.

4. Polyakov, S. I. Automation and Computerization of Production Processes: Textbook / S. I. Polyakov; Federal Agency for Education, State Educational Institution of Higher Professional Education "VGLTA". – Voronezh, 2008. – 372 p. – ISBN 978-5-7994-0273-0.

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СУШКОЙ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА
В ТУННЕЛЬНОЙ СУШИЛКЕ
CONTROL SYSTEM FOR DRYING CERAMIC BRICKS
IN A TUNNEL DRYER**

Акинъшин Е.В., студент

Поляков С. И., к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

poliakov1960@mail.ru

Akinshin E.V., Student

Polyakov S.I., PhD (Engineering), Associate professor

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Аннотация: В статье рассматривается автоматизация сушки кирпича с использованием современных систем управления. Обсуждаются преимущества применения основных положений теории автоматического управления и алгоритмического обеспечения для управления процессами сушки. Алгоритм управления разрабатывался специально для управления электроприводами задвижки туннельной сушилки с учетом влажности и температуры теплоносителя. Алгоритм может переключать технологическое оборудование по обслуживанию исполнительными органами туннельной сушилки при регулировании влажности, температуры теплоносителя, его циркуляции и удалении излишней влаги. ЭВМ обеспечивает любой закон регулирования и является самой новой и наиболее быстродействующей системой автоматизации.

Abstract. The article discusses the automation of brick drying using modern control systems. It discusses the advantages of using the basic principles of automatic control theory and algorithmic support for controlling drying processes. The control algorithm was developed specifically for controlling the electric drives of the tunnel dryer's gate, taking into account the humidity and temperature of the heat carrier. The

algorithm can switch the technological equipment for servicing the tunnel dryer's actuators while regulating the humidity, temperature, circulation, and removal of excess moisture. The computer provides any control law and is the latest and fastest automation system.

Ключевые слова: автоматизация, керамический кирпич, туннельная сушилка, структурная схема, модель, matlab, simulink, динамика, алгоритм управления, программа, влага, термометр, теплоноситель

Keywords: automation, ceramic brick, tunnel dryer, block diagram, model, matlab, simulink, dynamics, control algorithm, program, moisture, thermometer, heat carrier

Производство керамического кирпича осуществляется двумя способами: формованием из пластичной массы и полусухим прессованием порошкообразной массы. Иногда применяют так называемый комбинированный способ, заключающийся в сухой подготовке массы и в пластичном формовании изделий.

Наибольшее распространение получил способ полусухого прессования. От качественно проведенной сушки зависит конечный результат проведения всего технологического процесса. Поэтому крайне важно исследовать особенности работы технологического сушильного оборудования, степень его механизации и автоматизации.

Для этой цели необходимо выбрать современное автоматизированное оборудование, способное осуществлять точное выполнение технологического регламента производства керамического кирпича, процесса сушки и обеспечить выпуск качественной готовой продукции.

Статья посвящена исследованию и разработке системы автоматического управления сушкой керамического кирпича с применением современных технических средств автоматизации, математического моделирования контуров автоматического регулирования температуры и влажности теплоносителя.

Традиционными типами сушилок непрерывного действия являются туннельные сушилки, оптимизированные и доведенные до совершенства. В сушилках непрерывного действия осуществляется регулярное толкание вагонеток с продукцией. Требуется постоянная подача вагонеток с сырой продукцией и выход вагонеток с сухими изделиями. Нерегулярность работы оборудования формовки и садки компенсируются буферными зонами на входе и выходе сушилки и (или) увеличенным временем сушки (предусматривается соответствующий резерв производительности сушилки).

Сушка кирпича в сушилке состоит из трех этапов. Первый этап характеризуется передачей тепла нагретых газов теплоносителя кирпичу-сырцу при прохождении его по длине сушилки. На этом этапе важно поддерживать изменение температуры теплоносителя от входа сырца в туннель к выходу готового продукта из сушилки в строгом соответствии с технологическим регламентом сушки. Второй этап связан с процессом перехода влаги изнутри кирпича-сырца к поверхности. И, наконец, третий этап заключается в перемещении влаги с поверхности кирпича в сам теплоноситель. Для удаления остаточной поверхностной влаги на сырце необходимы значительные тепловые затраты.

В более совершенных сушилках полунепрерывного действия нерегулярность работы оборудования формовки и садки компенсируется с помощью программного изменения параметров сушки по длине туннеля в период, когда отсутствует толкание вагонеток.

В зависимости от потребности производства и конфигурации загрузки изделий внутренняя вентиляция сушилок производится с помощью подвижных или неподвижных конических диффузоров, центральных или боковых.

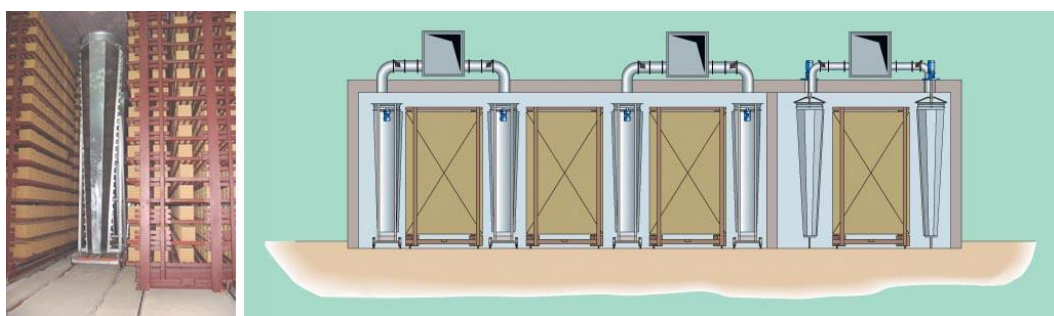


Рисунок 1 – Конструкция сушилок

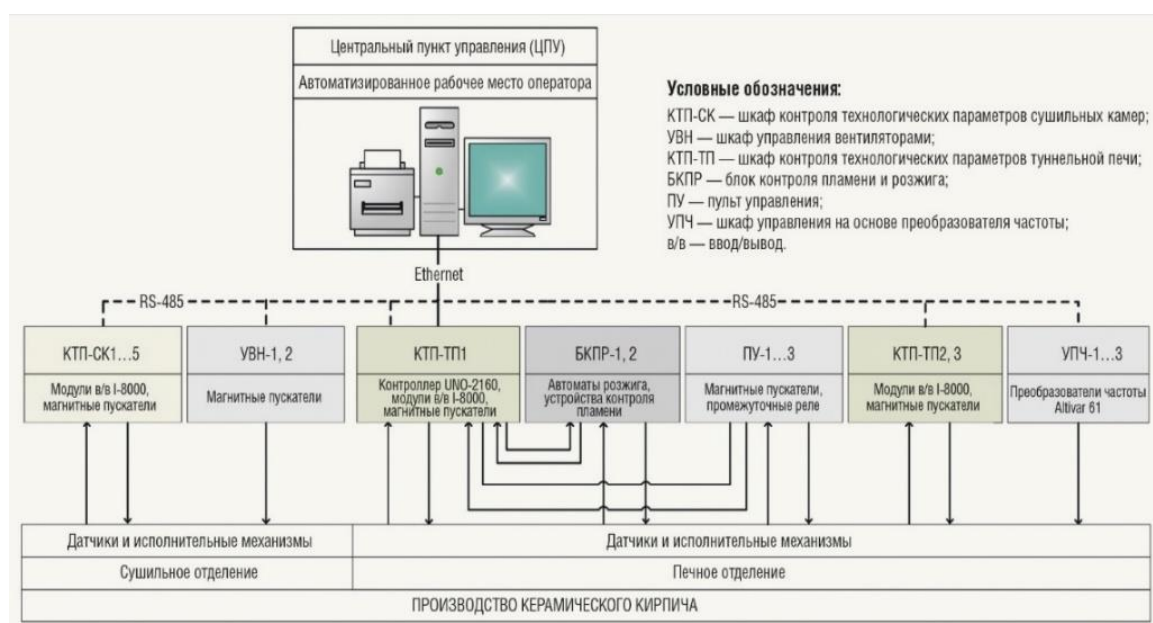
Полускоростная сушилка, запатентованная фирмой PICCINIMPIANTI, с системой активной поперечной рециркуляции внутри имеет низкое потребление энергии и высокую производительность. Сушилка характеризуется сообщающимися туннелями с чередующимся распределением потока воздуха.

Вентиляцию внутри сушилки обеспечивают: а) подвижные конические диффузоры с внутренним приводом; б) неподвижные распределительные кессоны с наружными двигателями; в) подвижные кессоны с наружными неподвижными двигателями.

В случае, когда применяются распределительные диффузорные кессоны с возвратно-поступательным движением короткого хода, сушилка имеет определенное число зон поперечной продувки, попеременно вентилируемых с обеих

сторон. Вентиляторы, размещенные в верхнем сечении распределительных кессонов, установлены неподвижно и напрямую соединены с соответствующими приводными двигателями, расположенными на наружной поверхности свода. Такая компоновка упрощает обслуживание, так как позволяет делать осмотр всей группы и демонтаж оборудования с наружной стороны сушилки.

Структурная схема современного программно-технического комплекса АСУ ТП приведена на рисунке 2.



Применительно к имеющемуся технологическому оборудованию была разработана структурная схема программно-технологического комплекса для автоматизированного управления сушильным отделением. Предложенная структура реализует прямое цифровое управление сушильным оборудованием. В состав АСУ ТП сушилки вошли:

- центральный пульт оператора (ЦПУ),
- автоматизированное рабочее место оператора;
- шкаф контроля технологических параметров сушильных камер;
- шкаф управления вентиляторами;
- модули ввода/вывода технологической информации;
- датчики основных измерительных параметров – давления, температуры, влажности, веса кирпича-сырца, скорости перемещения теплоносителя по длине туннельной сушилки;
- исполнительные механизмы приводов вентиляторов;

– шкаф управления на основе преобразователя частоты.

Автоматизированное рабочее место оператора размещено в помещении центрального диспетчерского пункта и организовано на базе ПЭВМ. Такой подход позволяет оператору отслеживать ход выполнения технологического процесса сушки по видеомониторам и обобщенной мнемосхеме: начало, окончание процесса, продолжительность сушки, графики изменения основных технологических параметров.

АРМ оператора выполнено на базе ПЭВМ, работающей под управлением операционной системы WindowsXPSP2. Система визуализации технологического процесса реализована средствами SCADA-пакета ViSA 7.5, поддерживающего клиент-серверную архитектуру с использованием промышленного стандарта OPC.

В процессе управления работой сушильного отделения оператор имеет возможность управлять работой сушилок, при необходимости корректировать ход выполнения технологического процесса, обрабатывать аварийные сигналы, поступающие с технологического оборудования (рисунок 3).



температуры в сушильной камере и эталонная кривая, построенная по данным режимной карты.

Программное обеспечение реализовано на языке технологического программирования ТехгоСи, отличительной особенностью которого являлось наличие комплекта инструментальных средств для нужд технологического проектирования, в частности, систем управления сушкой.



Рисунок 4 – Детальный фрагмент «Сушильная камера № 1»

Проектирование ПТК было выполнено фирмой «Инкотех» были укомплектованы, изготовлены и сконфигурированы восемь шкафов управления КТП-ТП и КТП-СК, а также АРМ оператора.

Одним из знаковых участков, определяющих качество готового продукта, в технологической цепи производства кирпича является его сушка. Отклонения от технологического регламента, допущенные при производстве, в том числе и при сушке, неизбежно приведут к браку: растрескиванию, короблению, изменению геометрических параметров и внешнего вида. Кроме этого, может измениться и прочность кирпича. Осуществить управление таким сложным процессом в ручном режиме крайне затруднительно. Процесс сушки протекает при больших затратах тепловой энергии. Единственным путем рационального расхода энергии и соблюдения требований технологического процесса при производстве кирпича остается автоматизированное управление.

Оснащение технологического процесса сушки современными средствами автоматизации, способными адекватно оценивать ход технологического процесса и вырабатывать верные управляющие воздействия на исполнительные устройства приведут к снижению перерасхода тепловой энергии и повышению качества готовой продукции.

Первым этапом на пути реализации автоматизированного управления сушкой является моделирование процесса имеющимися у разработчика средствами и технологиями. Крайне важно с позиций автоматизации изучить объект проектирования – туннельную сушилку с точки зрения ее динамических свойств. Для этой цели может быть использована методика теории автоматического управления, которая использует контур автоматического регулирования для управления основным технологическим параметром сушки, например, температурой. Контур моделируется из основных элементов, отвечающих за протекание процесса сушки – калорифера, центробежных вентиляторов, электроприводов, системы рециркуляции. Тепловые процессы здесь являются определяющими.[1]- [3]

Структурное моделирование MATLABSimulink позволяет разработчику варьировать параметрами настройки системы автоматического управления – коэффициентами передачи, временем изодрома и временем предварения соответствующих типовых звеньев контура автоматического регулирования для достижения оптимального управления объектом – туннельной сушилкой.

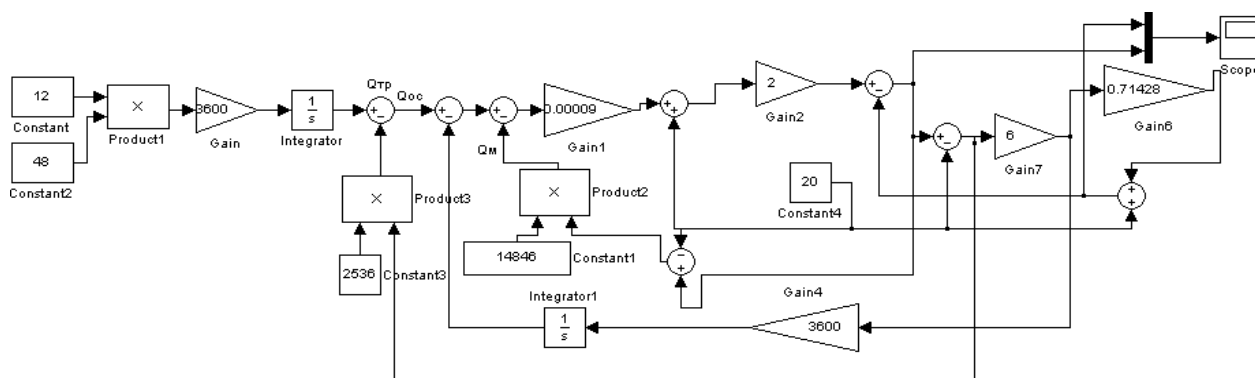


Рисунок 5 – Структурная схема модели сушки керамического кирпича в туннельной сушилке, реализованная в среде Simulink

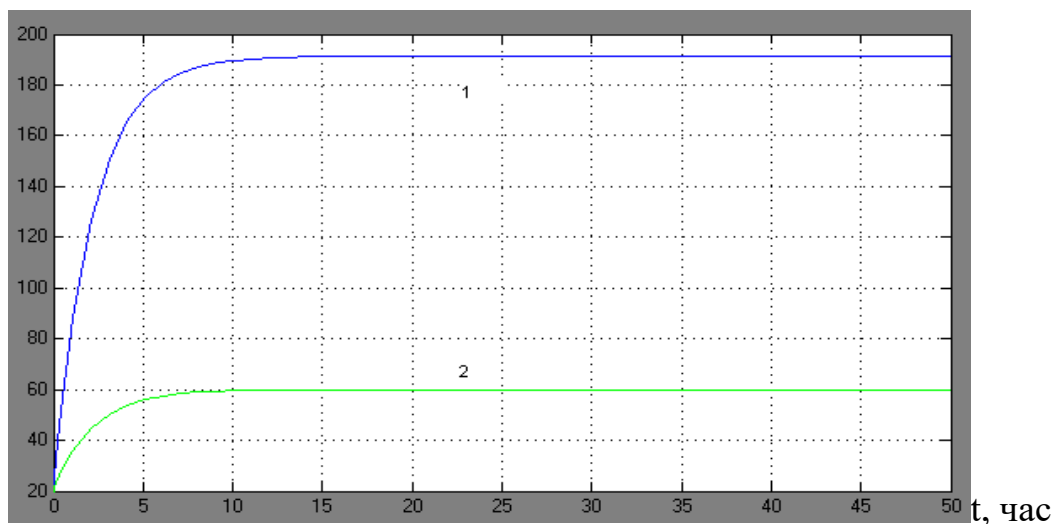


Рисунок 6 – Динамические характеристики разработанной модели

1 – график изменения температуры внутри сушилки;

2 – график изменения температуры на поверхности сушилки

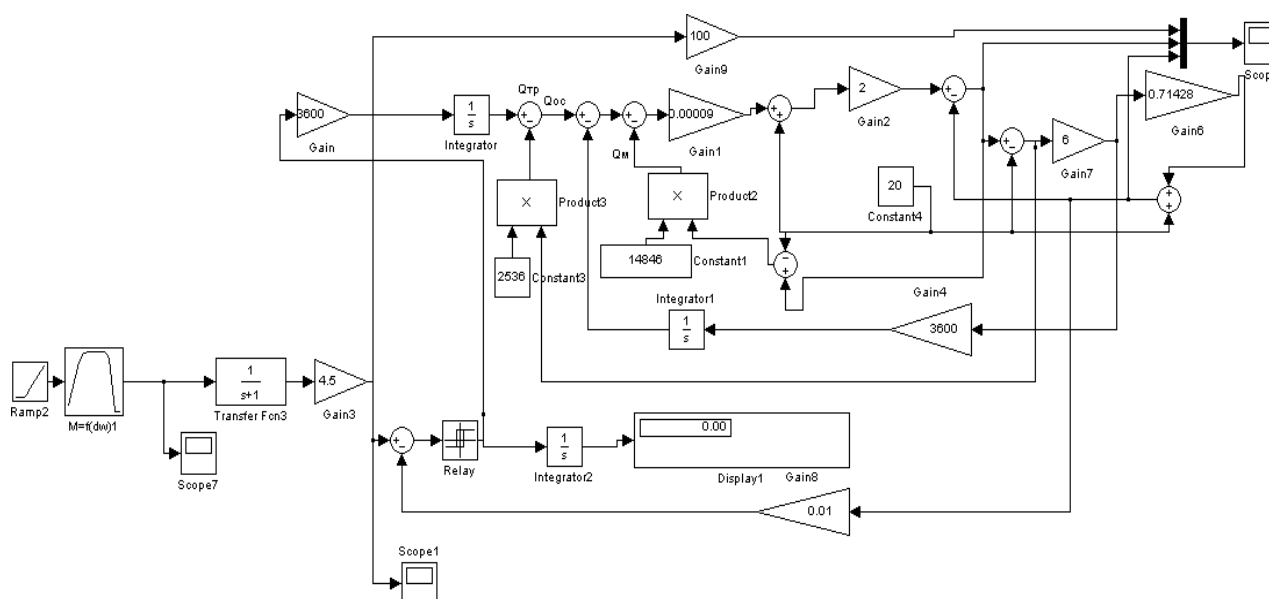


Рисунок 7 – Структурная схема модели сушки керамического кирпича в туннельной сушилке с регулятором, реализованная в среде Simulink

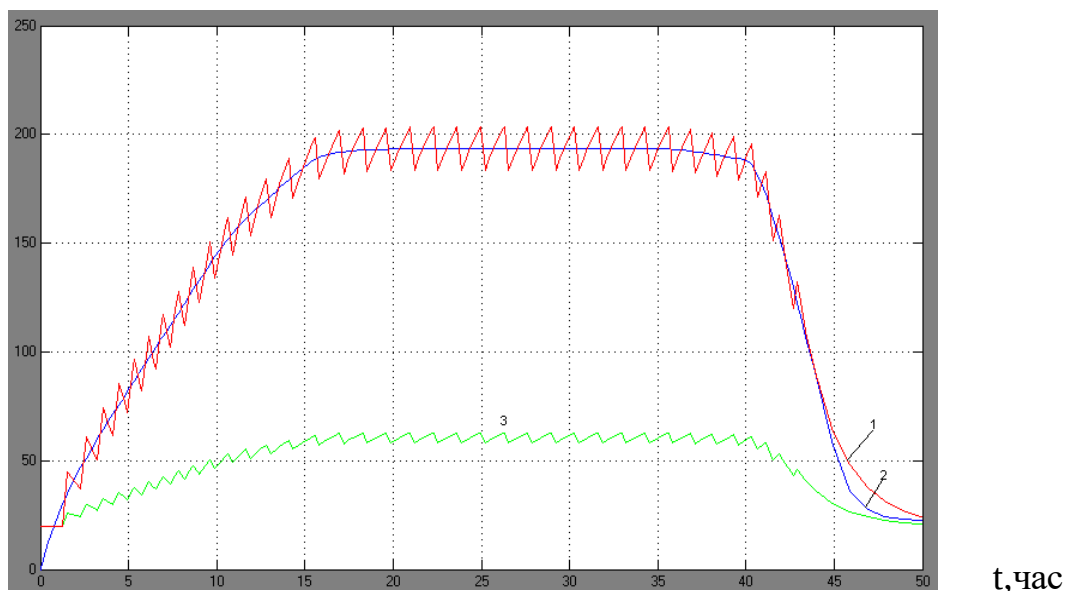


Рисунок 8 – Динамика изменения температуры во времени:

1 – график зависимости температуры в сушилке от времени;

2 – график сигнала управления;

3 – график зависимости температуры на поверхности сушила от времени

Из характеристики видно, что весь процесс сушки делится на три основных периода. Первый из них-период прогрева, температура постепенно увеличивается до 190 °С. Второй-период постоянной скорости высушивания. В течение этого периода температура остается постоянной 190 °С. Третий период называют периодом падающей скорости высушивания сырца. Во время этого периода температура спадает до 30 °С. После удаления из сырца влаги наступает период равновесного состояния.

В ходе работы была разработана и реализована в программе MATLAB 6.0 блок-схема математической модели туннельного сушила. Эту блок-схему целесообразно использовать для минимизации энергоемкости процесса сушки керамического кирпича. Также был реализован регулятор, с помощью которого осуществлено регулирование температуры внутри и на поверхности туннельного сушила. Это позволило улучшить качество процесса сушки керамического кирпича.

Описание структурной схемы управления:

Блок 1 – включение оборудования. Блок 2, 3, 4 – проверка исправности системы управления сушилкой. Блок 5 – загрузка туннельной сушилки. Блок 6, 7, 8 – подготовка сушилки. Блок 9, 10, 11 – запрос данных о влажности керамического кирпича. Блок 12 – ввод данных. Блок 13 – составление программы сушки. Блок 14 – включение таймера. Блок 15, 16, 17, 18 – выполнение подпро-

грамм. Блок 19 – контрольный запрос данных о влажности керамического кирпича. Блок 20 – анализ данных влажности кирпича. Блок 21 – завершение процесса сушки. Блок 22 – отключение оборудования туннельной сушилки. Блок 23 – выгрузка штабеля. Блок 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34 - задание влажности теплоносителя. Блок 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45 – регулирование температуры теплоносителя. Блок 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52 – работа вентиляции. Блок 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64 – работа вытяжной системы. Задание влажности теплоносителя, задание температуры теплоносителя, работа вентиляции и работа вытяжной системы – эти процессы происходят одновременно и микроконтроллер выполняет данные функции. Алгоритм управления процессом показан на рисунке 9 – 13. [4]

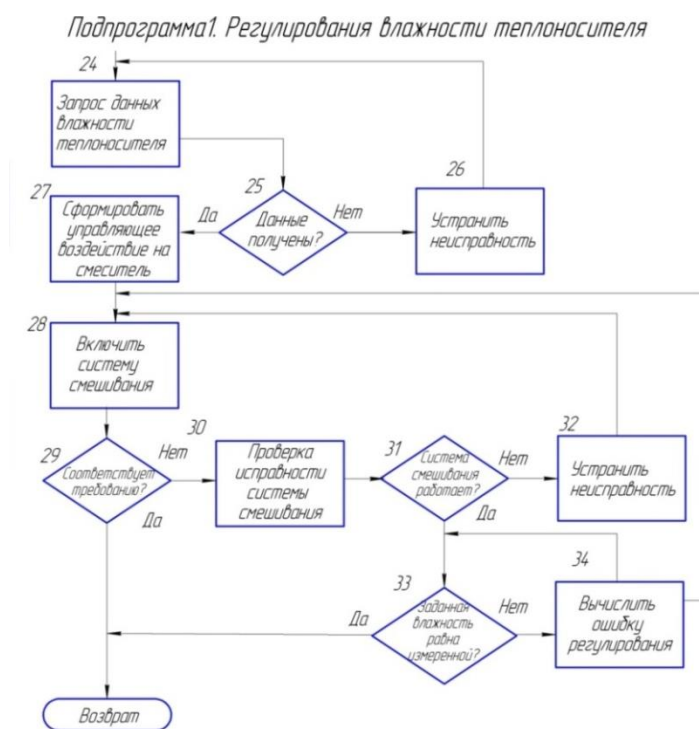


Рисунок 9 – Алгоритм управления процессом сушки. Подпрограмма 1.
Регулирование влажности теплоносителя

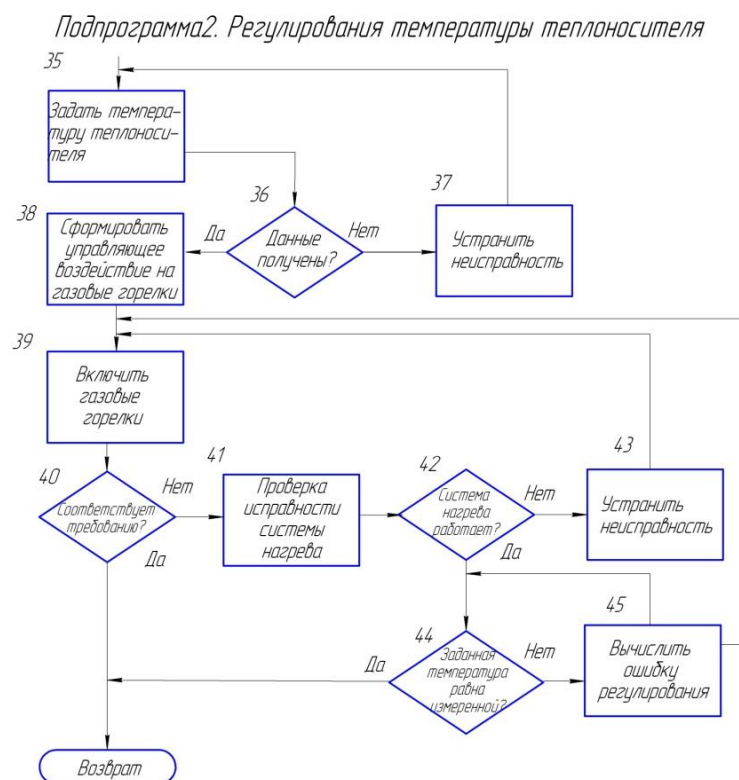


Рисунок 10 – Алгоритм управления процессом. Подпрограмма 2.
Регулирование температуры теплоносителя

Для измерения температуры сушильного агента в камере предлагается использовать хорошо зарекомендовавшие себя датчики температуры – термометры сопротивления платиновые, отличающиеся высокими метрологическими характеристиками.

Назначение термометров сопротивления: термометр предназначен для измерения температуры контактным способом со средой измерения, не оказывающей негативного механического и агрессивного воздействия на гильзу датчика. Сушильный агент отвечает этим требованиям.

Термометр сопротивления представляет собой чувствительный элемент, выполненный в виде намотанной на диэлектрический каркас проволоки из платины, помещенную в опалубку. Имеет монтажную коробку и присоединяется ко вторичному прибору по двух- или трехпроводной схеме. Гильза вносит заметную инерционность.

Для обеспечения качественного процесса сушки керамического кирпича на основе технологического процесса разработана функциональная схема системы автоматизации технологического процесса. Основными параметрами сушки являются температура теплоносителя, его влажность, скорость движения теплоносителя в рабочей зоне.

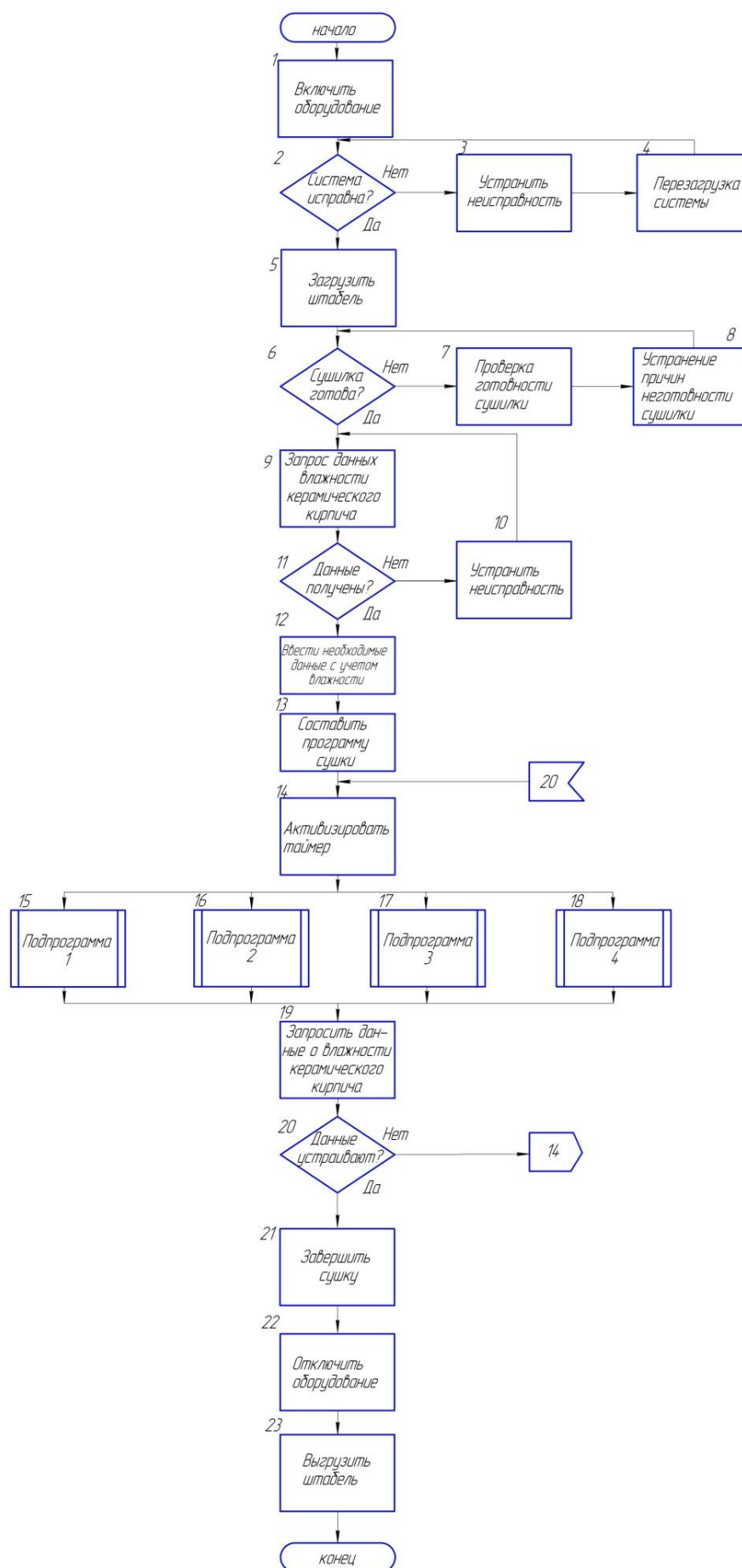


Рисунок 11 – Алгоритм управления процессом сушки кирпича

Подпрограмма 3. Циркуляция теплоносителя

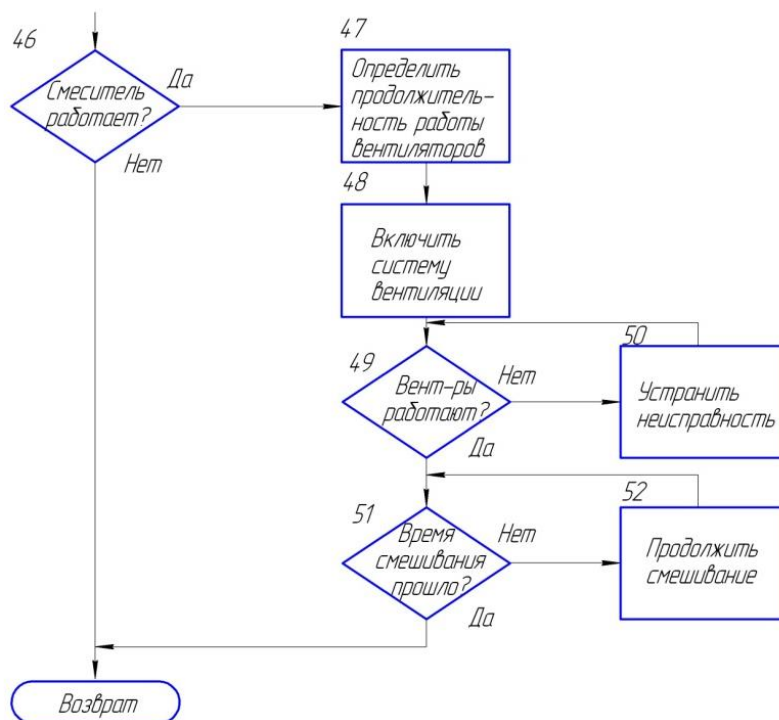


Рисунок 12 – Алгоритм управления процессом. Подпрограмма 3.
Циркуляция теплоносителя

Подпрограмма 4. Удаление излишней влаги теплоносителя

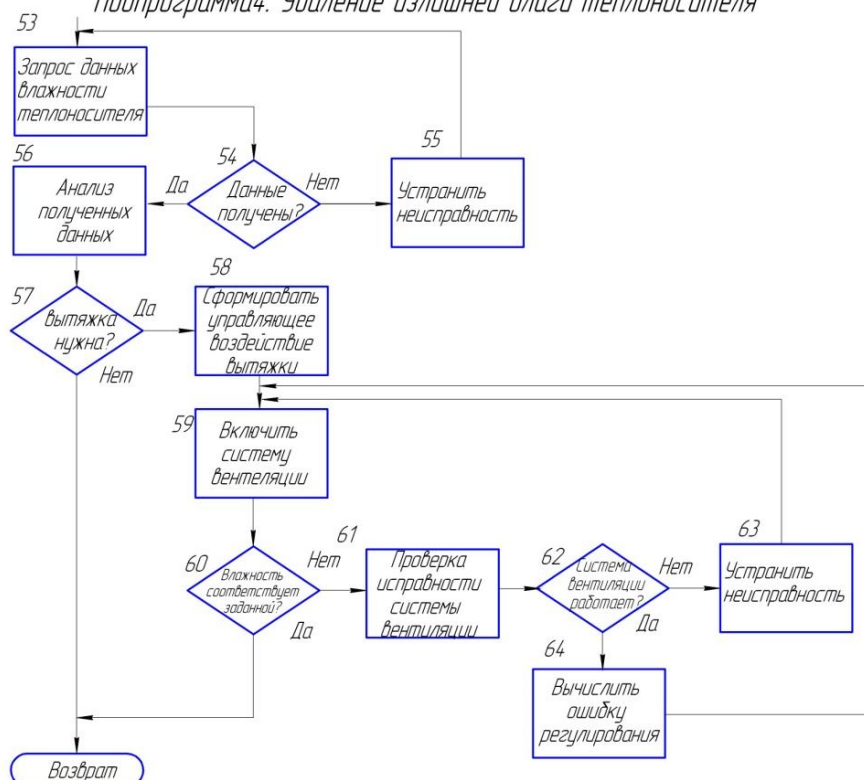


Рисунок 13 – Алгоритм управления процессом. Подпрограмма 4.
Удаление излишней влаги теплоносителя

Также системой предусмотрен контроль и регулирование основных параметров сушки по всей длине туннельной сушилки.

Измерение температуры в трубе, выполняющей роль смесителя, выполняется с помощью термосопротивления ТСП Метран 205. Сигнал с термосопротивления через преобразователь ИРТВ-5215 поступает на аналоговый вход ЭВМ. В роли ЭВМ выступает промышленная рабочая станция AWS-842ТР. Далее сигнал с дискретного выхода ЭВМ поступает на блок ручного управления БРУ-42, в котором предусмотрен переключатель ручное-автоматическое управление. С блока ручного управления через пускатель ПБР-3А сигнал поступает на исполнительный механизм, который в свою очередь воздействует на заслонку поступления атмосферного воздуха.

Аналогично выполняется регулирование температуры на входе теплоносителя в каждый туннель, за исключением того, что измерение температуры производится термосопротивлением ТСМ Метран 203. Регулирование температуры производится воздействием на заслонку поступления горячего теплоносителя. Регулирование температуры на выходе теплоносителя в каждом туннеле осуществляется за счет изменения количества теплоносителя в каждом туннеле. При этом измерение температуры производится термосопротивлением ТСМТУ, выходной сигнал которого поступает на аналоговый вход ЭВМ. Управляющий сигнал через ПБР-2 поступает на исполнительный механизм привода заслонки, регулирующий поступление горячего теплоносителя. Положение заслонок выводится на интегрированную систему управления в виде scada-системы промышленного компьютера, размещенные на щите. Распределение температуры в различных точках туннеля и на входе также выведены на щит. Наличие дистанционных указателей положения необходимо для реализации ручного управления при выходе ЭВМ из строя. Запуск и остановка двигателей вентиляторов может происходить как автоматически, сигнал с ЭВМ поступает на магнитный пускатель, который запускает двигатель, так и вручную с помощью кнопок «Пуск» и «Стоп». Включение двигателей отображается световыми индикаторами на щите управления.

Контроль влажности теплоносителя происходит с помощью измерительного преобразователя ИРТВ-5215, сигнал с которого поступает на аналоговый вход ЭВМ.

ЭВМ обеспечивает любой закон регулирования и является самой новой и наиболее быстродействующей системой автоматизации. В проекте ЭВМ выполняет роль ПИ-регулятора с заданным алгоритмом работы.

Список литературы

1. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления: линейные системы. Нелинейные системы. Импульс. системы. Цифровые и адаптив. системы. Критерии устойчивости. Случайные процессы / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2004. – 747 с. – ISBN 5-93913-035-6.
2. Веревкин, А. П. Модели в задачах разработки автоматизированных систем управления технологическими объектами / А.П. Веревкин, Т.М. Муртазин. – Вологда: Издательство «Инфра-Инженерия», 2025. – 196 с. – ISBN 978-5-9729-2517-9.
3. Клепиков, В. В. Автоматизация производственных процессов: учеб. пособие / В. В. Клепиков, Н. М. Султан-заде, А. Г. Схиртладзе. – Москва: ИНФРА-М, 2025. – 208 с. – ISBN 978-5-16-013871-8.
4. Поляков, С. И. Автоматика и автоматизация производственных процессов : учеб. пособие / С. И. Поляков; Фед. агентство по образованию, ГОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2008. – 372 с.– ISBN 978-5-7994-0273-0.

References

1. Besekersky, V. A. Theory of automatic control systems: linear systems. Nonlinear systems. An impulse. the system. Digital and adaptive. the system. Sustainability criteria. Random processes / V.A. Besekersky, E.P. Popov. – 4th ed., revised. and add. – St. Petersburg: Professiya, 2004. – 747 p. – ISBN 5-93913-035-6.
2. Verevkin, A. P. Models in the Tasks of Developing Automated Control Systems for Technological Objects / A. P. Verevkin, T. M. Murtazin. – Vologda: Publishing House Infra-Engineering, 2025. – 196 p. – ISBN 978-5-9729-2517-9.
3. Klepikov, V. V. Automation of Production Processes: Textbook / V. V. Klepikov, N. M. Sultan-zade, A. G. Skhirtladze. – Moscow: INFRA-M, 2025. – 208 p. – ISBN: 978-5-16-013871-8.
4. Polyakov, S. I. Automation and Computerization of Production Processes: Textbook / S. I. Polyakov; Federal Agency for Education, State Educational Institution of Higher Professional Education "VGLTA". – Voronezh, 2008. – 372 p. – ISBN 978-5-7994-0273-0.

**АНАЛИЗ ДАННЫХ ТЕЛЕМЕТРИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ПОДШИПНИКОВ КОНВЕЙЕРА
ANALYSIS OF TELEMETRY DATA TO PREDICT
THE FAILURE OF CONVEYOR BEARINGS**

Белоус Д.В., студент

Щербакова И.В., к.т.н., доцент

**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»**

г. Воронеж, Россия

shcherbakovaiv@vglta.vrn.ru

Belous D.V., student

Shcherbakova I.V., CSc (Engineering), Associate Professor

**Voronezh State University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia**

Аннотация: В условиях перехода к парадигме Индустрии 4.0 традиционные подходы к техническому обслуживанию конвейерных систем, основанные на реактивных или планово-предупредительных стратегиях, демонстрируют низкую экономическую эффективность. Целью исследования является разработка архитектуры системы предиктивного обслуживания подшипниковых узлов на основе анализа телеметрических данных и алгоритмов машинного обучения. В работе предложен многоуровневый технологический стек, объединяющий edge-аналитику для первичной фильтрации сигналов и серверную инфраструктуру для обучения прогностических моделей. В качестве ключевых признаков состояния использованы спектры вибрации, температурные градиенты и параметры электрической нагрузки. Экспериментальная валидация на репрезентативном датасете промышленных конвейеров показала точность прогнозирования остаточного ресурса на уровне 94,2%. Внедрение разработанной методологии позволило снизить долю незапланированных простоев на 31,5% и сократить операционные затраты на техническое обслуживание на 24%. Полу-

ченные результаты подтверждают целесообразность интеграции IIoT-решений в контур управления непрерывным производством.

Abstract: In the context of the transition to the Industry 4.0 paradigm, traditional maintenance approaches for conveyor systems, based on reactive or time-based strategies, demonstrate low economic efficiency. The aim of this study is to develop a predictive maintenance architecture for bearing units based on telemetry data analysis and machine learning algorithms. The paper proposes a multi-level technology stack that combines edge analytics for primary signal filtering with server infrastructure for training predictive models. Vibration spectra, temperature gradients, and electrical load parameters were used as key condition indicators. Experimental validation on a representative industrial conveyor dataset showed a residual life prediction accuracy of 94.2%. Implementation of the proposed methodology reduced unplanned downtime by 31.5% and decreased operational maintenance costs by 24%. The results confirm the feasibility of integrating IIoT solutions into the continuous production control loop.

Ключевые слова: телеметрия, предиктивное обслуживание, подшипники качения, машинное обучение, вибрационный анализ, IIoT.

Keywords: telemetry, predictive maintenance, rolling bearings, machine learning, vibration analysis, IIoT.

Цифровая трансформация промышленного сектора сопровождается масштабным внедрением систем промышленного интернета вещей (IIoT), обеспечивающих непрерывный сбор телеметрии с критически важных узлов оборудования. Конвейерные системы, являющиеся базовым элементом логистических и производственных цепей, эксплуатируются в условиях переменных динамических нагрузок, абразивного износа и температурных колебаний. Подшипниковые узлы выступают наиболее уязвимым звеном: по отраслевой статистике, до 40–60% отказов конвейерного оборудования связаны с деградацией опор качения [1]. Традиционные стратегии технического обслуживания (реактивная замена после поломки или регламентная замена по наработке) формируют «информационные острова», не позволяющие адаптировать графики ТО к фактическому техническому состоянию агрегатов. Это приводит к избыточным затратам на замену исправных компонентов или, напротив, к катастрофическим остановкам производственных линий.

Цель данного исследования является разработка и верификация архитектуры системы анализа телеметрии для раннего прогнозирования дефектов под-

шипников конвейера с использованием методов машинного обучения. Предлагаемое решение базируется на интеграции edge-аналитики для снижения сетевой нагрузки и серверных алгоритмов градиентного бустинга для многофакторной оценки деградации, что обеспечивает баланс между скоростью реакции и глубиной диагностики [2].

Методология исследования строится на комбинированном подходе, включающем архитектурное проектирование информационной системы, математическое моделирование деградационных процессов и валидацию алгоритмов классификации/регрессии на исторических телеметрических данных. Экспериментальная база сформирована на основе агрегированного промышленного датасета, содержащего непрерывные записи с конвейерных линий горно-обогатительных и логистических предприятий за период 18 месяцев. Набор данных включает синхронизированные временные ряды: виброускорение, частота дискретизации 10 кГц, температуру наружного кольца подшипника 1 Гц, ток и напряжение приводного двигателя 50 Гц, а также метки фактических отказов и замен.

Архитектура системы спроектирована по трехуровневому принципу: Operational Technology, Network и IT. На полевом уровне ОТ применяются пьезоэлектрические акселерометры с интерфейсом IEPЕ, термосопротивления Pt100 и шлюзы сбора данных. Протоколом выбора для передачи телеметрии стал MQTT 5.0 в силу его легковесности, поддержки QoS-гарантий доставки и работы в условиях нестабильного сетевого соединения [3]. На сетевом уровне данные маршрутизируются через промышленные шлюзы, где реализуется базовая фильтрация (скользящее среднее, пороговое отсечение выбросов). На IT-уровне развернута база данных временных рядов InfluxDB, обеспечивающая высокую скорость записи и эффективное сжатие телеметрии.

Алгоритм работы системы прогнозирования включает следующие этапы:

1. Первичная обработка на Edge. Преобразование сигналов с помощью быстрого преобразования Фурье для выделения гармоник, соответствующих частотам вращения, тел качения и сепаратора.
2. Расчет RMS-значений, пик-фактора, коэффициента эксцесса и креста, а также темпов изменения температуры.
3. Стандартизация признаков и применение SMOTE для компенсации дисбаланса классов «норма»/«предотказное состояние».
4. Использование ансамблевого метода XGBoost для классификации состояния и прогнозирования остаточного ресурса.

5. Кросс-валидация по времени для предотвращения утечки данных из будущего.

Выбор XGBoost обоснован его устойчивостью к переобучению, встроенной регуляризацией и высокой интерпретируемостью важности признаков через Gain/Coverage метрики, что критично для инженерной диагностики [4]. Обработка данных на периферии edge-аналитика сокращает объем передаваемой информации на 70-80%, оставляя для облачной обработки только агрегированные спектры и аномальные фрагменты.

В ходе эксперимента была обучена и протестирована прогностическая модель на тестовой выборке, составившей 20% от общего объема данных. Сравнительный анализ трех алгоритмических подходов (RandomForest, LSTM, XGBoost) представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика алгоритмов прогнозирования отказов данных

Алгоритм	Точность	F1-score, класс «отказ»	Время инференса, мс	Сложность настройки
RandomForest	89,40%	0,82	120	Низкая
LSTM	91,70%	0,86	340	Высокая
XGBoost	94,20%	0,91	85	Средняя

Как следует из таблицы 1, модель на базе градиентного бустинга продемонстрировала наилучший компромисс между точностью детектирования предотказных состояний и вычислительной эффективностью. Среднее время инференса составило 85 мс, что обеспечивает возможность работы в режиме, близком к реальному времени.

Технические параметры развернутой системы мониторинга приведены в таблице 2.

Функциональные блоки системы включают модуль визуализации панели Grafana, отображающий тренды виброускорения, температурные карты подшипников и индикаторы вероятности отказа. При превышении пороговых значений, например, рост эксцесса вибрации $> 3,0$ при одновременном превышении температурного градиента $> 2^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ система автоматически генерирует тревогу уровня «Warning» или «Critical». При этом поступает рекомендация по за-

мене узла в течение 48-72 часов. Интеграция с CMMS-системами позволяет формировать заявки на ТО без участия диспетчера.

Таблица 2 – Ключевые метрики производительности системы телеметрии

Задержка передачи данных ОТ → IT	< 140 мс	При QoS 2, MQTT 5.0
Пропускная способность шлюза	8 500 сообщений/сек	Пакетная агрегация на Edge
Объем хранимых данных на узел/год	~1,2 ТБ	Сжатие + retentionpolicy 365 дней
Точность прогноза отказа за 72 ч	94,20%	F1 = 0,91
Снижение незапланированных простоев	31,50%	По итогам пилотного внедрения

Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что многопараметрический анализ телеметрии с применением алгоритмов машинного обучения существенно превосходит по точности традиционные методы диагностики. При этом для прогнозирования отказов подшипников используются телеметрические данные о вибрации, температуре и нагрузке.

Список литературы

1. Терентьев, А. В. Предиктивная аналитика в промышленности: методы и технологии / А. В. Терентьев, В. А. Смирнов. – Москва : Технологии, 2023. – 248 с. – URL: <https://tech-industry.ru/predictive-analytics> (дата обращения: 15.03.2026).
2. Chen, T. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System / T. Chen, C. Guestrin // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2016. – P. 785–794. – doi: 10.1145/2939672.2939785. – URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2939672.2939785> (дата обращения: 20.03.2026).
3. IoT Analytics. Industrial IoT Protocols in Manufacturing: MQTT vs OPC UA vs Modbus / IoT Analytics GmbH, 2024. – URL: <https://iot-analytics.com/iiot-protocols-2024/> (дата обращения: 18.03.2026).
4. Deep Learning and Its Applications to Machine Health Monitoring: A Survey / R. Zhao, R. Yan, Z. Chen, K. Mao, P. Wang, R.X. Gao // Mechanical Systems

and Signal Processing. – 2019. – Vol. 115. – P. 213–237. – doi: 10.1016/j.ymssp.2018.05.050. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327018302676> (дата обращения: 22.03.2026).

5. Jardine, A. K. S. A Review on Machinery Diagnostics and Prognostics Implementing Condition-Based Maintenance / A. K. S. Jardine, D. Lin, D. Banjevic // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2006. – Vol. 20, No. 7. – P. 1483-1510. URL: <https://www.researchgate.net/publication/222661820> (дата обращения: 10.03.2026).

6. IEEE Standards Association. IEEE 1451-2023: Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators / IEEE, 2023. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/1451/10312/> (дата обращения: 12.03.2026).

References

1. Terentiev, A. V. Predictive Analytics in Industry: Methods and Technologies / A. V. Terentiev, V. A. Smirnov. – Moscow : Technologies, 2023. – 248 p. – URL: <https://tech-industry.ru/predictive-analytics> (date of access: 15.03.2026).

2. Chen, T. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System / T. Chen, C. Guestrin // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – 2016. – P. 785–794. – doi: 10.1145/2939672.2939785. – URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2939672.2939785> (date of access: 20.03.2026).

3. IoT Analytics. Industrial IoT Protocols in Manufacturing: MQTT vs OPC UA vs Modbus / IoT Analytics GmbH, 2024. – URL: <https://iot-analytics.com/iiot-protocols-2024/> (date of access: 18.03.2026).

4. Deep Learning and Its Applications to Machine Health Monitoring: A Survey / R. Zhao, R. Yan, Z. Chen, K. Mao, P. Wang, R.X. Gao // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – Vol. 115. – P. 213–237. – doi: 10.1016/j.ymssp.2018.05.050. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327018302676> (date of access: 22.03.2026).

5. Jardine, A. K. S. A Review on Machinery Diagnostics and Prognostics Implementing Condition-Based Maintenance / A. K. S. Jardine, D. Lin, D. Banjevic // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2006. – Vol. 20, No. 7. – P. 1483-1510. URL: <https://www.researchgate.net/publication/222661820> (date of access: 10.03.2026).

6. IEEE Standards Association. IEEE 1451-2023: Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators / IEEE, 2023. – URL: <https://standards.ieee.org/ieee/1451/10312/> (date of access: 12.03.2026).

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ
ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦЕХА НА ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ
ПРИСУТСТВИЯ
AUTOMATION OF A PRODUCTION FACILITY LIGHTING SYSTEM
BASED ON PRESENCE SENSORS**

**Бронников Е.С., студент ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Россия**

**Bronnikov E.S., student Voronezh State University
of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia**

Аннотация: В статье рассматриваются современные подходы к автоматизации систем освещения на промышленных предприятиях. Описаны основные принципы управления освещением, включая использование датчиков движения, освещенности и программируемых логических контроллеров. Особое внимание уделено внедрению интеллектуальных систем, позволяющих снизить энергопотребление и увеличить срок службы осветительных приборов. Представлены математические модели и экспериментальные данные, демонстрирующие возможности усовершенствования существующих систем с целью повышения энергоэффективности и снижения эксплуатационных затрат.

Abstract: This article examines modern approaches to automating lighting systems in industrial facilities. It describes the basic principles of lighting control, including the use of motion and light sensors and programmable logic controllers. Particular attention is paid to the implementation of intelligent systems that can reduce energy consumption and extend the life span of lighting fixtures. A mathematical model and experimental data are presented, demonstrating the potential for improving existing systems to increase energy efficiency and reduce operating costs.

Ключевые слова: автоматизация, освещение, промышленные предприятия, энергоэффективность, датчики движения, датчики освещенности, релейная автоматика, снижение энергопотребления.

Keywords: automation, lighting, industrial enterprises, energy efficiency, motion sensors, light sensors, relay automation, energy consumption reduction.

Системы освещения на промышленных предприятиях являются одними из основных потребителей электроэнергии. Традиционное управление освещением с помощью ручных выключателей часто приводит к тому, что свет горит в пустых помещениях, в обеденные перерывы и выходные дни, что вызывает нерациональный расход электроэнергии и сокращение ресурса светильников. С развитием технологий автоматизации появилась возможность не только снизить затраты на электроэнергию, но и повысить комфорт и безопасность труда.

Современные системы автоматизации освещения включают в себя датчики движения (присутствия), датчики освещенности, программируемые реле времени и контроллеры. Однако на многих предприятиях до сих пор используются устаревшие решения. Необходимы более сложные и адаптивные системы управления, способные учитывать реальную потребность в освещении в разных зонах цеха в разное время суток.

Особый интерес представляют интеллектуальные системы, которые комбинируют сигналы с нескольких типов датчиков и могут предсказывать необходимость включения света в зависимости от времени суток и дня недели. Внедрение таких систем позволяет снизить потребление электроэнергии на освещение на 30-50%.

Производственный цех промышленного предприятия обычно имеет значительную площадь и высоту потолков. Освещение осуществляется с помощью светильников высокого давления (ДНаТ, ДРЛ) или современных светодиодных светильников. Цех может быть условно разделен на зоны: постоянные рабочие места, проходы, складские зоны, вспомогательные помещения.

Особенностью промышленного освещения является высокая единичная мощность светильников и необходимость обеспечения нормируемой освещенности на рабочих поверхностях. При этом во многих зонах (проходы, складские участки) люди находятся непостоянно, что создает потенциал для экономии.

Эффективная работа системы освещения требует автоматического управления включением и выключением групп светильников в зависимости от: наличия людей в зоне; уровня естественной освещенности (около световых проемов); времени суток и дня недели.

Рассмотрим схему автоматизации освещения цеха (рисунок 1), которая включает в себя несколько функциональных узлов.

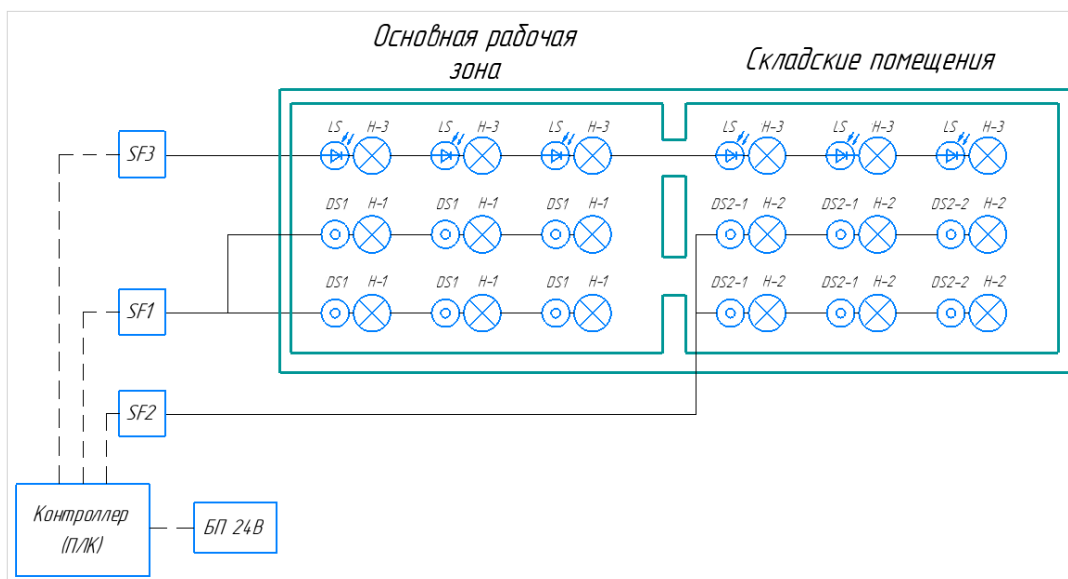


Рисунок 1 – Структурная схема автоматизации освещения
производственного цеха

Контур управления освещением рабочих зон предназначен для включения света только тогда, когда на рабочем месте есть человек. Датчик движения DS1 фиксирует присутствие оператора. Сигнал поступает на контроллер или реле, которое замыкает цепь питания группы светильников Н-1. Если движение отсутствует в течение заданного времени (например, 10 минут), свет автоматически выключается.

Контур управления освещением проходов и вспомогательных зон работает по аналогичному принципу, но с использованием датчиков движения с меньшей чувствительностью (DS2-1, DS2-2), которые управляют включением светильников Н-2. Это позволяет освещать только те участки проходов, где в данный момент находятся люди.

Контур коррекции по естественной освещенности используется для светильников, расположенных вблизи окон или световых фонарей. Датчик освещенности LS измеряет уровень наружного света. Если естественного света достаточно для выполнения работ (выше порога), контроллер блокирует включение этой группы светильников Н-3 даже при наличии сигнала от датчика движения.

Централизованное управление по времени (часы реального времени) позволяет задавать различные режимы работы для рабочего и нерабочего времени. Например, в ночную смену можно снизить пороги срабатывания датчиков или перевести часть освещения в дежурный режим (горит 10-20% светильников).

Для оценки эффективности автоматизации используется балансовая модель энергопотребления. В традиционной системе коэффициент использования близок к единице или может задаваться графиком работы цеха, так как свет часто горит принудительно всю смену. В автоматизированной системе данный коэффициент зависит от реального времени присутствия людей. Для создания модели использовались данные хронометража перемещения персонала по цеху в течение рабочей недели. Анализ показал, что система с ручным управлением приводит к тому, что в проходах и складских зонах свет горит до 70% времени, когда там никого нет. Созданная модель позволила рассчитать оптимальные установки времени задержки отключения света.

На основе данных о зонах присутствия была разработана система управления. Эффективность внедрения интеллектуальной системы управления освещением приведена в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение эффективности работы освещения при традиционном и автоматическом управлении

Параметр / Зона цеха	Традиционная система (ручное управление)	Автоматическая система (датчики движения + время)	Изменение
Годовое потребление э/э (тыс. кВт·ч)	180	108	-40%
Затраты на электро- энергию (тыс. руб./год)	900	540	-360 тыс. руб.
Средний срок служ- бы ламп (мес.)	12	20	+67%
Количество часов горения в сутки (проходы)	24	6-8	-67%
Окупаемость системы автоматизации	—	1,5-2 года	—

Данные таблицы 1 показывают, что после внедрения автоматической системы управления наблюдается значительное снижение энергопотребления (до 40%) за счет исключения холостой работы светильников в незанятых зонах. Дополнительный экономический эффект достигается за счет увеличения срока

службы ламп, так как сокращается количество часов их горения. Система окупается в течение 1,5-2 лет за счет экономии электроэнергии.

Список литературы

1. «Умный свет» на производстве: протоколы управления и экономическая эффективность // Elec.ru. – 2025. – 5 сентября. – URL: <https://www.elec.ru/publications/osveschenie/9120/> (дата обращения: 16.03.2026).

2. Применение PIR-датчиков в производственных помещениях: проблемы и решения // Rayzeek. – 2025. – URL: <https://www.rayzeek.com/ru/blog/> (дата обращения: 16.03.2026).

References

1. Smart Lighting in Production: Control Protocols and Economic Efficiency // Elec.ru. – 2025. – September 5. – URL: <https://www.elec.ru/publications/osveschenie/9120/> (date of appeal: 16.03.2026).

2. The Use of PIR Sensors in Industrial Facilities: Problems and Solutions // Rayzeek. – 2025. – URL: <https://www.rayzeek.com/ru/blog/> (date of appeal: 16.03.2026).

**РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ШЛЮЗА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ В СИСТЕМЕ «УМНЫЙ ДОМ»
DEVELOPMENT OF A UNIVERSAL ASHUTS FOR ENERGY
CONSUMPTION MANAGEMENT IN THE SMART HOME SYSTEM**

Волошин Д.В., студент

Никитина Ю.С., старший преподаватель

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова» г. Воронеж, Россия

yunika-five@yandex.ru

Voloshin D.V., student

Nikitina Yu.S., senior lecturer

Voronezh State University of Forestry and Technologies

Named after G.F. Morozov,

Voronezh, Russia

Аннотация: В статье рассматривается вариант разработки системы автоматического приоритетного управления нагрузками, в которой в качестве контроллера выбрана платформа Arduino Uno на базе микроконтроллера ATmega328P.

Abstract: The article discusses the development of an automatic load priority management system based on the Arduino Uno platform and the ATmega328P microcontroller.

Ключевые слова: программирование, микроконтроллер, исполнительное устройство, интеллектуальные системы управления.

Keywords: programming, microcontroller, executive device, intelligent control systems.

Современные электрические сети и бытовые электроприборы создают ситуацию, при которой суммарная потребляемая мощность в квартире или небольшом офисе может превысить допустимый лимит, установленный вводным автоматическим выключателем. В результате срабатывает защита, и обесточивается всё помещение целиком. Это приводит к отключению критически важ-

ных приборов (холодильников, систем безопасности, медицинского оборудования) и создаёт неудобства для пользователя. Возникает необходимость разработки интеллектуальных систем управления нагрузками, которые не просто отключают всё при перегрузке, а избирательно воздействуют на отдельные приборы, сохраняя питание наиболее важных. Такие системы являются элементом концепций «Умный дом» и «Умные энергосети».

Разработанная система представляет собой замкнутый контур автоматического управления, состоящий из следующих основных элементов:

1. Уровень датчиков и ввода: кнопки подключения приборов (имитируют включение/выключение нагрузки пользователем).

2. Уровень управления: микроконтроллер Arduino Uno, который обрабатывает входные сигналы и принимает решение по заданному алгоритму.

3. Уровень исполнительных устройств: четыре электромагнитных реле, коммутирующих цепи маломощной нагрузки (светодиоды, имитирующие работу реальных бытовых приборов). В качестве контроллера выбрана платформа Arduino Uno на базе микроконтроллера ATmega328P. Выбор обусловлен простотой программирования, наличием необходимого количества портов ввода-вывода и широкой распространенностью среди студенческих проектов. В системе реализована иерархия приоритетов, представленная в таблице 1.

Таблица 1 — Приоритеты и мощность условных приборов

Прибор	Мощность (усл. ед.)	Приоритет	Категория
Холодильник	30	1	Высокая
Обогреватель	50	1	Высокая
Бойлер	60	2	Средняя
Компьютер	40	3	Низкая

Лимит суммарной мощности установлен в 150 условных единиц. Алгоритм работы системы предусматривает, что высокоприоритетные приборы могут вытеснять низкоприоритетные при возникновении перегрузки. Средне приоритетный прибор (бойлер) может вытеснять только низкоприоритетный.

Управляющая программа написана в среде Arduino IDE на языке C++. Основные функциональные блоки программы:

1. Функция `calculateTotalPower()` – непрерывно пересчитывает суммарную потребляемую мощность на основе состояния реле и внешней нагрузки.

2. Функция `freePowerFor()` – при попытке включить новый прибор проверяет, не будет ли превышен лимит, и при необходимости отключает приборы с более низким приоритетом, чтобы освободить требуемую мощность.

3. Функция `handleButtonPress()` – обрабатывает нажатия кнопок, реализуя логику приоритетного включения/выключения.

4. Отладочный вывод – все состояния системы выводятся в последовательный порт (Serial Monitor) для визуального контроля и отладки.

Таблица 2 — Результаты тестирования системы

Действие пользователя	Начальное состояние	Результат	Соответствие алгоритму
Включение холодильника (30) и обогреватель (50)	Все приборы выключены	Оба включены ($80 < 150$)	Да
Включение компьютера (40)	Холодильник (30), обогреватель (50)	Компьютер не учился ($120 + 40 > 150$)	Да
Включение холодильника (30)	Компьютер (40)	Компьютер отключился, холодильник включился (вытеснение)	Да
Одновременное включение бойлера (60) и компьютера (40)	Холодильник выключен	Включается только бойлер (средний приоритет вытесняет низкий)	Да

Фрагмент кода, реализующий основную логику приоритетов, приведен ниже:

```

cpp
bool freePowerFor(int neededPower, int minPriorityToKeep) {
    for (int priority = 3; priority >= minPriorityToKeep; priority--) {
        for (int i = 0; i < 4; i++) {
            if (relayState[i] && relayPriority[i] == priority) {
                setRelay(i, false); // отключаем низкоприоритетный прибор
                if (totalPower + neededPower <= POWER_LIMIT) return true;
            }
        }
    }
    return false;
}

```

Результаты, полученные в ходе тестирования макета приведены в таблице 2.

В результате выполнения работы был разработан действующий макет системы приоритетного управления нагрузками на базе микроконтроллера Arduino.

Разработанная система позволяет:

1. Контролировать суммарную мощность подключенных приборов в реальном времени.
2. Автоматически отключать низкоприоритетные приборы при возникновении перегрузки.
3. Обеспечивать бесперебойную работу критически важных устройств.

Система демонстрирует принципы работы автоматизированных систем управления с обратной связью. Дальнейшее развитие системы может включать в себя:

1. Интеграцию с реальными датчиками тока для контроля фактического потребления.
2. Подключение к сети Wi-Fi для дистанционного управления через смартфон.
3. Разработку более сложной логики прогнозирования перегрузок на основе анализа истории потребления.

Список литературы

1. Петин, В. А. Проекты с использованием контроллера Arduino / В. А. Петин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2019. – 464 с.

2. Официальный сайт компании Arduino. – URL: <https://arduino.ru/> (дата обращения: 13.03.2026).

3. Схиртладзе, А. Г. Автоматизация технологических процессов и производств / А. Г. Схиртладзе, А. В. Федотов, В. Г. Хомченко. – М.: Инфра-М, 2020. – 296 с.

Reference

1. Petin V.A. Projects using the Arduino controller. – SPb.: BHV-Petersburg, 2019. – 464 p.

2 Arduino.ru – Russian-speaking community of Arduino enthusiasts. – URL: <https://forum.arduino.ru/> (accessed on March 13, 2026).

3. Skhirtladze A.G., Fedotov A.V., and Khomchenko V.G. Automation of Technological Processes and Production. Moscow: Infra-M, 2020. 296 p.

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОГО ТЕРМОРЕГУЛЯТОРА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO
DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC TEMPERATURE REGULATOR
USING THE ARDUINO PLATFORM**

Горлов Д.А., студент
Стариков А.В., д.т.н., профессор
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»
г. Воронеж, Россия
danil.gorloff2014@yandex.ru
Gorlov D.A., Student
Starikov A.V., DSc (Engineering), Professor
Voronezh State University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov,
Voronezh, Russian Federation

Аннотация: Статья содержит обзор разработки автоматического терморегулятора с использованием платформы Arduino Uno. Описаны необходимые аппаратные средства для построения терморегулятора, а также алгоритм работы терморегулятора, программные средства для разработки программы и загрузки ее память микроконтроллера.

Abstract: This article provides an overview of developing an automatic temperature regulator using the Arduino Uno platform. It describes the hardware required to build the thermostat, as well as its operating algorithm, software for developing a program and loading it into the microcontroller's memory.

Ключевые слова: Автоматизация, терморегулятор, программные средства, микроконтроллер.

Keywords: Automation, temperature controller, software, microcontroller.

Arduino –это аппаратно-программная платформа, предназначенная для создания различных электронных устройств с микроконтроллерным управлением. Она включает в себя аппаратную часть, представленную электронной

платой с размещенным на ней микроконтроллером, а также программную часть, состоящую из свободно распространяемой интегрированной среды разработки Arduino IDE и встроенных библиотек функций, упрощающих работу с аппаратными средствами при разработке пользовательских программ.

Электронная плата Arduino содержит минимальный набор электронных компонентов, обеспечивающих функционирование микроконтроллера, и фактически является аналогом материнской платы персонального компьютера. Микроконтроллеры серии ATmega, разработанные в начале 2000-х годов в компании Atmel, позволяют выполнять программирование микроконтроллера непосредственно через разъем USB, т.е. не требуют использования специального программатора. Таким образом, чтобы приступить к разработке собственного электронного устройства пользователю потребуется плата Arduino, соединительный шнур и персональный компьютер.

Программная составляющая платформы Arduino представлена интегрированной средой разработки Arduino IDE, использующей упрощенный диалект языка C/C++, который был специально адаптирован для написания приложений для микроконтроллеров. Кроме того, для данной интегрированной среды разработано большое количество специализированных библиотек, облегчающих взаимодействие с разнообразными датчиками и электронными компонентами.

Для разработки автоматического терморегулятора использована обновленная редакция платы Arduino Uno с микроконтроллером ATmega328 (рисунок 1). В отличие от предыдущих редакций плат, использовавших для связи по USB микроконтроллер FTDI USB, в ней для этой цели используется микроконтроллер ATmega8U2.



Рисунок 1 – Обновленная редакция платы ArduinoUno

Интегрированная среда разработки Arduino IDE обеспечивает комфортные условия разработки программного обеспечения для микроконтроллеров платформы Arduino (рисунок 2). Разработаны версии Arduino IDE для использования в операционных системах Windows, macOS и Linux.

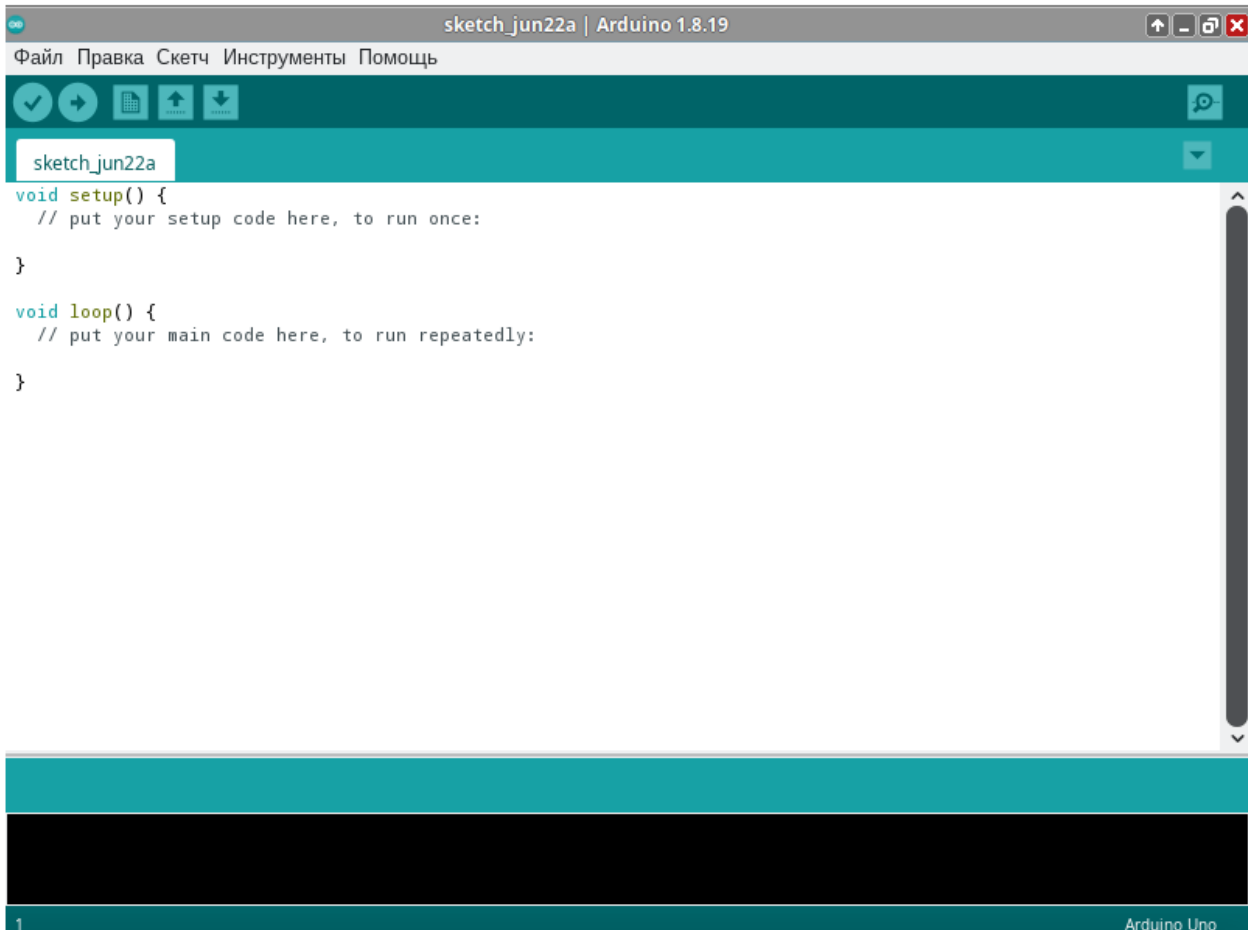


Рисунок 2– Интерфейс Arduino IDE

Структурная схема автоматического терморегулятора, разработанного на платформе Arduino, показана на рисунке 3.

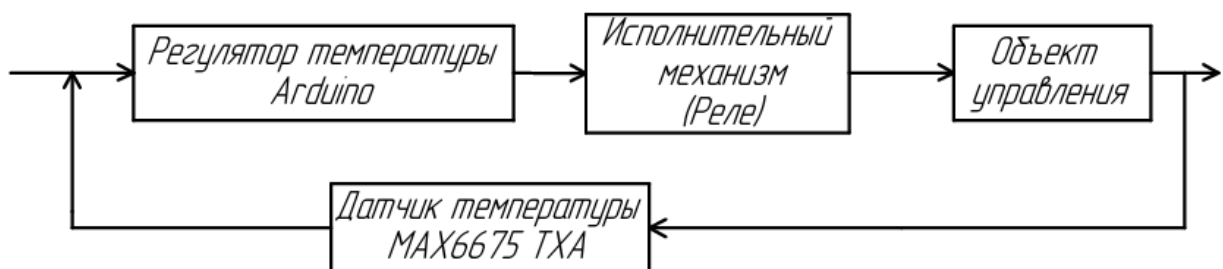


Рисунок 3 – Структурная схема терморегулятора

В качестве объекта управления для терморегулятора может выступать любое нагревательное оборудование (например, паяльная станция, инкубатор, отопительная система и другие). Таким образом, терморегулятор на платформе Arduino обеспечивает универсальный подход к процессу регулирования температуры, не зависящий от типа объекта проектирования.

Внешний вид контроллера, регулирующего температуру объекта управления, показан на рисунке 4.

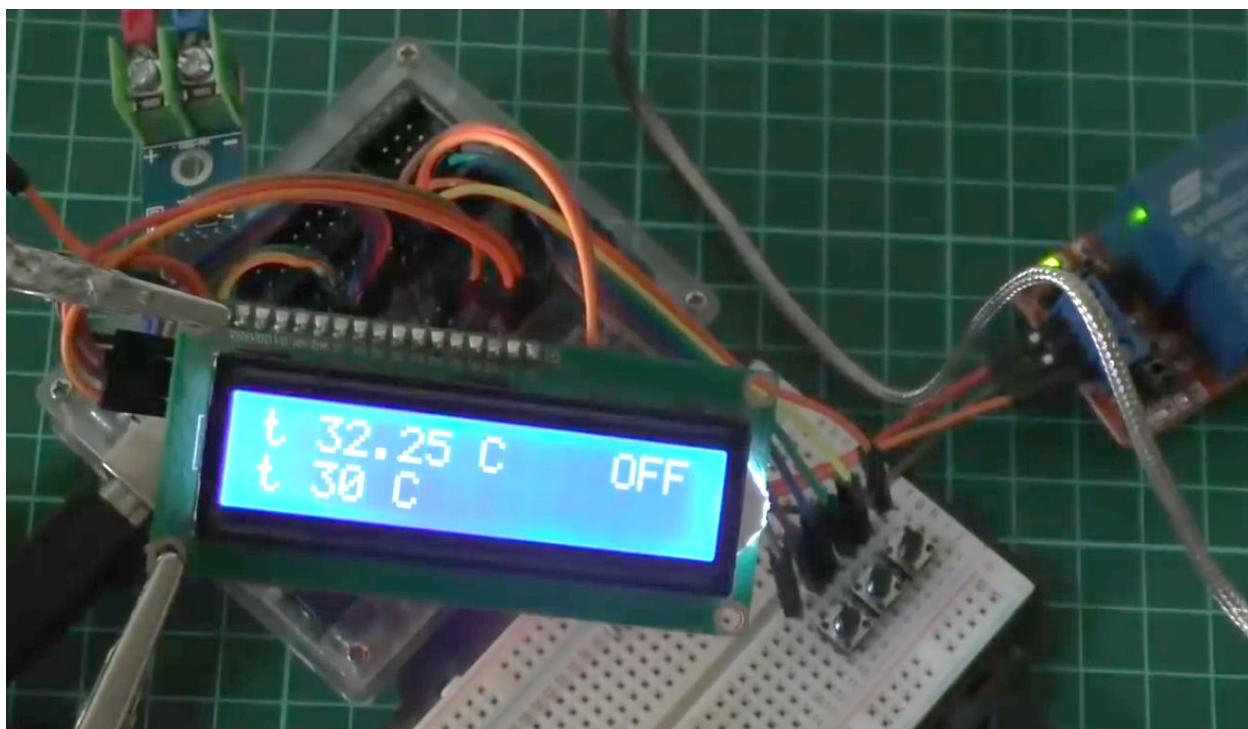


Рисунок 4 – Контроллер в сборе на коммутационной плате

Для задания значения (уставки) температуры необходимо использовать следующие три кнопки:

КН1 – кнопка запуска терморегулирования с помощью контроллера Arduino.

КН2 – увеличение заданного значения (уставки) температуры.

КН3 – уменьшение заданного значения (уставки) температуры.

Основным компонентом терморегулятора является контроллер Arduino UNO.

В качестве исполнительного механизма используется электромагнитное реле HW-307, которое является универсальным и доступным устройством на рынке электроники и обладает повышенной надежностью.

Датчик температуры представляет собой модуль преобразования аналогового сигнала с термопреобразователя типа Хромель-Алюмель.

SD Card представляет собой модуль для адаптации micro-SD накопителя для контроллеров Arduino, в котором может храниться необходимая информация о значениях температуры.

Выбор дополнительных модулей для платформы Arduino весьма разнообразен. На рынке представлены как оригинальные модули от известных производителей, так и более дешевые копии, причем качество некоторых из них не уступают качеству оригинальной продукции. На рисунке 5 представлен модуль MAX6675 с подключаемым датчиком термоэлектрического преобразования типа К.

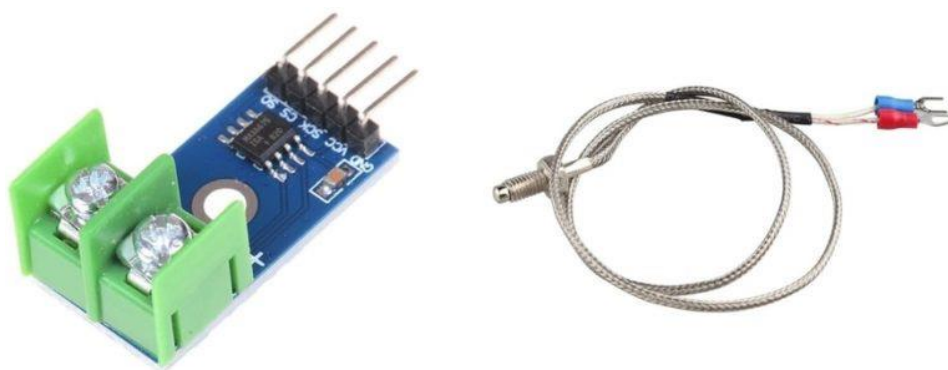


Рисунок 5— Датчик температуры термопары типа К MAX6675

Модуль MAX6675, объединённый с датчиком термоэлектрического преобразования типа К, осуществляет аналого-цифровое преобразование сигнала от термопары указанного типа посредством специализированного чипа фирмы Maxim Integrated. Модуль снабжён последовательным интерфейсом, согласованным с промышленным стандартом SPI, что позволяет подключать устройство непосредственно к микроконтроллерному оборудованию. Данный модуль позволяет гарантировать точное измерение текущих значений температуры

рабочей среды с применением встроенной системы компенсации влияния паразитных температурных факторов.

Датчик температуры оснащен 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем, обеспечивающим разрешение значений измерений до $+1024\text{ }^{\circ}\text{C}$ с точностью до $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для измерения температур в диапазоне от 0 до $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$ используются восемь младших разрядов АЦП.

Технические характеристики модуля:

1. Рабочее напряжение: DC 5 В.
2. Рабочий ток: 50 мА.
3. Диапазон измеряемых температур: $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 1024\text{ }^{\circ}\text{C}$.
4. Точность измерения: $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
5. Разрешение: $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$.
6. Режим вывода: цифровой сигнал SPI.

Поскольку генерируемое напряжение чрезвычайно мало, для преобразования измеренных значений в пригодную для использования форму требуется усилитель.

Целесообразно использовать специализированную интегральную микросхему MAX6675, обладающего всеми необходимыми компонентами для работы с термоэлектрическими преобразователями температуры (термопарами), в частности моего случая, использования термопары типа ТХА. Особенностью данного устройства является наличие встроенного усилителя сигнала (рисунок 6), компенсационного элемента холодного спая (англ. *Cold Junction Compensation—CJC*) и аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Благодаря конструктивным особенностям интегрированный модуль обеспечивает эффективное взаимодействие с термопарой типа К, минимизируя сложность схемотехнических решений. Дополнительным преимуществом микросхемы является отсутствие необходимости преобразования аналогового сигнала, так как внутренний АЦП формирует непосредственно цифровое представление измеренной величины в формате последовательного 12-разрядного двоичного кода.

Выбор данного модуля основывается на его доступности, а также простоте использования и подключения. Выбор термопары типа ХА, обосновывается большим диапазоном температуры измерения ($-200...+1200^{\circ}\text{C}$), а также дешевой и долговечностью. Проволока диаметром 1,5мм, согласно паспортным данным, выдерживает эксплуатацию свыше $+1000^{\circ}\text{C}$, около 100 часов, а около $+500^{\circ}\text{C}$ более 10000 часов.

Символьный индикатор типа LCD1602 с интерфейсом I²C применяется для визуализации текстовой информации посредством знаковосинтезирующего экрана формата 16×2, обеспечивающего отображение двух строк по шестнадцать знаков каждая (рисунок 7).

Модификация индикатора LCD1602 I²C оборудована специализированным контроллером Flash-I²C (LCD-конвертор Flash-I²C), позволяющим осуществлять управление устройством через минимальное количество линий связи – два сигнальных провода.



Рисунок 6 – Символьный индикатор LCD 1602

Простота подключения благодаря плате расширения I²C, крупный текст и информативное табло, не оставляет конкурентов среди других экранов, но ограничения по размеру экрана все равно сказывается на создании масштабных проектов. При высоком диапазоне использования при внешних условиях: температура эксплуатации: $-20...+70^{\circ}\text{C}$, он также обладает высокой скоростью отклика около 250 мс. Данная LCD панель зарекомендовала себя при создании проектов, а характеристики позволяют использовать в промышленных условиях, где присутствуют сложные эксплуатационные условия, наподобие вибрации или высокого напряжения ЭДС.

Модуль на основе электромеханического реле HW-307 (рисунок 8) имеет следующие характеристики: управляющее напряжение 5 В, подключаемая нагрузка до 10А, 300 В DC, 250В AC. Имеются светодиоды, которые сигнализируют о состоянии реле – включено или выключено. Большое количество циклов включения/выключения (около 100 000), а также низкая стоимость обуславливает выбор данного модуля.

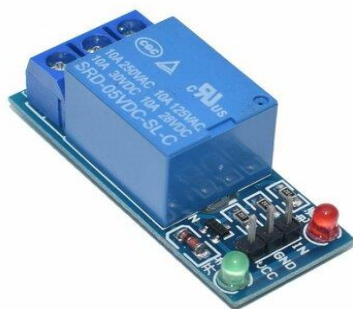


Рисунок 7 – Электромагнитное реле HW-307

Модуль кард-ридера SD Arduino – это самое доступное и надежное устройство, для возможности записи необходимой информации на физический носитель, однако возможность данного модуля не ограничено использованием только на микроконтроллерах Arduino, позволяя использовать с другими контроллерами и даже ПК (рисунок 9). Он поддерживает карты SD, SDHC, microSD, MMC, mini SD (при этом носители, не подходящие по типоразмеру, подключаются через адаптер).

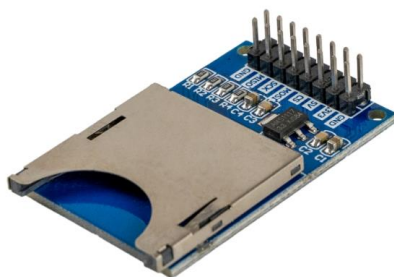


Рисунок 8– Модуль SD Card для подключения SD-карт к Arduino

Принципиальная схема автоматического терморегулятора на платформе Arduino представлена на рисунке 10.

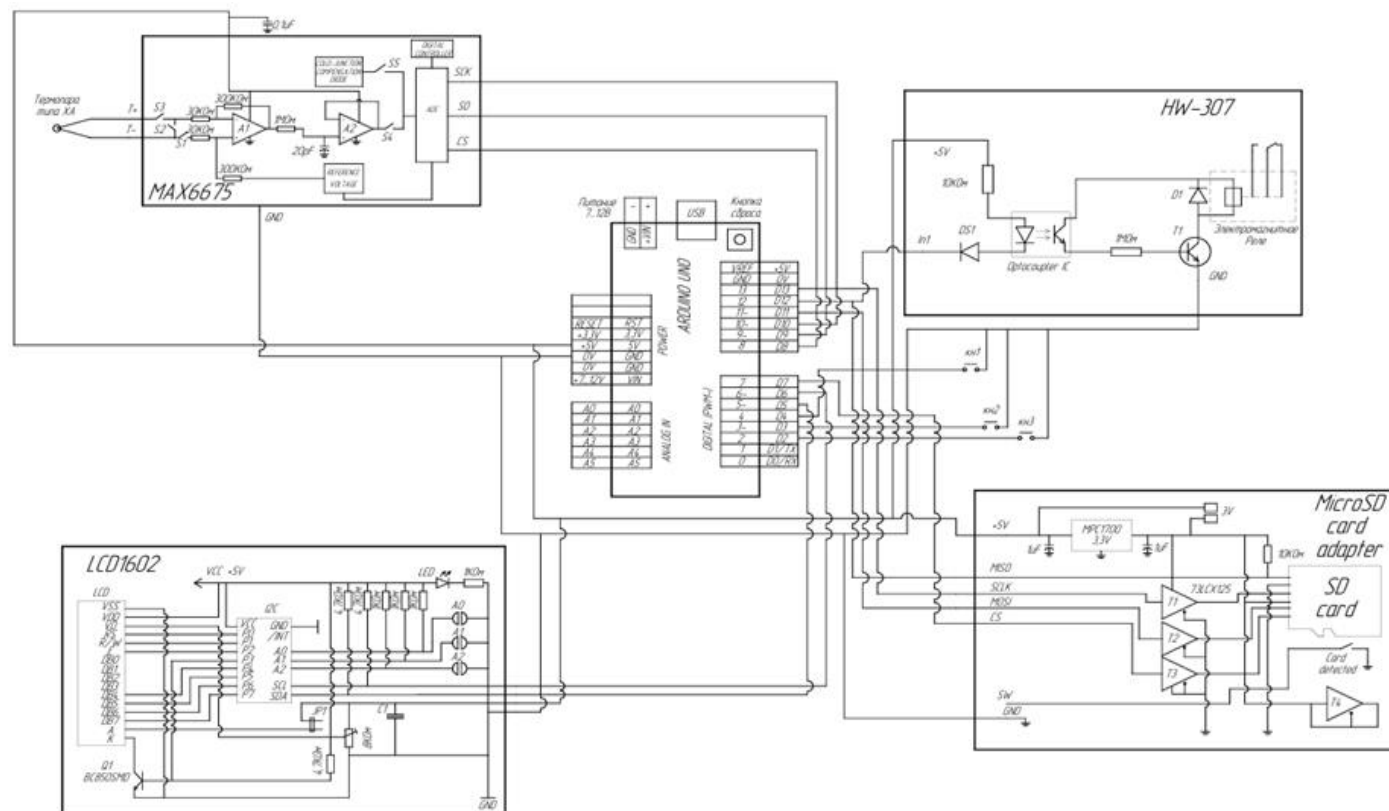


Рисунок 9– Принципиальная схема терморегулятора

Структурная схема алгоритма весьма объемна, поэтому ниже она представлена несколькими фрагментами.

На рисунке 10 показан фрагмент алгоритма, который запускает проверку основных модулей и в случае их отказа завершает работу терморегулятора. Если запуск и проверка выполнены успешно, то осуществляется переход к следующему этапу (фрагменту алгоритма).

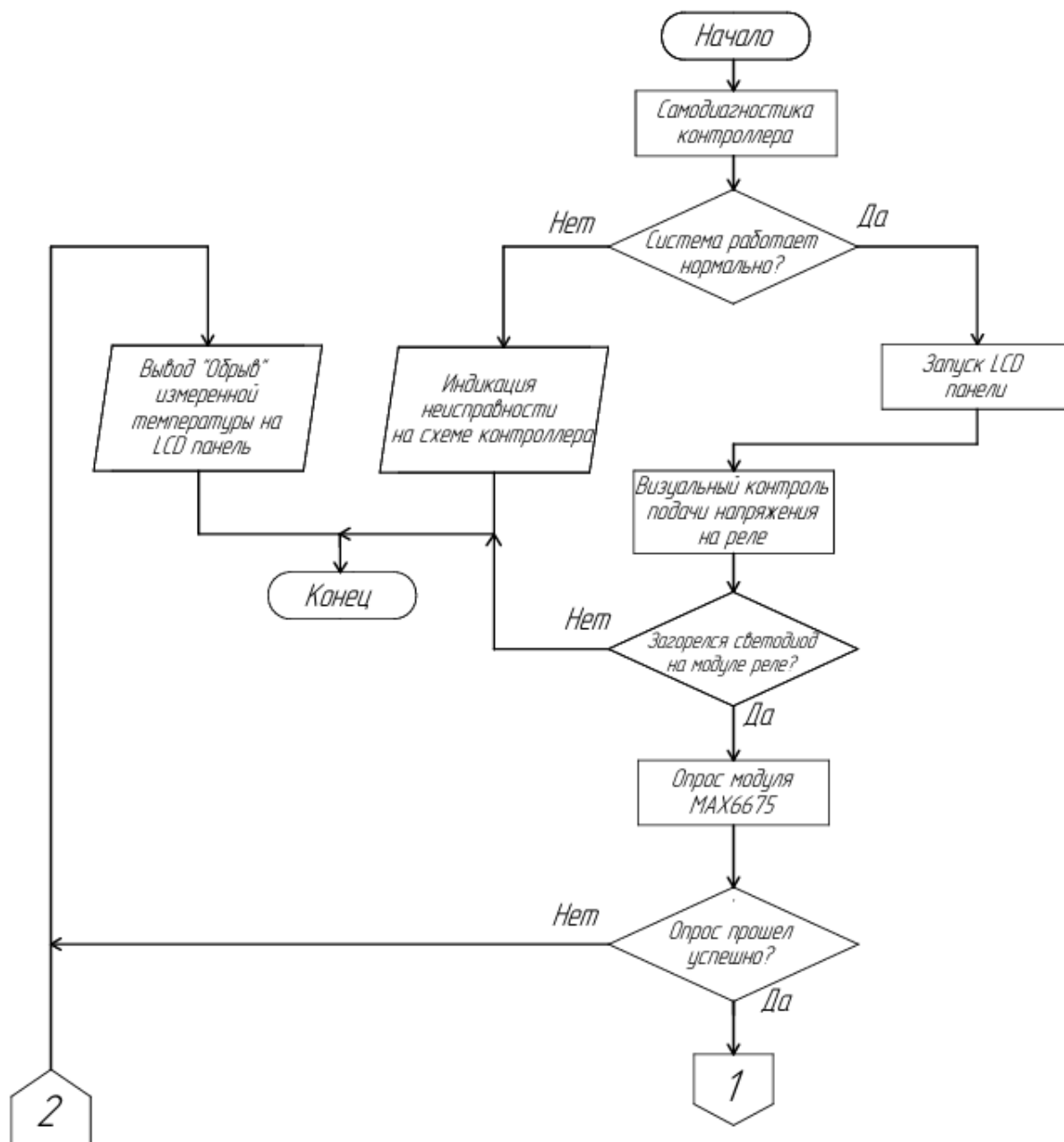


Рисунок 10 – Фрагмент алгоритма запуска работы терморегулятора

На рисунке 11 показан фрагмент схемы алгоритма инициализации (обнаружения) SD-карты и опроса термопары. При успешном обнаружении

SD-карты создается файл формата TXT(текстовый), в который каждые 3 секунды будет записываться заданное и измеренное значения температуры.

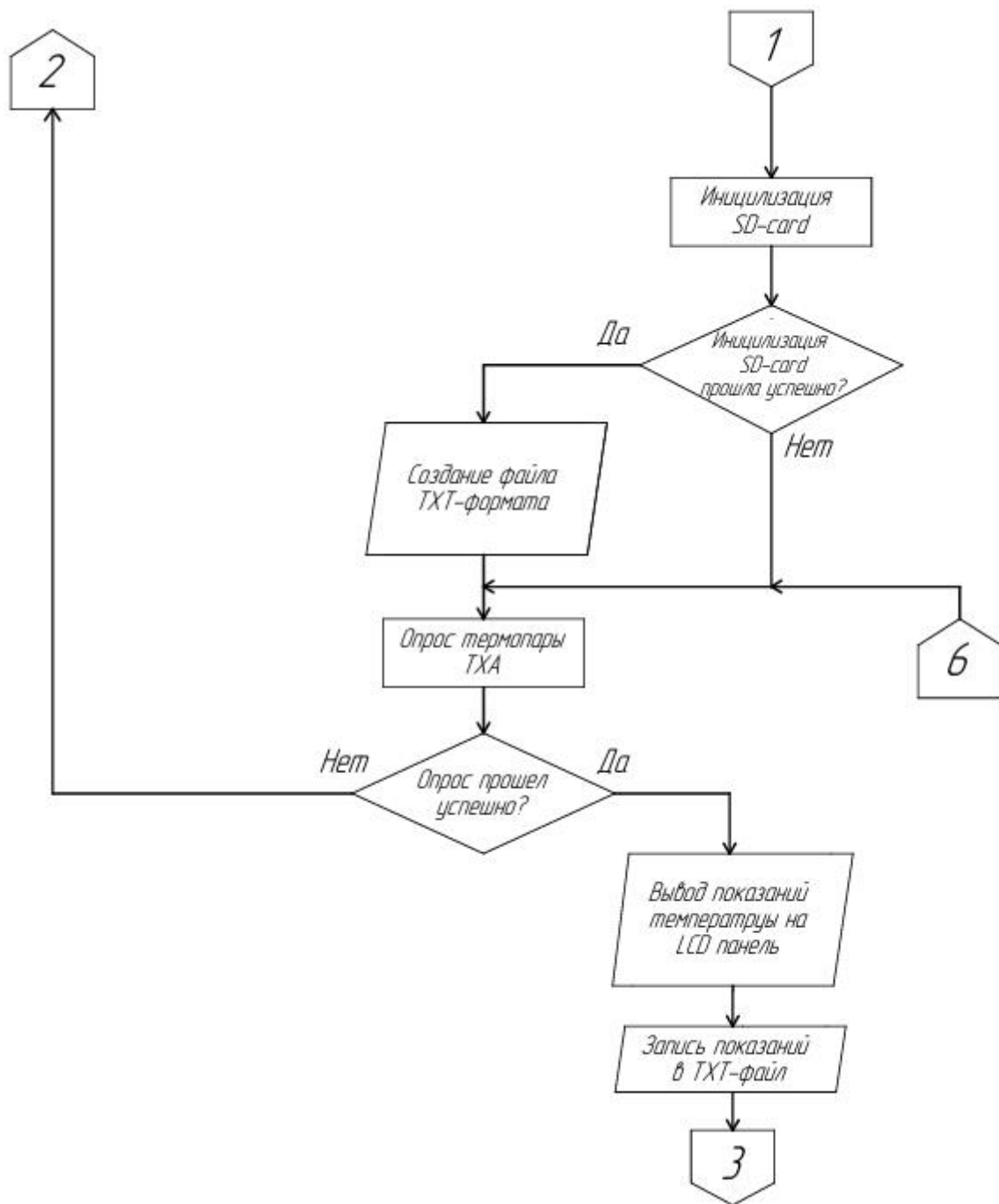


Рисунок 11 – Фрагмент алгоритма инициализации SD-карты и опроса термопары

На рисунке 12 показан фрагмент алгоритма по обработке нажатия кнопки (в данном случае это КН1); обработка нажатия двух других кнопок выполняется аналогично.

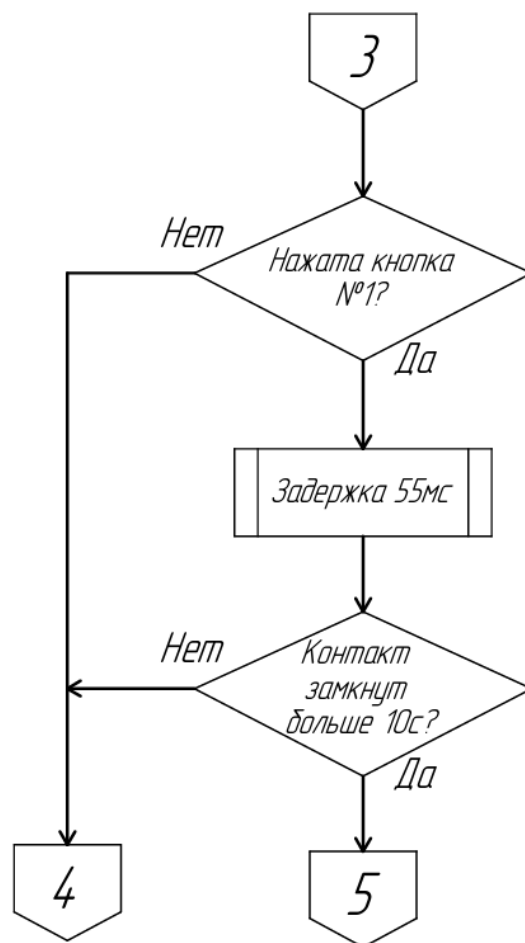


Рисунок 12 – Фрагмент алгоритма обработки нажатия кнопки КН1

Алгоритм работы с кнопкой КН1 во всех меню реализован одинаково. Временная задержки (в данном случае – 55 мс), используемая для предотвращения эффектадребзга контактов при нажатии кнопки, в IDEArduino реализована с помощью стандартной подпрограммы. Задание значений параметров для данной подпрограммы показано на рисунке 13.

```

10 int buttonState = LOW; // Текущее состояние кнопки
11 int lastButtonState = LOW; // Последнее стабильное состояние кнопки
12 unsigned long lastDebounceTime = 0; // Время последнего изменения состояния
13 const unsigned long debounceDelay = 55; // Задержка антидребзга в миллисекундах
  
```

Рисунок 13 – Скетч антидребзга кнопки

Работа реле происходит циклично после опроса температуры и уставки (рисунок 14). Если была нажата кнопка КН1, то алгоритм переходит к следующему этапу (фрагменту алгоритма).

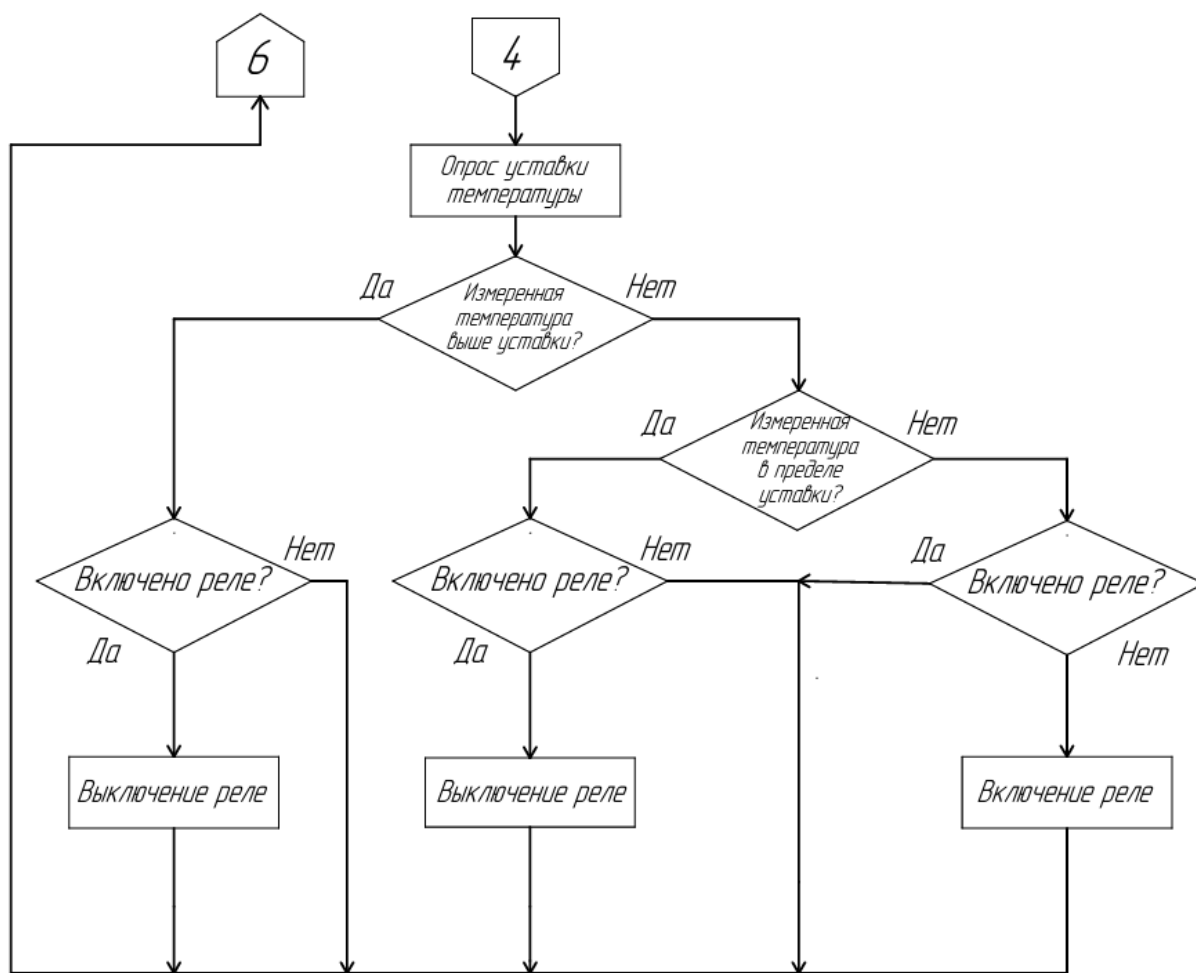


Рисунок 14 – Фрагмент алгоритма управлением работы реле

Реализация алгоритма настройки задания уставки и температурного диапазона аналогичны. Отличие лишь в выводе на LCDпанель разного текста: для настройки задания – «Задание температуры», и для настройки диапазона – «Диапазон задания». Фрагмент алгоритма по заданию уставки показан на рисунке 15.

Данный фрагмент проверяет нажатие кнопок КН2 и КН3. Если было нажатие, то выполняется подпрограмма антидребезга. Если по истечении временного интервала в 55 мс контакт остается замкнутым, то происходит уменьшение (КН3) или увеличение (КН2) значения температуры (уставки). Если контакты не были замкнуты, то происходит опрос кнопки КН1 или происходит регулирование температуры по реле, не выходя из меню «Задание температуры» (рисунок 16).

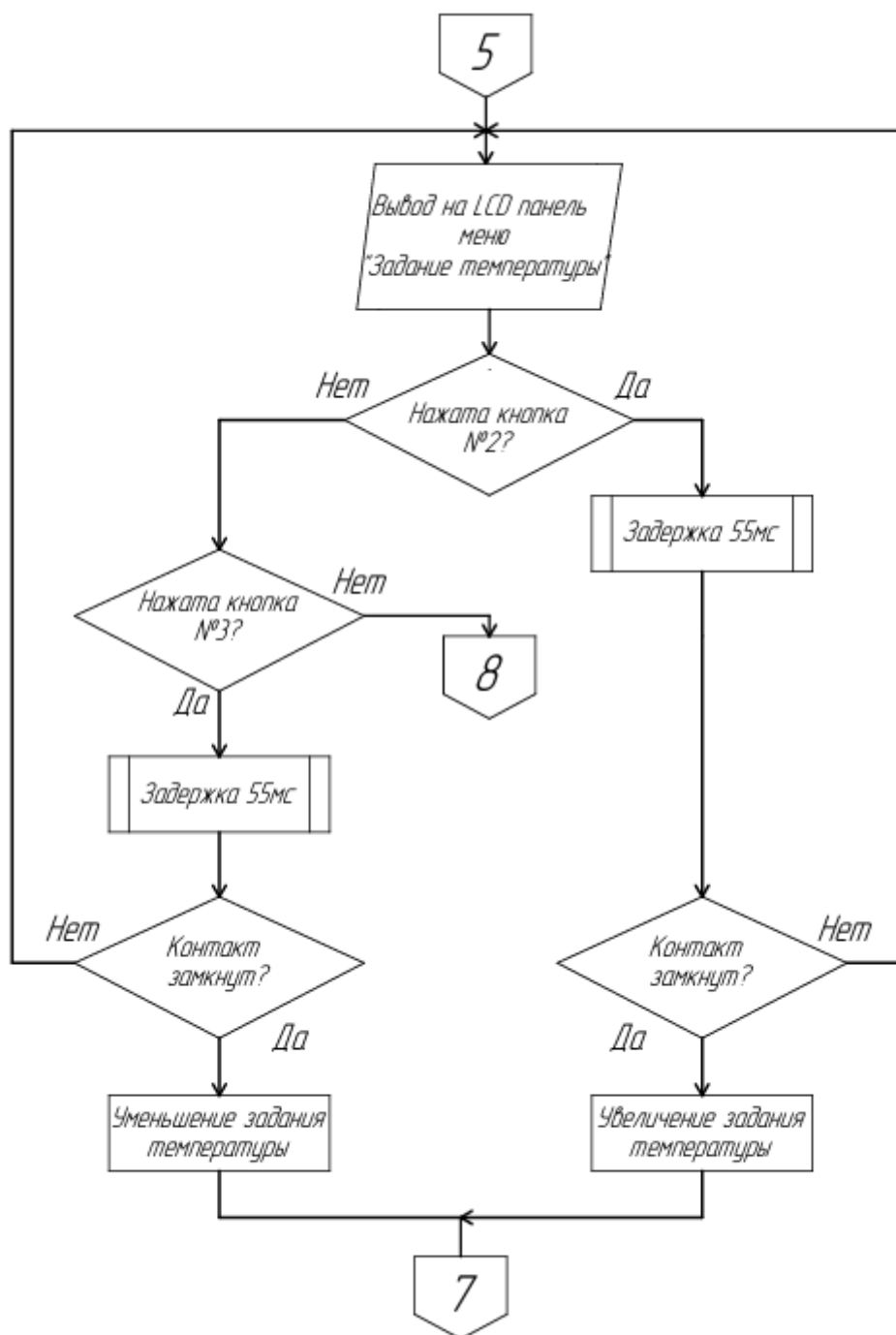


Рисунок 15 – Фрагмент алгоритма по изменению уставки

Как следует из схемы, этот фрагмент алгоритма аналогичен фрагменту алгоритма управления реле в основном меню (рисунок 14), различие заключается лишь в выводимой надписи на дисплее.

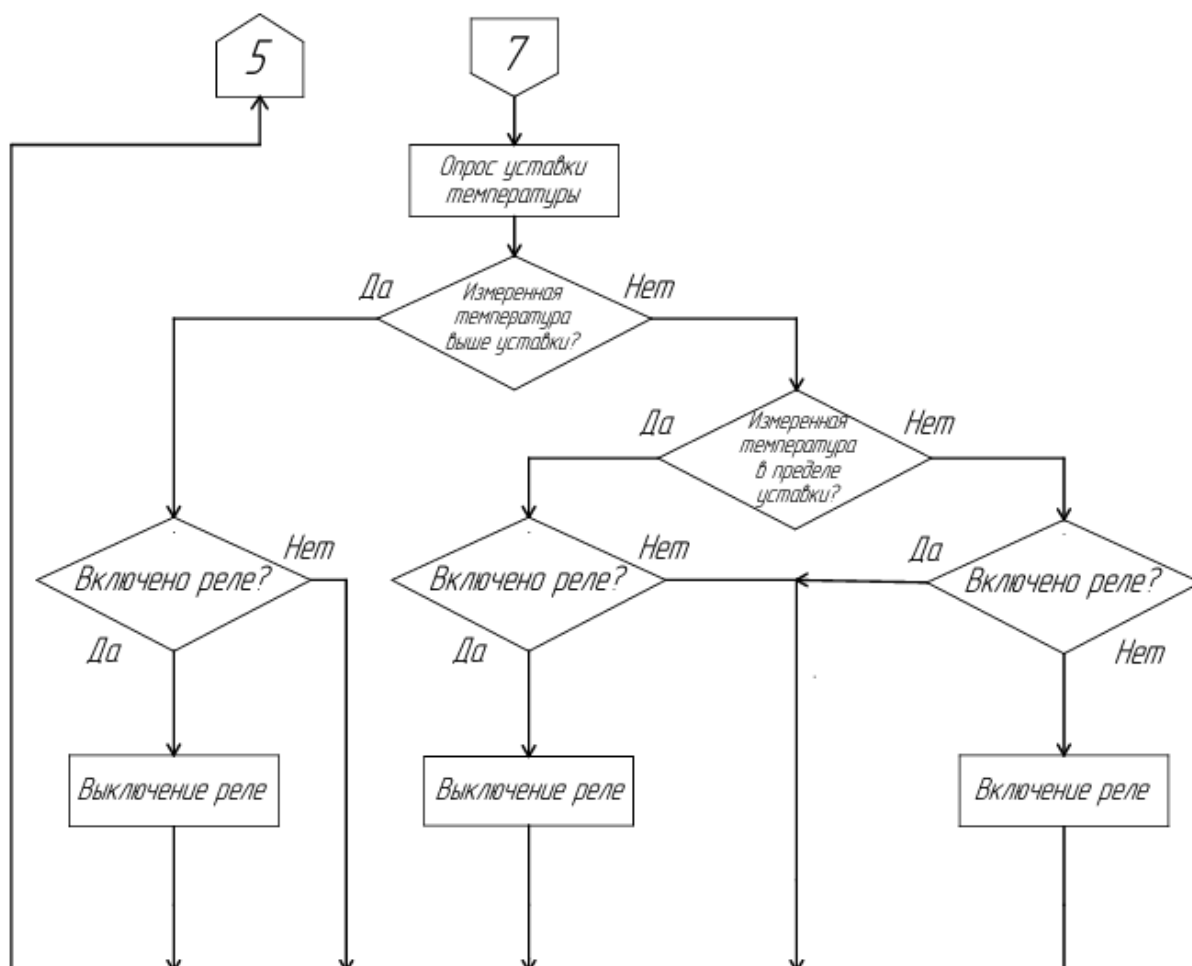


Рисунок 16 – Фрагмент алгоритма управления работой реле в меню «Задание температуры»

Следует отметить еще одну аналогию с работой кнопки КН1 в основном меню, отличие заключается лишь в том, что при отсутствии контакта, контроллер остается в меню «Задание температуры», а при нажатии переходит к следующему меню «Задание диапазона». Работа в меню «Задание диапазона» аналогична работе в меню «Задание температуры», поэтому фрагмент алгоритма для нее здесь не приводится.

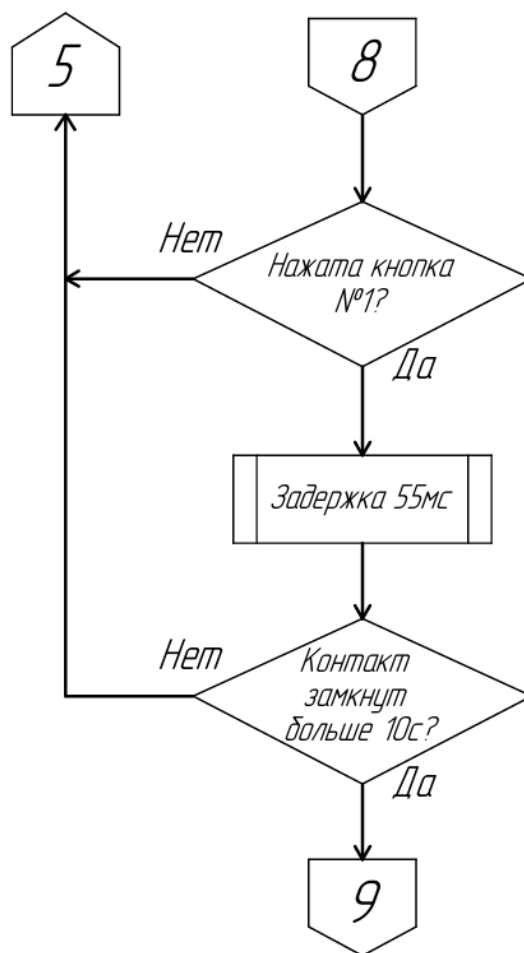


Рисунок 17 – Фрагмент алгоритма проверки нажатия кнопки КН1
в меню «Задание температуры»

Ссылка 9 на схеме алгоритма (рисунок 17) аналогична ссылке 5 на схеме алгоритма, представленной на рисунке 15. Различие заключается лишь в сообщении в блоке вывода, т.е. на LCD панель выводится текст «Диапазон температуры».

Выход из режима настройки уставки происходит нажатием кнопки КН1 длительностью более 10 секунд.

Изначально визуальное программирование предполагалось для написания программ для ПЛК и различных промышленных контроллеров, которые имеют свою собственную среду программирования. Одной из таких является отечественная программная среда FLProg, которая позволяет создавать прошивки для плат Arduino (рисунок 18). Для программирования используются графические языки FBD и LAD, которые являются стандартом в области программирования промышленных контроллеров.

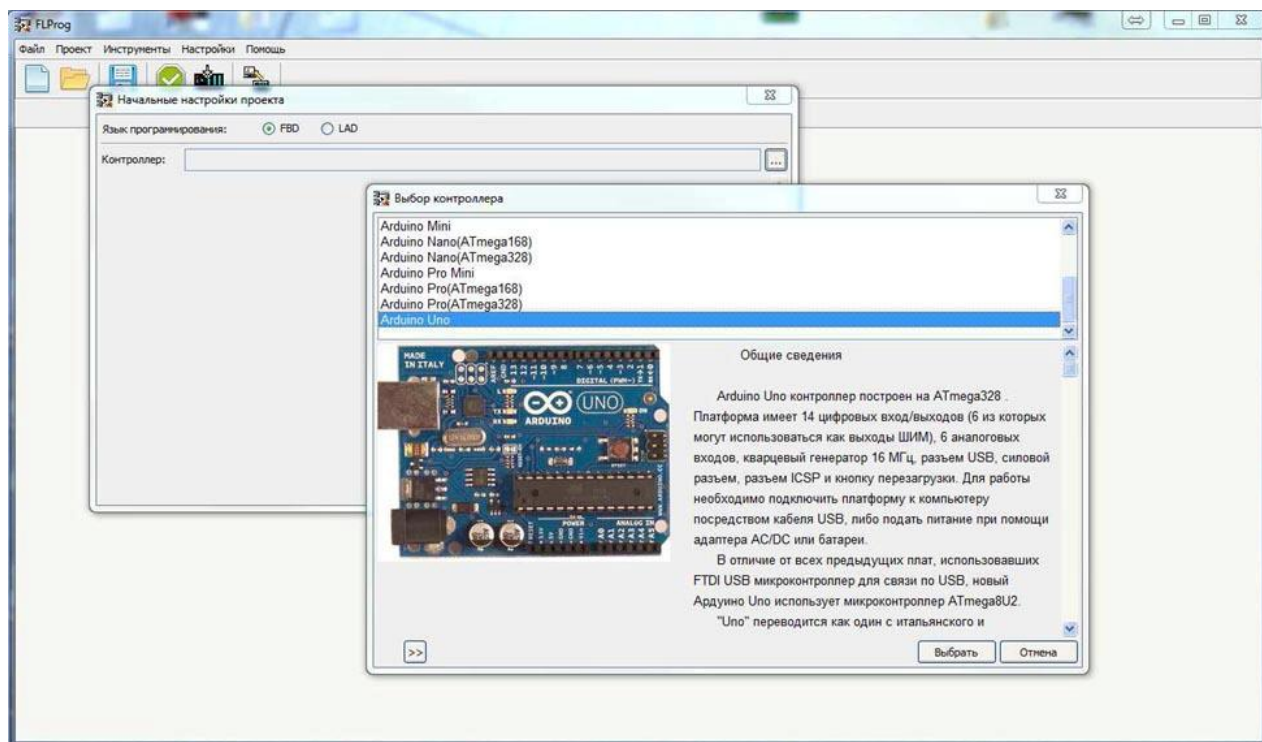


Рисунок 18 – Интерфейс программы FLProg

Программа является упрощенной версией с увеличенным функционалом блоков, работающими с внешними устройствами. Программа работает на компьютере под управлением OS Windows, Linux-32 и Linux-64.

Реализация регулятора с помощью прикладной программы FLProg и средства визуального программирования, позволяет достичь поставленной задачи намного быстрее, к тому, же не требуя специальных знаний языков программирования.

Исполнительная часть программы управления представлена двумя блоками. Первый блок сравнивает измеренные значения температуры с уставкой и значением гистерезиса.

Второй блок выполняет само регулирование – включение и выключение реле. Если измеренная температура ниже уставки и значения гистерезиса, то реле остается включенным, иначе –реле выключается.

Рассмотренное в статье решение позволяет разработать автоматический терморегулятор на платформе Arduino. Этот терморегулятор подходит для достаточно широкого диапазона температур, автоматически поддерживая заданную температуру в пределах приемлемой точности. Отличительными особенностями его является невысокая стоимость и высокая надежность. Использование визуальных средств программирования позволяют быстро разработать ра-

ботоспособное программное обеспечение для прошивки в память микроконтроллера.

Список литературы

1. Официальный сайт компании Arduino. – URL: <https://arduino.ru/> (дата обращения: 11.03.2026).
2. Arduino.ru – Русскоязычное комьюнити ардуино энтузиастов. – URL: <https://forum.arduino.ru/> (дата обращения: 11.03.2026).
3. Навсегда избавляемся от дребезга и дружим микроконтроллер с кнопкой / Хабр. – URL: <https://habr.com/ru/articles/924060/?ysclid=mmgd9uq0t9947586934> (дата обращения: 13.03.2026).
4. FLProg – Программируй реальность. – URL: <https://flprog.ru/> (дата обращения: 13.03.2026).
5. Опыт – Электроник74. – URL: <https://2150692.ru/faq/74-arduino-max6675>.
6. Arduino-rcl-radio.ru. – URL: <http://rcl-radio.ru/?p=131915&ysclid=mmfvnwdomn261171801> (дата обращения: 07.03.2026).
7. Петин, В. Проекты с использованием контроллера Arduino. – URL: <https://www.litres.ru/book/v-petin/proekty-s-ispolzovaniem-kontrollera-arduino-11838225/> (дата обращения: 05.03.2026).
8. Схемы и проекты на Arduino Uno, Mega, Nano и Mini со скетчами. – URL: <https://microkontroller.ru/arduino-projects/logger-dannyh-temperatury-vlazhnosti-na-sd-kartu-i-kompyuter-s-pomoshhyu-arduino/> (дата обращения: 09.03.2026).
9. Arduino плюс Excel – сбор и хранение данных. – URL: <https://bhv.ru/wikibook/arduino-plyus-excel-sbor-i-hranenie-dannyh/> (дата обращения: 09.03.2026).

References

1. Official website of the Arduino company. URL: <https://arduino.ru/> / (accessed on 03/11/2026).
2. Arduino.ru – Russian-speaking community of Arduino enthusiasts. – URL: <https://forum.arduino.ru/> / (accessed on March 11, 2026).
3. Get rid of the rattle forever and make friends with the microcontroller button / Habr. – URL: <https://habr.com/ru/articles/924060/?ysclid=mmgd9uq0t9947586934> (accessed on March 13, 2026).

4. FLProg – Program Reality. – URL: <https://flprog.ru/> (accessed on March 13, 2026).
5. Experience – Elektronik74. – URL: <https://2150692.ru/faq/74-arduino-max6675>
6. Arduino rcl-radio.ru. – URL: <http://rcl-radio.ru/?p=131915&ysclid=mmfvnwdomn261171801> (accessed: 03/07/2026).
7. Petin, V. Projects using the Arduino controller. – URL: <https://www.litres.ru/book/v-petin/proekty-s-ispolzovaniem-kontrollera-arduino-11838225> / (date of access: 03/05/2026).
8. Schemes and projects for Arduino Uno, Mega, Nano and Mini with sketches. – URL: <https://microkontroller.ru/arduino-projects/logger-dannyh-temperat> (date of request: 03/09/2026).
9. Arduino plus Excel – data collection and storage. – URL: <https://bhv.ru/wikibook/arduino-plyus-excel-sbor-i-hranenie-dannyh> / (date of access: 03/09/2026).

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АВТОМАТИЗАЦИИ
ПРОЦЕССОВ КАЛИБРОВАНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ
КОМПОНЕНТОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕ
RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AUTOMATION METHODS
FOR CALIBRATION AND TESTING OF ELECTRONIC COMPONENTS
IN PRODUCTION**

Грибанов А.А., к.т.н., доцент

Гетманская О.С., студент

Мещерякова А.А., к.т.н., доцент

Иванченко А.В., инженер

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

vgltaapp@mail.ru

ПАО «Сбербанк России», г. Москва

Getmanskaya O.S., Student

Gribanov A.A., PhD (Engineering), Associate professor

Meshcheryakova A.A., CSc (Engineering), Associate Professor

Ivanchenko A.V., Engineer

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

PJSC Sberbank of Russia, Moscow

Аннотация: В работе представлено комплексное исследование процессов автоматизации калибрования и тестирования электронных компонентов в условиях современного производства. Разработана математическая модель технологического процесса контроля качества, включающая дифференциальные уравнения динамики измерительной системы и статистические модели погрешностей. Предложена архитектура автоматизированной системы тестирования на базе стандарта PXIe с интегрированным модулем адаптивной калибровки. Проведено экспериментальное исследование эффективности разработанной системы на примере тестирования партии плат управления технологическим оборудо-

дованием. Результаты демонстрируют снижение времени цикла тестирования на 37%, уменьшение неопределенности измерений до 0,15% и повышение коэффициента обнаружения дефектов до 99,8%.

Abstract: This paper presents a comprehensive study of automation processes for calibration and testing of electronic components in modern production environments. A mathematical model of the quality control technological process has been developed, incorporating differential equations describing the dynamics of the measurement system and statistical models of measurement errors. An architecture for an automated testing system based on the PXIe standard with an integrated adaptive calibration module is proposed. Experimental studies on the efficiency of the developed system were conducted using the testing of a batch of control boards for technological equipment as a case study. The results demonstrate a 37% reduction in testing cycle time, a decrease in measurement uncertainty to 0.15%, and an increase in the defect detection rate to 99.8%.

Ключевые слова: автоматизация производства, тестирование электронных компонентов, калибровка, математическое моделирование, система управления, контроль качества, технологический процесс.

Keywords: production automation, electronic component testing, calibration, mathematical modeling, control system, quality control, technological process.

Современное развитие радиоэлектронной промышленности характеризуется экспоненциальным ростом сложности выпускаемых изделий и ужесточением требований к надёжности конечной продукции. В условиях перехода к концепции Индустрия 4.0 и цифровизации производственных процессов ключевым требованием становится обеспечение высокой точности и повторяемости всех технологических операций, включая критически важный этап выходного контроля качества. Процессы калибрования и тестирования электронных компонентов представляют собой совокупность взаимосвязанных операций, определяющих метрологическую прослеживаемость и техническую пригодность изделий к эксплуатации в составе конечных устройств. Традиционные методы контроля, основанные на ручном труде операторов с использованием универсальных измерительных приборов, обладают существенными недостатками, включающими низкую производительность, высокую вероятность ошибок вследствие человеческого фактора, сложность документирования результатов измерений и отсутствие возможности отслеживания истории измерений в реальном времени.

Объектом настоящего исследования является технологический процесс контроля качества электронных компонентов на участке входного и выходного контроля производственного предприятия. Технологический процесс включает последовательное выполнение операций установки компонента в тестовое гнездо, подачи тестовых сигналов заданной амплитудно-частотной характеристики, считывания отклика компонента, сравнения полученных данных с эталонными значениями, калибровки измерительного тракта при обнаружении дрейфа параметров и сортировки компонентов по результатам тестирования. Математическое описание процесса тестирования может быть представлено системой дифференциальных уравнений, описывающих динамику измерительной системы в пространстве состояний. Пусть вектор состояния измерительной системы определяется как $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$, где каждая компонента соответствует параметру измеряемого сигнала (напряжение, ток, частота, фаза). Динамика системы описывается уравнением состояния:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t),$$

где $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матрица коэффициентов системы, характеризующая внутреннюю динамику измерительного тракта, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ – матрица управления, определяющая влияние входных воздействий $\mathbf{u}(t)$ на состояние системы, $\mathbf{w}(t)$ – вектор возмущений, включающий шумы измерительных каналов, температурные дрейфы и внешние электромагнитные помехи. Выходное уравнение системы имеет вид:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u}(t) + \mathbf{v}(t),$$

где $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{p \times n}$ – матрица наблюдения, $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{p \times m}$ – матрица прямой связи, $\mathbf{v}(t)$ – вектор шумов измерений. Для обеспечения требуемой точности измерений необходимо минимизировать влияние возмущений $\mathbf{w}(t)$ и $\mathbf{v}(t)$ на результирующую погрешность.

Погрешность измерительной системы может быть представлена в виде аддитивной и мультипликативной составляющих. Общая погрешность измерения параметра P выражается уравнением:

$$\Delta P = \Delta P_0 + k \cdot P + \delta_T \cdot (T - T_0) + \delta_t \cdot (t - t_0) + \varepsilon_{rand},$$

где ΔP_0 – систематическая погрешность (смещение нуля), k – коэффициент пропорциональной погрешности, δ_T – температурный коэффициент погрешности, T – текущая температура, T_0 – эталонная температура, δ_t – коэффициент временного дрейфа, t – время с момента последней калибровки, t_0 – момент последней калибровки, ε_{rand} – случайная составляющая погрешности,

распределённая по нормальному закону $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$. Для компенсации систематических погрешностей применяется процедура калибровки, в ходе которой определяются коэффициенты ΔP_0 и k путём измерения эталонных сигналов с известными значениями. Процесс калибровки описывается системой линейных уравнений:

$$\begin{cases} P_{\text{изм},1} = k \cdot P_{\text{эт},1} + \Delta P_0 + \varepsilon_1, \\ P_{\text{изм},2} = k \cdot P_{\text{эт},2} + \Delta P_0 + \varepsilon_2, \\ \dots \\ P_{\text{изм},m} = k \cdot P_{\text{эт},m} + \Delta P_0 + \varepsilon_m, \end{cases}$$

где $P_{\text{изм},i}$ – измеренное значение i -го эталонного сигнала, $P_{\text{эт},i}$ – истинное значение i -го эталонного сигнала, ε_i – случайная погрешность i -го измерения. Решение данной системы методом наименьших квадратов позволяет определить оптимальные оценки коэффициентов калибровки:

$$k^* = \frac{m \cdot \sum_{i=1}^m P_{\text{изм},i} \cdot P_{\text{эт},i} - \sum_{i=1}^m P_{\text{изм},i} \cdot \sum_{i=1}^m P_{\text{эт},i}}{m \cdot \sum_{i=1}^m P_{\text{эт},i}^2 - \left(\sum_{i=1}^m P_{\text{эт},i}\right)^2},$$

$$\Delta P_0^* = \frac{\sum_{i=1}^m P_{\text{изм},i} - k^* \cdot \sum_{i=1}^m P_{\text{эт},i}}{m}.$$

Разработанная архитектура автоматизированной системы тестирования построена по модульному принципу с использованием стандарта PXIe (PCI eXtensions for Instrumentation), обеспечивающего высокую скорость передачи данных до 24 ГБ/с и синхронизацию модулей с точностью до 10 нс. Система включает в себя контроллер управления на базе промышленного процессора Intel Core i7 с тактовой частотой 3,5 ГГц, модуль коммутации сигналов на 64 канала с временем переключения менее 1 мс, программируемые источники питания с разрешением 1 мВ и 1 мкА, высокоскоростные цифровые вольтметры с разрешением 24 бита и частотой дискретизации до 1 МГц, модуль генерации тестовых сигналов с диапазоном частот от 1 Гц до 20 МГц. Структурная схема системы представлена на рисунке 1, где показаны основные функциональные блоки и направления потоков данных между ними.

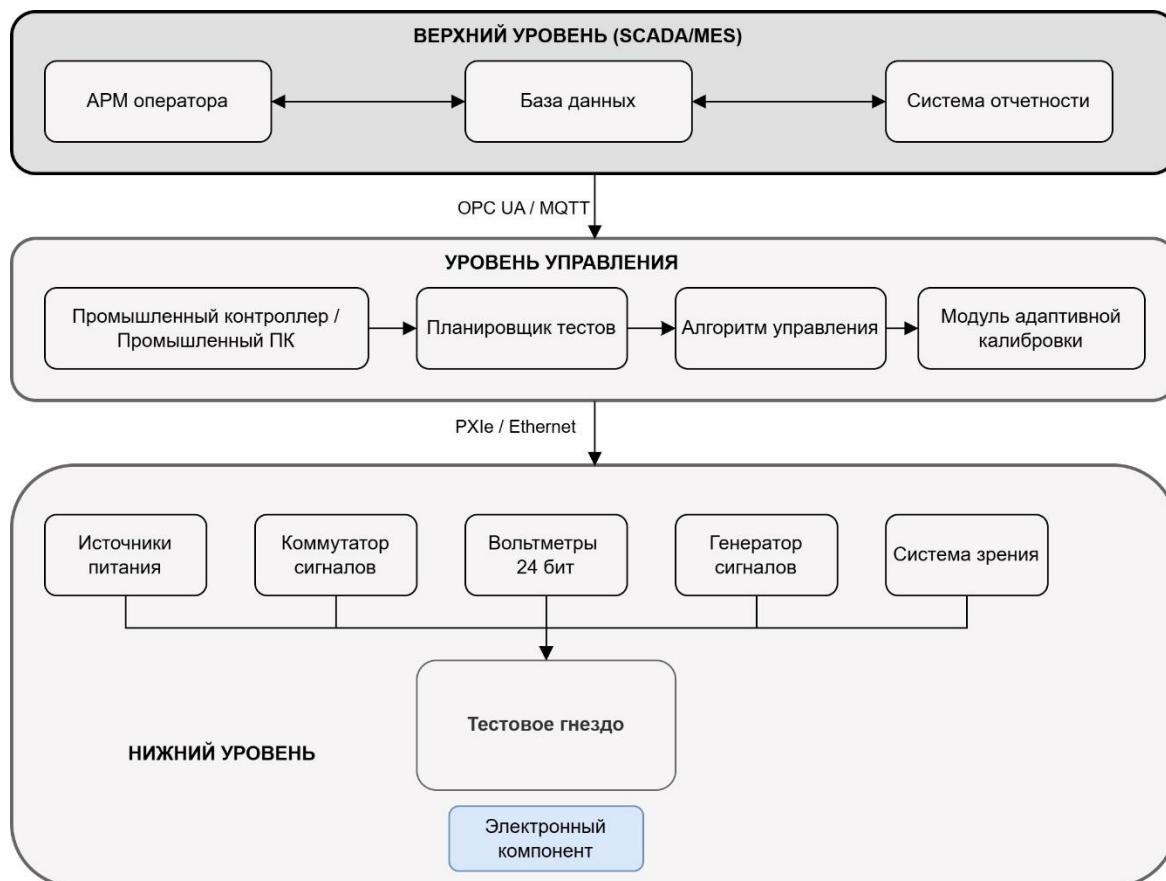


Рисунок 1 – Структурная схема автоматизированной системы тестирования электронных компонентов

Алгоритм функционирования системы реализует циклическую последовательность операций, начинающуюся с инициализации оборудования и проверки готовности всех измерительных каналов к работе. На этапе инициализации производится прогрев измерительных модулей в течение 15 минут для стабилизации температурных характеристик, загрузка калибровочных коэффициентов из энергонезависимой памяти, проверка целостности коммуникационных каналов и тестирование исполнительных механизмов системы загрузки-выгрузки компонентов. Далее следует этап идентификации компонента, осуществляемый посредством системы машинного зрения или считывания RFID-метки, что позволяет загрузить соответствующую карту тестирования из базы данных. Карта тестирования содержит последовательность проверок электрических параметров с указанием допустимых диапазонов значений, времени выдержки сигналов и критериев принятия решений.

Основной этап тестирования включает последовательную проверку электрических параметров компонента согласно карте тестирования. Для каждого параметра P_i выполняется измерение, результат которого сравнивается с допус-

ками $[P_{i,min}; P_{i,max}]$. Решение о годности компонента принимается по критерию:

$$Q = \prod_{i=1}^n I(P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max}),$$

где $I()$ – индикаторная функция, принимающая значение 1 при выполнении условия и 0 в противном случае, n – количество контролируемых параметров. Компонент признаётся годным при $Q = 1$ и бракованным при $Q = 0$. Особенностью разработанной системы является реализация модуля адаптивной калибровки, который непрерывно мониторит стабильность измерительного тракта и автоматически инициирует процедуру калибровки при обнаружении дрейфа параметров сверх установленного порога. Пороговое значение дрейфа определяется выражением:

$$\frac{|P_{изм} - P_{эт}|}{P_{эт}} > \delta_{доп},$$

где $\delta_{доп}$ – допустимая относительная погрешность, устанавливаемая в зависимости от класса точности измеряемого параметра. При превышении порога система автоматически переключает коммутатор на эталонный элемент, выполняет серию измерений, пересчитывает калибровочные коэффициенты и возвращает систему в режим тестирования без остановки производственной линии.

Результаты каждого измерения записываются в базу данных с привязкой к временной метке, идентификатору компонента, идентификатору партии и серийному номеру оборудования. Структура записи в базе данных включает поля: timestamp (время измерения), component_id (идентификатор компонента), batch_id (идентификатор партии), parameter_name (наименование параметра), measured_value (измеренное значение), tolerance_min (нижний допуск), tolerance_max (верхний допуск), result – результат, operator_id (идентификатор оператора), equipment_id (идентификатор оборудования). Такая структура обеспечивает полную прослеживаемость результатов измерений и возможность ретроспективного анализа качества продукции. Интеграция с системой MES осуществляется посредством протокола OPC UA, обеспечивающего безопасную передачу данных и совместимость с оборудованием различных производителей.

Для оценки эффективности разработанной системы был проведён сравнительный эксперимент на примере тестирования партии из 500 плат управления технологическим оборудованием на базе отечественных микроконтроллеров

серии 1986. Экспериментальная установка включала разработанную автоматизированную систему и традиционный стенд ручного контроля с использованием универсальных измерительных приборов. В ходе эксперимента измерялись следующие параметры: время тестирования одного компонента, погрешность измерения напряжения питания, погрешность измерения тока потребления, вероятность пропуска дефектных компонентов, время простоя оборудования на калибровку, затраты на документирование результатов. Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики методов контроля

Параметр	Ручной контроль	Автоматизированная система	Улучшение, %
Время тестирования 1 ед., с	$48,3 \pm 4,2$	$15,1 \pm 0,8$	68,7
Погрешность измерения напряжения, %	1,8	0,18	90,0
Погрешность измерения тока, %	2,1	0,21	90,0
Вероятность пропуска брака, %	2,3	0,02	99,1
Время калибровки на партию, мин	45	8	82,2
Затраты на документиро- вание, чел·ч	12,5	0,5	96,0
Коэффициент готовности системы	0,87	0,98	12,6

Графическое представление результатов эксперимента показано на рисунке 2, где приведено распределение времени тестирования для обеих систем в виде гистограмм.

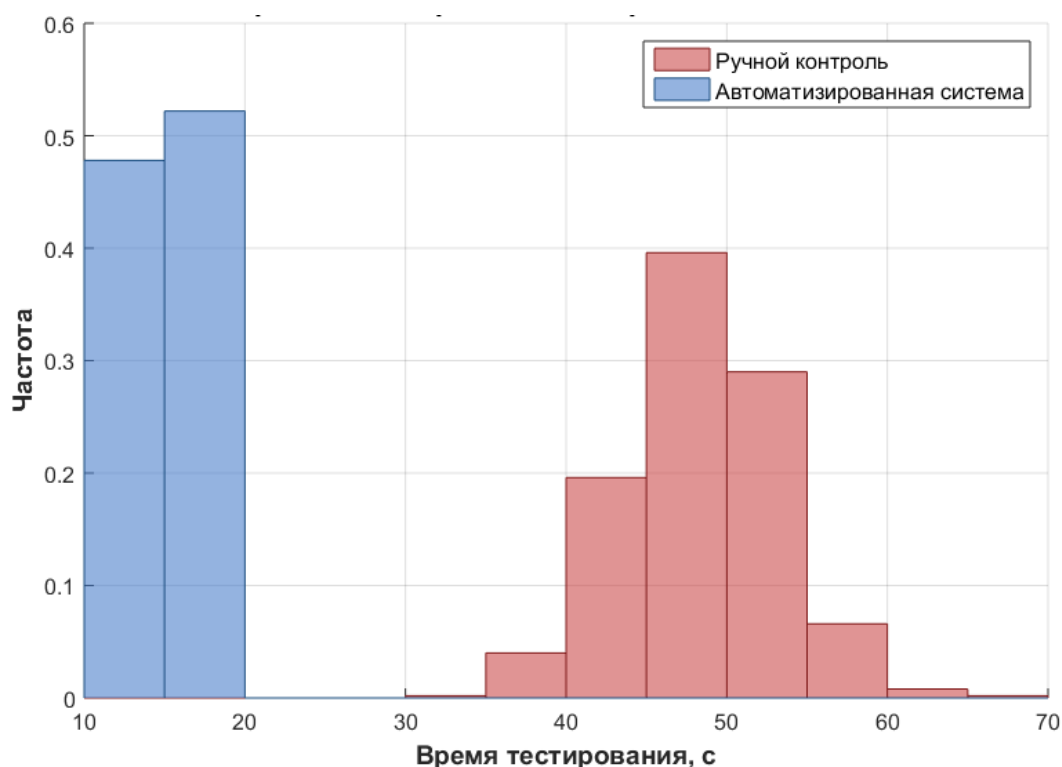


Рисунок 2 – Распределение времени тестирования компонентов

Анализ гистограммы показывает, что для автоматизированной системы характерно узкое распределение времени тестирования с математическим ожиданием 15,1 с и стандартным отклонением 0,8 с, что свидетельствует о высокой стабильности процесса. Для ручного контроля наблюдается широкое распределение с математическим ожиданием 48,3 с и стандартным отклонением 4,2 с, обусловленное вариациями в скорости работы операторов и утомляемостью персонала в течение рабочей смены.

Дополнительное исследование было направлено на оценку влияния температурного дрейфа на погрешность измерений. В ходе эксперимента температура в помещении варьировалась от 18 °С до 28 °С с шагом 2 °С, при этом для каждой температуры выполнялась серия из 100 измерений эталонного напряжения 5 В. Результаты представлены на рисунке 3 в виде графика зависимости погрешности от температуры.

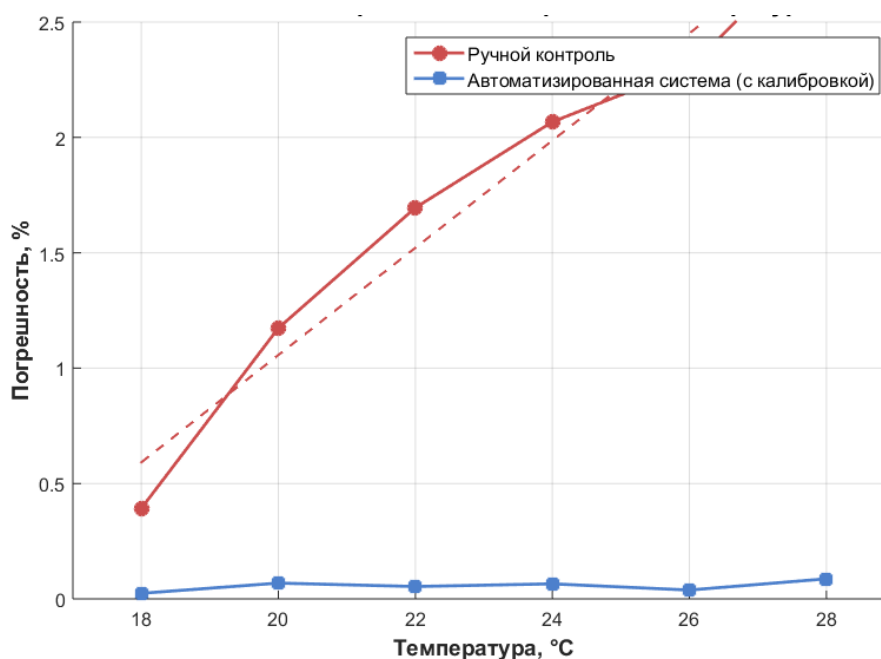


Рисунок 3 – Зависимость погрешности измерения от температуры

График демонстрирует, что без системы адаптивной калибровки погрешность измерений линейно возрастает с увеличением температуры со скоростью около $0,25\%/^{\circ}\text{C}$, что обусловлено температурными коэффициентами резисторов и операционных усилителей в измерительном тракте. При включённой системе адаптивной калибровки погрешность поддерживается на уровне не более $0,05\%$ во всём диапазоне температур, что подтверждает эффективность разработанного алгоритма компенсации температурного дрейфа.

Статистический анализ результатов тестирования был проведён с использованием критерия Стьюдента для оценки значимости различий между средними значениями времени тестирования и погрешности измерений. Для времени тестирования получено значение t -статистики $t = 47,3$ при числе степеней свободы $\nu = 998$, что значительно превышает критическое значение $t_{\text{кр}} = 1,96$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Для погрешности измерения напряжения $t = 52,1$ при $\nu = 998$, также превышающее критическое значение. В результате следует отметить, что различия между ручным и автоматизированным методами контроля являются статистически значимыми с достоверностью 95%.

Разработанная структура автоматизированной системы с модулем адаптивной калибровки позволяет существенно повысить производительность труда на рассматриваемом участке. Снижение времени цикла тестирования на 68,7%, уменьшение неопределенности измерений в 2–3 раза и повышение коэффициента обнаружения дефектов до 99,98% говорят об ценном опыте наших экспе-

риментальных исследований. Считаем, что предложенный подход тестирования компонентов электронной аппаратуры может быть рекомендован к внедрению на предприятиях радиоэлектронной промышленности.

Список литературы

1. Автоматизация входного контроля качества электронных компонентов информационно-измерительной системы / Е. С. Янов, А. В. Анцев, А. С. Фокина, А. Ю. Трусова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 9. – С. 175-178. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-9-175-176.

2. Обеспечение качества входного контроля электронных компонентов с применением нейронной сети / Г. И. Коршунов, К. А. Брусенцов, Э. С. Ярмонова, П. С. Зайцев // Контроль качества продукции. – 2024. – № 6. – С. 53-57.

3. Усманов, А. И. Анализ современных методов автоматизации неразрушающего контроля качества и диагностики электронных компонентов / А. И. Усманов, А. В. Козлова, В. Г. Мешков // Вестник МГТУ "Станкин". – 2024. – № 2(69). – С. 161-172.

References

1. Yanov E. S., Antsev A. V., Fokina A. S., Trusova A. Yu. Automation of incoming quality control of electronic components for an information-measuring system. News of the Tula State University. Technical Sciences, 2024, No. 9, pp. 175-178. DOI 10.24412/2071-6168-2024-9-175-176.

2. Korshunov G. I., Brusentsov K. A., Yarmonova E. S., Zaitsev P. S. Ensuring the quality of incoming inspection of electronic components using a neural network. Product Quality Control, 2024, No. 6, pp. 53-57.

3. Usmanov A. I., Kozlova A. V., Meshkov V. G. Analysis of modern methods for automation of non-destructive quality control and diagnostics of electronic components. Vestnik MSTU "STANKIN", 2024, No. 2(69), pp. 161-172.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ДОЗИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ
AUTOMATION OF COMPONENT DOSING PROCESS
IN THE PRODUCTION OF CONSTRUCTION MIXTURES**

Захаров Д.А., студент

Поляков С.И., к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

danil.zakharov.2018@bk.ru

Zakharov D.A., Student

Polyakov S.I., PhD (Engineering), Associate professor

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Аннотация: В статье рассматривается задача повышения точности дозирования компонентов при производстве сухих строительных смесей. Предложена математическая модель объекта регулирования, на основе которой выполнен расчёт параметров ПИД-регулятора и разработан адаптивный алгоритм управления, учитывающий изменение влажности сырья. Проведённое моделирование подтвердило эффективность разработанных решений. Результаты могут быть использованы при проектировании автоматизированных систем управления производством строительных смесей.

Abstract: The article deals with the problem of improving the accuracy of component dosing in the production of dry construction mixtures. A mathematical model of the controlled object is proposed, based on which the PID controller parameters are calculated and an adaptive control algorithm is developed that takes into account changes in raw material moisture. The simulation confirmed the effectiveness of the developed solutions. The results can be used in the design of automated control systems for the production of construction mixtures.

Ключевые слова: Автоматизация, дозирование, строительные смеси, ПИД-регулятор, адаптивное управление.

Keywords: Automation, dosing, construction mixtures, PID controller, adaptive control.

Производство сухих строительных смесей является одной из ключевых отраслей строительной индустрии. Объём производства в Российской Федерации за последние пять лет вырос на 30% и достиг 8,7 млн тонн в год. Современные строительные смеси представляют собой многокомпонентные составы, включающие цемент, песок, минеральные и химические добавки, полимерные модификаторы. Точность соблюдения рецептуры напрямую определяет эксплуатационные характеристики готовой продукции: прочность, адгезию, время схватывания и долговечность. [1]

При традиционном ручном управлении возникают значительные потери сырья (до 5%) и высокий уровень брака (до 4%). Основные причины – инерционность процессов, субъективный человеческий фактор и отсутствие оперативного контроля параметров в реальном времени. Автоматизация на базе программируемых логических контроллеров позволяет решить эти проблемы, однако существующие системы не всегда учитывают специфические особенности производства, такие как гигроскопичность сырья, сезонные колебания его влажности и необходимость частой смены рецептур.

Целью настоящей работы является разработка математической модели процесса дозирования и создание адаптивного алгоритма управления, обеспечивающего требуемую точность при изменении характеристик сырья.

Объектом исследования является технологическая линия производства сухих строительных смесей. Ключевой элемент системы – весовой дозатор с шнековым питателем.



Рисунок 1 – Шнековой весовой дозатор

Для построения системы управления объект описан математической моделью в виде апериодического звена первого порядка с чистым запаздыванием:

$$W_{об}(\omega) = \frac{K_{об} * e^{-\tau * \omega}}{T_{об} * \omega + 1} \quad (1)$$

где $K_{об} = 1,25$ кг/Гц - коэффициент передачи, характеризующий скорость набора массы при изменении частоты вращения шнека;

$T_{об} = 2,6$ с - постоянная времени, определяющая инерционность системы (время достижения 63% от установившегося значения);

$\tau = 3,1$ с - время чистого запаздывания, обусловленное временем транспортировки материала от выхода шнека до точки измерения массы. [2]

Для управления выбран ПИД-закон регулирования, обеспечивающий нулевую статическую ошибку, быстрый отклик и подавление колебаний. Параметры регулятора рассчитаны методом Циглера-Николса и скорректированы с учётом специфики процесса:

Для объектов, описываемых апериодическим звеном с запаздыванием, метод Циглера-Николса имеет следующие формулы:

$$K_P = 1,2 * \frac{T_{об}}{K_{об} * \tau} \quad (2)$$

$$T_i = 2 * \tau \quad (3)$$

$$T_d = 0,5 * \tau \quad (4)$$

Подстановка значений:

$$K_P = 1,2 * \frac{2,6}{1,25 * 3,1} = 1,2 * \frac{2,6}{3,875} = 1,2 * 0,671 = 0,805$$

$$T_i = 2 * 3,1 = 6,2 \text{ с.}$$

$$T_d = 0,5 * 3,1 = 1,55 \text{ с.}$$

Коррекция с учётом специфики процесса

Полученные параметры дают удовлетворительное быстродействие, но для процесса дозирования более важным является точность дозирования в установившемся режиме и минимизация перерегулирования. Поэтому нами выполнена корректировка процесса дозирования. [3]

Уменьшаем пропорциональную составляющую для снижения перерегулирования:

$$K_p^{кор} = K_P * 0,8 = 0,805 * 0,8 = 0,644$$

Уменьшаем интегральную составляющую (увеличиваем T_i) для повышения устойчивости:

$$T_i^{кор} = T_i * 0,7 = 6,2 * 0,7 = 4,34 \text{ с.}$$

Уменьшаем дифференциальную составляющую для снижения чувствительности к шумам измерений:

$$T_d^{\text{кор}} = T_d * 0,9 = 1,55 * 0,9 = 1,40 \text{ с.}$$

Таблица 1 – Сводная таблица данных

Этап	K_p	$T_i, \text{с.}$	$T_d, \text{с.}$
Метод Циглера-Николаса	0,805	6,2	1,55
После коррекции	0,644	4,34	1,40
Коэффициент коррекции	0,8	0,7	0,9

Показатели качества регулирования для обычного ПИД: время регулирования $t_p = 8,2 \text{ с}$; перерегулирование $\sigma = 12\%$.

Для реального производства характерно изменение физико-механических характеристик исходных компонентов смесей, что не может не отразиться на работе технологического весового оборудования и собственно на процессе дозирования. Применение адаптивного алгоритма для реализации процесса дозирования позволит учитывать изменение влажности цемента и песка. В соответствии с этим алгоритмом необходимо произвести корректировку параметров настройки регулятора.

$$K_p^{\text{ад}} = K_p * [1 - 0,05 * (\omega - 0,5)] = 0,592 \quad (5)$$

$$T_i^{\text{ад}} = T_i * [1 - 0,08 * (\omega - 0,5)] = 4,86 \text{ с} \quad (6)$$

На рисунке 2 пунктирная линия соответствует адаптивному ПИД.

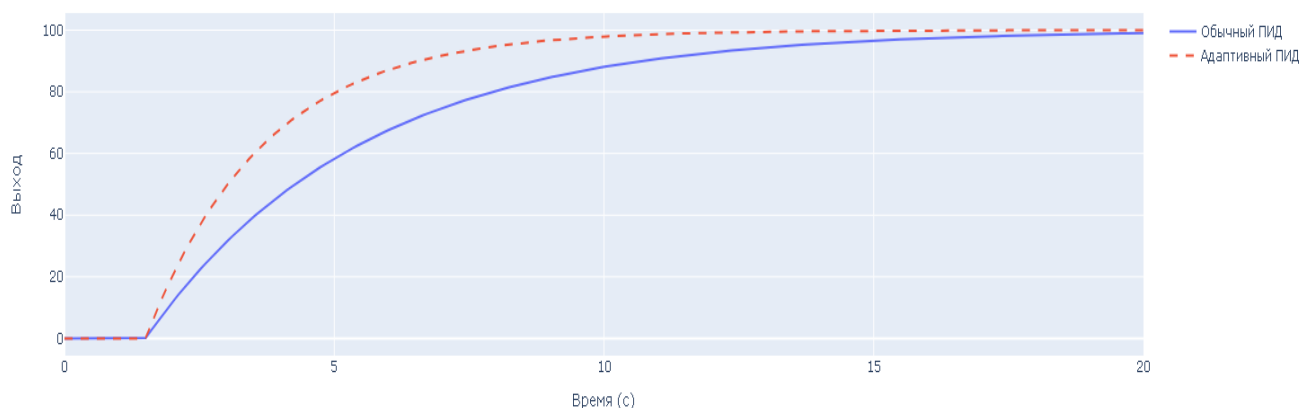


Рисунок 2 – Динамика процесса для адаптивного и традиционного способа регулирования

Анализ графика переходного процесса согласно рисунку 2 показал, что динамика системы приобрела более предпочтительный вид, произошло сниже-

ние основных показателей качества регулирования: величины перерегулирования и времени переходного процесса.

Построен график частотной характеристики, в соответствии с которым видна устойчивость системы, точка Найквиста находится на значительном удалении от годографа, легко может быть вычислен запас устойчивости по амплитуде и по фазе.

Таким образом, при реализации адаптивного способа регулирования улучшилось качество переходного процесса и обеспечен запас устойчивости работы системы управления.

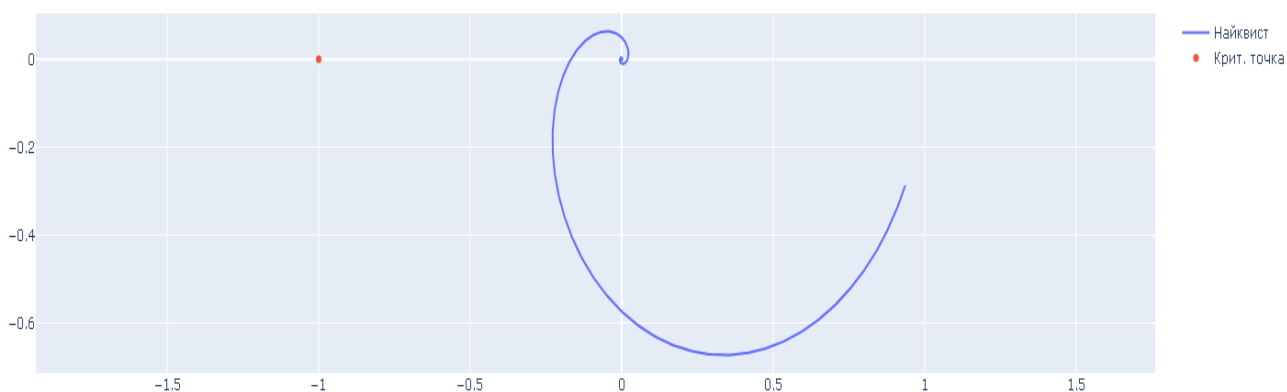


Рисунок 3 – График АФЧХ для АСР разомкнутого типа

Традиционный процесс дозирования предусматривает двухэтапный подход, обеспечивающий на начальном этапе грубое дозирование и далее на заключительном – точное. На производстве это достигается использованием двухскоростных мотор-редукторов, а в последнее время применением частотного способа управления асинхронными двигателями питателей, что обеспечивает качество дозирования и высокую точность за счет широкого диапазона скоростей и высокой степени стабилизации угловой скорости двигателей.

Кроме того, применение ПИД-регулирования гарантирует повышенную точность весового дозирования на заключительном этапе. Набор статистических данных по фактически отмеренным массам дозы позволит в будущем произвести корректировку процесса дозирования и выработку упреждающего сигнала управления.

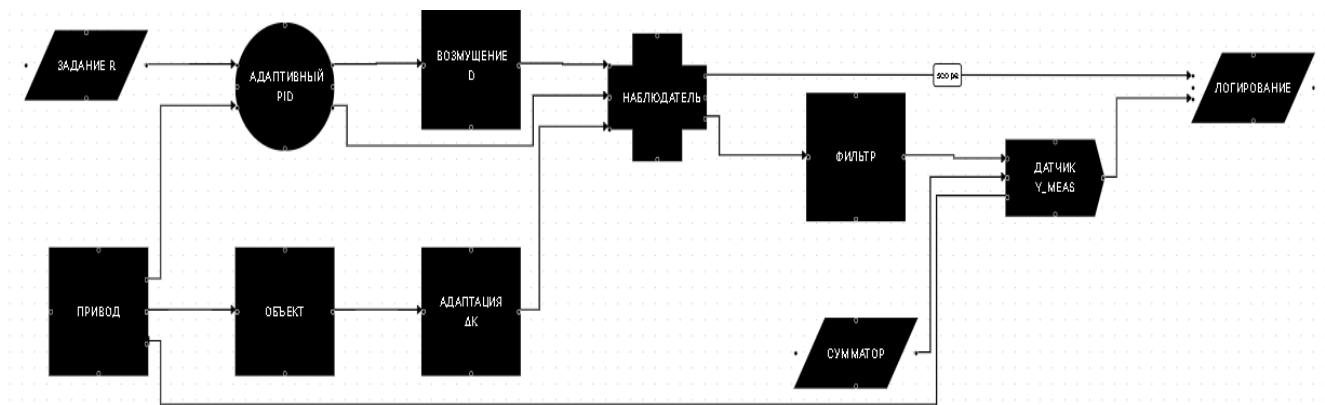


Рисунок 4 – Структурная схема управления процессом дозирования компонентов

Структурная схема алгоритма, реализующего адаптивный принцип управления, включается в работу после каждой отвешенной дозы. Назначение данного алгоритма состоит в выявлении ошибки регулирования, то есть рассогласования заданной и фактической дозы по окончании каждого цикла дозирования. Кроме этого в алгоритме предусмотрено использование датчика влажности. Используя полученные данные формируются новые значения основных параметров настройки регулятора. [4]

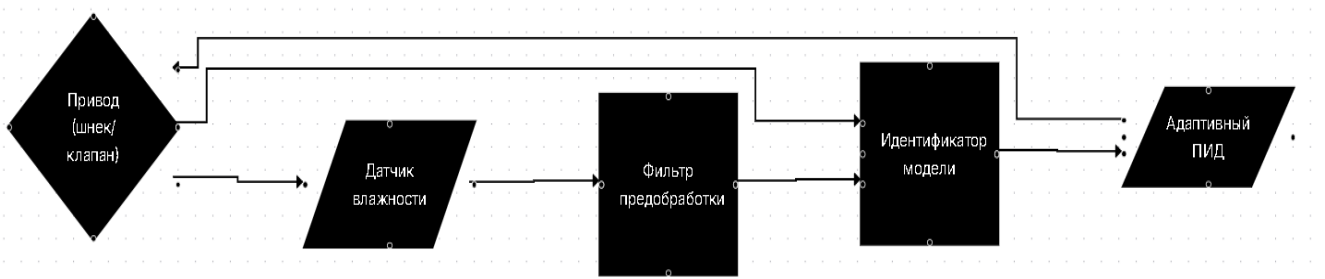


Рисунок 5 – Структурная схема управления процессом дозирования с учетом влажности компонентов

На заключительном этапе дозирования согласно рисунку 6 происходит выработка скорректированных управляющих воздействий на исполнительные устройства дозатора. Алгоритм по своей структуре обеспечивает сбор данных от датчиков расхода, влажности, запускает адаптивный ПИД-регулятор и в соответствии с идентификатором модели процесса дозирования вырабатывает адаптивные сигналы управления на весоизмерительное оборудование. [5]

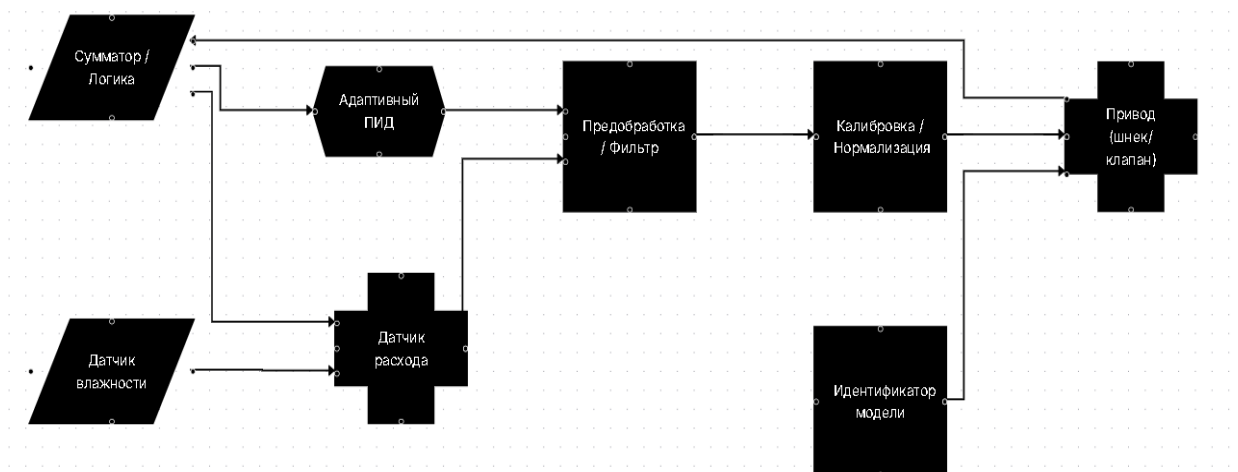


Рисунок 6 – Алгоритм адаптивного управления процессом дозирования компонентов смесей

В статье предложена математическая модель процесса дозирования, на основе которой выполнен расчёт параметров ПИД-регулятора. Разработан адаптивный алгоритм, компенсирующий изменение влажности сырья. Моделирование показало снижение перерегулирования на 30% и сокращение времени регулирования на 12%. Полученные решения могут быть реализованы в автоматизированных системах управления производством строительных смесей.

Список литературы

1. Петровский, В. С. Автоматизация технологических процессов и производств / В. С. Петровский. – Воронеж: ВГЛТА, 2010. – 432 с.
2. Петровский, В.С. Управление в автоматизированном производстве (лесопромышленный комплекс) / В. С. Петровский. – Воронеж: ВГЛТА, 2013. – 448 с.
3. Поляков, С. И. Автоматика и автоматизация производственных процессов: учеб. пособие / С. И. Поляков; Фед. агентство по образованию, ГОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2008. – 372 с.
4. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – М.: Наука, 2005. – 752 с.
5. Меньков, А. В. Теоретические основы автоматизированного управления / А. В. Меньков, В. А. Острейковский. – М.: Оникс, 2005. – 416 с.

References

1. Petrovsky, V. S. Automation of technological processes and production / V. S. Petrovsky. – Voronezh: VGLTA, 2010. – 432 p.
2. Petrovsky, V. S. Management in automated production (forestry complex) / V. S. Petrovsky. – Voronezh: VGLTA, 2013. – 448 p.
3. Polyakov, S. I. Automation and automation of production processes: textbook. manual / S. I. Polyakov; Federal Agency for Education, GOU VPO "VLGTA". – Voronezh, 2008. – 372 p.
4. Besekersky, V. A. Theory of Automatic Control Systems / V. A. Besekersky, E. P. Popov. – Moscow: Nauka, 2005. – 752 p.
5. Menkov, A. V. Theoretical Foundations of Automated Control / A. V. Menkov, V. A. Ostreikovsky. – Moscow: Oniks, 2005. – 416 p.

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЯХ**

**METHODS AND MEANS OF AUTOMATED ENVIRONMENTAL
MONITORING AT INDUSTRIAL ENTERPRISES**

Ковун Д.А., студент

Стариков А.В., д.т.н., профессор

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

Wendows3@gmail.com

Kovun D.A., Student

Starikov A.V., DSc (Engineering), Professor

Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Аннотация: В статье рассматриваются методы и средства автоматизированного экологического мониторинга на промышленных предприятиях. Приводятся основные функциональные требования к автоматизированным системам экологического мониторинга, а также способы измерения загрязняющих веществ с использованием датчиков и дистанционных методов наблюдения. Описываются математические модели распространения загрязнений и методы обработки полученных данных. Отмечается, что применение современных измерительных технологий, информационных систем и математических зависимостей позволяет более эффективно контролировать состояние окружающей среды и своевременно выявлять возможные экологические риски.

Abstract: This article examines methods and tools for automated environmental monitoring at industrial facilities. It presents the key functional requirements for automated environmental monitoring systems, as well as methods for measuring pollutants using sensors and remote sensing methods. Mathematical models of pollutant

propagation and methods for processing the obtained data are described. It is noted that the use of modern measurement technologies, information systems, and mathematical relationships enables more effective environmental monitoring and the timely identification of potential environmental risks.

Ключевые слова: Экологический мониторинг, автоматизированные системы мониторинга, контроль загрязнения окружающей среды, датчики загрязняющих веществ, дистанционные методы наблюдения, математическое моделирование распространения загрязнений, анализ экологических данных, выбросы промышленных предприятий, системы обработки информации, экологическая безопасность.

Keywords: Environmental monitoring, automated monitoring systems, environmental pollution control, pollutant sensors, remote sensing methods, mathematical modeling of pollution spread, environmental data analysis, industrial emissions, information processing systems, environmental safety.

В настоящее время решением проблемы экологической безопасности заняты многочисленные ученые и специалисты, среди которых есть не только экологи, но и инженеры-химики, геодезисты, специалисты по охране труда, и инженеры в области автоматизации и вычислительных технологий. У перечисленных специалистов есть своя область ответственности, и свои задачи. При этом однако общей целью является снижение нагрузки на окружающую среду и повышение безопасности для человека и природы.

Невозможно представить экономику без производств, но при этом производства в большинстве случаев не являются безотходными. В процессе работы может выделяться большое количество вредных веществ, приводящих к загрязнению воздуха, воды, и почвы. В промышленных районах особенно часто можно замечать резкие изменения экологической обстановки в течении дня.

До появления современных технологий контроль за экологической безопасностью осуществлялся при помощи периодических измерений, которые представляли из себя забор проб, и затем пробы везли в лабораторию для последующего анализа, что показывало высокую точность измерений, но делало невозможным быстрое получение результатов анализа.

Для мгновенного получения данных в последнее время всё больше уделяется внимания к автоматизированным технологиям. Современный подход с точки зрения автоматизации процесса не только упрощает и ускоряет измерения текущей экологической обстановки, но и позволяет обрабатывать целую

базу данных прошлых измерений. Сама база данных имеет больше информации для обработки, что со старым подходом было практически недостижимо. Теперь меры для решения проблем с угрозами безопасности могут быть предприняты для тех случаев, которые ранее просто могли быть незаметны.

Изучение методов и средств, применяемых в автоматизированных системах экологического мониторинга, представляет интерес не только для специалистов экологического профиля, но и для инженеров, которые занимаются разработкой и внедрением этих технологий, а также совершенствованием и оптимизацией подобных решений.

Экологический мониторинг – систематический процесс измерения, наблюдения и анализа, который позволяет выявлять изменения, оценивать последствия и разрабатывать рекомендации для предприятий или других объектов инфраструктуры [1].

От автоматизированных систем экологического мониторинга зависит точность оценки состояния окружающей среды, поэтому очень важно, чтобы они соответствовали ряду требований. Если система будет собирать некорректные данные или передавать их с большой задержкой, то даже самое новое оборудование теряет смысл. От этой системы требуется возможность отслеживать ситуацию в реальном времени о состоянии внутри производства и вокруг него.

Также очень важно, чтобы при возникновении чрезвычайных ситуаций системы могли оперативно оповестить соответствующие службы [2].

Одно из важнейших требований это высокая точность измерений. Результат измерений должен корректно демонстрировать концентрацию загрязняющих веществ в воздухе или газовом потоке. Концентрация вещества рассчитывается на основе входных данных от измерительного прибора. Используется следующая зависимость:

$$C = \frac{(S-S_0)}{k},$$

где C – концентрация загрязняющего вещества; S – измеренный сигнал датчика; S_0 – базовый сигнал датчика при отсутствии загрязнения; k – коэффициент чувствительности датчика.

Определяя изменение сигнала датчика, можно оценить рост концентрации газа относительно базового уровня. Например, размещая датчик возле вентиляционного канала или дымовой трубы, можно отслеживать увеличение уровня выбросов по сравнению с нормальными условиями.

Анализируя работу датчика на практике, можно заметить, что зависимость между сигналом и концентрацией не всегда остается линейной. Поэтому часто используют калибровочную зависимость следующего вида:

$$C = a(S - S_0)^b,$$

где C – концентрация загрязняющего вещества; S – измеренный сигнал датчика; S_0 – базовый сигнал датчика при отсутствии загрязнения; a – калибровочный коэффициент; b – показатель степени, характеризующий нелинейность зависимости.

Коэффициенты a и b определяются проводя экспериментальную настройку оборудования. Такие параметры подбираются для каждого конкретного датчика, чтобы его показания максимально совпадали с результатами лабораторных измерений.

Если уделить внимание на непрерывность измерений, то на предприятии уровень загрязнения может меняться достаточно быстро. Например, это может происходить при запуске оборудования, во время технологического процесса или при изменении режима работы вентиляционных систем. Если система будет фиксировать данные не постоянно, то часть информации просто потеряется. Организуя регулярную фиксацию данных, системы мониторинга повышают точность анализа выбросов.

Рассматривая параметры выбросов, необходимо учитывать не только концентрацию, но и массовый расход загрязняющего вещества. Этот параметр можно определить по следующей формуле:

$$Q = C \cdot v \cdot A,$$

где Q – массовый расход загрязняющего вещества; C – концентрация вещества в газовом потоке; v – средняя скорость движения газа; A – площадь поперечного сечения трубы или канала.

Используя данную формулу, определяют количество вещества, проходящего через сечение трубы за одну секунду. Даже при небольшой концентрации газа общий выброс может оказаться значительным, учитывая, что поток воздуха начнёт двигаться с большой скоростью.

Определяя концентрацию газа, её первоначально выражают в единицах ppm (от англ. *parts per million* – частей на миллион). Это единица измерения малых концентраций, обозначающая одну миллионную долю от общего объема или массы смеси. Используя данную величину, оценивают долю вещества в смеси при малых концентрациях.

Для перевода этого значения в массовую концентрацию, требуется следующее дополнительное соотношение:

$$C_m = \frac{C_{ppm} \cdot M}{24.45},$$

где C_m – массовая концентрация газа; C_{ppm} – концентрация вещества, выраженная в ppm; M – молекулярная масса вещества.

Учитывая, что число 24,45 связано с молярным объемом газа при стандартных условиях, можно корректно выполнить пересчёт. Благодаря такому преобразованию можно более точно оценить количество вещества, которое содержится в определенном объеме воздуха.

Переходя к контролю загрязнения на промышленном предприятии, определяют состав и количество поступающих в окружающую среду веществ. Для этого применяются различные методы измерения. Применяя на практике обычно используют несколько подходов одновременно, потому что один метод редко дает полную картину. В зависимости от условий, предпочтительными могут быть разные методы.

Уровни мониторинга: локальный, региональный, глобальный [3].

Распространённый и безопасный метод основан на оптических измерениях. Работа датчиков такого типа заключается в том, что некоторые газы способны поглощать или рассеивать свет определенной длины волны, и если пропустить через исследуемую среду с газом световой луч и измерить, насколько изменилась его интенсивность, можно сделать вывод о концентрации вещества.

Связь между интенсивностью излучения и концентрацией газа описывается законом Бугера-Ламберта-Бера. В упрощенном виде он записывается следующим образом:

$$I = I_0 e^{-\sigma CL},$$

где I – интенсивность излучения после прохождения через среду; I_0 – начальная интенсивность излучения; σ – коэффициент поглощения вещества; C – концентрация загрязняющего вещества; L – длина пути луча в среде.

При увеличении концентрации вещества в воздухе, увеличивается интенсивность света. Именно на этом принципе в большинстве случаев работают многие современные оптические газоанализаторы. Размещая такие приборы рядом с источниками выбросов или на экологических постах, обеспечивают контроль загрязнений.

Рассматривая методы контроля, выделяют измерения мелкодисперсных частиц, таких как PM10 и PM2.5. Эти частицы представляют собой очень мелкую пыль, которая может долго находиться в воздухе и оказывать влияние на здоровье человека. Измеряя эти частицы, часто используют метод лазерного рассеяния. Внутри прибора находится источник света и фотодатчик. Частица, проходя через луч лазера, рассеивает свет, и прибор фиксирует изменение сигнала.

Массовую концентрацию частиц можно оценить с помощью следующего соотношения:

$$C = \frac{m}{V},$$

где C – массовая концентрация частиц в воздухе; m – масса собранных частиц; V – объем воздуха, прошедший через измерительную систему.

Этот метод применяют, на фильтровальных установках или в лабораторных анализах воздуха. Пропуская через фильтр определенный объем воздуха, затем измеряют массу осевших частиц. Сравнивая массу фильтра до и после измерения, определяют количество загрязнения.

При оценке состояния экосистемы можно сравнить текущие результаты с предыдущими, определить положительные и отрицательные тенденции по количеству вредных веществ, аэрозоли, пыли фракций PM10 и PM2.5. Также результаты сравниваются с допустимыми значениями [1].

В случаях, когда необходимо оценить распространение загрязняющих веществ в атмосфере, то для этого применяются математические модели, которые позволяют рассчитать концентрацию газа на определенном расстоянии от источника выброса. Одной из наиболее известных является гауссова модель рассеивания. В общем виде она может быть записана следующим образом:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right),$$

где $C(x, y, z)$ – концентрация загрязняющего вещества в точке пространства; Q – интенсивность выброса загрязняющего вещества; u – скорость ветра; H – высота источника выброса; σ_y – параметр рассеивания загрязнения по горизонтали; σ_z – параметр рассеивания загрязнения по вертикали; x, y, z – координаты точки наблюдения относительно источника выброса.

На практике такие модели позволяют примерно оценить, как загрязнение будет распространяться вокруг предприятия. Можно рассчитать, как изменится

концентрация газа на расстоянии нескольких сотен метров от трубы или в ближайшем жилом районе. Также это может помочь делать прогнозы.

Совместное использование этих методов позволит качественно работать в разных ситуациях, включающих в себя мониторинг, прогнозирование и своевременное реагирование на случай аварийных ситуаций.

Не всегда можно проводить измерения прямо на месте загрязнения. Например, если речь идет о большом промышленном комплексе, удаленных территориях или труднодоступных участках. В этом случае используются дистанционные методы мониторинга, которые позволяют оценивать состояние окружающей среды на расстоянии. Возможности дистанционного зондирования позволяют контролировать воду, воздух, и даже почву.

Лучше всего для этих задач подходят лазерное зондирование, или лидар. Через атмосферу пропускают лазерный луч и измеряют, как он рассеивается или поглощается. Этим способом можно оценить концентрацию определенных газов или взвешенных частиц в воздухе. Лидары применяются, например, для мониторинга выбросов дымовых труб или для наблюдения за загрязнением городского воздуха.

Интенсивность рассеянного или возвращенного сигнала тоже определяется с помощью формулы Бугера-Ламберта-Бера, поскольку принцип определения газа один и тот же.

Ещё помимо лазерной технологии, есть обычное спутниковое наблюдение. Новейшие спутники оснащены сенсорами, которые фиксируют отражение солнечного света от поверхности земли и атмосферы в разных диапазонах спектра. Анализируя эти данные, можно определить наличие вредных веществ, растительность или изменения водоемов. Для перевода отражательной способности в концентрацию загрязнителей используют функцию переноса радиации, которая связывает измеренное отражение с количеством вещества:

$$C = f(R_{\lambda}),$$

где C – концентрация загрязняющего вещества; R_{λ} – отражательная способность поверхности на длине волны λ ; f – функция преобразования, связывающая отражательную способность с концентрацией вещества.

Этот метод удобен для оценки крупных территорий и анализа динамики загрязнений. С помощью спутников можно отследить, как дым от промышленных районов распространяется на десятки километров, или выявить районы с повышенным содержанием озона или диоксида азота.

Дистанционный мониторинг часто используют вместе с радиолокационными методами. В этом случае в атмосферу отправляется радиосигнал, и по его отражению можно определить структуру слоя загрязнения. Принцип похож на работу радаров, сигнал от источника рассеивается на частицах, и прибор фиксирует мощность возвращенного сигнала.

Дистанционные методы выигрывают в том, что они позволяют контролировать среду без присутствия человека на месте исследования и фиксируют изменения в больших объемах пространства. Из недостатков точность отдельных измерений иногда ниже, чем у стационарных датчиков, поэтому такие методы иногда совмещают с локальными системами мониторинга. Дистанционные методы позволяют получить общую картину экологической ситуации.

Оценивая концентрацию загрязняющих веществ лишь в одной точке, невозможно полностью охарактеризовать экологическую ситуацию вокруг предприятия. Поэтому, анализируя ситуацию, учитывают распространение веществ в окружающей среде. Выброс из трубы может сначала подниматься вверх вместе с теплым потоком газа, а затем постепенно переноситься ветром на соседние территории. Часто, распространяясь в атмосфере, результат загрязнения может быть не только рядом с источником, но и на значительном расстоянии от него. Именно поэтому при проведении экологического анализа, часто используют методы математического моделирования.

Используя математические модели можно рассчитать, как будет изменяться концентрация вещества в воздухе в зависимости от расстояния, направления ветра и других факторов. Проводя такие расчёты, заранее оценивают возможное влияние предприятия на окружающую среду, определяя, будут ли жилые районы находиться в безопасных условиях.

Важным процессом в таких моделях является диффузия загрязняющих веществ, которая описывает постепенное распространение частиц в воздухе за счет хаотического движения молекул. Рассматривая данный процесс, используют уравнение диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C,$$

где C – концентрация загрязняющего вещества; t – время; D – коэффициент диффузии; $\nabla^2 C$ – оператор Лапласа, описывающий изменение концентрации вещества в пространстве.

Анализируя уравнение, отмечают, что вещество со временем стремится к равномерному распределению в окружающей среде.

Однако в атмосфере распространение загрязнений происходит не только из-за диффузии. Учитывая влияние воздушных потоков, существенную роль играет перенос вещества ветром, и учитывая данный фактор, используют уравнение конвективно-диффузионного переноса:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \nabla C = D \nabla^2 C + S,$$

где C – концентрация загрязняющего вещества; t – время; u – вектор скорости ветра; ∇C – градиент концентрации; D – коэффициент диффузии; $\nabla^2 C$ – оператор Лапласа, характеризующий диффузионное распространение вещества; S – источник загрязнения.

При анализе этой формулы, можно заметить, что изменение концентрации зависит сразу от нескольких процессов. Уравнение учитывает, что вещество распространяется не только за счет диффузии, но и переносится потоками воздуха. Ветер, направленный в сторону жилого района, именно туда сильнее всего будет перемещаться облако загрязнения.

Выполняя расчёты, часто используют упрощенные модели. Зная высоту трубы, скорость ветра и интенсивность выброса, можно с небольшой погрешностью оценить, на каком расстоянии концентрация загрязнения станет максимальной. Применяя такие расчёты при проектировании предприятий, определяют безопасное расстояние до жилых зон.

Используя математические модели, анализируют различные сценарии. Моделируя ситуацию при сильном ветре, при штиле или при изменении температуры воздуха. При анализе результатов можно столкнуться с различными другими эффектами, когда загрязнённый воздух или вода оказываются сконцентрированы в определённых областях и не двигаются дальше. Они происходят из-за рельефа, например.

Для прогноза распространения загрязнения относительно пространства и времени, требуется так же использовать математическое моделирование. В методах экологического мониторинга оно ещё позволяет фиксировать текущие показатели.

Необходимо заранее предвидеть последствия ввода в эксплуатацию этой системы. Она собирает большой объём данных. Среди её показателей бывают не только концентрации газов, уровни мелких частиц, направление и скорость ветра и его температуру, но бывают другие параметры, которые нередко бывают тяжёлыми для используемых средств информационных технологий. Всё это

необходимо правильно обработать, ведь дело не только в измерении этих параметров.

Когда наша система принимает информацию от датчиков, она должна отправлять её на запись данных в долгосрочную память, и на выполнение обработки данных. Для этого нужны программные комплексы и базы данных на серверах.

В системе мониторинга есть возможность просмотра процесса в реальном времени. Отслеживание данных в разном времени тоже важно. Оно позволит обнаружить аварийную ситуацию раньше, и найти источник загрязнения. Не все датчики обладают высокой инертностью, нужно обязательно делать сглаживание данных, которые они выдают. Оно предотвращает случайные колебания.

С течением времени расчёт средних значений концентрации даёт более стабильную оценку состояния окружающей среды. Он рассчитывается по следующей формуле:

$$C_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i,$$

где $C_{\text{ср}}$ – средняя концентрация загрязняющего вещества; C_i – отдельные измеренные значения концентрации; n – количество измерений.

Измерения данных, раз в пять минут, за один час накапливают двенадцать значений. А та формула определяет среднюю концентрацию вещества за один час наблюдений. Рассмотрим проверку данных, происходит оценка, и она демонстрирует насколько отличаются они сильно друг от друга. Однако основываясь на прошлом требовании о сглаживании, резкие изменения концентрации делятся на два вероятных типа. Они могут указывать на нестабильную работу оборудования. А могут и на кратковременные выбросы. Необходимо в том случае провести оценку разброса измерений. Она использует формулу среднеквадратичного отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - C_{\text{ср}})^2},$$

где σ – среднеквадратичное отклонение; C_i – отдельные значения концентрации; $C_{\text{ср}}$ – средняя концентрация; n – количество измерений.

Увеличение этого параметра указывает на более сильные колебания показателей. Если концентрация окажется нестабильной, то проводят проверку оборудования.

При стабильных значениях и исправном оборудовании проводят поиск превышений допустимых норм. Превышения выявляют при сравнении измеренных значений с установленными предельно допустимыми концентрациями. Вычисляя специальный коэффициент превышения, нужно воспользоваться формулой

$$K = \frac{C}{C_{\text{lim}}},$$

где C – измеренная концентрация вещества; C_{lim} – установленное нормативное значение предельно допустимой концентрации.

При значении коэффициента больше единицы, концентрация превышает допустимый уровень. В автоматизированных системах такие ситуации фиксируются и передаются операторам или экологическим службам предприятия.

Результаты измерений представляются в виде графиков изменения концентрации во времени или в виде карт распределения загрязнения по территории предприятия. Такие визуализации помогают быстрее понять общую ситуацию и заметить возможные проблемы.

Автоматизированная система экологического мониторинга состоит из нескольких взаимосвязанных частей, которые позволяют получать и анализировать данные о состоянии окружающей среды. Если рассматривать такую систему в общем виде, то можно выделить три основных уровня: уровень измерения, уровень передачи данных и уровень обработки информации.

Первый (нижний) уровень – измерительное оборудование. Сюда входят датчики и анализаторы, которые устанавливаются на территории предприятия или рядом с источниками выбросов. Датчики подключаются к устройствам сбора данных. Устройство сбора данных – это регистратор, объединяющий функции контроллера и компьютера. Он принимает сигналы от нескольких датчиков одновременно, сохраняют информацию и подготавливают ее для передачи в центральную систему. Аналогово-цифровые преобразователи могут быть как отдельными, так и интегрированными в контроллер. На этом этапе также выполняется первичная обработка данных.

Следующий (средний) уровень системы связан с передачей данных. Информация от измерительных приборов должна поступать в центральный сервер, где выполняется основной анализ, это может происходить через разные типы

связи. Используются могут быть сети мобильной связи (GPRS, 3G, 4G, 5G), WiFi, связь по проводам, радиоканалы или специальные промышленные протоколы передачи данных.

После передачи информация поступает в центр обработки данных (верхний уровень). На этом уровне программные системы сохраняют данные в информационной базе и осуществляют расчеты. Система может автоматически сигнализировать о выходе за пределы норм.

Проводится работа по выявлению причинно-следственных связей, закономерностей, экологических проблем, составляются рекомендации и предложения [4].

Надежности работы всей системы можно оценить, вычислив показатель доступности данных. Он показывает, какая доля измерений была успешно получена и сохранена без ошибок. Этот показатель можно оценить с помощью выражения

$$A = \frac{T_{\text{work}}}{T_{\text{total}}},$$

где A – коэффициент доступности системы; T_{work} – время, в течение которого система работала корректно; T_{total} – общее время наблюдения.

Значение коэффициента близкое к единице демонстрирует, что система работает стабильно, поступление данных происходит практически без потерь. При заметно более низком показателе, идёт обнаружение возможных неполадок оборудования или каналов связи.

Разрабатывая архитектуру системы, предусматривают возможность резервирования (дублирования) оборудования. Некоторые датчики могут дублировать друг друга. Подключение системы к источнику бесперебойного питания повышает надежность мониторинга и уменьшает вероятность ошибки из-за неисправности оборудования или аварийных ситуаций с электропитанием.

Методы и средства, которые были рассмотрены в этой статье применяются на предприятиях. Они обеспечивают сбор данных, работают быстрее традиционных методов наблюдений. Разработчики внедряют их в системы экологического мониторинга. Для современных систем были выделены функциональные требования, и они в первую очередь ориентированы на точность и скорость измерений, на стабильность работы оборудования, непрерывный сбор данных.

Опираясь на способы измерения загрязняющих веществ, изучили методы контроля, и применили их в системах экологического мониторинга.

Формы обобщения результатов наблюдений за загрязнением природных вод устанавливаются специальными указаниями Росгидромета [5].

Углубились в тему математического моделирования, и оно является инструментом анализа распространения загрязняющих веществ. Если они будут применены, то с помощью них будет оценено распространение загрязнений. Территории, которые находятся под негативным влиянием загрязняющего вещества, тоже определяют те формулы.

Были перечислили причины большого объёма данных, собираемых современными системами, и найдены подходящие решения для этой ситуации, которые внедряют инженеры и программисты в целях строительства графиков и внедрению понятных для человека данных.

Экологическая безопасность будет повышена, если специалисты будут использовать эти системы и инструменты мониторинга.

Список литературы

1. Ковун, Д. А. Исследование методов и средств для автоматизированной системы экологического мониторинга атмосферного воздуха / Д. А. Ковун, А. В. Стариков // Актуальные проблемы автоматизации, роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах: материалы Всероссийской научно-практ. конф. препод. и спец. и Всероссийской научно-практ. конф. студ. и мол. ученых. Воронеж, 27 марта – 08 апреля 2025 года. ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 2025. – С. 118-123. – DOI:10.58168/AIARMTOES2025_118-123.

2. Ковун, Д. А. Автоматизация экологического мониторинга промышленных зон в крупных населенных пунктах / Д. А. Ковун, А. В. Стариков // Технологии в биоэкономике: инновации и вызовы в XXI веке: материалы Международного форума. Воронеж, 28–30 мая 2025 года. ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, 2025. – С. 144-149. – DOI: 10.58168/TBiEc2025_144-149.

3. Экологический мониторинг : учебное пособие / Е. П. Лысова, О. Н. Парамонова, Н. С. Самарская, Н. В. Юдина. – М. : ИНФРА-М, 2023. – 151 с.

4. Ашихмина, Т. Я. Методы экологического мониторинга окружающей среды : учебно-методическое пособие / Т. Я. Ашихмина. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 372 с.

5. Голицын, А. Н. Промышленная экология и мониторинг загрязнения природной среды / А. Н. Голицын. – М. : ОНИКС, 2010. – 336 с.

References

1. Kovun D.A., Starikov A.V. Issledovanie metodov i sredstv dlya avtomatizirovannoi sistemy ekologicheskogo monitoringa atmosfernogo vozdukha [Study of methods and tools for an automated environmental air monitoring system]. In: Aktual'nye problemy avtomatizatsii, robotizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh, organizatsionnykh, ekonomicheskikh sistemakh: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference (Voronezh, March 27 – April 8, 2025). Voronezh: VGLTU im. G.F. Morozova, 2025, pp. 118–123. DOI: 10.58168/AIARMTOES2025_118-123. (in Russian)
2. Kovun D.A., Starikov A.V. Avtomatizatsiya ekologicheskogo monitoringa promyshlennykh zon v krupnykh naselennykh punktakh [Automation of environmental monitoring of industrial zones in large urban areas]. In: Tekhnologii v bioekonomike: innovatsii i vyzovy v XXI veke: proceedings of the International forum (Voronezh, May 28–30, 2025). Voronezh: VGLTU im. G.F. Morozova, 2025, pp. 144–149. DOI: 10.58168/TBiEc2025_144-149. (in Russian)
3. Lysova E.P., Paramonova O.N., Samarskaya N.S., Yudina N.V. Ekologicheskii monitoring [Environmental Monitoring]. Moscow: INFRA-M, 2023, 151 p. (in Russian).
4. Ashikhmina T.Ya. Metody ekologicheskogo monitoringa okruzhayushchei sredy [Methods of Environmental Monitoring]. Vologda: Infra-Inzheneriya, 2024, 372 p. (in Russian).
5. Golitsyn A.N. Promyshlennaya ekologiya i monitoring zagryazneniya prirodnoi sredy [Industrial Ecology and Environmental Pollution Monitoring]. Moscow: ONIKS, 2010, 336 p. (in Russian).

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАСХОДА ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ОКРАСКЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ**

**OPTIMIZATION OF PAINTING MATERIALS CONSUMPTION IN ROBOT-
AIDED PAINTING OF LARGE-SIZED CONSTRUCTIONS**

Кодацкая А.С., студент

Грибанов А.А., к.т.н., доцент

Мещерякова А.А., к.т.н., доцент

**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»**

г. Воронеж, Россия

vgltaapp@mail.ru

Kodatskaya A.S., Student

Gribanov A.A., PhD (Engineering), Associate professor

Meshcheryakova A.A., CSc (Engineering), Associate Professor

Voronezh State University of Forestry and Technologies

named after G.F. Morozov,

Voronezh, Russia

Аннотация: Статья посвящена исследованию влияния технологических параметров движения робота-манипулятора KUKA KR6 900 на равномерность покрытия и расход лакокрасочных материалов (ЛКМ) при окраске крупногабаритных металлических конструкций. Предложена математическая модель распыления, связывающая толщину слоя с расстоянием до поверхности, углом распыления и линейной скоростью движения краскораспылителя. На основе полного факторного эксперимента 2^3 с трёхкратной повторностью в центральной точке установлены регрессионные зависимости расхода ЛКМ и коэффициента вариации толщины от указанных параметров. Показано, что оптимизация траектории с поддержанием расстояния 240–260 мм, угла 85° – 90° и скорости 450–550 мм/с позволяет снизить расход материала на 12–18 % при сохранении коэффициента вариации толщины покрытия не более 8 %.

Abstract: This paper investigates the influence of technological motion parameters of the KUKA KR6 900 robot manipulator on coating uniformity and paint consumption during the painting of large-scale metal structures. A mathematical spraying model is proposed, relating layer thickness to the distance to the surface, spray angle, and linear velocity of the paint sprayer. Based on a full 2^3 factorial experiment with three replicates at the center point, regression models for paint consumption and the coefficient of thickness variation were established as functions of the specified parameters. It is demonstrated that trajectory optimization, maintaining a distance of 240–260 mm, an angle of 85° – 90° , and a speed of 450–550 mm/s, reduces material consumption by 12–18% while keeping the coating thickness variation coefficient below 8%.

Ключевые слова: роботизированная окраска, оптимизация траектории, расход лакокрасочных материалов, равномерность покрытия, полный факторный эксперимент, регрессионный анализ, KUKA KR6 900.

Keywords: robotic painting, trajectory optimization, paint consumption, coating uniformity, full factorial experiment, regression analysis, KUKA KR6 900.

Роботизированные комплексы окраски широко применяются в машиностроении для обработки крупногабаритных конструкций, включая мостовые фермы, опоры ЛЭП и металлоконструкции промышленных зданий. Как показано в предыдущих исследованиях [1], решение задач кинематики робота KUKA KR6 900 на основе параметров Денавита–Хартенберга позволяет формировать траектории движения краскораспылителя вдоль сложных поверхностей. Однако кинематическая корректность траектории не гарантирует экономичности процесса: при неоптимальных технологических параметрах наблюдается избыточный расход ЛКМ до 25–30 % из-за неравномерного распределения факела распыления [2]. Актуальной задачей является переход от чисто геометрического планирования траекторий к технологически обоснованной оптимизации параметров движения с целью минимизации расхода ЛКМ при обеспечении требуемого качества покрытия.

Процесс формирования покрытия при пневматическом распылении описывается распределением плотности потока частиц ЛКМ в поперечном сечении факела. Для упрощённого расчёта толщины слоя h в точке поверхности используется гауссова модель профиля распыления:

$$h(x) = h_0 \cdot \exp\left(-\frac{2x^2}{b^2}\right) \cdot k_d(d) \cdot k_\alpha(\alpha) \cdot \frac{1}{v}$$

где h_0 – максимальная толщина слоя на оси факела, мм; x – поперечная координата относительно оси распылителя, мм; b – эффективная ширина факела, мм; d – расстояние от сопла до поверхности, мм; α – угол между осью распылителя и нормалью к поверхности, град; v – линейная скорость движения краскораспылителя, мм/с; $k_d(d)$, $k_\alpha(\alpha)$ – безразмерные коэффициенты, учитывающие влияние расстояния и угла.

Коэффициент влияния расстояния аппроксимируется линейной зависимостью в рабочем диапазоне 200–350 мм:

$$k_d(d) = 1 - 0,0012 \cdot (d - 250)$$

Коэффициент влияния угла распыления описывается косинусной зависимостью с учётом аэродинамических эффектов:

$$k_\alpha(\alpha) = \cos^{1,2}(\alpha)$$

Расход материала на единицу площади q связан с толщиной слоя и плотностью ЛКМ ρ соотношением $q = \rho \cdot h$. Неравномерность покрытия оценивается коэффициентом вариации $C_v = \sigma_h / \bar{h} \cdot 100\%$, где σ_h – среднеквадратическое отклонение толщины, $\bar{h}$ – средняя толщина слоя.

Для количественной оценки влияния параметров на расход ЛКМ и равномерность покрытия проведён полный факторный эксперимент 2^3 с трёхкратной повторностью в центральной точке для оценки воспроизводимости. Варьируемые факторы и их уровни представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Факторы и уровни полного факторного эксперимента 2^3

Фактор	Обозначение	Нижний уровень (–1)	Верхний уровень (+1)	Основной уровень (0)
Расстояние до поверхности, мм	d	200	300	250
Угол распыления, град	α	75	90	82,5
Скорость движения, мм/с	v	350	650	500

Отклики: Y_1 – относительный расход ЛКМ (отн. ед. к базовому режиму $d = 250$, $\alpha = 90^\circ$, $v = 500$ мм/с); Y_2 – коэффициент вариации толщины покрытия C_v , %.

Эксперимент проведён в среде моделирования KUKA.Sim Professional 4.1 с имитацией распыления на плоскую поверхность размером 1000×500 мм. Для каждого режима рассчитано распределение толщины слоя по 25 контрольным точкам, расположенным по сетке 5×5 с шагом 200 мм. Измерение толщины в виртуальной среде осуществлялось путём интегрирования плотности потока частиц в ячейке 20×20 мм вокруг каждой контрольной точки. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты полного факторного эксперимента 2^3

№ опыта	x_1 (d)	x_2 (α)	x_3 (v)	Y_1 (расход), отн. ед.	Y_2 (C_v), %
1	–1	–1	–1	1,18	9,8
2	+1	–1	–1	1,09	11,2
3	–1	+1	–1	1,15	8,5
4	+1	+1	–1	1,05	9,1
5	–1	–1	+1	0,92	6,3
6	+1	–1	+1	0,86	7,8
7	–1	+1	+1	0,90	5,9
8	+1	+1	+1	0,84	6,5
9	0	0	0	1,00	6,2
10	0	0	0	1,01	6,4
11	0	0	0	0,99	6,1

Дисперсия воспроизводимости, рассчитанная по трём повторным опытам в центральной точке, составила $S_{\text{воспр}}^2 = 0,0083$ для Y_1 и $S_{\text{воспр}}^2 = 0,0233$ для Y_2 , что подтверждает достаточную точность измерений.

Для получения регрессионных уравнений применён метод наименьших квадратов. Коэффициенты уравнения регрессии b_j рассчитывались по формуле:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_{ij}$$

где $N = 8$ – число опытов в плане без повторов, y_i – значение отклика в i -м опыте, x_{ij} – значение j -го фактора в i -м опыте (кодированные переменные).

Для отклика Y_1 (расход ЛКМ) получены следующие коэффициенты: $b_0 = 1,000$, $b_1 = -0,080$, $b_2 = -0,050$, $b_3 = +0,120$, $b_{13} = +0,040$. Остальные ко-

эффекты взаимодействия (b_{12} , b_{23} , b_{123}) не превысили критерий Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и были исключены из модели как незначимые. Критерий Фишера для полученной модели составил $F_{\text{расч}} = 42,7 > F_{\text{табл}}(3,4) = 6,59$, что подтверждает адекватность модели.

Для отклика Y_2 (коэффициент вариации) значимыми оказались только линейные эффекты: $b_0 = 6,20$, $b_1 = +1,80$, $b_2 = +1,50$, $b_3 = -0,90$. Эффекты взаимодействия признаны незначимыми ($F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$). Критерий Фишера для модели Y_2 составил $F_{\text{расч}} = 38,4 > F_{\text{табл}}(3,4) = 6,59$.

Окончательные регрессионные уравнения в кодированных переменных имеют вид:

$$Y_1 = 1,00 - 0,08x_1 - 0,05x_2 + 0,12x_3 + 0,04x_1x_3,$$

$$Y_2 = 6,2 + 1,8x_1 + 1,5x_2 - 0,9x_3.$$

Переход к натуральным переменным для уравнения Y_1 осуществлялся по формулам кодирования:

$$x_1 = \frac{d-250}{50}, \quad x_2 = \frac{\alpha-82,5}{7,5}, \quad x_3 = \frac{v-500}{150}.$$

После подстановки и упрощения получено уравнение в натуральных переменных:

$$Y_1 = 0,88 - 0,0008d - 0,0027\alpha + 0,0008v + 0,0000053(d - 250)(v - 500)$$

Анализ коэффициентов регрессии показывает, что наибольшее влияние на расход ЛКМ оказывает скорость движения (+12% при переходе от 350 до 650 мм/с), что объясняется уменьшением времени воздействия факела на единицу площади. Увеличение расстояния до 300 мм приводит к расширению факела и снижению пиковой толщины слоя, что компенсируется увеличением расхода на 8 % для достижения заданной средней толщины 80 мкм. Угол распыления менее критичен в диапазоне 75°–90°, однако при $\alpha < 80^\circ$ наблюдается рост C_v до 12 % из-за асимметрии профиля распыления.

Для визуализации взаимного влияния факторов построены поверхности отклика и линии уровня. На рисунке 1 представлена зависимость относительного расхода Y_1 от расстояния d и скорости v при фиксированном угле $\alpha = 90^\circ$. Поверхность имеет характерный наклон в сторону увеличения расхода при росте скорости и уменьшении расстояния. Минимальные значения Y_1 наблюдаются в области $d = 280\text{--}300$ мм и $v = 350\text{--}450$ мм/с, однако в этой зоне коэффициент вариации C_v превышает допустимые 8 %.

На рисунке 2 показана зависимость коэффициента вариации Y_2 от расстояния d и угла α при фиксированной скорости $v = 500$ мм/с. Чётко прослежива-

ется рост неравномерности покрытия при увеличении расстояния и уменьшении угла распыления. Оптимальная область с $C_v \leq 8\%$ локализована при $d \leq 260$ мм и $\alpha \geq 82^\circ$.

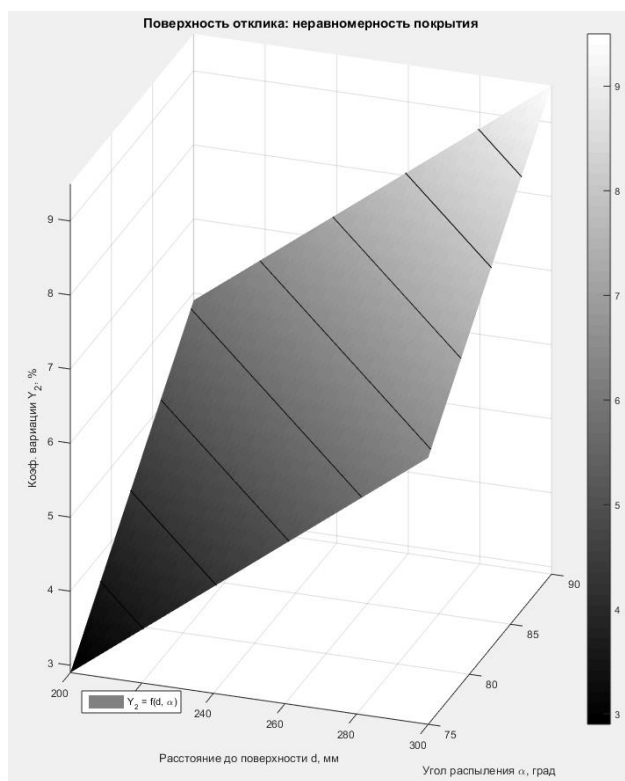


Рисунок 1 – Зависимость относительного расхода ЛКМ Y_1 от расстояния d и скорости v при фиксированном угле $\alpha = 90^\circ$

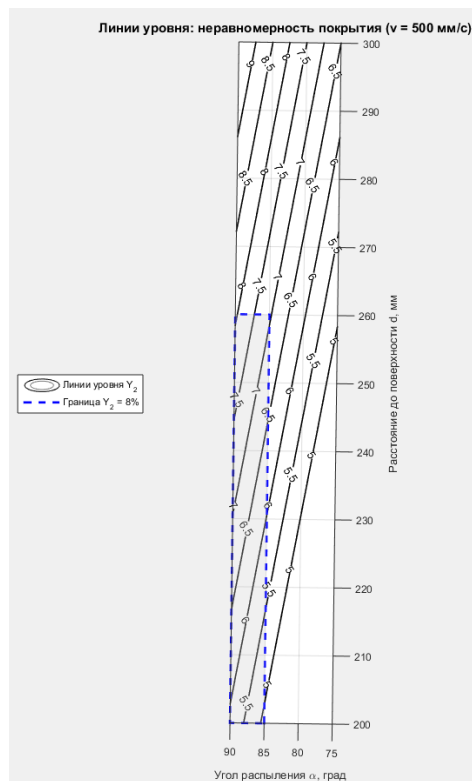


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента вариации толщины покрытия Y_2 от расстояния d и угла α при фиксированной скорости $v = 500$ мм/с

Оптимальная область параметров (рис. 3) определена по критерию минимизации Y_1 при ограничении $Y_2 \leq 8\%$ с использованием метода перебора по сетке $5 \times 5 \times 5$ в рабочем диапазоне факторов:

$$240 \leq d \leq 260 \text{ мм}, \quad 85^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ, \quad 450 \leq v \leq 550 \text{ мм/с}.$$

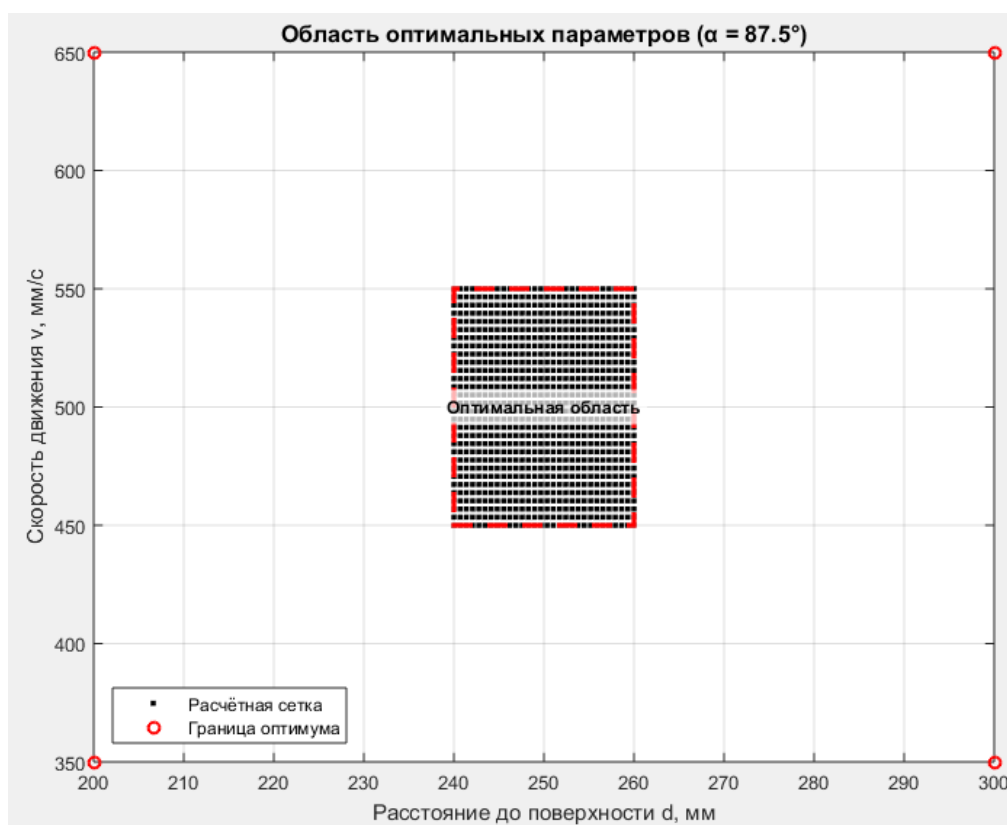


Рисунок 3 – Оптимальная область параметров

При реализации оптимизированной траектории на виртуальном стенде расход ЛКМ составил 0,84 от базового значения, а $C_v = 6,8\%$, что соответствует требованиям ГОСТ 9.401-91 [3] к равномерности защитных покрытий металлоконструкций.

Предложенная модель распыления и результаты факторного эксперимента позволяют перейти от эмпирической настройки режимов окраски к расчётной оптимизации технологических параметров. Установлено, что поддержание расстояния 250 мм, угла распыления не менее 85° и скорости 450–550 мм/с обеспечивает снижение расхода ЛКМ на 12–18 % без ухудшения равномерности покрытия. Полученные регрессионные зависимости могут быть интегрированы в алгоритм расчёта траекторий движения робота KUKA KR6 900, дополняя кинематические расчёты на основе параметров Денавита–Хартенберга технологическими ограничениями. Перспективным направлением является расширение модели с учётом кривизны обрабатываемой поверхности и динамических ограничений манипулятора.

Список литературы

1. Кодацкая, А. С. Проектирование роботизированного комплекса для окраски крупногабаритных металлических конструкций / А. С. Кодацкая, А. А. Грибанов, А. А. Мещерякова // Актуальные проблемы автоматизации, роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах : Материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых, Воронеж, 27 марта – 08 апреля 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2025. – С. 353-358. – DOI 10.58168/AIARMTOES2025_253-358.

2. Дробина, Е. А. Интеллектуальная система управления робототизированным покрасочным комплексом / Е. А. Дробина // ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ науки и ОБРАЗОВАНИЯ : сборник статей IX Международной научно-практической конференции : в 2 ч., Пенза, 12 января 2020 года. Ч. 1. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. – С. 93-95.

3. ГОСТ 9.401-91. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 29.03.91 № 335 : дата введения 1992-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2007. – IV, 124 с.

References

1. Kodatskaya, A. S., Griбанov, A. A., Meshcheryakova, A. A. Design of a robotic complex for painting large-sized metal structures. In: Current problems of automation, robotization and control in technical, organizational and economic systems: Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference of teachers and specialists and the All-Russian scientific-practical conference of students and young scientists, Voronezh, March 27 – April 08, 2025. Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 2025. P. 353-358. DOI 10.58168/AIARMTOES2025_253-358.

2. Drobina, E. A. Intelligent control system for a robotic painting complex. In: Innovative development of science and education: collection of articles of the IX International scientific-practical conference: in 2 parts, Penza, January 12, 2020. Part 1. Penza: "Nauka i Prosveshchenie" (IP Gulyaev G.Yu.), 2020. P. 93-95.

3. GOST 9.401-91. Unified system of corrosion and ageing protection. Paint coatings. General requirements and accelerated test methods for resistance to climatic factors: interstate standard: official edition: approved and put into effect by the Decree of the USSR State Committee for Product Quality Management and Standards of March 29, 1991 No. 335: date of introduction 1992-07-01. Moscow: Standartinform, 2007. IV, 124 p.

**ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ
КРИВОЛИНЕЙНОГО ОЧЕРТАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
КРУГЛЫХ В ПЛАНЕ ЗДАНИЙ¹¹
INFORMATION MODELING OF CURVILINEAR PAVEMENTS IN THE
DESIGN OF CIRCULAR BUILDINGS**

Кузнецов Д.Н., к.т.н, доцент
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
г. Воронеж, Россия
kuznecov82@bk.ru

Kuznetsov D.N., PhD in Sci. Tech., Associate Professor
Voronezh State Technical University,
Voronezh, Russia

Аннотация: В статье рассматривается методика информационного моделирования несущих конструкций покрытий с криволинейным очертанием поверхности для круглых в плане зданий. Разработанная методика позволяет задавать различные варианты металлической трехмерной структурной решетки для покрытий и автоматизировать процессы моделирования на этапе проектирования. Приводятся примеры построения поверхностей покрытий с геометрией для круглого в плане здания диаметром 30 м с различными вариантами структурной решетки. Представленная в статье методика моделирования позволяет сократить сроки, снизить трудоемкость и рассмотреть различные варианты при проектировании покрытий круглых в плане зданий.

Abstract: This article discusses a methodology for building information modeling of load-bearing roof structures with curved surfaces for circular buildings. The developed methodology allows for the specification of various options for a three-dimensional metal structural lattice for coatings and the automation of modeling processes at the design stage. Examples of constructing roof surfaces with geometry for a circular building with a diameter of 30 m with various structural lattice options are given. The modeling methodology presented in the article allows us to reduce the

timeframe, decrease labor intensity, and consider various options when designing roofs for buildings with circular plans.

Ключевые слова: криволинейные поверхности, круглые в плане здания, структурные конструкции, автоматизация проектирования, информационно моделирование.

Keywords: curved surfaces, round buildings in plan, structural designs, design automation, information modeling.

Пространственные решетчатые конструкции с поперечными сечениями из металлических труб применялись для покрытий зданий с начала 1950-х годов. Наибольшее распространение в практике проектирования типовых структурных плит получили следующие серийные конструктивные решения: «Октаплатт» (ФРГ), «Триодетик» (Канада), «Юнистрэт» (США), «Система МАР-ХИ» (СССР), «ЦНИИСК» (СССР), «КИСЛОВОДСК» (СССР) [1]. Пространственные стержневые конструкции в виде структурных плит обычно используют для покрытий прямоугольных в плане зданий. Для проектирования покрытий круглых в плане зданий указанные серийные решения плохо подходят, так как их типовая решетка не позволяет плавно менять геометрию покрытия одновременно в плане и по высоте. При проектировании покрытий круглых в плане зданий и сооружений используют купольные конструкции, однопоясные и двухпоясные висячие покрытия, радиальные фермы и др. [2, 3]. Можно отметить, что структурные покрытия обладают рядом преимуществ, таких как: возможность изменения формы поверхности, малая высота, возможность унификации узлов и элементов, удобство транспортировки, малый собственный вес и другие. Технологии информационного моделирования (далее ТИМ) позволяют создавать решетчатые покрытия для круглых в плане зданий [4]. Для уменьшения сроков и трудоемкости моделирования подобных покрытий необходимо применять эффективные методики моделирования, именно такая методика рассматривается в данной статье.

Последовательность информационного моделирования структурных покрытий ранее уже апробирована автором применительно к прочим покрытиям со сложной геометрической формой и рассматривалась в работах [5-7], в данной работе попробуем построить информационную модель (далее ИМ) применительно к покрытию круглого в плане здания диаметром 30 м. На начальном этапе в среде программного комплекса Autodesk Revit построим цифровую информационную модель (далее ЦИМ) поверхности покрытия круглого в плане

здания с опорным контуром из двух пересекающихся симметричных арок (см. рис. 1). В континуальном виде форма поверхности покрытия описывается системой дифференциальных линейных уравнений вида:

$$\frac{d^2z}{dx^2} + \frac{d^2z}{dy^2} = 0, \quad (1)$$

где x, y, z – координаты точек (узлов сетки) поверхности.

Далее разделим построенную поверхность системой ортогональной и регулярной сетки (рис. 1).

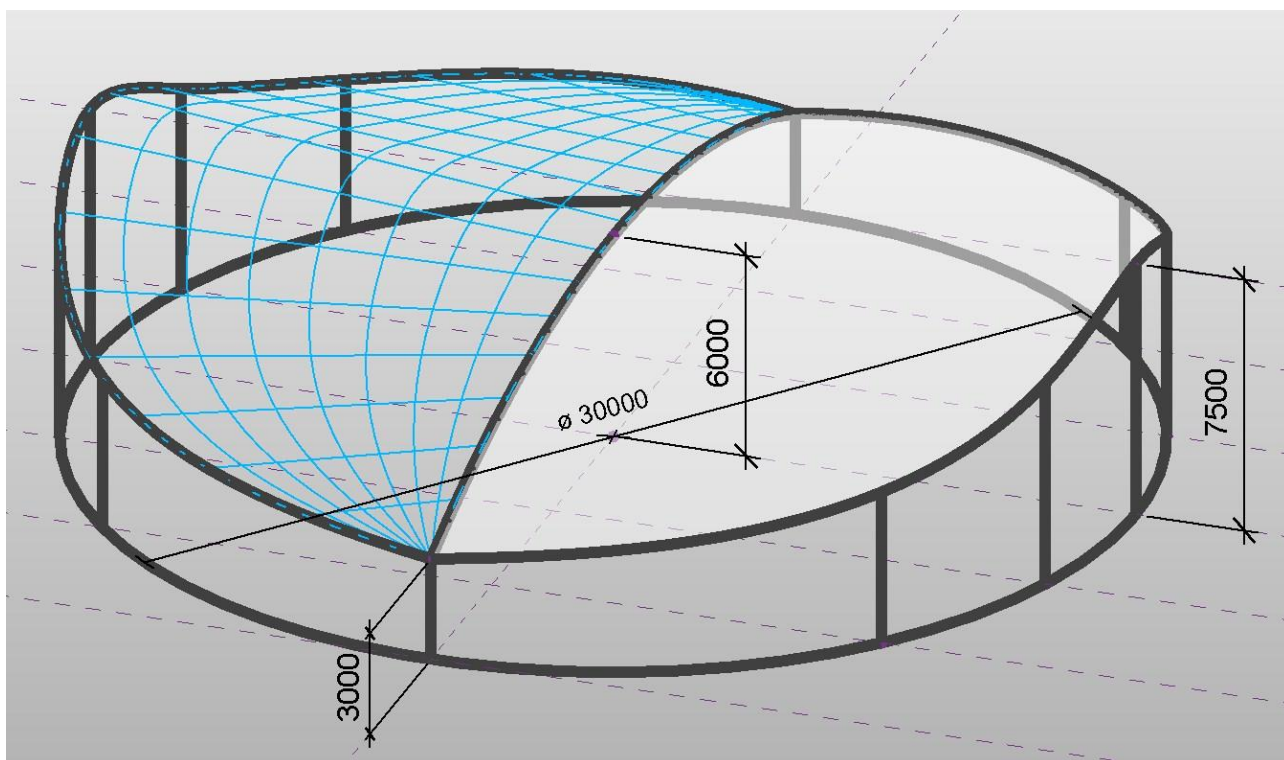
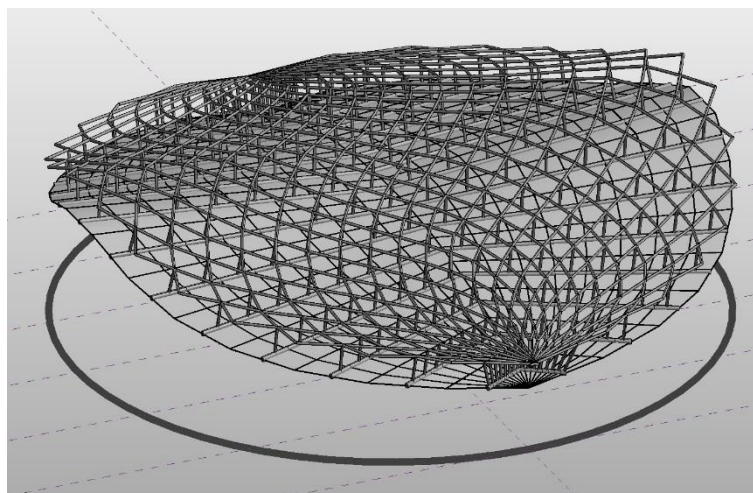


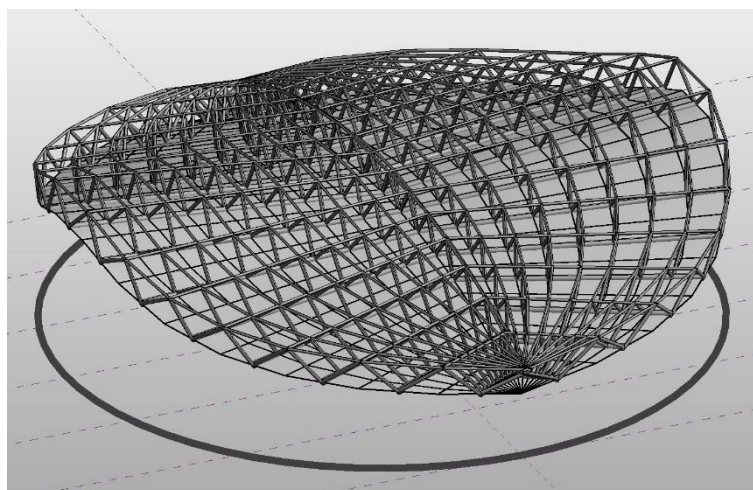
Рисунок 1 – Поверхность покрытия круглого в плане здания с опорным контуром из двух пересекающихся симметричных арок

Три ранее разработанных семейства с системой решетки различных видов применялись для построения ЦИМ с тремя соответствующими видами решетки. Поочередно, согласно системе ортогональной сетки в проект ЦИМ покрытия был загружен каждый вид семейства с определенной системой решетки, которая задана применительно ко всей модели проектируемого покрытия круглого в плане здания. В итоге мы получили три варианта ЦИМ покрытия с тремя различными видами решетки (см. рис. 2). Полученные ЦИМ можно использовать для выбора наиболее рационального варианта, для экспорта в вычислительный комплекс и для последующей разработки проектной документации.

а)



б)



в)

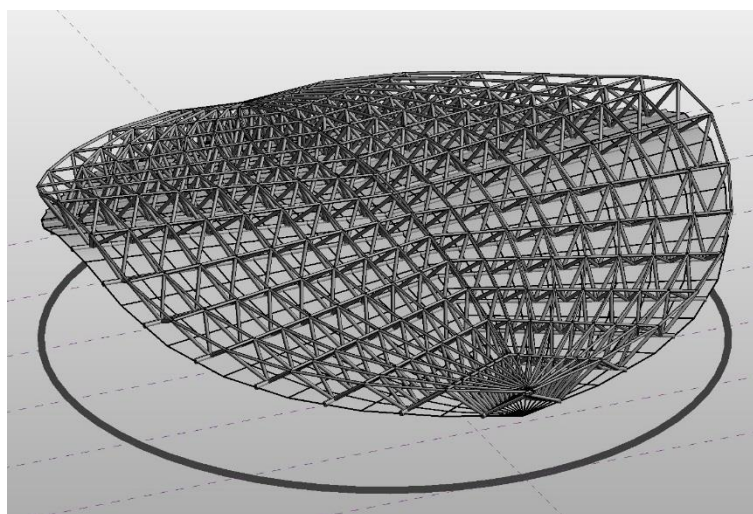


Рисунок 2—ЦИМ покрытия с тремя различными видами решетки:
а) —ЦИМ с перекрестно-стоечной решеткой; б) — ЦИМ с призматической
решеткой; в) — ЦИМ с пирамидальной решеткой;

На основании результатов вариантного параметрического моделирования решетчатой конструкции покрытия круглого в плане здания с опорным контуром из двух пересекающихся арок можно сделать вывод, что ТИМ позволяют автоматизировать процесс проектирования круглых в плане зданий и расширяют вариативность при выборе вида структурной решетки.

Список литературы

1. Серия 1.466 – 3С Пространственные решетчатые конструкции из труб типа «Кисловодск»: Типовые конструкции и детали зданий и сооружений / Гипроспецлегкоконструкция: Госстрой СССР, 1977. – 24 с.
2. Дыховичный, Ю. А. Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы): справочник / Ю. А. Дыховичный, Э. З. Жуковский. – М.: Высш. шк., 1991. – 543 с.
3. Канчели, В. Н. Строительные пространственные конструкции: учеб. пособие / В. Н. Канчели. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 112 с.
4. Царитова, Н. Г. Применение информационных технологий при проектировании пространственных покрытий / Н. Г. Царитова, А. В. Штанкевич, И. А. Шурховец // Информационные технологии в обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений: мат-лы XXII Междунар. научно-техн. конф. Новочеркасск, 26 октября 2023 г., Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова: Изд-во Лик, 2023. С. 43-47. EDN: EBVKWP.
5. Применение BIM-технологий для проектирования криволинейных покрытий на основе пространственных решетчатых конструкций / Д. И. Емельянов, Д. Н. Кузнецов, Л. А. Федосова, А. А. Глушков // Строительная механика и конструкции. 2019. № 1(20). С. 71-81. EDN: YZOZHV.
6. Кузнецов, Д. Н. Моделирование решетчатых покрытий синусоидального вида / Д. Н. Кузнецов, И. А. Кузнецов // Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры: мат-лы VIII Междунар. научно-практ. конф. ; под общ. ред. А. А. Семенова. – СПб.: СПбГАСУ, 2025. – С. 234-240. DOI: 10.23968/BIMAC.2025.032. EDN: JEBQRS.
7. Свентиков, А. А. Автоматизированное проектирование пространственных решетчатых стальных конструкций покрытий сложной формы / А. А. Свентиков, Д. Н. Кузнецов // Строительство и реконструкция. – 2021. – № 1(93). – С. 38-49. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-38-49. EDN: NMUKBS.

References

1. Series 1.466 – 3S Spatial lattice structures made of Kislovodsk-type pipes: Typical structures and details of buildings and structures / Giprospecligokonstruktsiya: Gosstroy USSR, 1977. – 24 p.
2. Dykhavichny, Yu. A. Modern spatial structures (reinforced concrete, metal, wood, plastics): Handbook / Yu. A. Dykhavichny, E. Z. Zhukovsky. M.: Vyssh. shk., 1991. – 543 p.
3. Kancheli, V. N. Construction spatial structures: Textbook / V. N. Kancheli. – M.: Publishing house ACB, 2003. – 112 p.
4. Tsaritova, N. G. Application of information technologies in the design of spatial coatings / N. G. Tsaritova, A. V. Shtankevich, I. A. Shurkhovets // Information technologies in the survey of operated buildings and structures: materials of the XXII International scientific and technical conference. Novocherkassk, October 26, 2023, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov: Publishing House Lik, 2023. Pp. 43-47. EDN: EBVKWP.
5. Application of BIM Technologies for the Design of Curvilinear Coverings Based on Space / D. I. Emelyanov, D. N. Kuznetsov, L. A. Fedosova, A. A. Glushkov // Structural mechanics and structures. 2019. No. 1(20). pp. 71-81. EDN: YZOZHV.
6. Kuznetsov, D. N. Modeling of sinusoidal lattice coverings/ D. N. Kuznetsov, I. A. Kuznetsov // Information modeling in problems of construction and architecture: materials of the VIIIth International Scientific and Practical Conference. Under the general editorship of A.A. Semenov. St. Petersburg: SPbGASU, 2025. pp. 234-240. DOI: 10.23968/BIMAC.2025.032. EDN: JEBQRS.
7. Sventikov, A. A. Computer-aided design of spatial lattice steel structures of coatings of complex shape / A. A. Sventikov, D. N. Kuznetsov // Construction and reconstruction. 2021. No. 1(93). pp. 38-49. DOI: 10.33979/2073- 7416-2021-93-1-38-49. EDN: NMUKBS.

**ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ
СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ СОРТИРОВКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ
В КОНТЕКСТЕ ИНДУСТРИИ 4.0**

**ECONOMIC EFFICIENCY ASSESSMENT OF OPTICAL LUMBER
SORTING SYSTEMS IMPLEMENTATION IN THE CONTEXT OF
INDUSTRY 4.0**

Лискин Д.С., студент

Попов О.В., студент

Щербакова И.В., к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова» г. Воронеж, Россия

shcherbakovaiv@vglta.vrn.ru

Liskin D.S., student

Popov O.V., student

Shcherbakova I.V., CSc (Engineering), Associate Professor

Voronezh State University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Аннотация: В условиях низкой рентабельности лесопромышленного сектора РФ менее 10% критически важным становится внедрение технологий Индустрии 4.0 для оптимизации производственных процессов. Целью исследования является оценка экономической целесообразности внедрения систем автоматической оптической сортировки пиломатериалов с учётом российских рыночных реалий. В работе применён метод сравнительного экономического моделирования, учитывающий прямые потери от брака, рост производительности и максимизацию ценности продукции. Техническая реализация базируется на архитектуре ПоТ с использованием машинного зрения и edge-аналитики. Результаты показали, что совокупная годовая выгода (NAB) для предприятия объёмом 10 000 м³ может достигать 156,4 млн. рублей за счёт синергии снижения брака, сокращения трудозатрат и улучшения классификации. Окупаемость критически зависит от капитальных затрат (CAPEX), варьирующихся от 10 до

50 млн рублей. Сделан вывод о высокой потенциальной эффективности при условии точной интеграции с существующими ERP-системами и учёта ограничений по стоимости оборудования в условиях импортозамещения.

Abstract: In the context of low profitability of the Russian forest industry sector (less than 10%), the implementation of Industry 4.0 technologies for optimizing production processes becomes critical. The aim of the study is to assess the economic feasibility of implementing automatic optical lumber sorting systems, taking into account Russian market realities. The paper applies a comparative economic modeling method, taking into account direct losses from defects, productivity growth, and product value maximization. Technical implementation is based on IIoT architecture using machine vision and edge analytics. Results showed that the total annual benefit (NAB) for an enterprise with a volume of 10,000 m³ can reach 156.4 million RUB due to the synergy of defect reduction, labor cost savings, and improved classification. Payback critically depends on capital expenditures (CAPEX), ranging from 10 to 50 million RUB. It is concluded that there is high potential efficiency provided accurate integration with existing ERP systems and consideration of equipment cost limitations under import substitution conditions.

Ключевые слова: Оптическая сортировка, экономическая эффективность, автоматизация деревообработки, пиломатериалы, срок окупаемости, импортозамещение.

Keywords: Optical sorting, economic efficiency, automation of wood processing, lumber, payback period, import substitution.

Современное состояние лесопильной промышленности характеризуется высокой конкуренцией и возрастающими требованиями к качеству конечной продукции, а также, критически низкими показателями маржинальности, не превышающими 10%. В то же время на мировом уровне наблюдается устойчивая тенденция роста рынка деревообработки: по прогнозам, к 2030 году его объем достигнет 6,52 миллиарда долларов США при среднегодовом темпе роста 4,42%. В условиях ограниченности качественного сырьевого ресурса и роста производственных издержек ключевым фактором устойчивого развития предприятий становится повышение эффективности использования древесины. Одним из наиболее перспективных направлений технологической модернизации в этой области является переход от ручного контроля качества к автоматизированным системам на базе технологий машинного зрения. Основным барьером на пути к повышению конкурентоспособности отечественных предприятий оста-

ся технологическая отсталость этапов сортировки. Традиционная ручная сортировка является медленным и трудоемким процессом, подверженным ошибкам, связанным как с усталостью оператора, так и субъективным восприятием дефектов. Это приводит к недооценке продукции, когда качественный материал ошибочно относится к низшему сорту, или к пропуску брака в высшие категории. Переход к ценностно-ориентированным моделям ценообразования требует внедрения решений, обеспечивающих измеримый экономический эффект через более широкую и глубокую степень автоматизации [3].

Целью исследования является обоснование экономической целесообразности внедрения систем оптической сортировки пиломатериалов на основе моделирования прямых и косвенных выгод с учётом российских рыночных цен и условий импортозамещения.

Оптические системы, использующие камеры высокого разрешения и лидары, способны детектировать такие дефекты, как узлы, трещины, гниль и плесень с точностью более 95%, что недостижимо при ручном труде. Технологическое решение, построенное на архитектуре IoT, позволяет системе работать в режиме 24/7 со скоростью до 120 метров в минуту. Сравнительный анализ эксплуатационных характеристик показал, что автоматизированная система превосходит ручной труд по скорости обработки в 3 раза, достигая показателей в 80–120 метров в минуту. Ключевым преимуществом является переход на режим работы 24/7, что недоступно при ручной сортировке из-за ограничений человеческого ресурса. Была выбрана линия сортировки сухих пиломатериалов KRAFTER BS-Line Российского производства.

Предлагаемое решение по использованию системы оптической сортировки – это важный элемент стратегической модернизации предприятия, позволяющий преобразовывать сырьё в продукт максимальной ценности за счёт точной классификации и минимизации потерь.

В рамках данного исследования применялся метод сравнительного экономического моделирования и анализа архитектурных парадигм промышленной автоматизации. Выбор данных моделей обусловлен необходимостью оценки компромисса между скоростью развёртывания и глубиной интеграцией технологического оборудования с информационными системами предприятия.

Реализация системы оптической сортировки базируется на многоуровневой архитектуре, соответствующей стандартам Индустрии 4.0.

Для оценки целесообразности внедрения данных технологий была разработана математическая модель совокупной чистой годовой выгоды — Net Annual Benefit (NAB). Расчет производится по формуле:

$$NAB = BV + PV + QV,$$

где BV — экономический эффект от минимизации брака; PV — выгода от масштабирования производительности и оптимизации фонда оплаты труда; QV — доход от повышения точности классификации (сортности).

Исходные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчётов (РФ, 2026 г.):

Параметр	Значение	Обоснование
Курс USD/RUB	85 руб./\$	Бюджетный прогноз на 2026 год
Цена пиломатериала (1 сорт)	18 000 руб./м³	Среднерыночная цена хвойной обрезной доски
Цена пиломатериала (2 сорт)	16 000 руб./м³	Дисконт за снижение класса качества
Стоимость утилизации брака (щепы)	3 000 руб./м³	Оценка вторичной переработки
Зарплата сортировщика (с налогами)	800 000 руб./год	Данные по отрасли
Стоимость базовой системы сортировки	10-5 млн. руб.	Цены на линии сортировки в РФ
Стоимость продвинутой системы	40-50 млн. руб.	С учётом интеграции и адаптации ПО

Для оценки стоимости оборудования использовались аналогии с системами сортировки в смежных отраслях (горнодобывающая промышленность), где стоимость AI-оптических систем начинается от 150 000 долларов США [5].

В ходе моделирования были получены количественные метрики эффективности внедрения автоматизированной системы сортировки. Сравнительный анализ ручного и автоматического методов представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика методов сортировки

Параметр	Ручная сортировка	Автоматическая сортировка	Единицы измерения
Скорость обработки	20–40	60–120	метров в минуту
Точность классификации	~70–80	>95	%
Влияние человеческого фактора	Высокое	Отсутствует	Качественная оценка
Режим работы	1 смена (ограничено)	24/7 (непрерывно)	Часы

Как видно из табл. 2, скорость автоматической градации пиломатериалов как минимум в три раза превышает показатели ручной сортировки. Такое увеличение скорости линии напрямую переводится в увеличение объёма выпускаемой продукции. Например, при работе 2000 часов в год прирост производительности позволяет дополнительно выпускать значительные объёмы продукции, что формирует основу для компонента PV.

На основе введённых переменных были рассчитаны составляющие годовой выгоды.

1. Выгода от снижения брака (BV). При текущем проценте брака 5% (500 м³) и стоимости утилизации 3 000 руб. за м³ щепа против средней цены пиломатериала первого сорта 18 000 руб. за м³, потеря ценности составляет 15 000 руб. на единицу. Снижение брака на 1% (200 м³) за счёт точной классификации даёт экономию:

$$BV=200 \times (18\,000 - 3\,000) = 3\,000\,000 \text{ рублей.}$$

В базовой модели использовано консервативное значение 3 млн руб. для учёта вероятностных факторов.

2. Выгода от производительности и труда (PV). Сокращение штата сортировщиков с 4 до 1 человека при годовой стоимости труда 800 000 руб. на сотрудника даёт экономию 2,4 млн. руб. Дополнительный доход от увеличения объёма продукции при цене 1 500 руб. за погонный метр и приросте 100 тыс. м³ составляет 150 млн руб. $PV=2\,400\,000+150\,000\,000=152\,400\,000$ рублей.

3. Выгода от улучшения качества (QV). Смещение 5% продукции из второго сорта (16000 руб./м³) в первый (18 000 руб./м³) при объеме 10 000 м³ даёт: $QV=(10\,000\times0,05)\times(18\,000-16\,000)=1\,000\,000$ рублей.

Итоговая чистая годовая выгода:

$$NAB=BV+PV+QV=3\,000\,000+152\,400\,000+1\,000\,000=156\,400\,000 \text{ рублей}$$

или ~1,84 млн долларов США по курсу 85 руб./\$.

Для оценки инвестиционной привлекательности упрощённо рассчитан чистый дисконтированный доход за первый год при двух сценариях стоимости оборудования, табл. 3.

Таблица 3 – Сценарии окупаемости инвестиций (в рублях)

Сценарий	Стоимость системы (CAPEX), млн. руб.	Годовая выгода (NAB), млн. руб.	NPV (1 год), млн. руб.	Статус
Оптимистичный	10	156,4	+146,4	Целесообразно
Реалистичный	25	156,4	+131,4	Целесообразно
Консервативный	50	156,4	+106,4	Окупается >1 года

Данные таблицы демонстрируют, что даже при реалистичной стоимости оборудования в 25 млн. рублей инвестиции окупаются в течение первого года с существенным положительным финансовым результатом.

Полученные результаты подтверждают гипотезу о высокой экономической эффективности внедрения систем оптической сортировки в условиях российского рынка. Наибольший вклад в годовую выгоду в рассмотренном примере вносит косвенный эффект от роста производительности и сокращения труда, составляющий более 97% от общей выгоды. Это указывает на то, что основным драйвером является не столько экономия на браке, сколько способность линии работать быстрее и с меньшим количеством персонала.

По сравнению с традиционными методами контроля качества, автоматизированные системы обеспечивают неизменную и объективную оценку для каждой единицы продукции. Человеческий фактор неизбежно вносит субъективизм, тогда как алгоритмы на основе искусственного интеллекта достигают

точности более 95% [4]. Альтернативные решения, такие как простые цветковые сортировщики, не подходят для сложной деревообработки из-за недостаточной глубины анализа дефектов. Системы для горнодобывающей промышленности с ориентировочной стоимостью от 20-35 млн. руб. ближе по техническим требованиям, но требуют адаптации под специфику древесины [5].

Внедрение автоматизации не ограничивается лишь самим процессом сортировки. Подразумевается единый производственный комплекс, который может быть интегрирован с другими участками производства, такими как лесопилки и заводы по производству клееных изделий.

В ходе исследования была проведена оценка экономической эффективности внедрения систем оптической сортировки пиломатериалов с учётом российских рыночных цен. Экономический эффект достигается за счёт синергии трёх ключевых факторов: снижения явных потерь от брака, значительного роста производительности и сокращения трудозатрат, а также максимизации ценности конечной продукции за счёт более точной классификации.

Перспективы дальнейших исследований могут быть связаны с изучением возможностей интеграции систем сортировки пиломатериалов с платформами ИИ.

Список литературы

1. Woodworking Machinery Market Size, Share & 2030 Growth Trends. Mordor Intelligence. – URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/woodworking-machinery-market> (дата обращения: 14.03.2026).
2. Annual Report 2024. Stora Enso. – URL: https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/documents/annual-reports/2024/storaenso_annual_report_2024.pdf (дата обращения: 14.03.2026).
3. Forest Products Annual Market Review 2023–2024. UNECE. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2024-11/2413966E_FPAMR24_WEB.pdf (дата обращения: 14.03.2026).
4. Scalable AI-driven automation for visual lumber grading. ScienceDirect. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652625023431> (дата обращения: 14.03.2026).
5. Sensor-Based Ore Sorting Technology in Mining. MDPI. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/9/523> (дата обращения: 14.03.2026).

6. Digital Transformation of the Wood Industry. ResearchGate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/390558789_Digital_Transformation_of_the_Wood_Industry (дата обращения: 14.03.2026).

References

1. Woodworking Machinery Market Size, Share & 2030 Growth Trends. Mordor Intelligence. – URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/woodworking-machinery-market> (дата обращения: 14.03.2026).

2. Annual Report 2024. Stora Enso. – URL: https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/documents/annual-reports/2024/storaenso_annual_report_2024.pdf (дата обращения: 14.03.2026).

3. Forest Products Annual Market Review 2023–2024. UNECE. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2024-11/2413966E_FPAMR24_WEB.pdf (дата обращения: 14.03.2026).

4. Scalable AI-driven automation for visual lumber grading. ScienceDirect. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652625023431> (дата обращения: 14.03.2026).

5. Sensor-Based Ore Sorting Technology in Mining. MDPI. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/9/523> (дата обращения: 14.03.2026).

6. Digital Transformation of the Wood Industry. ResearchGate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/390558789_Digital_Transformation_of_the_Wood_Industry (дата обращения: 14.03.2026).

**РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОЗДАНИЮ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ
СМЕШИВАНИЯ ДРЕВЕСНОЙ СТРУЖКИ СО СВЯЗУЮЩИМ
НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS FOR CREATING AN
AUTOMATED SYSTEM FOR CONTROLLING THE MIXING PROCESS OF
WOOD CHIPS WITH A BINDER BASED ON NON-DESTRUCTIVE
CONTROL METHODS**

Мещерякова А.А., к.т.н., доцент
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»,

г. Воронеж, Россия

Meshcheryakova A.A., CSc (Engineering), Associate Professor
Voronezh State University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы совершенствования методики контроля и автоматизации процесса смешивания древесной стружки со связующим при производстве древесных плит (ДСтП, OSB, MDF). Проанализированы недостатки традиционных гравиметрических и химических методов контроля, а также систем управления на основе фиксированных временных циклов. Предложено внедрение автоматизированной системы управления (АСУ) смесителем непрерывного действия с использованием прогнозирующей модели (MPC).

Abstract: The article discusses the improvement of the control methodology and automation of the process of mixing wood chips with a binder in the production of wood panels (DSP, OSB, MDF). The disadvantages of traditional gravimetric and chemical control methods, as well as control systems based on fixed time cycles, are analyzed. The implementation of an automated control system (ACS) for a continuous mixer using a predictive model (MPC) is proposed.

Ключевые слова: смешивание стружки, связующее, контроль качества, машинное зрение, автоматизированная система управления.

Keywords: mixing of shavings, binder, quality control, machine vision, and an automated control system.

Целью работы являлась разработка научно обоснованных рекомендаций по совершенствованию методики контроля и созданию концепции автоматизированной системы управления процессом. В ходе исследования систематизированы существующие критерии оценки качества смеси (коэффициент неоднородности, методы последовательного анализа), проанализированы методы отбора проб и инструментального анализа. Выявлены недостатки традиционных гравиметрических и химических методов, такие как трудоемкость, низкая оперативность и разрушающий характер.

В качестве основного направления совершенствования предложен переход к неразрушающим, быстрым методам анализа на основе спектроскопии в ближней инфракрасной области (БИК-спектроскопии) и машинного зрения. Разработанная структурно-функциональная схема автоматизированной системы управления (АСУ) смесителем непрерывного действия, реализующая принцип управления с прогнозирующей моделью (МРС) интегрирует данные с датчиков расхода сырья, БИК-анализатора и камер машинного зрения для непрерывной оценки однородности и динамической коррекции параметров дозирования и перемешивания в реальном времени.

При производстве древесно-стружечных плит на основе карбамидоформальдегидной или фенолоформальдегидной смолы одним из наиболее сложным участком является смешивание стружечной массы со связующим. Сложность процесса заключается в получении однородной стружечной массы, что сильно влияет на физико-механические свойства готовой плиты. При малом содержании связующего получаем не плотную плиту, имеющую низкие механические свойства. Избыток связующего приводит к неравномерному распределению его на стружке, что также снижает прочностные характеристики древесно-стружечной плиты. В данной области проведено большое количество исследований (например, в работах Макарова Ю.И.), но несмотря на это полностью решить вопрос равномерного распределения связующего по стружке еще не добились из-за сложности контроля данного процесса.

Используемые методы контроля не позволяют оценить распределение связующего по стружке в реальном времени, с учетом различных внешних по-

казателей – качество стружки, породный состав, влажность стружки, качество связующего с учетом используемых материалов (смола, отвердитель, добавки), жизнеспособность связующего, вязкость связующего (смолы). Контроль качества осуществляется выборочно, с помощью трудоемких и медленных лабораторных методов, что приводит к запаздыванию управляющих воздействий и возможному выпуску некондиционного полуфабриката.

Процесс смешивания является механо-химическим, так как сочетает механическое распределение связующего по поверхности твердых частиц с начальными стадиями физико-химического взаимодействия (смачивание, адгезия). Его можно охарактеризовать как пространственное перемещение макрочастиц стружки и микрокапель связующего с целью получения статистически однородной по составу среды.

В отличие от смешения однородных сыпучих материалов, здесь присутствуют две разнородные фазы. Первая твердая фаза состоит из древесной стружки. Данная фаза неоднородна по составу, имеются разные породные составы в стружке, размер стружки разнообразен и зависит от качества сырья и характеристик режущего инструмента, плотность стружки отличается друг от друга и зависит от места расположения в сырье, также разные гигроскопичность и анизотропия свойств древесной стружки. Вторая жидкая фаза состоит из связующего (в зависимости от вида древесно-стружечных плит используется в производстве разная смола), отвердителя и различных добавок повышающих качество плиты. Вязкость смолы важный показатель при смешивании связующего. Она влияет на жизнеспособность связующего, а при повышении температуры в плитах пресса уменьшает время полимеризации, что приводит к получению древесно-стружечных плит низкой прочностью.

В процессе смешивания двух фаз (стружки и связующего) в смесителе происходит несколько сложных процессов. Конвективное смешивание заключается в перемешивании стружки со связующим и перераспределением полученной смеси равномерно по всему объему смесительного барабана. Чем лучше и равномернее произойдет конвективное смешивание, тем более однородную клеевую массу получим на выходе из смесительного барабана.

Диффузионное смешивание заключается в проникновении на микроуровне связующего в стружку. Это происходит за счет равномерного распределения связующего по всем частицам, при перемешивании в барабане две фазы между собой хаотично движутся, происходит трение и смачивание между фазами. Если связующее неравномерно распределиться по древесной стружке, то

можем получить при прессовании древесно-стружечных плит голодный клеевой шов (плита будет рассыпаться). Если связующего будет много, то получим плиту низкого качества, так как будет перерасход связующего, увеличится количество токсичных веществ выделяемых при прессовании, прочность древесно-стружечных плит снизится.

В процессе смешивания можем получить расслоение древесных частиц. Это происходит из-за разного качества полученной древесной стружки (порода, размер, фракция, влажность), а так же перераспределения связующего на поверхности стружки (неравномерное нанесение на стружку). Расслоение древесных частиц приводит к резкому ухудшению качества древесно-стружечных плит.

Для получения качественной клеевой массы надо соблюдать несколько требований. Всегда проверять соотношение компонентов связующего к стружке, не допускать перерасход любого из компонентов. Обязательно в процессе производства древесной стружки следить за ее качеством, стараться не допускать получения мелкой фракции, что приводит к увеличению расхода связующего. Но и получение очень крупной стружки приводит к получению древесной массы с неравномерным нанесением связующего.

Не допускается использовать связующее на основе смолы с высокой/низкой вязкостью. Перед использованием новой партии смолы надо проверять ее на жизнеспособность и строго следовать рекомендациям по ее использованию.

В процессе смешивания связующего и древесной стружки необходимо правильно выбирать технологические режимы смесителя – скорость вращения барабана, температура в смесителе, время смешивания в барабанном смесителе, а так же температура и влажность в помещении.

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки научно обоснованных методов управления процессом смешивания, которые позволят уйти от эмпирического управления процессом смешивания. Использование современных технологий автоматизации, методов неразрушающего контроля и интеллектуальных систем управления позволит достичь оптимальности между качеством получаемой стружечной смеси и ресурсосбережением материалов при производстве древесно-стружечных плит, что даст конкурентные преимущества для деревоперерабатывающих предприятий.

Список литературы

1. Андрианов, Е. И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов / Е. И. Андрианов. – М.: Химия, 1982. – 256 с.
2. Шубин, И. Н. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства: учеб. пособие / И. Н. Шубин, М. М. Свиридов, В. П. Таров. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 76 с.
3. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов. – М.: Наука, 1985. – 440 с.
4. Свиридов, М. М. К вопросам определения работы на процесс смешивания сыпучих компонентов / М. М. Свиридов, И. Н. Шубин // Труды ТГТУ. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2001. – Вып. 8. – С. 77 – 81.

Reference

1. Andrianov, E. I. Methods of Determining the Structural and Mechanical Characteristics of Powdered Materials / E. I. Andrianov. – Moscow: Khimiya, 1982. – 256 p.
2. Shubin, I. N. Technological Machines and Equipment. Bulk Materials and Their Properties: Textbook / I. N. Shubin, M. M. Sviridov, V. P. Tarov. – Tambov: Tambov State Technical University, 2005. – 76 p.
3. Kafarov, V. V. System Analysis of Chemical Technology Processes. Processes of Grinding and Mixing Bulk Materials / V. V. Kafarov, I. N. Dorokhov, S. Yu. Arutyunov. – Moscow: Nauka, 1985. – 440 p.
4. Sviridov, M. M. On the issues of determining the work on the process of mixing bulk components / M. M. Sviridov, I. N. Shubin // Proceedings of TSTU. – Tambov: Tambov State Technical University. – 2001. – Issue 8. – Pp. 77 – 81.

**УПРАВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЯМИ ДРЕВЕСИНЫ
ПРИ ЧПУ-ОБРАБОТКЕ: КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД НА ОСНОВЕ
СТАБИЛИЗАЦИИ ВЛАЖНОСТИ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ
КОМПЕНСАЦИИ**

**DEFORMATION MANAGEMENT IN WOOD CNC PROCESSING:
AN INTEGRATED APPROACH BASED ON MOISTURE STABILIZATION
AND ALGORITHMIC COMPENSATION**

**Михута Я.А., студент,
Писарева С.В., к.ф.-м.н., доцент**
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия
shcherbakovaiv@vglta.vrn.ru

Mihuta Y.A., student

Pisareva S.V., CSc (Physics and Mathematics), Associate Professor
Voronezh State University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Аннотация: Гигроскопичность древесины вызывает анизотропные деформации при изменении влажности, что критически снижает геометрическую точность раскроя на станках с ЧПУ. Предложен комплексный метод, сочетающий предварительную стабилизацию влажности заготовок и программную компенсацию усадки в управляющем коде. Качественный и количественный анализ зависимости размеров от влажности с учётом анизотропии, нелинейности и пороговых эффектов; разработка алгоритма расчёта поправочных коэффициентов для каждой оси станка. Для цедрелы душистой (*Cedrela odorata*) установлены коэффициенты усадки 0,0342% тангенциальное и 0,0263% радиальное направление; для ели европейской (*Picea abies*) значения варьируются от 0,0320 до 0,0542 % в зависимости от зрелости древесины. Внедрение поправок позволяет снизить систематическую погрешность размеров на 1,5-2,6 % в целевом диапазоне влажности 6-14 %. Синергия пассивных мер стабилизации и ак-

тивной алгоритмической компенсации обеспечивает долгосрочную геометрическую стабильность изделий и повышает эффективность ЧПУ-производства.

Abstract: Wood hygroscopicity induces anisotropic dimensional changes under humidity fluctuations, critically compromising CNC cutting precision. Solution: We propose an integrated method combining pre-stabilization of workpiece moisture content with algorithmic shrinkage compensation in CNC control code. Qualitative and quantitative analysis of dimensional dependence on moisture content, accounting for anisotropy, non-linearity, and threshold effects; development of an algorithm for calculating axis-specific compensation coefficients. For *Cedrela odorata*, shrinkage coefficients of 0.0342 % tangential and 0.0263 % radial were established; for Norway spruce (*Picea abies*), values range from 0.0320 to 0.0542 % depending on wood maturity. Implementation of corrections reduces systematic dimensional error by 1.5-2.6 % within the target moisture range of 6-14%. Synergy of passive stabilization measures and active algorithmic compensation ensures long-term geometric stability of wood products and enhances CNC manufacturing efficiency.

Ключевые слова: деформация древесины, стабилизация влажности, ЧПУ-обработка, алгоритмическая компенсация.

Keywords: wood deformation, moisture stabilization, CNC processing, and algorithmic compensation.

Цифровизация промышленного производства, включая внедрение технологий Индустрии 4.0 и промышленного интернета вещей (IIoT), лежит в основе повышения точности и эффективности обработки конструкционных материалов [1]. Однако в деревообрабатывающей промышленности решение данной задачи остается весьма сложным, поскольку природная гигроскопичность древесины обуславливает нестабильность геометрических параметров заготовок при изменении влажности окружающей среды. Это приводит к систематическим погрешностям при раскрое древесины на станках с числовым программным управлением [2].

Несмотря на то, что современные станки с числовым программным управлением (ЧПУ-системы) обеспечивают высокую кинематическую точность позиционирования инструмента, они не способны учитывать физико-химические свойства обрабатываемого материала. Такая изолированность «информационного острова» системы управления станком от данных о состоянии сырья, неизбежно ведет к снижению общей эффективности технологического процесса деревообработки [3].

Целью исследования является разработка комплексного метода повышения точности ЧПУ-раскроя древесины за счёт интеграции данных о влажности материала в алгоритмы управления станком. Гипотеза решения состоит в том, что точность ЧПУ-обработки древесины может быть существенно повышена при условии синхронизации данных о физическом состоянии материала с алгоритмами управления станком, реализуемой через многоуровневую систему сбора, обработки и компенсации.

Методология исследования базировалась на сравнительном анализе литературных данных по физике древесины [4], стандартизированных методиках измерения влажности ISO 13061-1:2014, EN 13183-1 и моделировании процесса усадки в диапазоне эксплуатационных влажностей 6-20 %[5-6].

Алгоритм работы системы компенсации включает следующие этапы:

- Измерение, когда оператор проводит замеры влажности в нескольких контрольных точках заготовки с использованием калиброванного электронного влагомера.
- Идентификация, когда в интерфейсе ЧПУ выбирается порода древесины и ориентация волокон относительно осей станка тангенциальное или радиальное направление.
- Расчёт, когда система обращается к локальной базе данных коэффициентов усадки и вычисляет поправочные множители по формуле:

$$L_{cut} = \frac{L_{projected}}{1 - k \times \Delta MC},$$

где $L_{projected}$ – проектный размер, k – коэффициент усадки для данного направления, $\Delta MC = MC_{initial} - MC_{final}$ – разница между начальной и конечной влажностью.

Протокол обмена данными между влагомером и ЧПУ-контроллером реализован на базе Modbus TCP как наиболее распространённого промышленного стандарта, обеспечивающего интероперабельность оборудования различных производителей. База данных коэффициентов усадки хранится в формате SQLite для обеспечения быстрого доступа и лёгкой интеграции с существующими САМ-системами.

Архитектура системы включает три уровня:

1. ОТ-уровень: датчики влажности, ЧПУ-контроллер, исполнительные механизмы станка;
2. Сетевой уровень: шлюз Modbus TCP/Ethernet для передачи данных;

3. IT-уровень: сервер базы данных, интерфейс оператора, модуль аналитики.

Для минимизации влияния шумов измерений применяется скользящее среднее с окном 5 отсчётов; при обнаружении градиента влажности $>2\%$ между точками заготовки система генерирует предупреждение о риске неравномерной деформации.

В таблице 1 представлены данные об особенностях усадки древесины для различных пород и направлений.

Таблица 1 – Зависимость коэффициента усадки древесины от породы дерева

Порода деревьев	Начальная влажность, %	Конечная влажность, %	Усадка, %	Коэффициент, %/%
Кубинский кедр	76	12	2,6	0,0342
Ель обыкновенная (зрелая)	72	17	3,9	0,0542
Ель обыкновенная (молодая)	72	17	2,3	0,032

Данные таблицы 1 показывают существенную зависимость коэффициентов усадки древесины даже в пределах одной породы деревьев, что подтверждает необходимость корректировки алгоритма управления станком с ЧПУ при обработке различных пород древесины с учетом влажности сырья.

В ходе эксперимента проведено моделирование работы станка с ЧПУ с применением разработанного метода интеграции данных о влажности материала в алгоритмы управления станком. В результате раскроя детали из кубинского кедра длиной 1000 мм при изменении влажности с 18% до 9% удалось снизить погрешность с 26 мм до 0,5 мм.

Проведённое исследование позволяет сделать вывод о том, что интеграция данных о влажности древесины в алгоритмы управления ЧПУ-станком значительно повышает точность раскроя древесины.

Список литературы

1. Шеховцов, В. В. Цифровая трансформация деревообрабатывающей промышленности: вызовы и возможности / В. В. Шеховцов, А. С. Петров // Промышленная автоматизация. – 2024. – Т. 18, № 3. – С. 45-59. – URL: <https://auto-industry.ru/article/2024/3/45> (дата обращения: 10.03.2026).

2. Thibaut M. Hygro-mechanical behavior of wood: from cellular scale to structural applications: thesis. Grenoble: Université Grenoble Alpes, 2020. 215 p. URL: <https://theses.hal.science/tel-02570560> (дата обращения: 10.03.2026).

3. Иванов, Д. Н. Интероперабельность в Индустрии 4.0: протоколы и архитектурные паттерны для промышленных систем / Д. Н. Иванов, Е. П. Смирнова // Автоматизация в промышленности. – 2025. – № 1. – С. 12-24.

4. Derome D., et al. Shrinkage processes in standard-size Norway spruce wood: a multi-scale analysis // Scientific Reports. 2021. Vol. 11, Art. 18456. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3196842/> (дата обращения: 10.03.2026).

5. ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. Geneva: ISO, 2014. URL: <https://www.iso.org/standard/60063.html> (дата обращения: 10.03.2026).

6. EN 13183-1:2002. Moisture content of a piece of sawn timber. Part 1: Determination by oven dry method. Brussels: CEN, 2002.

Reference

1. Shekhovtsov V.V., Petrov A.S. Digital Transformation of the Woodworking Industry: Challenges and Opportunities // Industrial Automation. 2024. Vol. 18, No. 3. Pp. 45-59. URL: <https://auto-industry.ru/article/2024/3/45> (accessed: 10.03.2026).

2. Thibaut M. Hygro-mechanical behavior of wood: from cellular scale to structural applications: thesis. Grenoble: Université Grenoble Alpes, 2020. 215 p. URL: <https://theses.hal.science/tel-02570560> (accessed: 10.03.2026).

3. Ivanov D.N., Smirnova E.P. Interoperability in Industry 4.0: Protocols and Architectural Patterns for Industrial Systems // Automation in Industry. 2025. No. 1. Pp. 12-24.

4. Derome D., et al. Shrinkage processes in standard-size Norway spruce wood: a multi-scale analysis // Scientific Reports. 2021. Vol. 11, Art. 18456. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3196842/> (дата обращения: 10.03.2026).

5. ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. Geneva: ISO, 2014. URL: <https://www.iso.org/standard/60063.html> (дата обращения: 10.03.2026).

6. EN 13183-1:2002. Moisture content of a piece of sawn timber. Part 1: Determination by oven dry method. Brussels: CEN, 2002.

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ
RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AUTOMATED
CONTROL SYSTEMS FOR TECHNOLOGICAL PROCESSES OF THE GAS
DISTRIBUTION STATION**

Очеретяный А.С., студент

Грибанов А.А., к.т.н., доцент

Мещерякова А.А., к.т.н., доцент

**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»**

г. Воронеж, Россия

vgltaapp@mail.ru

Ocheretyany A.S., Student

Gribanov A.A., PhD (Engineering), Associate professor

Meshcheryakova A.A., CSc (Engineering), Associate Professor

**Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia**

Аннотация: В данной статье представлены результаты исследования и разработки автоматизированной системы управления технологическими процессами газораспределительной станции. Рассмотрены основные технологические параметры, подлежащие автоматизации, предложена структура системы управления на базе программируемого логического контроллера. Разработана математическая модель процесса редуцирования газа и синтезирован регулятор давления. Приведены результаты моделирования в среде MATLAB, подтверждающие эффективность предложенных решений.

Abstract: This article presents the results of research and development of an automated process control system for a gas distribution station. The main technological parameters subject to automation are considered, and a control system structure based on a programmable logic controller is proposed. A mathematical model of the gas pressure reduction process has been developed, and a pressure controller has been

synthesized. The results of simulation in the MATLAB environment are presented, confirming the effectiveness of the proposed solutions.

Ключевые слова: газораспределительная станция, автоматизированная система управления, технологический процесс, регулятор давления, математическое моделирование.

Keywords: gas distribution station, automated control system, technological process, pressure regulator, mathematical modeling.

Газораспределительные станции являются важнейшими объектами транспортной инфраструктуры газовой отрасли. Основное назначение ГРС заключается в снижении давления природного газа до уровня, необходимого для распределения потребителям, а также в учёте количества поставляемого газа. Надёжность и безопасность функционирования ГРС напрямую зависят от качества автоматизации технологических процессов [1].

В условиях современного развития промышленности предъявляются повышенные требования к точности регулирования параметров газа, энергоэффективности и уровню безопасности ГРС. Традиционные системы управления, построенные на аналоговой элементной базе, не всегда обеспечивают требуемые показатели качества регулирования. В связи с этим актуальной задачей является разработка современных автоматизированных систем управления на базе микропроцессорной техники [2].

Целью данной работы является исследование и разработка автоматизированной системы управления технологическими процессами ГРС, обеспечивающей стабильное поддержание выходного давления газа в заданных пределах при изменении входных параметров и расхода.

Типовая газораспределительная станция включает несколько основных технологических узлов, обеспечивающих подготовку и редуцирование газа [3]. Узел очистки газа предназначен для удаления механических примесей из газового потока, что необходимо для защиты downstream-оборудования от абразивного износа. Узел подогрева газа обеспечивает предотвращение гидратообразования при редуцировании давления, поскольку при дросселировании газа происходит его охлаждение согласно эффекту Джоуля-Томсона. Узел редуцирования представляет собой основной технологический узел, где осуществляется снижение давления газа с высокого на среднее или низкое. Узел учёта газа предназначен для коммерческого учёта количества газа, передаваемого потребителям. Система безопасности включает запорную арматуру и системы ава-

рийного отключения, срабатывающие при выходе контролируемых параметров за допустимые пределы.

В процессе функционирования ГРС подлежат контролю и регулированию несколько ключевых параметров, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Контролируемые и регулируемые параметры ГРС

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Диапазон значений
Входное давление	$P_{\text{вх}}$	МПа	1,2–7,5
Выходное давление	$P_{\text{вых}}$	МПа	0,003–1,2
Расход газа	Q	м ³ /ч	0–50000
Температура газа до подогрева	T_1	°С	–40–+40
Температура газа после подогрева	T_2	°С	+5–+40

Основным регулируемым параметром является выходное давление газа $P_{\text{вых}}$, которое должно поддерживаться с точностью $\pm 5\%$ от заданного значения независимо от колебаний входного давления и расхода.

Математическое моделирование технологического процесса редуцирования газа базируется на фундаментальных законах сохранения массы и энергии. Динамика изменения давления в трубопроводе описывается нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных. Однако для задач синтеза системы управления целесообразно использовать линеаризованную модель в окрестности рабочей точки. Газопровод после регулятора давления рассматривается как емкость с распределенными параметрами, которая аппроксимируется сосредоточенными параметрами второго порядка в зависимости от длины участка и скорости распространения волны давления. В данном исследовании нами принята модель второго порядка с запаздыванием, что наиболее точно отражает инерционные свойства реального объекта при переходных процессах. Передаточная функция объекта регулирования по каналу «положение клапана – выходное давление» имеет вид:

$$W_{\text{об}}(s) = \frac{K_{\text{об}}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \cdot e^{-\tau s},$$

где $K_{\text{об}}$ – коэффициент усиления (статическая чувствительность системы к изменению положения регулирующего органа); T_1, T_2 – постоянные времени,

обусловленные объёмом трубопроводов и ёмкостью резервуаров; τ – время запаздывания (время транспортировки газа от клапана до точки измерения давления). Типовая ГРС имеет следующие значения параметров: $K_{об} = 0,85$ МПа/%, $T_1 = 15$ с, $T_2 = 45$ с, $\tau = 5$ с.

Отметим, что возмущающее воздействие на систему оказывается со стороны входного давления в магистральном газопроводе и изменения расхода газа потребителями.

Для управления процессом редуцирования будем использовать ПИД-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{\text{рег}}(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right),$$

где K_p – коэффициент усиления регулятора; T_i – время интегрирования; T_d – время дифференцирования. Настройка параметров регулятора была выполнена методом Циглера-Никольса с последующей коррекцией для обеспечения робастности системы. В результате нами получены следующие значения настроек ПИД-регулятора: $K_p = 2,4$, $T_i = 35$ с, $T_d = 8$ с.

В среде MATLAB было проведено математическое моделирование переходных процессов для оценки их качества. В результате получили переходную характеристику, приведенную на рисунке 1.

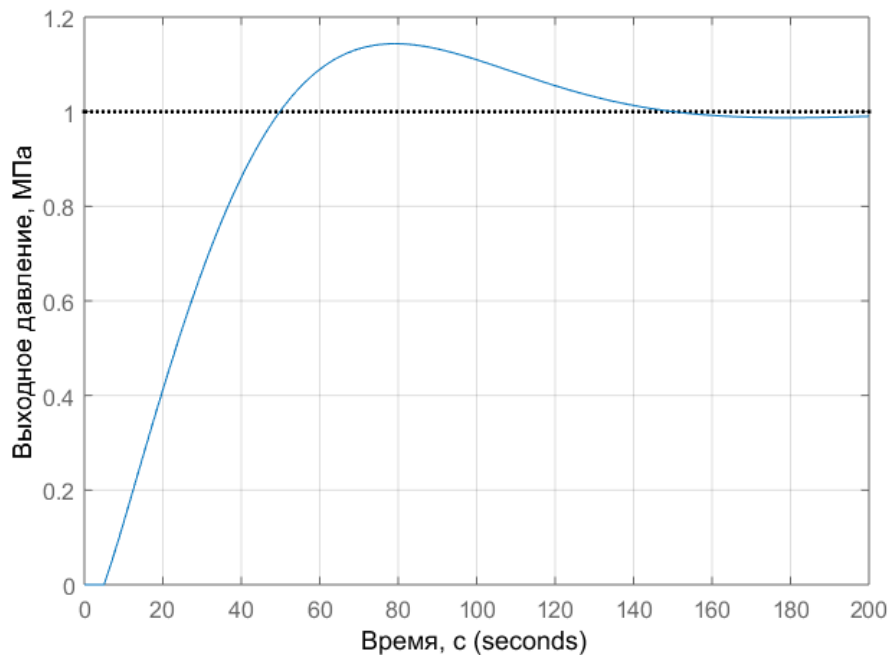


Рисунок 1 – Переходная характеристика АСР по давлению

Процесс моделирования ситуации изменения давления в газопроводе показан на рисунке 2.

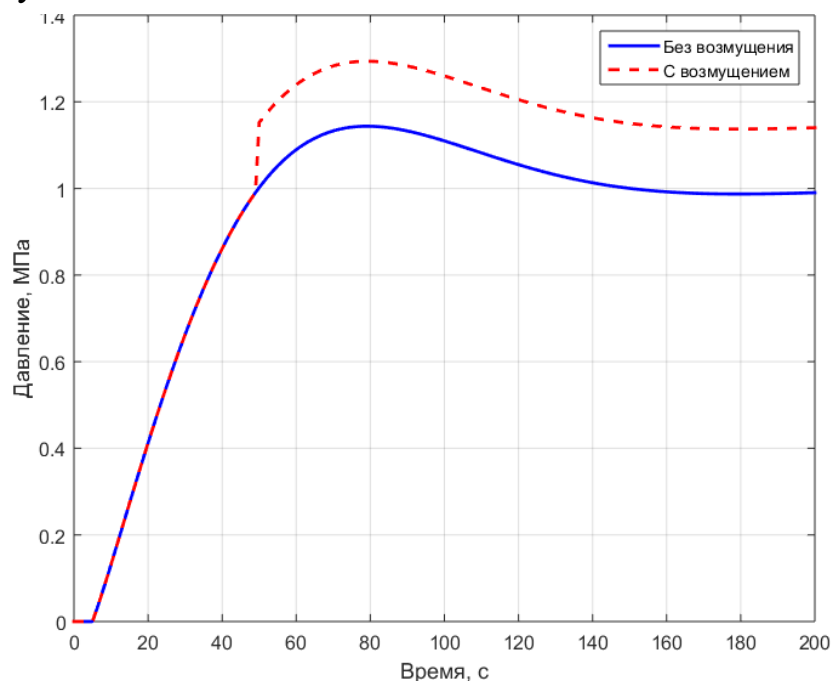


Рисунок 2 – Реакция АСР на возмущение по входному давлению

В таблице 2 приведены полученные показатели качества регулирования давления в магистрали.

Таблица 2 – Показатели качества регулирования

Показатель	Значение	Требование
Время регулирования	140 с	≤ 160 с
Перерегулирование	8 %	≤ 15 %
Статическая ошибка	0 %	0 %
Запас устойчивости по фазе	42°	$\geq 25^\circ$

В целом, проведенные исследования и результаты математического моделирования подтверждают соответствие требуемому качеству регулирования давления в магистрали.

Список литературы

1. Бабырь, А. Ю. Актуальные проблемы организации работы на газораспределительных станциях и способы их решения на примере газораспределительной станции "Лебяжье" / А. Ю. Бабырь // Проблемы разработки месторож-

дений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2020. – Т. 2. – С. 136-143.

2. Буренкова, Е. И. Обоснование выбора систем автоматизированного управления на примере газораспределительной станции АО "Мособлгаз" / Е. И. Буренкова // Инновации. Наука. Образование. – 2020. – № 22. – С. 478-484.

3. Пищулин, Д. А. Использование современных систем автоматизации на газораспределительных станциях / Д. А. Пищулин // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоэнергоснабжения. – 2025. – № 1(11). – С. 19-27.

References

1. Babyr A. Yu. Actual problems of organizing work at gas distribution stations and ways to solve them on the example of the gas distribution station "Lebyazhye". Problems of Development of Hydrocarbon and Ore Mineral Deposits, 2020, Vol. 2, pp. 136-143.

2. Burenkova E. I. Justification of the choice of automated control systems on the example of the gas distribution station of JSC "Mosoblgaz". Innovations. Science. Education, 2020, No. 22, pp. 478-484.

3. Pishchulin D. A. The use of modern automation systems at gas distribution stations. Scientific and Technical Problems of Improvement and Development of Gas and Energy Supply Systems, 2025, No. 1(11), pp. 19-27.

**КРИТЕРИИ ВЫБОРА ДАТЧИКА УРОВНЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СРЕД
И УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**
**CRITERIA FOR SELECTING LEVEL SENSORS FOR VARIOUS MEDIA
AND OPERATING CONDITIONS**

Ряполова Т.В., студент

Иванов С.А., к.т.н., доцент

**Лобанов Д.В., старший преподаватель ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический университет»**

г. Воронеж, Россия

Поляков С.И., к.т.н., доцент

**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»**

г. Воронеж, Россия

Сидоркин О.А., к.т.н., доцент

**ВУНЦ ВВС "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина"**

г. Воронеж, Россия

Ryapolova T.V., Student

Ivanov S. A., Senior Lecturer

Lobanov D.V., Senior Lecturer

FSBEI HE "Voronezh State Technical University"

Voronezh, Russian Federation

Polyakov S.I., PhD (Engineering), Associate professor

**Voronezh State University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov,**

Voronezh, Russia

Sidorkin O.A., PhD (Engineering), Associate professor

**Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy
named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin"**

Voronezh, Russian Federation

Аннотация: В статье рассмотрены различные типы датчиков уровня и критерии их выбора для различных сред и условий эксплуатации

Abstract: This article examines various types of level sensors and the criteria for their selection for different media and operating conditions.

Ключевые слова: датчики уровня, сигнализаторы уровня, рабочая среда, уровень материала, условия эксплуатации.

Keywords: level sensors, level switches, working medium, material level, operating conditions.

В современных промышленных процессах, связанных с использованием резервуаров, баков и иных ёмкостей, важной задачей является контроль уровня хранимых веществ. Это необходимо как для обеспечения непрерывности технологического процесса, так и для предотвращения аварийных ситуаций, связанных с переполнением или опустошением ёмкостей.

Для решения данной задачи применяются датчики уровня, условно подразделяющиеся на два основных типа: сигнализаторы уровня и уровнемеры. Несмотря на кажущуюся схожесть, данные устройства выполняют различные функции. Сигнализаторы предназначены для фиксации достижения заданного уровня (например, максимального или минимального), тогда как уровнемеры предоставляют информацию о том, на какой отметке находится продукт в данный момент.

Разнообразие существующих принципов измерения и измеряемых сред не позволяет выделить универсальное решение. Выбор конкретного типа датчика определяется условиями эксплуатации и характеристиками контролируемой среды.

При выборе датчика уровня необходимо учитывать ряд факторов, определяющих его эффективность в рамках конкретных условий эксплуатации. Прежде всего следует определить агрегатное состояние измеряемого вещества: жидкость, сыпучий материал или пастообразная среда, а также пылящая и непылящая, парящая и не парящая среда. Для жидкостей дополнительным фактором является наличие пены, которая может существенно влиять на точность измерений и параметры электропроводности среды и резервуара.

С точки зрения взаимодействия с измеряемой средой датчики подразделяются на контактные и бесконтактные. Бесконтактные методы предпочтительны при работе с агрессивными, токсичными, высокотемпературными, вязкими и липучими или стерильными средами, поскольку исключают прямой контакт с

продуктом и, соответственно, риск его загрязнения. Также бесконтактные датчики используют для измерения уровня сыпучих сред, так как при сильном потоке подачи материала есть вероятность вырвать сам датчик.

Ключевым параметром является диапазон измерения, который должен соответствовать геометрическим параметрам резервуара и способу установки датчика. Также необходимо учитывать рабочие условия, такие как температура, давление и прочие параметры условий эксплуатации, поскольку они могут существенно влиять на работоспособность.

Не менее важным является тип выходного сигнала датчика. Он должен быть совместим с используемой системой автоматизации и может быть релейным, аналоговым или цифровым, а также включать дополнительные функции, например, индикацию, помехозащищённость, самодиагностику, защиту от короткого замыкания, переполюсовки и т.п.

Для стандартизации проектирования и корректного отражения этих функций в технической документации обозначения датчиков уровня на схемах автоматизации выполняются по ГОСТ 21.208-2013. В соответствии с ним базовая буква «L» (Level) обозначает контроль уровня, а сопутствующие символы указывают на характер работы прибора: к примеру, «LI» служит для обозначения непрерывных уровнемеров с индикацией, а «LSA» – для сигнализаторов критических отметок с функцией автоматической защиты или оповещения.

Рассмотрение типов датчиков начнем с кондуктометрических датчиков, показанных на рисунке 1, предназначенных для контроля уровня электропроводящих сред: воды, пищевых продуктов, а также растворов кислот и щелочей. Конструктивное исполнение такой системы измерения зависит от материала резервуара. В металлических емкостях роль общего электрода может выполнять сама стенка, тогда как в резервуарах из диэлектрических материалов требуется установка дополнительного электрода.



Рис. 1 – Внешний вид кондуктометрического датчика

Принцип их действия основан на различии электрической проводимости воздуха и жидкости. В случае использования неэлектропроводящего резервуара используются два электрода: общий и сигнальный. При достижении жидкостью уровня сигнального электрода происходит скачкообразное изменение сопротивления, что фиксируется регулятором уровня жидкости. Данный вид датчиков уровня имеет релейный выход.

Основными преимуществами являются простота конструкции, принципа действия и надёжность, однако область применения ограничена только электропроводящими и не имеющими налипающих на электроды частиц средами.

Поплавковые датчики представляют собой один из наиболее простых и распространённых способов измерения уровня жидкости. Пример внешнего вида такого датчика изображён на рисунке 2. Их работа основана на перемещении поплавка вдоль направляющей оси в зависимости от изменения уровня жидкости.



Рис. 2 – Внешний вид поплавкового датчика уровня

Положение поплавка фиксируется и преобразуется в измерительный сигнал. Такие датчики отличаются высокой точностью и устойчивостью к изменениям вязкости жидкости, а также наличию пены и пара.

Тем не менее их выходной сигнал может быть ошибочным при наличии волн или турбулентности на поверхности жидкости. Кроме того, диапазон измерения ограничен длиной направляющей, что обычно не превышает одного метра. Также они не подходят для агрессивных сред, вызывающих коррозию и сред, имеющих налипающие на поверхность частицы. Данные датчики могут иметь цифровой или аналоговый выход.

Радарные датчики, представленные на рисунке 3, относятся к бесконтактным методам измерения и устанавливаются в верхней части резервуара. Они излучают радиоволновые (микроволновые) импульсы, которые отражаются от поверхности продукта и возвращаются обратно к приёмнику. Измеряя время

прохождения сигнала, система определяет расстояние до поверхности вещества, что позволяет вычислить уровень.



Рис. 3 – Внешний вид радарного датчика уровня

Основным преимуществом радарных датчиков является высокая точность и универсальность. Они могут использоваться для измерения уровня жидкостей, сыпучих и пастообразных материалов. При этом их работа практически не зависит от температуры, давления, плотности и других свойств среды.

Дополнительным преимуществом является отсутствие контакта с продуктом, что делает их пригодными для работы в агрессивных условиях, в средах, имеющих налипающие частицы и упрощает обслуживание.

Недостатки: не подходят для использования в пылящих, парящих, пенящихся средах.

Выходной сигнал данного типа датчика может представлять собой аналоговый либо же цифровой сигнал.

Ёмкостные датчики, представленные на рисунке 4, работают на основе изменения электрической ёмкости системы «датчик–среда». При изменении уровня вещества изменяется диэлектрическая проницаемость среды, что приводит к изменению ёмкости, фиксируемой измерительной системой.



Рис. 4— Внешний вид ёмкостных датчиков уровня

Данные датчики отличаются высокой прочностью и устойчивостью к экстремальным условиям, включая высокие температуры и давления. Они могут применяться для измерения уровня жидкостей, порошков и гранулированных материалов.

Кроме того, ёмкостные датчики работают с вязкими и налипающими средами, что делает их востребованными в химической и пищевой промышленности.

К недостаткам можно отнести повышенные требования к экранировке и особенности работы на высоких частотах.

Выходной сигнал такого датчика может быть как аналоговый, так и цифровой.

Ротационные (флажковые) сигнализаторы, изображенные на рисунке 5, предназначены для контроля уровня сыпучих продуктов, таких как зерно, песок, гранулы или порошки.



Рис. 5 – Внешний вид ротационных сигнализаторов уровня

Работа сигнализатора основана на вращении лопасти (флажка) с помощью микродвигателя. Пока уровень материала не достиг сигнализатора, лопасть свободно вращается. Как только продукт покрывает лопасть, вращение блокируется, что вызывает срабатывание сигнализатора и изменение выходного сигнала.

Сигнализаторы отличаются простотой конструкции и высокой надежностью. Они не чувствительны к пыли, электропроводности среды, диэлектрической проницаемости среды и налипанию материала.

Недостатком данного вида сигнализаторов является износ, из-за наличия движущихся механических частей. Такой сигнализатор не рекомендуется для использования с очень тяжелыми или высокоабразивными материалами, кото-

рые могут механически повредить лопасть. Датчики такого типа имеют релейный выход.

Вибрационные сигнализаторы («вибровилки»), представленные на рисунке 6, являются универсальными устройствами для определения уровня как жидкостей, так и зернистых сыпучих веществ.



Рис. 6 – Внешний вид вибрационных сигнализаторов уровня

Работа сигнализатора заключается в том, что чувствительный элемент в форме камертона вибрирует на определенной частоте под воздействием пьезоэлектрического кристалла. При контакте с измеряемой средой частота вибрации изменяется, что фиксируется электроникой и преобразуется в выходной сигнал.

Данные сигнализаторы довольно универсальны и компактны. Они подходят для работы в сложных условиях, при наличии пены, турбулентности или пузырьков газа в жидкости, а также имеют небольшие габариты и легко монтируются, что крайне удобно в ограниченном пространстве. Не менее важным плюсом является надёжность вибрационного сигнализатора уровня. Так как в конструкции сигнализатора нет движущихся частей, это обеспечивает длительный срок службы без частого обслуживания, а за счёт вибраций не происходит налипания пылящего материала на сам сигнализатор.

Недостаток состоит в том, что вибровилка требует непосредственного контакта с продуктом. Сильное налипание вязких материалов между зубцами вилки может привести к ложным срабатываниям.

Данный сигнализатор имеет различные вариации выходного сигнала, такие как: релейный, цифровой, транзисторный выходы.

Сравнение различных типов датчиков показывает, что каждый из них имеет свои области эффективного применения (преимущества и недостатки) и для наглядности представленные в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнительная таблица типов датчиков

Тип датчика	Принцип действия	Выходной сигнал	Среда применения	Преимущества	Недостатки
Кондуктометрический	Различие электропроводимости воздуха и жидкости; замыкание цепи при контакте.	Релейный.	Электропроводящие жидкости (вода, растворы кислот/щелочей).	Простота конструкции и высокая надежность.	Работает только с электропроводящими средами.
Поплавковый	Перемещение поплавка вдоль направляющей оси при изменении уровня.	Аналоговый или цифровой.	Жидкости различной вязкости.	Высокая точность, устойчивость к пене и изменениям вязкости.	Ограниченная длина измерения; чувствительность к волнам и турбулентности; не для агрессивных сред.
Радарный	Отражение электромагнитных импульсов от поверхности продукта.	Аналоговый или цифровой.	Универсален: жидкости, сыпучие и пастообразные материалы.	Бесконтактный метод; высокая точность; не зависит от температуры и давления.	Высокая стоимость оборудования.
Ёмкостный	Изменение электрической ёмкости системы «датчик–среда».	Аналоговый или цифровой.	Жидкости, вязкие среды, порошки, грануляты.	Прочность; устойчивость к экстремальным температурам и давлениям.	Высокие требования к экранировке; особенности работы на высоких частотах.
Ротационный	Вращение лопасти, которое блокируется при достижении продукта.	Релейный.	Сыпучие продукты (зерно, песок, гранулы, порошки).	Простота; нечувствительность к пыли и налипанию материала.	Механический износ; не подходит для очень тяжелых и абразивных материалов.
Вибрационный	Изменение частоты вибрации «вилки» при контакте со средой.	Аналоговый, цифровой или релейный.	Универсален: жидкости и мелкозернистые сыпучие вещества.	Устойчивость к пене и турбулентности; отсутствие движущихся частей; компактность.	Требуется контакта с продуктом; риск ложных срабатываний при сильном налипании вязких сред.

Проведённый анализ подтверждает, что выбор датчика уровня представляет собой многокритериальную задачу, решение которой определяется характеристиками измеряемой среды и условиями эксплуатации. Ввиду отсутствия

универсального типа оборудования, эффективного в любых условиях эксплуатации, каждый прибор обладает специфическим набором преимуществ и ограничений. Применение сравнительного подхода позволяет аргументированно подобрать оптимальное решение для конкретной технологической задачи, гарантируя надёжность, точность и общую эффективность измерений.

Список литературы

1. Датчики уровня: сигнализаторы уровня: каталог продукции / Компания «ОВЕН». – Москва. – URL: <https://owen-russia.ru/product-category/datchiki/datchiki-urovnya/> (дата обращения: 02.05.2026).
2. Минигалиев, Г. Б. Выбор датчиков уровня: учебное пособие / Г. Б. Минигалиев, А. В. Долганов; Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ». – Нижнекамск: НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2015. – 58 с. – URL: https://www.nchti.ru/phocadownload/nchti_ucheb2/nchti_VYBOR%20DATChIKOV%20UROVNYa.pdf (дата обращения: 02.03.2026).
3. ГОСТ 21.208-2013. Система проектной документации для строительства. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов средств автоматизации в схемах.
4. Беркут, А. И. Системы автоматического контроля технологических параметров: учеб. пособие для студентов, обучающихся по направлению 653500 "Стр-во" / А. И. Беркут, А. А. Рульнов. – Москва: МГСУ, Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2005. – 143 с.: ил.: 21 см.; ISBN 5-93093-405-3.
5. Радарные датчики уровня жидкости // Мераприбор: [сайт]. – URL: <https://merapribor.ru/catalog/uroven/radarnye-datchiki-urovnya-zhidkosti/> (дата обращения: 04.03.2026). – Текст: электронный.
6. Датчик-реле уровня жидкости ДРУ-1ПМ-Г // Ризур: [официальный сайт]. – URL: <https://rizur.ru/catalog/signalizatory-i-datchiki-rele-urovnya/datchik-rele-urovnya-zhidkosti-dru-1pm-g/> (дата обращения: 04.03.2026).

References

1. Level sensors: level alarms: product catalog / ARIES Company. – Moscow. – URL: <https://owen-russia.ru/product-category/datchiki/datchiki-urovnya/> (date of reference: 05/02/2026).
2. Minigaliev, G. B. The choice of level sensors: a textbook / G. B. Minigaliev, A. V. Dolganov; Nizhnekamsk Chemical Technology Institute (branch) of the Feder-

al State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "KNRTU". Nizhnekamsk: NHTI FSBEI HPE "KNRTU", 2015. 58 p. – URL: https://www.nhti.ru/phocadownload/nhti_ucheb2/nhti_VYBOR%20DATChIKOV%20UROVNYa.pdf (date of request: 03/02/2026).

3. GOST 21.208-2013. The system of project documentation for construction. Automation of technological processes. Conventional designations of automation devices in diagrams.

4. Berkut, A. I. Systems of automatic control of technological parameters: textbook. handbook for students studying in the direction 653500 "University" / A. I. Berkut, A. A. Rulnov. – Moscow: MGSU, Publishing House of As-soc. builds. vuzov, 2005. – 143 p.: ill.: 21 cm.; ISBN 5-93093-405-3.

5. Radar liquid level sensors // Merapribor: [website]. – URL: <https://merapribor.ru/catalog/yroven/radarnye-datchiki-urovnya-zhidkosti> / (date of access: 03/04/2026). – Text: electronic.

6. Sensor-liquid level switch DRU-1PM-G // Rizur: [official website]. – URL: <https://rizur.ru/catalog/signalizatory-i-datchiki-rele-urovnya/datchik-rele-urovnya-zhidkosti-dru-1pm-g> / (date of access: 03/04/2026).

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
RESEARCH AND OPTIMIZATION OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS
FOR RESISTANCE WELDING PARAMETERS TO IMPROVE
THE QUALITY OF WELDED JOINTS**

Сазин Д.И., студент

Мещерякова А.А., к.т.н, доцент

Грибанов А.А., к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

Sazin D.I., student

Meshcheryakova A.A., CSc (Engineering), Associate Professor

Gribanov A.A CSc (Engineering),

Voronezh State University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы автоматизации управления процессами контактной сварки и современные тенденции развития систем автоматического регулирования сварочного оборудования. Обоснована актуальность внедрения автоматизации для повышения качества производства, производительности и безопасности, а также минимизации влияния человеческого фактора. Проанализированы ключевые параметры управления (сварочный ток, время, усилие сжатия), функциональные схемы подвесных точечных машин и виды контактной сварки. Установлено, что переход к программно-управляемым комплексам позволяет обеспечить стабильность параметров, снизить количество брака и повысить конкурентоспособность продукции в машиностроении и строительстве.

Abstract: The article discusses the issues of automation of contact welding processes control and modern trends in the development of automatic control systems for welding equipment. The relevance of automation implementation for improving

production quality, productivity and safety, as well as minimizing the influence of the human factor, is substantiated. The key control parameters (welding current, time, compression force), functional schemes of suspended spot machines and types of contact welding are analyzed. It is established that the transition to software-controlled complexes allows to ensure the stability of parameters, reduce the number of defects and increase the competitiveness of products in mechanical engineering and construction.

Ключевые слова: автоматизация, контактная сварка, системы автоматизации, управление контактной сваркой.

Keywords: automation, resistance welding, automation systems, resistance welding control.

Автоматизация управления контактной сварки –одно из важнейших направлений для повышения качества производства, увеличения производительности и самое главное безопасности производства [1, 2].

Контактная сварка является основополагающим процессом во многих отраслях, например от авиастроения и автомобилестроения до производства бытовых и энергетических систем. В современных условиях, которые диктует рынок, традиционные установки контактной сварки с полуавтоматическим или ручным управлением перестают подходить под требования, которые диктуют реалии. Они чаще всего становятся источником технологического брака из-за человеческого фактора, тем самым не давая интегрировать процесс в единую цифровую среду, ограничивая производительность и ухудшая качество.

Напряжение, при котором происходит сварка, берётся из питающего напряжения сети переменного тока 380 В. Для сварки предусмотрено 16 ступеней питающего напряжения, которое формируется с помощью 5 первичных обмоток. Одна обмотка является главной и работает во всех диапазонах. При её подключении вырабатывается максимальное напряжение. Остальные обмотки являются дополнительными. При согласованном и последовательном подключении дополнительных обмоток основной коэффициент трансформации уменьшается, что влечёт за собой снижение выходного напряжения вторичной обмотки. Четыре дополнительные обмотки с весовыми коэффициентами витков 1, 2, 4, 8, позволяют, подключаясь последовательно и встречно относительно основной, уменьшать результирующий коэффициент. Таким образом он варьирует комбинации подключения, на второй обмотке получают требуемое напряжение для сварочного инструмента.

В силовом шкафу расположена коммутационная и защитная аппаратура: автоматический выключатель и контактор для ввода питания, сильноточные реле для переключения обмоток трансформатора, а также оптотиристорный модуль, который подаёт напряжение на первичную обмотку на заданное время для сварного импульса. Здесь же и находится понижающий трансформатор 220/12 В и фазовые индикаторы “А”, “В”, “С”.

Актуальность автоматизации управления контактной сварки очень высока из-за необходимости обеспечения высокого качества шва, повышения производительности, снижения стоимости производства при массовом производстве, работа в опасных условиях и обеспечения повторяемости шва в ответственных отраслях. Автоматизация управляет током, временем, давлением и минимизирует человеческий фактор, что очень важно и влияет на надёжность и качество сварного шва. Она стала нужна для того, чтобы повысить качество и надёжность так как является ключевым пунктом в мостостроении, автомобилестроении, авиастроении и военной промышленности. Без неё будет тяжело сделать не только конкурентоспособное изделие, но и безопасное, ведь безопасность играет ключевую роль в производстве и эксплуатации товаров, которые производят с помощью сварки. С ней увеличилось не только производство, например автомобилей, но и качество, которое влияет на нашу безопасность на дорогах.

Также сварка помогает в строительстве мостов, как например Крымский мост, для того чтобы перевозить предметы первой необходимости и путешествовать между городами.

Технологический процесс контактной сварки представляет собой объект управления, на который воздействует комплекс управляющих и возмущающих факторов, определяющих качество формируемого соединения. Ключевыми управляемыми параметрами точечной и шовной сварки являются:

- 1) Сварочный ток ($I_{св}$) – Основной источник тепловыделения в зоне контакта.
- 2) Время протекания тока ($t_{св}$)– Для точечной сварки– это длительность импульса, для шовной– это время импульса (t_i) и паузы (t_p) между ними.
- 3) Усилие сжатия электродов ($F_{сж}$)– Определяет контактное сопротивление, пластическую деформацию металла и теплоотвод.
- 4) Геометрия рабочей поверхности электродов – Влияет на плотность тока и распределение давления.
- 5) Скорость перемещения ($V_{св}$) – Дополнительный параметр шовной сварки.

Требования к стабильности и точности поддержания этих параметров различны. Так, например для обеспечения заданной прочности соединения сварочный ток $I_{св}$ на 10% может привести к уменьшению диаметра литого ядра и падению прочности на 20–25%. В то же время, усилие сжатия $F_{сж}$ допускает отклонение в пределах 10–15% без критического ухудшения качества.

Рассмотрим подвесную точечную машину – это тип сварочного оборудования, который предназначен для выполнения точечной сварки объемных и крупногабаритных конструкций, которые невозможно обрабатывать и перемещать на стационарных сварочных машинах. Главная особенность таких машин – это их мобильность.

Они применяются в автомобилестроении и вагоностроении, изготовление каркасов железобетонных изделий, сварка арматурных стоек, соединение листовых деталей в поточных линиях и труднодоступных местах.

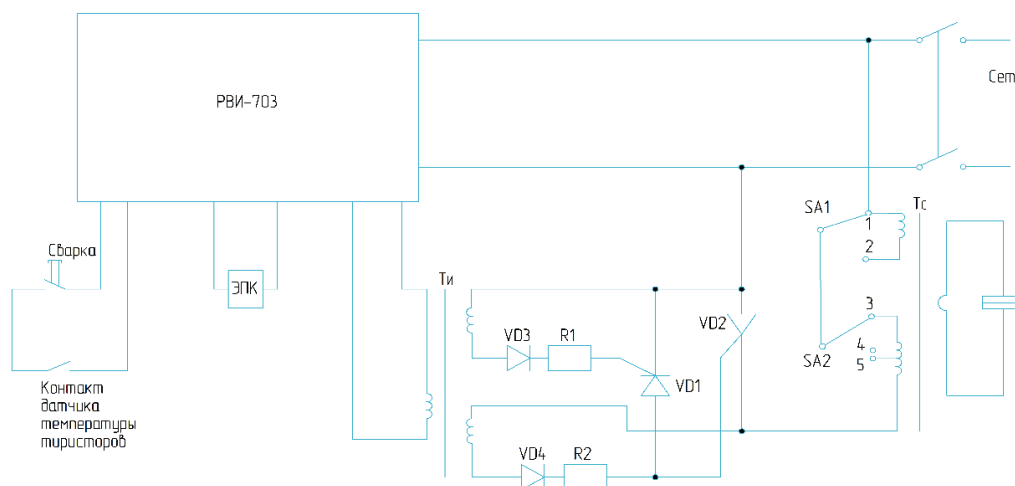


Рисунок 1 – Функциональная схема подвесной точечной машины

На рисунке 1 приведена функциональная схема подвесной точечной машины.

Эта схема работает следующим образом:

1) Сварочный трансформатор:

1.1) Первичная обмотка подключена к сети и имеет отводы. Что позволяет ступенчато регулировать сварочный ток с помощью переключателей.

1.2) Вторичная обмотка имеет всего 1 или 2 витка для получения большого сварочного тока низкого напряжения.

2) Тиристорный контактор: Два тиристора включены встречно-параллельно в цепь первичной обмотки трансформатора.

3) Система управления: Управляющие импульсы приходят из регулятора цикла сварки.

Схема работы на предприятии с использованием контактной сварки включает в себя этапы: обработка поверхности, подача электротока, охлаждение места крепления, сдавливание металла. В зависимости от вида контактной сварки (шовная, стыковая, точечная) схема может отличаться.

Недостатки контактной сварки могут быть связаны с техникой безопасности, дефектами, с особенностями технологии и оборудованием.

Некоторые недостатки контактной сварки:

1) Технология: Необходимость плавного наращивания импульсов тока чтобы избежать возникновения брызг металла, ограничения по толщине деталей, необходимость в мощном источнике питания, при подготовке требуется подгонка деталей с высокой точностью, высокая стоимость оборудования.

2) Дефекты: прожиг металла, потемнение сварочной точки, трещины, выброс расплавленного металла из точки сварки.

3) Оборудование: Узкая специализация, износ электродов, нестабильность сварочного тока.

Структурная схема контактной сварки различается в зависимости от вида процесса: точечная, рельефная, стыковая, шовная.

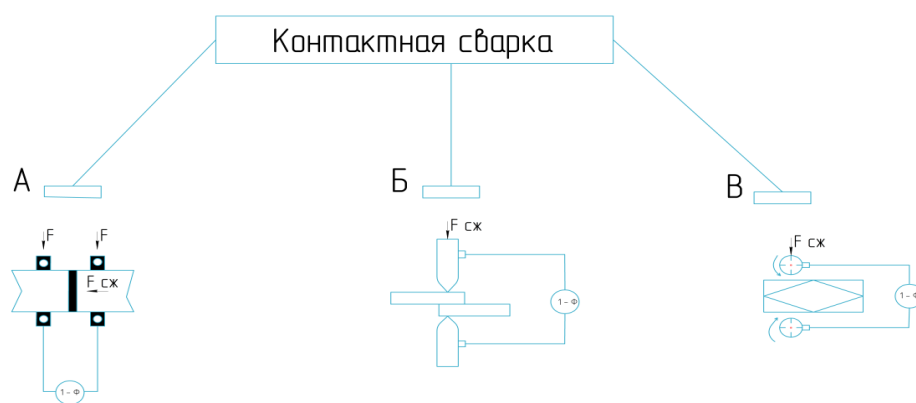


Рисунок 2 – Структурная схема контактной сварки

А) Стыковая: детали соединяются по всей площади касания.

Б) Точечная: детали свариваются по отдельным участкам касания.

В) Шовная: детали соединяются швом, состоящих из ряда отдельных сварных точек, частично перекрывающих одна другую.

Таким образом, внедрение автоматизации в процессы контактной сварки является ключевым фактором эффективности производства и качества выпус-

каемой продукции. Переход от ручного управления к программно-управляемым комплексам позволяет не только минимизировать влияние человеческого фактора, но и обеспечить стабильных параметров сварки. Современные системы автоматизации, включая адаптивные алгоритмы управления и технологическое зрение, дают возможность контролировать качество сварного соединения в реальном времени. Это приводит к значительному уменьшению брака при выпуске, увеличивает ресурс и экономит электроэнергию. Таким образом автоматизация становится необходимым условием для того чтобы конкурировать в выпуске качественной продукции например для автомобилестроения, приборостроения и т.д.

Список литературы

1. Ещенко, С. Е. Структура и управление манипуляционных систем технологических роботов при лазерной резке объектов / С. Е. Ещенко, А. А. Мещерякова // Актуальные проблемы автоматизации, роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах : материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых. – Воронеж, 2025. – С. 346-352.
2. Hi-News.ru. – URL: <https://hi-news.ru/technology/sozdan-robot-dlya-avtomaticheskoy-ochistki-snega-na-bolshix-territoriyah.html?ysclid=m8ww2gitvd548624465>(дата обращения: 03.03.2026).

References

1. Eshchenko, S. E. Structure and Control of Manipulative Systems of Technological Robots in Laser Cutting of Objects / S. E. Eshchenko, A. A. Meshcheryakova // Actual Problems of Automation, Robotics, and Control in Technical, Organizational, and Economic Systems : materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Teachers and Specialists and the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists. – Voronezh, 2025. – Pp. 346-352.
2. Hi-News.ru. – URL: <https://hi-news.ru/technology/sozdan-robot-dlya-avtomaticheskoy-ochistki-snega-na-bolshix-territoriyah.html?ysclid=m8ww2gitvd548624465> (date of appeal: 03.03.2026).

**АНАЛИЗ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ
И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА ДОЗИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ
АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ
ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY
AND AUTOMATED MEANS OF THE ASPHALT CONCRETE MIXTURE
DOSING PROCESS**

Сапрыкин М.Ю., студент

Мещерякова А.А., к.т.н, доцент

Грибанов А.А., к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

Saprykin M.Yu., student

Meshcheryakova A.A., Candidate of Technical Sciences, associate professor

Gribanov A.A., Candidate of Technical Sciences,

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Аннотация: В статье исследуются современные подходы к автоматизации технологического процесса производства асфальтобетонной смеси (АБС). Описаны основные контуры автоматизированного управления на участках подготовки сырья и дозирования компонентов (инертных материалов, цемента, воды, химических добавок) на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК). Представлена математическая модель процесса дозирования, учитывающая динамические погрешности и эффект запаздывания подачи материала («проскок»). На основе экспериментальных данных продемонстрирована эффективность предложенного алгоритма с упреждающим управлением. Обосновано, что внедрение адаптивных систем автоматизации способствует повышению качества смеси, оптимизации энергопотребления и снижению производственных затрат.

Abstract: The article explores modern approaches to the automation of the asphalt concrete mixture (ACM) production process. It describes the main automated

control loops in the areas of raw material preparation and dosing of components (inert materials, cement, water, and chemical additives) using programmable logic controllers (PLCs). The article presents a mathematical model of the dosing process that takes into account dynamic errors and the effect of delayed material supply ("overshoot"). Based on experimental data, the article demonstrates the effectiveness of the proposed algorithm with proactive control. It has been substantiated that the introduction of adaptive automation systems contributes to improving the quality of the mixture, optimizing energy consumption, and reducing production costs.

Ключевые слова: автоматизация, асфальтобетонная смесь, дозирование компонентов, программируемые логические контроллеры, математическое моделирование, точность управления, технологический процесс.

Keywords: automation, asphalt concrete mixture, component dosing, programmable logic controllers, mathematical modeling, control accuracy, and technological process.

Автоматизация производства асфальтобетонной смеси (АБС) на производстве является важной частью повышения эффективности производства и позволяет повысить качество смесей, понизить их себестоимость, сократить затраты на обслуживающий персонал и обеспечить высокую надежность. Производство асфальтобетонной смеси является комплексным процессом и состоит из множества технологических процессов, и их синергия между собой влияют на производственные показатели предприятия. Внедрение современных технологий автоматизации и интеллектуальных систем управления позволяет увеличить производительность смесительных установок и дозаторов, оптимизировать энергопотребление, и увеличить точность дозировки компонентов, что позволяет значительно улучшить качество смеси.

Современные системы автоматизации производства асфальтобетонной смеси включают в себя множество контуров управления: дозирование инертных материалов (песка, щебня, минерального порошка); регулирование подачи воды, вяжущих материалов (битум, цемент), химических добавок. Данные процессы раньше регулировались вручную обслуживающим установку персоналом, но в настоящее время стандарты качества к смеси повысились и старые методы работы производства не удовлетворяют современным требованиям. Поэтому на производстве появилась потребность в более сложных и современных системах управления, способные в реальном времени регулировать пропорции

компонентов. На данный момент автоматизацию технологических процессов на асфальтобетонных заводах (АБЗ) различают на 3 стадии:

1. Частична – автоматизирована только часть операций, при этом управление смежными операциями выполняется вручную.
2. Комплексная – автоматизирован весь технологический процесс производства, требует только наблюдение оператора
3. Полная – автоматизирован весь технологический процесс и не требует присутствия наблюдения.

В настоящее время автоматизация на производствах в России зачастую находится на первом этапе, но множество АБЗ уже проводят модернизацию и плавно переходят на 2 стадию.

Цель исследования– рассмотреть современные подходы к автоматизации производства асфальтобетонной смеси, описать существующие системы управления и представить возможные усовершенствования. В исследовании будут предложены математические модели для управления процессом производства и приведет результат экспериментальных данных, которые подтверждают их эффективность.

На современных АЗВ главным этапом является подготовительное отделение, в котором происходит накопление и предварительное дозирование сырьевых компонентов. Основной особенностью работы этого отделения является важность строго точности подачи компонентов в смесители. Для этого технологическая линия оснащается регулирующей арматурой с пневматическим приводами: заслонками, клапанами, также для предотвращения зависания сыпучих материалов в бункерах установлены пневмомолотки и вибраторы. Внедрение автоматизации в данные процессы позволяет нам поднять эффективность контролирования за параметрами: масса цемента и инертных материалов, объем жидкости и химических материалов и уровень заполнения бункеров.

Типовая схема управления показана на рисунке 1 и содержит следующие узлы:

- бункеры инертных материалов;
- бункер цемента;
- емкости для воды и химических добавок;
- системы питающих и отводящих насосов;
- система дозаторов;
- транспортные ленты.

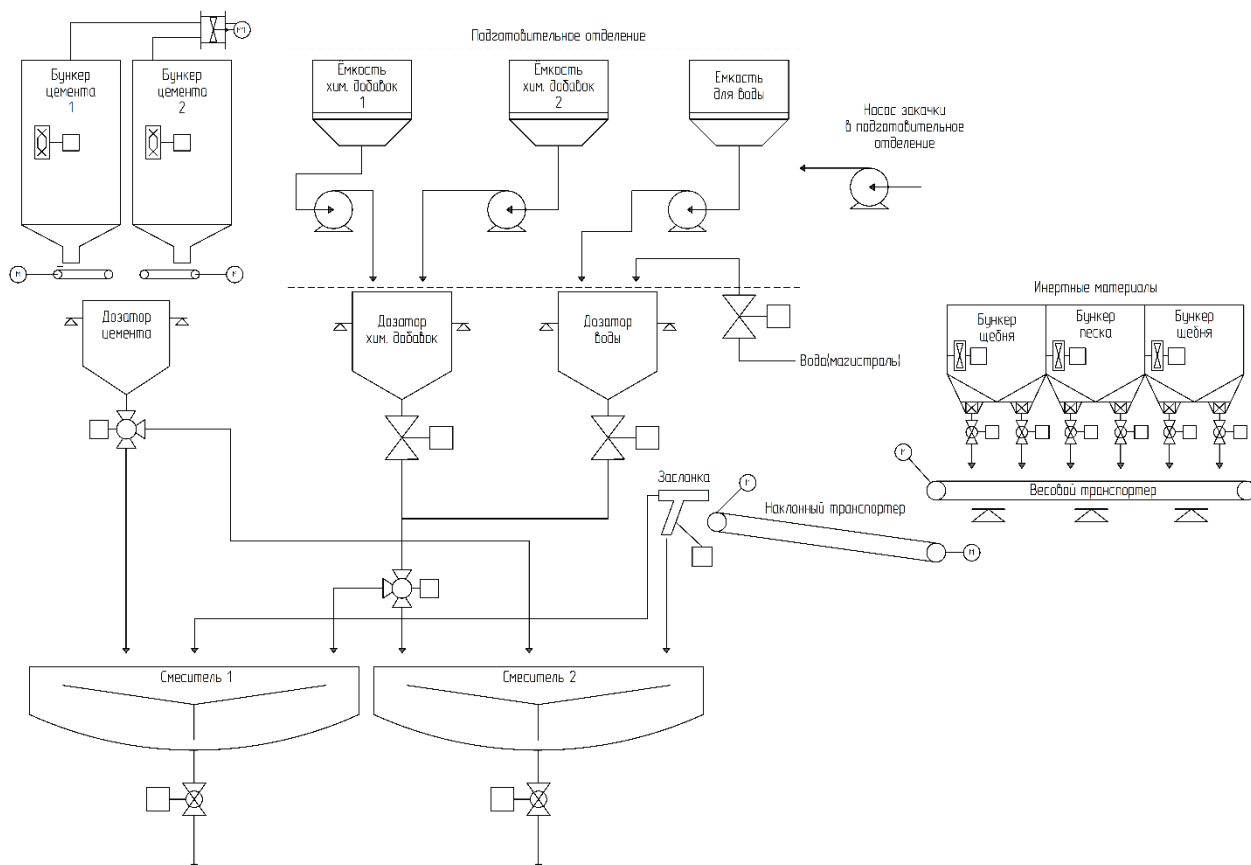


Рисунок 1 – Технологическая схема автоматизации подготовительного отделения производства асфальтобетонной смеси

Рассмотрим схему автоматизации подготовительного отделения рисунок 1, которая включает себя несколько контуров.

Контур дозирования цемента предназначен для подачи заданного количества вяжущего материала в смеситель. Сигнал от весоизмерительного датчика дозатора поступает на контроллер и при достижении необходимой массы подается команда на закрытие заслонок с пневмоприводом, расположенных под бункерами. Главной задачей этого контура является обеспечение высокой точности дозирования, так как отклонение массы цемента в асфальтобетонной смеси критически влияет на его качество.

Контур дозирования химических добавок и воды отвечает за подачу жидких составляющих. На основе рецептуры и предполагаемого готового продукта контроллер управляет работой насосов и положением клапанов на емкостях химических добавок и воды. Трёхходовой клапан с пневмоприводом позволяет организовывать циркуляцию компонента и направляет его в смеситель.

Контур управления подачей инертных материалов включает в себя управление заслонками бункеров с инертными материалами и управлением пуском и остановкой весового и наклонного транспортёра. Контроллер открыв-

вает заслонки в определённой последовательности для набора компонентов на ленту до тех пор, пока не наберется нужная по технологии масса. После этого материалы подаются на наклонный транспортер, а оттуда через заслонку-делитель распределяются по смесителям.

Контур предотвращения зависания предназначен для бесперебойного течения сыпучих материалов из бункеров с инертными материалами и цемента. В системе автоматизации предусмотрено циклическое включение и выключение пневмомолотков и вибраторов с пневмоприводов, которые активирует контроллер при зависании материала.

Математическая модель процесса дозирования. Традиционные системы автоматического регулирования работают по набору предварительно настроенных установок, однако они не всегда могут компенсировать динамические ошибки, возникающие при дозировке сыпучих материалов. Использование методов магического моделирования позволяет разработать более гибкую систему управления, способная минимизировать затраты.

Объемный расход сыпучего материала через выпускное отверстие бункера определяем по формуле:

$$Q = \lambda \cdot F \cdot \sqrt{g \cdot D} \quad (1)$$

где Q – объем расходного материала, $\text{м}^3/\text{с}$; λ – безразмерный коэффициент истечения; F – площадь выпускного отверстия, м^2 ; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; D – гидравлический диаметр выпускного отверстия, м .

Для автоматизации процесса дозирования большую роль играет изменение массы материала во времени, и она описывается интегральным уравнением:

$$m(t) = m_0 + \int_0^t \rho \cdot Q(\tau) dt \quad (2)$$

где $m(t)$ – текущая масса материала в дозаторе, кг ; m_0 – остаток материала от предыдущего цикла, кг ; t – текущий момент времени, с ; ρ – насыпная плотность материала, $\text{кг}^3/\text{м}$; $Q(\tau)$ – объемный расход материала в момент времени τ , $\text{м}^3/\text{с}$; τ – промежуточный момент времени, с .

Однако реальный процесс усложняется дискретной структурой материала. При закрытии заслонки материал продолжает поступать в дозатор в течении некоторого времени после подачи сигнала, это явление называется «проскоком». Для его компенсации нужно учитывать время запаздывания механизма, и

команда для закрытия заслонки должна выполняться с упреждением по формуле:

$$t_{\text{ком}} = t_{\text{цель}} - t_{\text{зап}} \quad (3)$$

где $t_{\text{ком}}$ – время компенсации эффекта, с; $t_{\text{цель}}$ – момент времени, когда масса достигает заданного значения, с; $t_{\text{зап}}$ – время запаздывания закрытия заслонки, с.

Для оценки эффективности предложенной модели было проведено имитационное моделирование процесса дозирования цемента. В качестве исходных данных были приняты: целевая масса цемента 100 кг, насыпная плотность цемента $\rho = 1200 \text{ кг}^3/\text{м}$, площадь проходного сечения заслонки $F = 0,015 \text{ м}^2$, гидравлический диаметр отверстия $D = 0,14 \text{ м}$, $\lambda = 0,65$. Расчет массы проводится при традиционном и предлагаемом подходе, в традиционном закрытие створки происходит в момент набора нужной массы, в предлагаемом команда подается на упреждение с учетом $t_{\text{зап}} = 0,4 \text{ с}$. Полученные данные записаны в таблицу 1.

Таблица 1 – Сравнение точности дозирования

Цикл	Заданная масса, кг	Расчет массы при традиционном подходе, кг	Отклонение, %	Расчет массы при предлагаемом подходе, кг	Отклонение, %
1	100	104,1	4,1	100,3	0,3
2	100	103,9	3,9	99,8	-0,2
3	100	104,7	4,7	100,4	0,4
4	100	103,3	3,3	99,7	-0,3
5	100	104,3	4,3	100,2	0,2

Полученные данные показывают, что использование предлагаемый метод позволяет снизить погрешность с 5% до 0,5%. Это подтверждает эффективность математической модели для автоматизации дозирования.

Таким образом можно подвести итог, что внедрение современных методов автоматизации в системы дозирования и адаптивных алгоритмов позволяет существенно повысить эффективность подготовительного отделения асфальтобетонного завода, увеличить точность дозировки материалов, что снижает расходы и повышает качество получаемой асфальтобетонной смеси.

Список литературы

1. Мещеряков, С. Ю. Разработка автоматизированной системы управления производством асфальтобетонной смеси // С. Ю. Мещеряков, А. А. Мещерякова // Актуальные проблемы автоматизации, роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах : материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых. – Воронеж, 2025. – С. 203-209.

2. Управление качеством АБЗ. – URL: https://studref.com/487730/stroitelstvo/upravlenie_kachestvom (дата обращения: 02.03.2026).

References

1. Meshcheryakov, S. Yu. Development of an Automated Asphalt Concrete Mixture Production Control System // S. Yu. Meshcheryakov, A. A. Meshcheryakova // Actual Problems of Automation, Robotics, and Control in Technical, Organizational, and Economic Systems : materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Teachers and Specialists and the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists. – Voronezh, 2025. – Pp. 203-209.

2. Asphalt concrete plant quality management. – URL: https://studref.com/487730/stroitelstvo/upravlenie_kachestvom (access date: 02.03.2026).

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ СУПЕРВИЗОРНОГО
УПРАВЛЕНИЯ (НЦУ) ЛЕНТОЧНЫМИ СУШИЛЬНЫМИ
УСТАНОВКАМИ**

**METHOD OF DESIGNING SUPERVISORY CONTROL SYSTEMS
(SCS) FOR BELT DRYERS**

Сафонова Ю.А., к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

kulakova7@yandex.ru

Safonova Yu.A., PhD (Engineering), Associate Professor

Voronezh State University of Forestry and Technologies

named after G.F. Morozov,

Voronezh, Russia

Аннотация: в статье рассматривается подход к проектированию двух-уровневой системы управления процессом сушки макаронных изделий. Обосновывается переход от локальных контуров стабилизации к иерархической структуре с использованием режима непосредственного цифрового управления (НЦУ). Описаны алгоритмы каскадной коррекции параметров и логика аварийных блокировок.

Abstract: the article discusses an approach to designing a two-level control system for the pasta drying process. It justifies the transition from local stabilization loops to a hierarchical structure using a Direct Digital Control (DDC) mode. The paper describes cascade parameter correction algorithms and emergency interlocking logic.

Ключевые слова: автоматизация, ленточная сушилка, НЦУ, ПЛК, каскадное регулирование, системы управления.

Keywords: automation, belt dryer, DDC, PLC, cascade control, control systems.

Автоматизация процессов сушки в пищевой промышленности является сложной научно-технической задачей, обусловленной спецификой объекта управления. Ленточные сушильные установки представляют собой распределенные системы с существенным транспортным запаздыванием и высокой тепловой инерцией [1].

Актуальность разработки методики проектирования систем непосредственного цифрового управления (НЦУ) продиктована необходимостью перехода от жестких локальных алгоритмов к адаптивным стратегиям. В условиях неустойчивости параметров исходного сырья (изменение начальной влажности макаронных изделий с базовых 28,4%) традиционные одноконтурные системы регулирования не способны обеспечить требуемую точность конечного показателя (влажность $\leq 13\%$) [2].

Применение иерархической структуры «ПЛК - Рабочая станция» позволяет разделить задачи на два уровня: нижний уровень (field/control), где осуществляется решение задач оперативного управления в реальном времени, верхний уровень (supervisory), на котором реализуется режим НЦУ, расчет оптимальных траекторий сушки и предиктивная коррекция уставок на основе потоковых данных.

Объектом управления является многозонная ленточная сушилка. Технологический процесс характеризуется следующими параметрами [3]:

- 1) вход - исходное сырье (влажность 28,4%);
- 2) выход - готовый продукт (влажность не более 13%);
- 3) теплоносители - пар ($P=3$ атм, $T=150$ °С, расход 4400 кг/ч) и нагретый воздух (расход 1735 кг/ч, $T=46$ °С);
- 4) целевой показатель - поддержание относительной влажности в камере на уровне 74% при времени экспозиции 2 часа.

Проектирование системы основано на декомпозиции технологического процесса на взаимосвязанные контуры регулирования. В отличие от стандартных схем, предлагается использование многосвязного каскадного регулирования.

На уровне промышленного контроллера (ПЛК) реализуется базовый алгоритм поддержания материального и теплового балансов. Контур теплоносителя, где регулируется подача пара в змеевик, новизна заключается в ведении статической коррекции: расход пара G_p корректируется не только по отклонению, но и по температуре в сушильной камере T_{sk} , позволяющее компенсировать внешние возмущения еще до того, как они существенно повлияют на температуру

воздуха после теплообменника. Аэродинамический контур, в котором стабилизируется расход воздуха G_v с коррекцией по давлению P_{sk} . Данная связь необходима для предотвращения «запирания» сушильной камеры и обеспечения равномерного выноса влаги. Алгоритм безопасности функционирует по принципу «ИЛИ». При достижении критического уровня давления или снижении давления пара ниже установленного технологического минимума подача пара, а также функционирование приводов вентилятора и конвейера немедленно прекращается.

Рабочая станция в режиме НЦУ приобретает статус, как активное звено управления, формируя сложный алгоритм оптимизации управления. Снижение влияния транспортного запаздывания, например, времени сушки $t = 2$ ч, в задаче управления можно определить, как основную научную задачу.

Динамическое изменение температуры $SP_T(t)$ зависит от значения корректирующего показателя, который определяется согласно показаниям регулятора температуры, установленного по месту:

$$SP_T(t) = SP_{base} + K_{corr} \cdot \Delta W \cdot (t - \tau), \quad (1)$$

где ΔW – величина отклонения текущей влажности в сушильной камере от установленного технологическими режимами значения (74 %); τ – коэффициент, который характеризует транспортное запаздывание материала на ленте.

Предиктивное управление, реализующееся системой в режиме НЦУ, основано на том, что при появлении изменений, согласующихся с ростом влажности отработанного воздуха сушильной камеры, превышающем 75 %, рабочая станция по управлению параметрами сушильной камеры регулирует задание на подачу пара, при этом не обязательно обнаруживать изменения в значениях температуры зоны сушки, однако влажность продукта на выходе поддерживается согласно технологическим регламентам в пределах 13 %.

Сохранение работоспособности установки и возможность предотвращения брака продукции обеспечивается алгоритмом «безударного» перехода, т.к. при отказе верхнего уровня или обрыве связи со станцией, ПЛК автоматически переводит систему управления из режима НЦУ в режим локальной стабилизации по последним установленным валидным значениям показателей. Алгоритмы управления ПЛК реализуются на массивах значений аналоговых и дискретных сигналов (таблица 1).

Таблица 1 – Порты ввода/вывода, контроля и управления показателями

Параметр	Сигнал	Обозначение	Назначение в системе
Температура воздуха в сушильной камере	AI (Аналоговый вход)	TE_1	Коррекция расхода пара
Температура воздуха после теплообменника	AI	TE_2	Стабилизация теплового режима
Расход воздуха в камеру	AI	FE_1	Контур стабилизации воздуха
Давление в сушильной камере	AI	PT_1	Защита и коррекция расхода воздуха
Интегрированный расход пара	AI	FE_2	Учет энергоносителей
Влажность в сушильной камере	AI	ME_1	Главный параметр для режима НЦУ
Состояние двигателей (вент./конвейер)	DI (Дискретный вход)	S_1, S_2	Обратная связь для алгоритма
Клапан подачи пара в змеевик	AO (Аналоговый выход)	VC_1	Исполнительный механизм (ИМ)
Заслонка подачи воздуха	AO	VC_2	Исполнительный механизм (ИМ)
Пускатель вентилятора	DO (Дискретный выход)	K_1	Управление приводом
Пускатель конвейера	DO	K_2	Управление транспортировкой

Оператор осуществляет управление, контроль и регулирование параметров процесса через графический интерфейс рабочей станции системы.

Для модели, включающей два уровня: локальный и НЦУ этапы управления описаны далее.

1. Подготовка и пуск:

а) выбор режима: оператор устанавливает переключатель на мнемосхеме в положение «Локальный» для предварительного прогрева камеры;

б) задание базовых уставок: вводятся значения стабилизации расхода пара и воздуха. Система проверяет наличие давления в паровой магистрали;

в) запуск приводов: последовательное включение вентилятора и конвейера, при успешном запуске (подтверждение DI) открывается подача пара.

2. Переход в режим НЦУ (оптимизация). При достижении установившегося теплового режима оператор активирует режим НЦУ:

а) на экране визуализируется график влажности;

б) станция начинает транслировать динамическую уставку в ПЛК.

Задача оператора заключается в контроле показателя влажности на выходе (поддерживать 13%). В случае отклонения оператор имеет право внести корректирующий коэффициент в математическую модель НЦУ (например, при смене сорта макаронных изделий).

3. Мониторинг и реагирование на аварии. Система SCADA визуализирует аварийные события:

а) предупредительная сигнализация: цветовая индикация при приближении давления к критическому порогу или влажности к 75%;

б) аварийная блокировка: при срабатывании защит (падение давления пара или избыточное давление в камере) оператор получает звуковой сигнал и текстовое сообщение о причине останова. Повторный пуск возможен только после квитирования (подтверждения) аварии и устранения причины неисправности.

Разработанная методика проектирования, включающая детальный I/O-лист и алгоритмы человеко-машинного взаимодействия, обеспечивает высокую надежность эксплуатации ленточных сушилок. Сочетание жесткой логики ПЛК и гибких аналитических возможностей режима НЦУ позволяет достичь стабильного качества продукции при минимизации влияния «человеческого фактора» на технологический процесс.

Список литературы

1. Ловкис, З. В. Прессование и сушка макаронных изделий / З. В. Ловкис, А. И. Григель // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2021. – Т. 14, № 1(51). – С. 43-49.

2. Иванова, З. А. Совершенствование технологии производства макаронных изделий / З. А. Иванова, Ф. Х. Тхазеплова, А. М. Атабиев // Проблемы развития АПК региона. – 2024. – № 3(59). – С. 171-176.

3. Османьян, Р. Г. Исследование влияния высокотемпературных режимов сушки в автоматизированных линиях на качество макаронных изделий / Р. Г. Османьян // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. – 2007. – № 2. – С. 436.

References

1. Lovkis, Z. V. Pressing and Drying of Pasta / Z. V. Lovkis, A. I. Grigel // Food Industry: Science and Technology. – 2021. – Vol. 14, No. 1(51). – Pp. 43-49.

2. Ivanova, Z. A. Improvement of the Technology of Pasta Production / Z. A. Ivanova, F. Kh. Tkhazeplova, A. M. Atabiev // Problems of Regional Agricultural Development. – 2024. – No. 3(59). – Pp. 171-176.

3. Osmanyanyan, R. G. Research on the Effect of High-Temperature Drying Modes in Automated Lines on the Quality of Pasta / R. G. Osmanyanyan // Food and Processing Industry. Abstract Journal. – 2007. – No. 2. – P. 436.

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА
И УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРИПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ
ТРАНСПОРТНЫМИ ПРОЦЕССАМИ НА ПРОМЫШЛЕННОМ
ПРЕДПРИЯТИИ**

**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A MONITORING
AND MANAGEMENT SYSTEM FOR IN-HOUSE TRANSPORT PROCESSES
IN AN INDUSTRIAL ENTERPRISE**

Терентьевский Р.В., студент

Грибанов А.А., к.т.н., доцент

Мещерякова А.А., к.т.н., доцент

**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»**

г. Воронеж, Россия

vgltaapp@mail.ru

Terentyevsky R.V., Student

Gribanov A.A., PhD (Engineering), Associate professor

Meshcheryakova A.A., CSc (Engineering), Associate Professor

**Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia**

Аннотация: В статье рассматривается проблема повышения эффективности внутрипроизводственных логистических операций за счёт внедрения интеллектуальной системы мониторинга и управления транспортными потоками. Предложена архитектура системы, основанная на интеграции технологий позиционирования в реальном времени, цифрового двойника производственной среды и адаптивных алгоритмов маршрутизации. Разработана математическая модель транспортного потока с учётом динамических ограничений производственной среды. Проведено имитационное моделирование, подтвердившее снижение времени транспортировки грузов на 23,7 % и уменьшение простоев транспортных средств на 31,4 % по сравнению с традиционными методами управления.

Abstract: The article addresses the problem of improving the efficiency of in-plant logistics operations through the implementation of an intelligent monitoring and control system for transport flows. A system architecture based on the integration of real-time positioning technologies, a digital twin of the production environment, and adaptive routing algorithms is proposed. A mathematical model of the transport flow has been developed, taking into account the dynamic constraints of the production environment. Simulation modeling was carried out, which confirmed a reduction in cargo transportation time by 23.7% and a decrease in vehicle downtime by 31.4% compared to traditional control methods.

Ключевые слова: автоматизация производства, внутризаводская логистика, система мониторинга, оптимизация маршрутов, цифровой двойник.

Keywords: production automation, in-plant logistics, monitoring system, route optimization, digital twin.

Современные промышленные предприятия характеризуются высокой степенью автоматизации технологических процессов, однако вопросы оптимизации вспомогательных операций, в частности внутрипроизводственных транспортных процессов, зачастую остаются вне поля зрения. Нерациональная организация перемещения грузов, полуфабрикатов и готовой продукции приводит к увеличению длительности производственного цикла, росту эксплуатационных затрат и снижению общей производительности [1]. Согласно исследованиям, до 40 % времени работы внутризаводского транспорта расходуется на холостые пробеги и ожидание погрузочно-разгрузочных операций. Актуальность разработки интеллектуальных систем управления транспортными потоками обусловлена необходимостью достижения синергии между основным и вспомогательным оборудованием в условиях цифровизации промышленности [2-3].

Целью работы является разработка системы мониторинга и управления внутрипроизводственными транспортными процессами, обеспечивающей динамическую оптимизацию маршрутов на основе данных в реальном времени. Для достижения поставленной цели решаются задачи формализации производственной среды, разработки математической модели транспортного потока, проектирования архитектуры системы и экспериментальной верификации предложенных решений.

Пусть производственное предприятие представляется как ориентированный взвешенный граф $G = (V, E, W)$, где множество вершин $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ соответствует рабочим местам, складам и пунктам погрузки-разгрузки, а мно-

жество рёбер $E = \{e_{ij}\}$ описывает допустимые маршруты перемещения. Каждому ребру e_{ij} сопоставляется динамическая стоимость перемещения, зависящая от времени:

$$w_{ij}(t) = \alpha \cdot \frac{d_{ij}}{v_{\max}} + \beta \cdot \rho_{ij}(t) \cdot T_{\text{wait}} + \gamma \cdot \delta_{ij}(t) \cdot T_{\text{block}} + \eta \cdot \frac{E_{ij}}{E_{\text{norm}}},$$

где d_{ij} – физическое расстояние между узлами i и j , м; $v_{\max}$ – максимальная скорость транспортного средства, м/с; $\rho_{ij}(t) \in [0,1]$ – коэффициент загрузки маршрута в момент времени t ; T_{wait} – среднее время ожидания при загрузке, с; $\delta_{ij}(t) \in \{0,1\}$ – индикатор временных ограничений; T_{block} – время блокировки маршрута, с; E_{ij} – энергопотребление на участке, кВт·ч; E_{norm} – нормативное энергопотребление, кВт·ч; $\alpha = 0,35$, $\beta = 0,30$, $\gamma = 0,25$, $\eta = 0,10$ – весовые коэффициенты, определённые методом экспертных оценок.

Для множества транспортных средств $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ вводится вектор состояния:

$$x_r(t) = [p_r(t) \quad v_r(t) \quad q_r(t) \quad E_r(t) \quad T_{\text{оп},r}(t) \quad \text{SOC}_r(t) \quad T_{\text{прост},r}(t)]^T,$$

где $p_r(t) \in V$ – текущее местоположение средства r ; $v_r(t)$ – текущая скорость, м/с; $q_r(t)$ – текущая загрузка, кг; $E_r(t)$ – накопленное энергопотребление, кВт·ч; $T_{\text{оп},r}(t)$ – наработанное время, ч; $\text{SOC}_r(t)$ – состояние заряда батареи, %; $T_{\text{прост},r}(t)$ – время простоя, с.

Задача маршрутизации формулируется как минимизация суммарного времени выполнения всех транспортных заявок за плановый период:

$$\min J = \sum_{r=1}^k \sum_{j=1}^{n_r} (T_{\text{движ},rj} + T_{\text{погр},rj} + T_{\text{ожид},rj}),$$

при ограничениях на уникальность маршрута, удовлетворение спроса, допустимые зоны перемещения, минимальный заряд батареи, ограничение скорости, грузоподъёмность, ёмкость узлов и максимальное время простоя.

Для решения задачи оптимизации применён модифицированный алгоритм муравьиной колонии с динамическим обновлением феромонов:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho(t)) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{r=1}^k \Delta \tau_{ij}^{(r)}(t),$$

где коэффициент испарения $\rho(t)$ адаптируется в зависимости от плотности транспортного потока в диапазоне от 0,15 до 0,45. Локальное обновление феромонов определяется текущей загрузкой маршрута, а глобальное – по результатам лучшего маршрута итерации.

Предлагаемая нами система реализована по трёхуровневой архитектуре (рис. 1). Нижний уровень включает распределённую сеть датчиков: маяки ультраширокополосного позиционирования с точностью до 10 см, лазерные сканеры для обнаружения препятствий и датчики нагрузки на транспортных средствах. Средний уровень представлен шлюзами обработки данных, осуществляющими предварительную фильтрацию измерений по алгоритму Калмана. Верхний уровень содержит сервер цифрового двойника, который в реальном времени отображает состояние производственной среды и реализует модуль адаптивной маршрутизации.

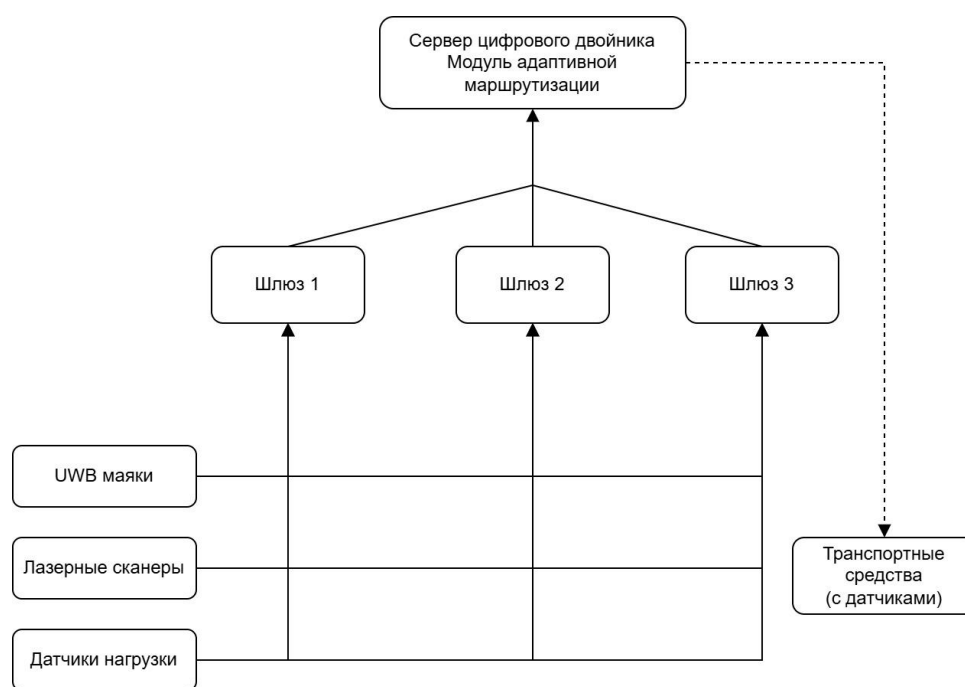


Рисунок 1 – Архитектура системы мониторинга и управления внутрипроизводственными транспортными процессами

Параметры имитационной модели, использованной для верификации системы, приведены в табл. 1. Выбор значений обусловлен характеристиками типового производственного участка машиностроительного предприятия средней мощности.

Таблица 1 – Параметры имитационной модели производственного участка

Параметр	Значение	Единица измерения
Площадь производственного цеха	4800	м ²
Количество транспортных средств	8	шт.
Средняя скорость перемещения	1,2	м/с
Количество пунктов погрузки-разгрузки	14	шт.
Интенсивность поступления заявок	32	заявок/час
Средняя длительность погрузки	185	с

Фильтрация данных на уровне шлюзов осуществляется по дискретному фильтру Калмана:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k-1}),$$

где $\hat{x}_k$ – оценка состояния в момент k ; z_k – вектор измерений; K_k – коэффициент усиления фильтра; H – матрица наблюдения. Параметры фильтра настроены экспериментально: ковариация шума процесса $Q = \text{diag}(0,01; 0,01; 0,001)$, ковариация шума измерений $R = \text{diag}(0,05; 0,05)$.

Имитационное моделирование выполнялось в среде MATLAB. В модели учитывались: транспортные заявки, очереди на погрузочно-разгрузочных пунктах; движение транспортных средств по графу маршрутов с динамически пересчитываемыми весами.

В таблице 2 приводятся результаты имитационного моделирования в сравнительном виде.

Таблица 2 – Результаты имитационного моделирования (сравнение)

Параметр	Базовый сценарий	Разработанная система	Изменение, %
Среднее время доставки, с	428 ± 34	326 ± 28	–23,7
Коэффициент использования ТС	0,58 ± 0,04	0,81 ± 0,03	+39,7
Холостые пробеги, %	38 ± 3,2	21 ± 2,1	–44,7
Конфликты на маршрутах, ед./смена	12 ± 2,8	3 ± 1,2	–75,0
Время реакции на события, с	92 ± 15	4,2 ± 0,8	–95,4

Эффект наиболее заметен в периоды пиковых нагрузок (рис. 2).

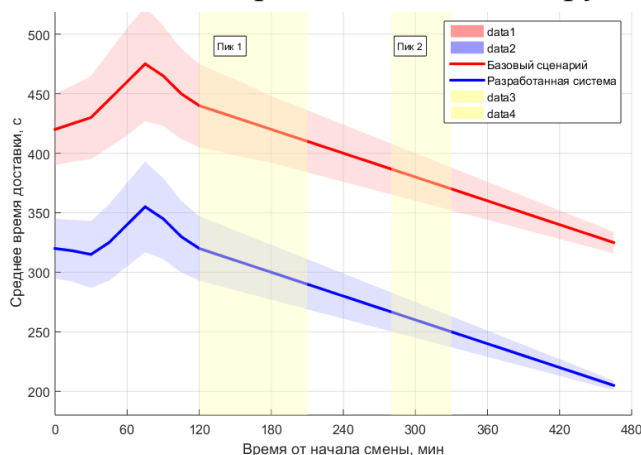


Рисунок 2 – Графики динамики доставки груза в течение рабочей смены

В результате нами разработана система мониторинга и управления внутрипроизводственными транспортными процессами, обеспечивающая динамическую оптимизацию маршрутов на основе данных в реальном времени. Математическая модель транспортного потока учитывает пространственные и временные ограничения производственной среды, включая 7 переменных состояния транспортного средства и 8 типов ограничений. Предложена модификация алгоритма муравьиной колонии с динамическим коэффициентом испарения феромонов, зависящим от плотности транспортного потока.

Имитационное моделирование подтвердило эффективность предложенного подхода: снижение времени транспортировки на 23,7 %, повышение коэффициента использования транспортных средств до 0,81, уменьшение конфликтов на маршрутах на 75 %.

Список литературы

1. Ганиева, Н. М. Логистика производственных процессов : учебное пособие / Н. М. Ганиева ; федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет". – Омск, 2012. – 248 с. – ISBN 978-5-8149-1341-8.
2. Основы управления производственными и материальными потоками / Н. Ю. Сопилко, О. Ю. Мясникова, И. И. Шаталова, Н. С. Щербакова ; Российский университет дружбы народов (РУДН). – Москва, 2019. – 105 с. – ISBN 978-5-209-09106-6.

3. Полуботко, А. А. Производственная логистика в цифровой экономике / А. А. Полуботко, С. Г. Халатян ; Ростовский государственный экономический университет (РИНХ). – Ростов-на-Дону, 2025. – 108 с. – ISBN 978-5-7972-3428-9.

References

1. Ganieva N. M. Logistics of production processes: Textbook. Omsk: Omsk State Technical University, 2012. 248 p. ISBN 978-5-8149-1341-8.

2. Sopilko N. Yu., Myasnikova O. Yu., Shatalova I. I., Shcherbakova N. S. Fundamentals of production and material flow management. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia (RUDN), 2019. 105 p. ISBN 978-5-209-09106-6.

3. Polubotko A. A., Khalatyan S. G. Production logistics in the digital economy. Rostov-on-Don: Rostov State University of Economics (RINH), 2025. 108 p. ISBN 978-5-7972-3428-9.

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ В ОБРАБОТКЕ
МУЗЫКАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ
APPLICATION OF FURIE TRANSFORM IN PROCESSING MUSICAL
COMPOSITIONS**

Щербаков Е.Ю., студент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет» г. Воронеж, Россия

Щербакова И.В., к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова» г. Воронеж, Россия

shcherbakovaiv@vgtlta.vrn.ru

Shcherbakov E. Yu., student

Voronezh State Technical University

Shcherbakova I.V., CSc (Engineering), Associate Professor

Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Аннотация: В статье рассматриваются возможности применения математических методов на основе преобразования Фурье в обработке музыкальных композиций.

Abstract: The article discusses the possibilities of applying mathematical methods based on Fourier transforms in the processing of musical compositions.

Ключевые слова: преобразования Фурье, текущий спектр, мгновенный спектр, свертка сигналов, звуковой файл.

Keywords: Fourier transforms, current spectrum, instantaneous spectrum, signal convolution, the audio file.

В основе современных технологий работы со звуком в компьютерных программах лежат спектральные представления о природе звука. Спектральное разложение сигналов – один из главных математических инструментов анализа

звука. Такой подход позволяет раскладывать сложные сигналы на простые составляющие, которые легче анализировать и моделировать.

Еще в 19 веке французский математик Жан-Батист Фурье показал, что сложный сигнал на отрезке времени T может быть представлен в виде суммы гармонических колебаний, то есть разложен в функциональный ряд, называемый тригонометрическим рядом Фурье:

$$s(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \cdot \sin \frac{2\pi kt}{T}, \quad (1)$$

где $s(t)$ – некоторая периодическая функция с периодом T .

Для анализа сигналов ряд Фурье записывают в несколько ином виде

$$s(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cdot \cos \left(\frac{2\pi kt}{T} - \varphi_k \right). \quad (2)$$

Каждый член ряда

$$c_k \cdot \cos \left(\frac{2\pi kt}{T} - \varphi_k \right) \quad (3)$$

называется гармоникой и описывает косинусоидальное колебание с амплитудой c_k и фазой φ_k . Совокупность коэффициентов c_k называется амплитудным спектром сигнала, а φ_k – фазовым спектром.

Частоты всех синусоидальных колебаний, составляющих функции $s(t)$, кратны основной частоте $F=1/T$. Отдельные составляющие функционального ряда называются гармониками. Колебание с частотой F называется первой гармоникой ($k = 1$), с частотой $2F$ – второй гармоникой ($k = 2$) и т.д.

Важным свойством ряда Фурье является то, что если взять конечное число членов ряда, т.е. аппроксимировать периодическую функцию отрезком ряда

$$s(t) \cong c_0 + \sum_{k=1}^N c_k \cdot \cos \left(\frac{2\pi kt}{T} - \varphi_k \right), \quad (4)$$

то для любого N получается наименьшее среднеквадратическое отклонение

приближенного представления функции $s(t)$ от его точного представления, если коэффициенты определены по формулам

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) dt, \quad (5)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \cdot \cos \frac{2\pi kt}{T} dt, \quad (6)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \cdot \sin \frac{2\pi kt}{T} dt. \quad (7)$$

С увеличением числа элементов разложения N точность представления повышается и при $N \rightarrow \infty$ приближенное равенство переходит в точное.

Разложение в ряд Фурье можно применить и к непериодической функции, если рассматривать ее как предельный случай периодической функции при неограниченном возрастании периода. Если $T \rightarrow \infty$, то частотный интервал между соседними гармониками $F \rightarrow df$, а $\frac{2\pi k}{T} \rightarrow \omega$. Параметр ω – изменяющаяся непрерывно круговая текущая частота. В этом случае основными соотношениями теории спектров при анализе и синтезе звуковых сигналов будут формулы:

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (8)$$

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (9)$$

Пара преобразований Фурье (8), (9) связывает между собой две функции: вещественную функцию времени $s(t)$ и комплексную функцию частоты $G(\omega)$.

Если ряд Фурье представляет периодическую функцию суммой хотя и

бесконечного числа синусоид, но с частотами, имеющими определённые дискретные значения, то интеграл Фурье (8) представляет непериодическую функцию суммой синусоид с непрерывной последовательностью частот. Принято считать, что в непериодическом сигнале есть все частоты, а амплитуды всех его отдельных спектральных составляющих бесконечно малы. $G(\omega)$ называют комплексным спектром непериодической функции, а абсолютное значение $|G(\omega)|$ – спектром.

В действительности ни одно действие, в том числе и музыка, не может длиться бесконечно. Поэтому при анализе реального процесса звукоизвлечения для вычисления спектра интегрирование проводят в пределах от $-\infty$ до определённого момента времени. Результат преобразования Фурье с переменным верхним пределом интегрирования (в качестве которого выступает текущее время) называют «текущим спектром». В реальных условиях наблюдение процесса начинается в некоторый момент времени t_0 , который можно принять за начало отсчёта времени. С учетом этих допущений можно дать следующее определение текущего спектра:

$$G_t(\omega) = \int_0^t s(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (10)$$

Величина $G_t(\omega)$ есть функция не только частоты, но и времени. Текущий спектр можно рассматривать, как связующее звено между частотным и временным описанием процесса.

Виртуальные анализаторы спектра компьютерных программ вычисляют именно значение текущего спектра. Пример текущего спектра прямоугольного импульса представлен на рис. 1.

Анализируя результаты измерения текущего спектра музыкальной композиции, можно сделать следующее:

а) Оценить степень равномерности использования в композиции звукового диапазона частот, а также выявить некоторые ошибки оркестровки и сведения треков с записями отдельных инструментов, например, по провалам на графике спектральной функции.

б) Обнаружить случайные нежелательные резонансы, возникающие в том помещении, где происходит звукозапись, или в акустическом и электрическом сигнальных трактах – присутствие узких пиков на графике спектральной функ-

ции.

в) Устранить различные электромагнитные наводки и помехи от них.

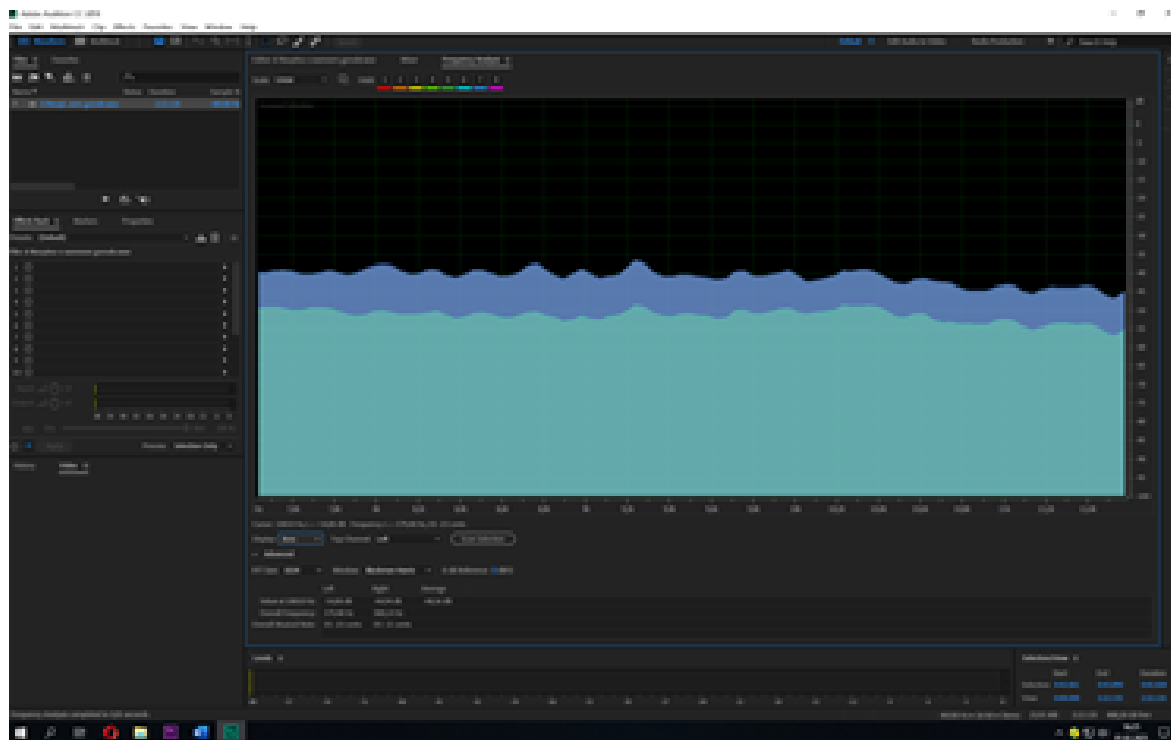


Рисунок 1 – Текущий спектр прямоугольного импульса конечной длительности с синусоидальным заполнением, полученный анализатором спектра программы Adobe Audition

При этом текущий спектр отражает усредненные значения параметров за некоторый промежуток времени. Для разработки алгоритмов обработки звукового сигнала вводят понятие мгновенного спектра. Мгновенный спектр – это спектр отрезка процесса длительностью ΔT , непосредственно предшествующего данному моменту времени t . Математически мгновенный спектр описывается выражением:

$$G_T(\omega, t) = \int_{t-T}^t s(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (11)$$

В (11) применяется скользящее интегрирование: интервал интегрирования имеет постоянную длину, но перемещается по оси времени, хотя относительно текущего времени расположен неизменно.

Для отображения совокупности мгновенных спектров можно использовать матрицу, в строках которой записываются реализации мгновенных спектров, а в столбце указывается соответствующая частота.

В современных звуковых редакторах используются два способа отображений мгновенного спектра. Первый способ – как последовательность слоев изображения, перемещающихся вдоль оси времени. Каждая реализация спектра – это один слой, который остаётся на графике и не стирается, таким образом превращаясь в рельефный массив этих изображений.

Рассмотрим созданный для анализа спектра сигналов звуковой редактор Spectrum Analyzer Professional. Им можно исследовать любой аналоговый звук. Для этого ко входу звуковой карты нужно подключить любой источник сигнала, будь то электронный музыкальный инструмент или микрофон. Можно анализировать звуковые файлы, уже имеющиеся в компьютере. На рис. 2 показано окно программы Spectrum Analyzer Professional с режимом Lines – сплошная линия.

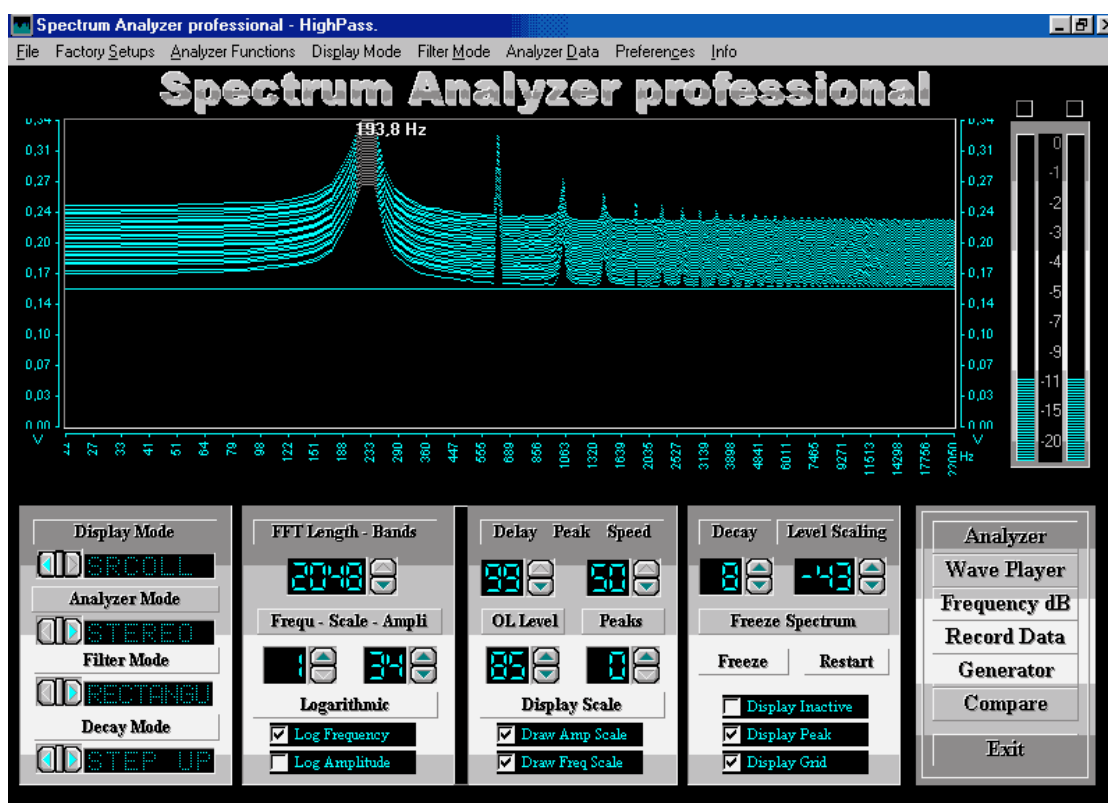


Рисунок 2 – Мгновенный спектр в координатах «частота – спектральная ПЛОТНОСТЬ»

Здесь по вертикали откладываются значения спектра, а по горизонтали –

частоты. В рабочем окне отображаются импульсы в виде прямоугольников. Изображение мгновенного спектра на экране пульсирует, оно не постоянно. Уловить «на глаз» его поведение не представляется возможным. В программе можно сделать скриншот и для наглядности увидеть одно отображение из их огромного множества.

Если добавить третью координату, то можно получить пространственное изображение мгновенного спектра (рис. 3).

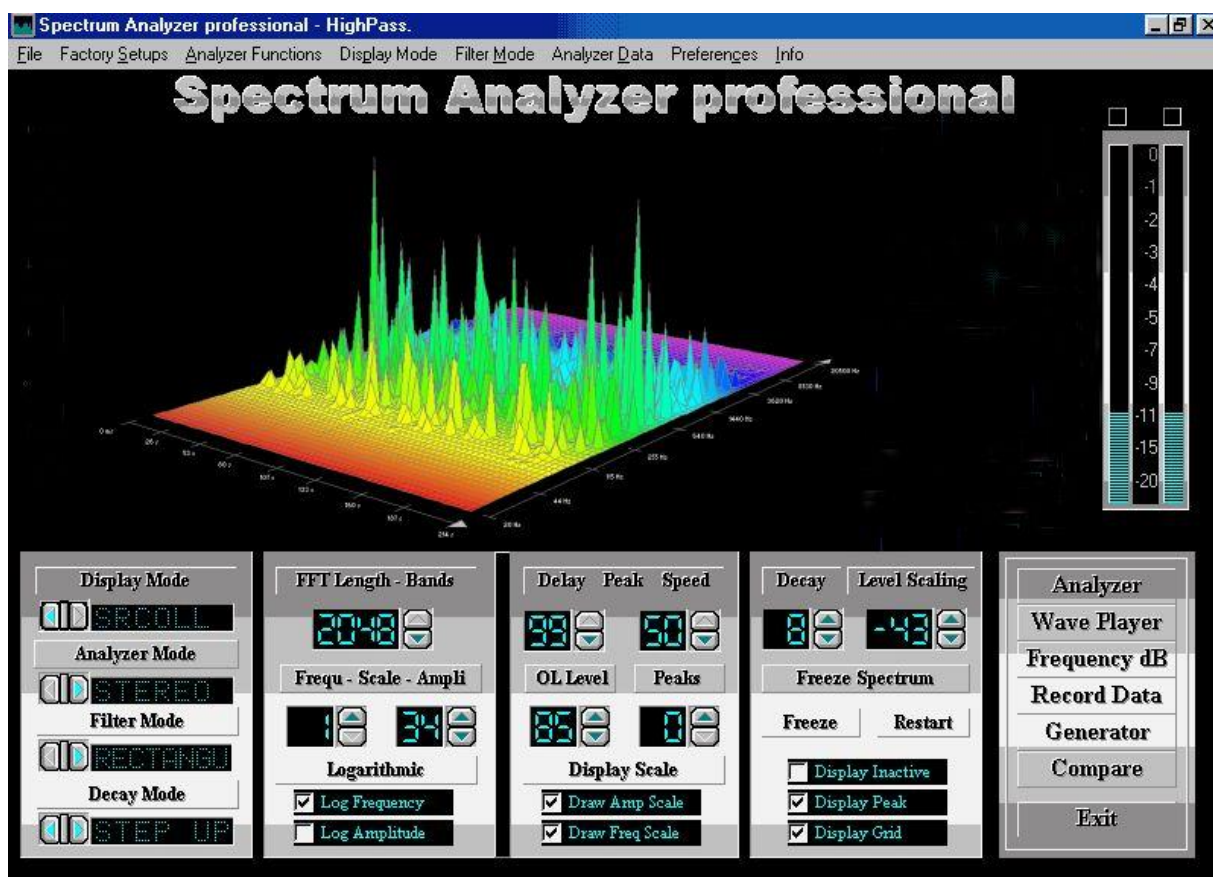


Рисунок 3 – Рельеф спектра в координатах «частота – спектральная плотность – время»

Цветовое отображение мгновенного спектра используется, например, в программе Adobe Audition (рис. 4), где черным цветом показан минимальный уровень спектра, белым – максимальный. Можно увидеть и промежуточные значения, имеющие свои цвета.

Алгоритмы и наглядность этой программы больше всего подходит для анализа мгновенного спектра звукового сигнала. Вот почему её использует большинство звукорежиссеров и операторов во всем мире.



Рисунок 4 – Цветовое отображение мгновенного спектра
в программе Adobe Audition

Для звукоинженера самый эффективный способ исследовать звук – это обратиться к его мгновенному спектру. В наше время, в компьютерных музыкальных программах для исследования и редактирования музыки широко используются подходы, основанные на анализе её мгновенного спектра.

При работе со звуком в современных программных средствах применяется ряд теорем, относящихся к спектральному преобразованию сигналов, важнейшей из которых является теорема о свертке: спектр произведения двух сигналов равен свертке их спектров в частотной области:

$$G(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_1(\tau) G_2(\omega - \tau) d\tau. \quad (12)$$

В цифровой обработке сигналов и изображений свертка является важнейшей математической операцией. Основная функция свертки заключается в объединении двух сигналов для получения результирующего сигнала.

Свертка сигналов – это эффективное использование одного из сигналов в качестве фильтра для другого сигнала, где каждый дополнительный элемент

второго сигнала действует как дополнительная временная задержка. Понятие «свертка сигналов» используется, например, в звуковом редакторе Adobe Audition.

Согласно теореме свертки для преобразования Фурье, свертка двух сигналов во временной области эквивалентна умножению их спектров в частотной области. Следовательно, если два сигнала свертываются во временной области, они дают тот же результат, если их преобразования Фурье перемножаются в частотной области.

Например, если $x(t)$ и $h(t)$ – это два сигнала во временной области, а их преобразования Фурье равны $X(\omega)$ и $H(\omega)$ соответственно. Обозначим их свертку во временной области $f(t)$:

$$f(t) = x(t) * h(t),$$

а соответствующее преобразование Фурье – $F(\omega)$. Тогда

$$F(\omega) = X(\omega) \cdot H(\omega).$$

Свёртка особенно полезна в том случае, когда сигналы конечны во времени, а это всегда имеет место в реальных условиях. Тогда бесконечные пределы интегрирования заменяются конечными. Свёртка используется для исследования характера преобразования электрической цепью импульсного сигнала, поступающего на её вход, или для моделирования звучания музыки в зависимости от акустических свойств того помещения, где проходит концерт.

При обработке звука аналоговый сигнал обычно проходит дискретизацию. В этом случае для расчета коэффициентов ряда Фурье применяют формулу прямого дискретного преобразования Фурье:

$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_n e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}, k = \overline{0, N-1} \quad (13)$$

Восстановить исходный звуковой сигнал по коэффициентам c_k можно с помощью обратного дискретного преобразования Фурье:

$$y_n = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j\frac{2\pi}{N}nk}, n = \overline{0, N-1}$$

В настоящее время для ускоренного вычисления дискретного преобразования Фурье применяется специальный алгоритм, называемый быстрым преобразованием Фурье.

На алгоритмах быстрого преобразования Фурье разработано огромное количество программ и модулей, входящих в универсальные программы, для создания и обработки звуковых сигналов. К ним относятся всевозможные фильтры, с помощью которых можно существенно улучшить звучание фонограммы или придать ей другие звуковые характеристики, влияя на её частотную составляющую.

Рассмотрим **Fast Fourier Transform Filter** (фильтр быстрого преобразования Фурье) программы Adobe Audition, который известен, как FFT Filter. По сути это множество фильтров, которыми можно скорректировать амплитудно-частотную характеристику звукового файла. Это незаменимый инструмент для звукорежиссёра, который имеет наглядный интерфейс, отображающий амплитудно-частотную характеристику звукового файла, и который работает на основе быстрого преобразования Фурье. В FFT Filter имеются ручные настройки и готовые пресеты, помогающие в быстром решении тех или иных задач. Рассмотрим пример применения преобразования Фурье в элементах FFT Filter.

Для подавления свистящих звуков, характерных для голоса многих людей, используется пресет *De-Esser* модуля FFT Filter программы Adobe Audition.

Как правило свистящие и шипящие звуки образуются в голосе человека из-за особенностей строения его голосового аппарата, в частности расположения языка, формы и строения зубов (их отсутствия) и от многих других анатомических особенностей. У каждого человека свистящие «всплески» могут быть на разной частоте, как правило от 2 до 10 кГц. Гармоники на этих частотах ослабляют. Пресет *De-Esser* регулируют с помощью ручных настроек. Окно пресета *De-Esser* представлено на рис. 5.

Фильтр, представленный на рис. 5, будет ослаблять гармоники с частотой от 7 до 10 кГц. Для обрабатываемого музыкального файла можно подобрать значения фильтра: ширину его пропускания, диапазон ослабляемых частот, интенсивность в db и пр.

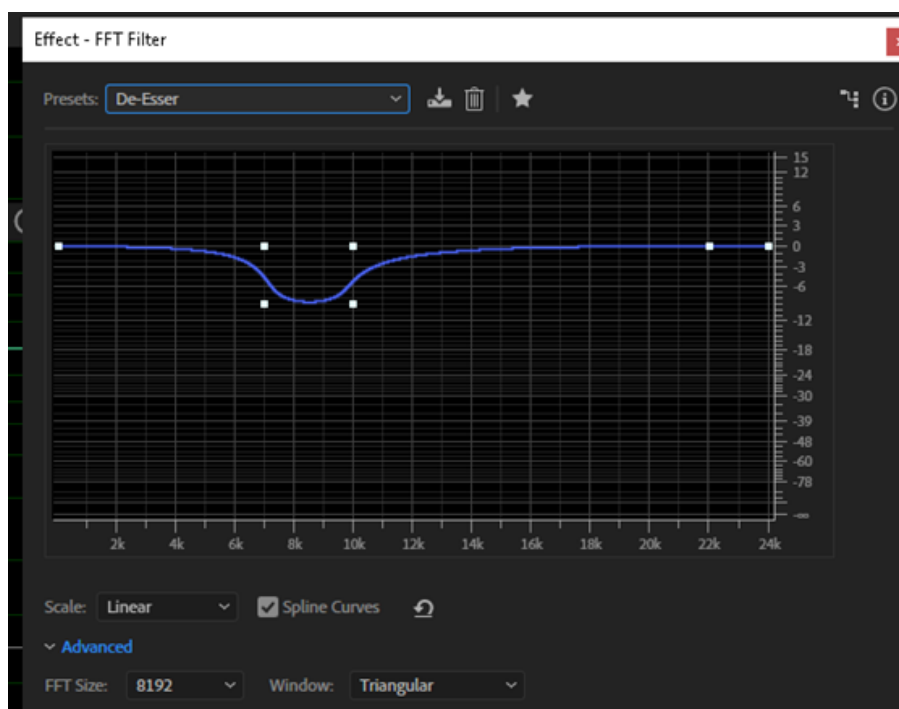


Рисунок 5 – Окно пресета *De-Esser* модуля FFTFilter
Программы Adobe Audition

На рис. 6 представлен спектр звукового файла до применения пресета *De-Esser*. Прямоугольником выделен свистящий «всплеск». На рис. 7 представлен спектр звукового файла после применения пресета *De-Esser*. Видно, что амплитуда всплеска стала значительно меньше.

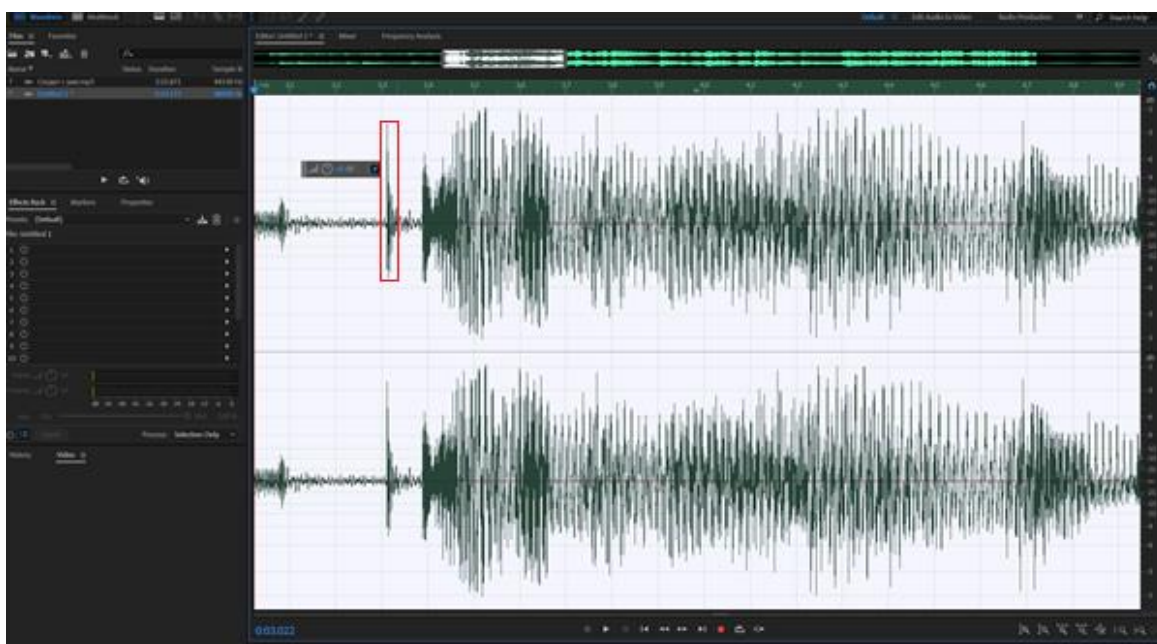


Рисунок 6 – Спектр звукового файла до применения пресета *De-Esser*

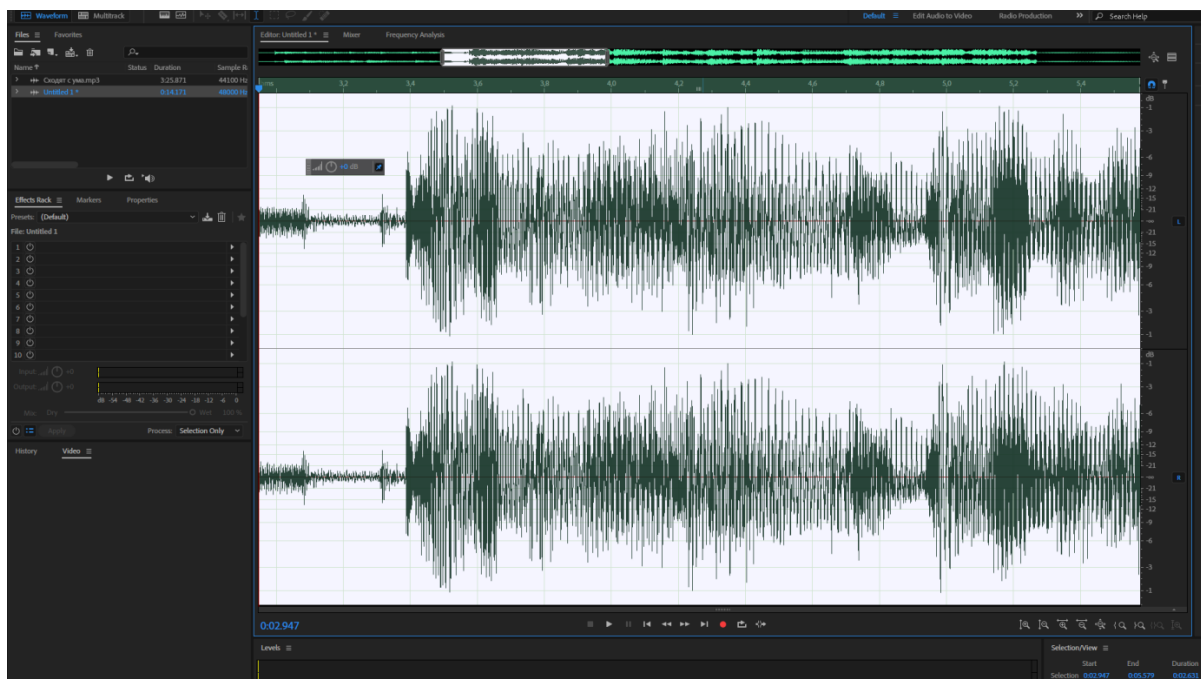


Рисунок 7 – Спектр звукового файла после применения пресета *De-Esser*

Применение преобразования Фурье позволяет качественно реставрировать музыкальные записи старой звуковой аппаратуры и придавать современным музыкальным фонограммам «неповторимое» звучание.

Список литературы

1. Петелин, Р. Ю. Звукозапись на компьютере / Р. Ю. Петелин, Ю. В. Петелин. – URL: <https://petelin.ru/books/soundrec/soundrec.htm>.
2. Обработка звука в Adobe Audition 1.5. – URL: <http://ad-audition.ru/ss01/Index0.htm/>.

References

1. Petelin, R. Yu. Sound Recording on a Computer / R. Yu. Petelin, Yu. V. Petelin. – URL: <https://petelin.ru/books/soundrec/soundrec.htm>.
2. Sound Processing in Adobe Audition 1.5. – URL: <http://ad-audition.ru/ss01/Index0.htm>.

**ДВУХКОНТУРНОЕ АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ
ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СИГНАЛА
МОЩНОСТИ ШПИНДЕЛЯ
DUAL-LOOP ADAPTIVE CONTROL OF WOOD MILLING BASED
ON SPINDLE POWER SIGNAL ANALYSIS**

Узунов К. А., студент

Щербакова И. В., к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г. Ф. Морозова»,

г. Воронеж, Россия

qazwsxedc65409876543@gmail.com

Uzunov K. A., Student

Shcherbakova I.V., CSc (Engineering), Associate Professor

Voronezh State University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Аннотация: В статье рассматривается задача повышения эффективности процесса фрезерования древесины в условиях неоднородности материала. Предложен алгоритм двухконтурного адаптивного управления, основанный на анализе сигнала мощности шпинделя. Экспериментально подтверждена возможность снижения пиковых нагрузок и увеличения ресурса инструмента без использования дополнительных датчиков.

Abstract: This article examines the problem of improving the efficiency of the wood milling process under conditions of material heterogeneity. A two-loop adaptive control algorithm based on the analysis of the spindle power signal is proposed. Experiments have confirmed the possibility of reducing peak loads and extending tool life without the use of additional sensors.

Ключевые слова: адаптивное управление, ЧПУ, фрезерование, древесина, мощность шпинделя, износ инструмента.

Keywords: adaptive control, CNC, milling, wood, spindle power, tool wear.

Процессы механической обработки древесины отличаются нестабильностью условий резания, что напрямую связано с природным строением материала. Заготовки из древесины содержат различные структурные неоднородности, включая сучки, участки с повышенной плотностью, а также зоны с изменённой ориентацией волокон. Наличие подобных дефектов вызывает существенные колебания нагрузок в зоне контакта инструмента и материала. При использовании традиционных подходов управления, основанных на фиксированных режимах, это приводит либо к перегрузке технологического оборудования, либо к вынужденному снижению производительности. Дополнительным ограничением является отсутствие встроенных механизмов оценки текущего состояния режущего инструмента, что негативно сказывается на эффективности его эксплуатации и стабильности качества обработки.

В рамках данного исследования предложен иной подход к организации управления процессом фрезерования, основанный на анализе сигнала мощности, потребляемой шпинделем. Указанный параметр рассматривается как интегральная характеристика, отражающая совокупное воздействие сил резания. Его использование позволяет получать информацию о процессе без внедрения дополнительных измерительных устройств, поскольку доступ к данным обеспечивается через стандартные интерфейсы систем ЧПУ, включая API Fanuc FOCAS.

Для повышения информативности исходного сигнала применена процедура его разложения на составляющие компоненты. Быстро протекающие изменения, возникающие вследствие локальных дефектов структуры древесины, выделяются посредством вейвлет-преобразования, позволяющего фиксировать кратковременные скачки нагрузки. В свою очередь, медленно изменяющаяся составляющая, связанная с постепенным ухудшением режущих свойств инструмента, определяется с использованием метода CEEMDAN. Он обеспечивает адаптивное разложение сигнала с учётом шумовых факторов.

На основе результатов декомпозиции сформирована структура системы управления, включающая два взаимодополняющих контура. Первый контур ориентирован на оперативную компенсацию кратковременных возмущений. В случае резкого увеличения нагрузки происходит автоматическая корректировка скорости подачи, что позволяет снизить вероятность перегрузки оборудования. Быстродействие данного контура, составляющее порядка 100–200 мс, обеспечивает адекватную реакцию на внезапные изменения условий обработки.

Второй контур предназначен для учёта длительных изменений, обусловленных износом режущего инструмента. Анализ тренда мощности даёт возможность выявить постепенное увеличение нагрузки, свидетельствующее о снижении эффективности процесса резания. В ответ на это система выполняет адаптацию технологических параметров, поддерживая оптимальный уровень нагрузки и способствует увеличению срока службы инструмента.

Практическая реализация разработанного алгоритма выполнена исключительно программными средствами и не требует вмешательства в аппаратную часть станка. Специализированное приложение осуществляет циклическое считывание параметров нагрузки шпинделя, их последующую обработку и передачу корректирующих воздействий в систему управления. Частота обновления данных составляет единицы миллисекунд, что позволяет обеспечить практически непрерывный характер регулирования.

Экспериментальная проверка предложенного решения проводилась на деревообрабатывающем оборудовании с числовым программным управлением. В качестве обрабатываемого материала использовались заготовки из сосны, содержащие естественные дефекты структуры. В качестве режущего инструмента в эксперименте использовалась твердосплавная концевая фреза, диаметр которой составлял 10 мм. В ходе контрольных испытаний регистрировался ряд показателей, таких как нагрузка шпинделя, продолжительность обработки, ресурс инструмента.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что применение адаптивного управления в деревообработке существенно снижает максимальную нагрузку шпинделя, сокращает время обработки детали на 4,8 %, продлевает работоспособность режущего инструмента станка.

Таким образом, в результате выполненной работы разработана и экспериментально подтверждена эффективность системы двухконтурного адаптивного управления в деревообрабатывающих технологиях. Важно отметить, что адаптивное управление предполагает применения методов машинного обучения для прогнозирования состояния режущего инструмента, а также оценки анализируемых параметров процесса деревообработки.

Список литературы

1. Wood machining / под ред. J. A. McKenzie. – New York: Springer, 2015.
2. Smid, P. CNC Programming Handbook / P. Smid. – Industrial Press, 2016.

3. Acoustic emission in machining. – Journal of Manufacturing Processes, 2018.
4. Cutting force theory. – CIRP Annals, 2012.

References

1. Wood Machining / ed. by J. A. McKenzie. – New York: Springer, 2015.
2. Smid, P. CNC Programming Handbook / P. Smid. – Industrial Press, 2016.
3. Acoustic emission in machining. – Journal of Manufacturing Processes, 2018.
4. Cutting force theory. – CIRP Annals, 2012.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХЛЕБОПЕКАРНОГО
ПРОИЗВОДСТВА ПУТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ УЧАСТКА
ФОРМОВАНИЯ ТЕСТА**
**IMPROVING THE EFFICIENCY OF BAKERY PRODUCTION
BY AUTOMATING THE DUST FORMING STAGE**

Хади И., студент
Мещерякова А.А., к.т.н, доцент
Грибанов А.А., к.т.н, доцент
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия
Hadi I., student
Meshcheryakova A.A., CSc (Engineering), Associate Professor
Gribanov A.A., CSc (Engineering),
Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы повышения эффективности хлебопекарных производств путем реконструкции и оснащения современным оборудованием. Проанализировано текущее состояние рынка хлебобулочных изделий и выявлена необходимость оптимизации технологических процессов. Основное внимание уделено автоматизации участка формования и округления тестовых заготовок на линии производства подового хлеба, где ранее применялся ручной труд. Предложено внедрение специализированных автоматических округлителей для замены ручного труда. Обоснованы преимущества автоматизации: повышение качества продукции, улучшение эргономики рабочих мест и снижение зависимости от квалификации операторов.

Abstract: The article discusses the issues of increasing the efficiency of bakery production by reconstruction and equipping with modern equipment. The current state of the bakery products market is analyzed, and the need for optimizing technological processes is identified. The main focus is on the automation of the dough shaping and rounding process in the production line for flat bread, which previously

involved manual labor. The article proposes the introduction of specialized automatic rounders to replace manual labor. The advantages of automation are justified, including improved product quality, improved ergonomics of workplaces, and reduced dependence on operator skills.

Ключевые слова: автоматизация, хлебопекарное производство, формирование теста, округление заготовок, человеческий фактор, качество продукции, модернизация.

Keywords: automation, bakery production, dough forming, rounding of workpieces, human factor, product quality, and modernization.

В условиях современной экономической конъюнктуры стратегическим приоритетом развития хлебопекарной отрасли является интенсификация производственных мощностей посредством технической реконструкции действующих предприятий и внедрения высокотехнологичного оборудования. Ключевой проблемой отрасли на текущем этапе выступает необходимость повышения общей эффективности производства, что достигается за счет оптимизации технологических цепочек, снижения энергопотребления и минимизации производственных потерь.

Анализ рыночной конъюнктуры хлебобулочных изделий свидетельствует о выраженной дифференциации спроса. Согласно данным отраслевой экспертизы, развитие рынка осуществляется преимущественно за счет сегмента нетрадиционных и премиальных сортов хлебобулочной продукции. В то же время потребление хлеба так называемой «социальной» категории демонстрирует стабильность на протяжении нескольких лет, удерживая долю рынка на уровне около 50 %. Несмотря на рост предложения в сегменте премиальной продукции, массовый спрос на дорогостоящие сорта ограничен платежеспособностью населения. В настоящее время трудно представить стол без хлеба. Для большинства семей хлеб – это продукт первой необходимости. В магазинах предлагают широкий ассортимент хлеба, на любой вкус и эстетические требования. Многие ученые разрабатывают различные добавки для улучшения вкусовых характеристик хлебобулочной продукции.

В последнее время на российском рынке широко распространены малые предприятия выпускающие хлебобулочную продукцию. Это создает конкуренцию и повышает требования к качеству выпускаемой продукции.

Проведя анализ технологического процесса производства хлебобулочной продукции мы определили узкое место в производстве – участок формования и

округления тестовых заготовок. На текущем этапе операция округления выполняется вручную, что характеризуется высокой трудоемкостью и зависимостью от человеческих ресурсов. Для обслуживания данного участка задействовано четыре сотрудника: машинист тесторазделочных машин 4 разряда (функции наладчика-сменщика) и три машиниста 3 разряда, закрепленные за соответствующими печами.

Эксплуатация ручного труда на данном этапе сопряжена с рядом технологических и санитарных рисков:

- вероятность контаминации: Высокий риск попадания посторонних включений в тесто вследствие человеческого фактора (невнимательность, нарушение санитарных норм);
- нестабильность качества: Геометрическая неоднородность тестовых заготовок из-за вариативности физических усилий операторов, что негативно сказывается на равномерности пропекания и товарном виде готовой продукции;
- эргономические показатели: Высокая физическая нагрузка на персонал приводит к быстрой утомляемости, снижению концентрации и, как следствие, росту брака.

Целевой функцией внедрения автоматизированных средств на данном участке является замена антропогенного труда на механизированное исполнение операций с помощью специализированного оборудования. Интеграция автоматических округлителей тестовых заготовок позволяет реализовать следующие преимущества:

- технологическая оптимизация: Исключение человеческого фактора способствует стандартизации геометрических параметров заготовок и повышению стабильности качества продукции. Снижаются риски, связанные с физиологическими ограничениями операторов (усталость, снижение остроты зрения, мышечная слабость).
- эргономическое улучшение: Автоматизация позволяет исключить тяжелые физические операции, улучшая условия труда и соблюдая современные требования охраны труда.
- производительность: Специализированное оборудование (округлители) обеспечивает непрерывность процесса и высокую скорость обработки заготовок, что способствует увеличению пропускной способности линии.

На рисунке 1 представлена структурная схема хлебопекарного производства.

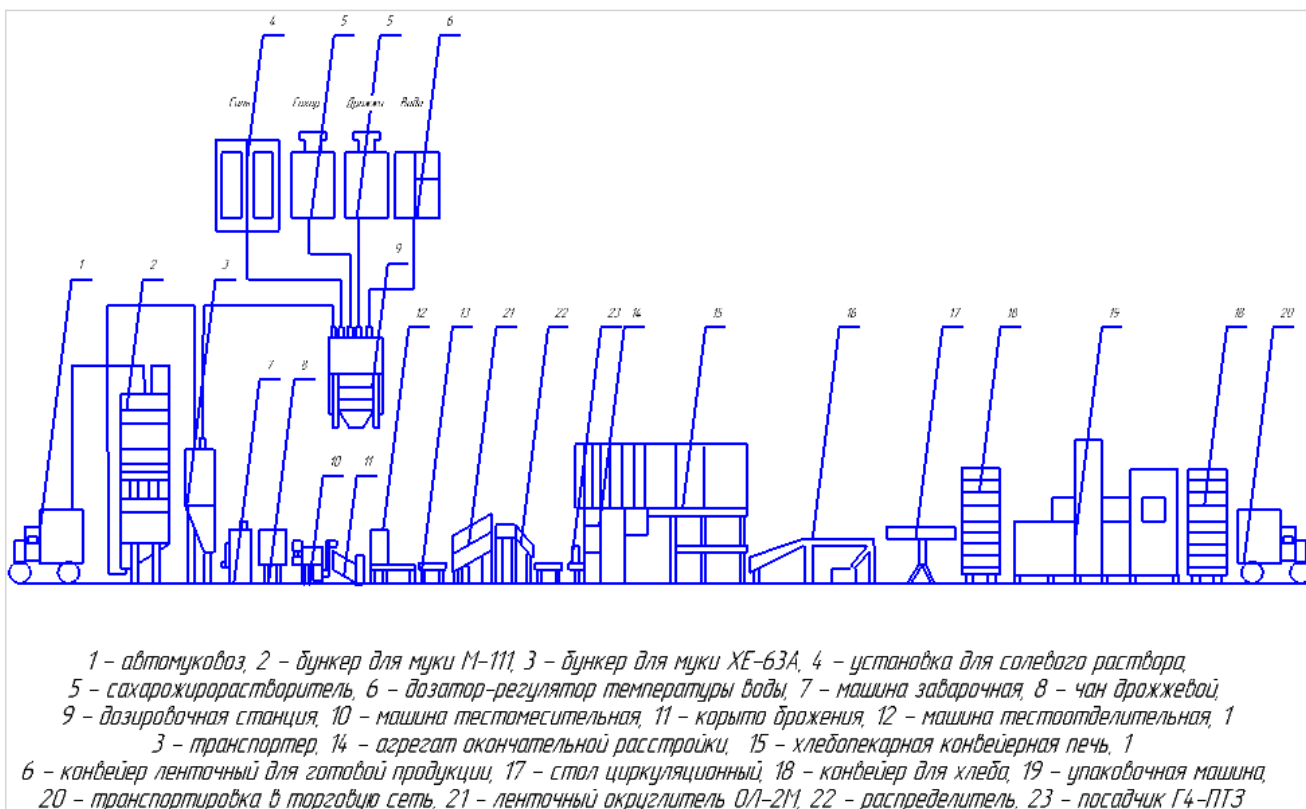


Рисунок 1 – структурная схема хлебопекарного производства

Процесс тестоприготовления является основным и наиболее продолжительным этапом, во многом определяющим качество хлебобулочных изделий. К основным операциям тестоприготовления относят: дозирование сырья и полуфабрикатов, их смешивание и замес, а самое главное – брожение.

На рисунке 2 показана предлагаемая автоматизированная схема тестоприготовления.

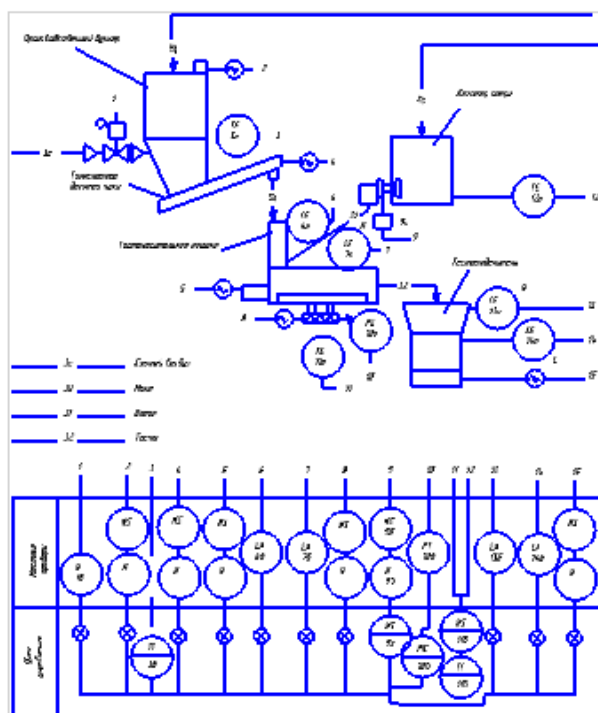


Рисунок 2 – Предлагаемая автоматизированная схема тестоприготовления

Таким образом, автоматизация участка формования является необходимым шагом для повышения конкурентоспособности предприятия, обеспечения стабильности качественных характеристик продукции и оптимизации использования трудовых ресурсов.

Список литературы

1. Ерофеева, А. В. Тенденции развития хлебопекарного производства в России / А. В. Ерофеева // Молодой ученый. – 2020. – № 27 (317). – С. 181-182. – URL: <https://moluch.ru/archive/317/72262/>.
2. Научно-производственный журнал «Хлебопродукты». – URL: <https://khlebprod.ru/index.php/soyuz-pekarej14/sovremennoe-sostoyaniemukomolnoj-i-khlebopekarnoj-promyshlennosti-rossii> (дата обращения: 10.03.2026).

References

1. Erofeeva, A. V. Trends in the Development of Bakery Production in Russia / A. V. Erofeeva // Young Scientist. – 2020. – No. 27 (317). – Pp. 181-182. – URL: <https://moluch.ru/archive/317/72262/>.
2. Scientific and Production Journal "Khleboprodukty". – URL: <https://khlebprod.ru/index.php/soyuz-pekarej14/sovremennoe-sostoyaniemukolnoj-i-khlebopekarnoj-promyshlennosti-rossii> (accessed on March 10, 2026).

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СУШИЛЬНЫМИ
КАМЕРАМИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ
DESIGNING A REMOTE MONITORING AND INTELLIGENT CONTROL
SYSTEM FOR TIMBER DRYING KILNS**

Ходарев С.Р., студент

Щербакова И.В., к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

shcherbakovaiv@vglta.vrn.ru

Khodarev S.R., student

Shcherbakova I.V., CSc (Engineering), Associate Professor

Voronezh State University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Аннотация: В статье рассматривается проектирование кибер-физической системы для сушки пиломатериалов, интегрирующей промышленные контроллеры, технологии промышленного интернета вещей (IIoT) и методы машинного обучения. Предложена иерархическая архитектура, включающая физический уровень, уровень контроллера, уровень передачи данных, уровень хранения и аналитики, а также уровень визуализации и обратной связи. Описаны типы данных, этапы обработки и подход к машинному обучению.

Показано соответствие системы принципам Индустрии 4.0. Ожидаемый экономический эффект – снижение брака на 15–20%, сокращение времени цикла на 10–15%, уменьшение энергопотребления на 8–12%, срок окупаемости около 1,5–2 лет.

Abstract: The paper discusses the design of a cyber-physical system for timber drying that integrates industrial controllers, IIoT technologies, and machine learning. A hierarchical architecture is proposed including the physical level, controller level, data transmission level, storage and analytics level, as well as visualization and feed-

back level. Data types, processing stages, and the machine learning approach are described. The system's compliance with Industry 4.0 principles is demonstrated. The expected economic effect is a 15–20% reduction in defects, a 10–15% reduction in cycle time, an 8–12% reduction in energy consumption, and a payback period of about 1.5–2 years.

Ключевые слова: сушка пиломатериалов, кибер-физическая система, промышленный интернет вещей (IIoT), MQTT, машинное обучение, ПЛК, адаптивное управление.

Keywords: timber drying, cyber-physical system, IIoT, MQTT, machine learning, PLC, adaptive control.

Сушка пиломатериалов является одной из наиболее энергоёмких и ответственных операций в деревообработке. Существующие системы управления сушильными камерами, как правило, работают по жёстким режимным картам, не учитывающим индивидуальные особенности каждой партии древесины (порода, начальная влажность, толщина, наличие дефектов). Это приводит к перерасходу энергии, увеличению времени сушки и появлению брака (трещины, коробление). Актуальность работы обусловлена необходимостью создания адаптивной системы, способной в реальном времени подстраивать режимы сушки под текущее состояние материала.

Целью исследования является разработка кибер-физической системы удалённого мониторинга и интеллектуального управления сушильными камерами на базе технологий IIoT и машинного обучения. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- анализ параметров, влияющих на процесс сушки;
- разработка архитектуры сбора и передачи данных с использованием протокола MQTT;
- организация хранения, обработки и визуализации данных;
- применение методов машинного обучения для прогнозирования оптимальных режимов;
- обеспечение информационной безопасности в соответствии со стандартом IEC 62443.

Разрабатываемая модель имеет архитектуру, построенную по иерархическому принципу, и включает следующие уровни:

Физический уровень – сушильная камера с датчиками температуры, влажности воздуха, влажности древесины, скорости воздушного потока, а также исполнительными механизмами (нагреватели, клапаны, вентиляторы).

Уровень контроллера – ПЛК и HMI-панель, реализующие базовое управление в реальном времени (ПИД-регуляторы, логику безопасности, первичную обработку и буферизацию данных).

Уровень передачи данных – IoT-шлюз, передающий данные по протоколу MQTT на брокер (локальный или облачный). Используется шифрование TLS, аутентификация клиентов и контроль доступа по стандарту IEC 62443.

Уровень хранения и обработки – сервер с базой данных временных рядов (InfluxDB или TimescaleDB) для сырых и агрегированных данных, а также реляционная PostgreSQL для событий, тревог и метаданных партий.

Уровень аналитики – модели машинного обучения на Python (градиентный бустинг, LSTM), обученные на исторических данных.

Уровень визуализации и обратной связи – веб-интерфейс (Node-RED, Grafana) и канал передачи оптимизированных уставок обратно на ПЛК.

В предлагаемой модели предусматривается передача данных через MQTT: ПЛК публикуют показания датчиков (период 10–60 секунд), брокер распределяет их подписчикам – серверу БД и веб-интерфейсу. На сервере выполняется первичная обработка, включающая:

- валидацию (отбрасывание выбросов);
- фильтрацию (сглаживание шумов);
- интерполяцию пропусков;
- расчёт производных параметров (например, психрометрической разности);
- генерацию событий при выходе за пределы.

Визуализация предоставляет оператору следующие возможности: просмотр текущих трендов, контроль этапов сушки, отображение аварийных сигналов и прогресса, а также сравнительные графики завершённых циклов и статистику по качеству.

Организация машинного обучения в разрабатываемой системе организован в три последовательных этапа, которые образуют замкнутый цикл управления.

Первый этап – выполняется настройка моделей по ретроспективным данным. Используются массивы информации, накопленные за предшествующие циклы сушки. В результате формируется обученная модель, способная выпол-

нять прогноз оценочного времени окончания сушки или формировать рекомендуемые значения уставок для последующих технологических этапов.

Второй этап – функционирование в режиме реального времени. Актуальные показания датчиков, поступающие из сушильных камер, подаются на вход обученной модели, которая на их основе генерирует прогнозные оценки и управляющие рекомендации.

Третий этап – передача рекомендаций в контур управления. Сформированные моделью предложения отображаются оператору через пользовательский интерфейс. Если предложения оператором одобрены, данные направляются в программируемый логический контроллер (ПЛК) для автоматической корректировки режима сушки пиломатериалов, т.е. в модели реализован контур интеллектуального управления.

Следует отметить соответствие разработанной архитектуры модели базовым принципам технологии Industry 4.0. Один из важнейших принципов – совместимость, обеспечиваемая применением открытых промышленных протоколов MQTT и OPC UA, что позволяет интегрировать компоненты системы от разных производителей.

Задействованные технологии Индустрии 4.0 включают: промышленный интернет вещей (IIoT), большие данные (Big Data), машинное обучение (Machine Learning), облачные и граничные вычисления (Cloud и Edge Computing), а также кибер-физические системы, обеспечивающие неразрывную связь физического процесса с цифровой моделью.

Предложенная адаптивная кибер-физическая система позволяет заменить жёсткие режимные карты интеллектуальным управлением, учитывающим реальное состояние материала. Ожидаемый экономический эффект:

- снижение брака на 15–20%;
- сокращение времени цикла на 10–15%;
- уменьшение энергопотребления на 8–12%;
- рост производительности труда оператора;
- срок окупаемости около 1,5–2 лет.

В перспективе система может стать основой для создания цифровых двойников, предиктивной диагностики оборудования и интеграции с MES- и ERP-уровнями предприятия.

Список литературы

1. Афоничев, Д. Н. Математическая модель системы автоматического управления электродвигателем постоянного тока в программе SimInTech / Д. Н. Афоничев, И. И. Аксенов, М. Ю. Еремин // Актуальные проблемы автоматизации, роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах : материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых ; ВГЛУ. – Воронеж, 2025. – С. 8–14.

2. Евдокимова, С. А. Проблемы безопасности промышленного интернета вещей / С. А. Евдокимова // Актуальные проблемы автоматизации, роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах : материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых ; ВГЛУ. – Воронеж, 2025. – С. 64–70.

3. Новикова, Т. П. О применении автоматизированных технологий управления в точном земледелии в условиях изменения климата / Т. П. Новикова, С. А. Евдокимова, А. И. Новиков // Актуальные проблемы автоматизации, роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах : материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых ; ВГЛУ. – Воронеж, 2025. – С. 278–283.

4. Студеникин, П. В. Исследование и разработка инновационной автоматизированной системы управления процессом сушки паркетной фрезы в вакуумных камерах / П. В. Студеникин, А. А. Мещерякова // Актуальные проблемы автоматизации, роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах : материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых ; ВГЛУ. – Воронеж, 2025. – С. 323–328.

5. IEC 62443: Industrial communication networks – Network and system security. – International Electrotechnical Commission, 2018.

References

1. Afonichev D. N., Aksenov I. I., Eremin M. Yu. Mathematical model of the automatic control system of a DC electric motor in the SimInTech program // Actual Problems of Automation, Robotics, and Management in Technical, Organizational, and Economic Systems : Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Teachers and Specialists and the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists; VSUFT. – Voronezh: VGLTU, 2025. – Pp. 8–14.

2. Evdokimova S. A. Security Issues of the Industrial Internet of Things //

Actual Problems of Automation, Robotics, and Management in Technical, Organizational, and Economic Systems : Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Teachers and Specialists and the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists; VSUFT. – pp. 64-70.

3. Novikova T. P., Evdokimova S. A., Novikov A. I. On the Application of Automated Control Technologies in Precision Agriculture in the Context of Climate Change // Actual Problems of Automation, Robotics, and Management in Technical, Organizational, and Economic Systems : Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Teachers and Specialists and the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists; VSUFT. – pp. 278-283.

4. Studenikin P.V., Meshcheryakova A.A. Research and development of an innovative automated control system for the process of drying parquet frieze in vacuum chambers // Actual Problems of Automation, Robotics, and Management in Technical, Organizational, and Economic Systems : Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Teachers and Specialists and the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists; VSUFT. – pp. 323-328.

5. IEC 62443: Industrial communication networks – Network and system security. – International Electrotechnical Commission, 2018.

СЕКЦИЯ 2.
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И АВТОНОМНЫЕ
МОБИЛЬНЫЕ ПЛАТФОРМЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

DOI: 10.58168/IAARMT2026_207-213

УДК 621.865(075.8)

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ АВТОНОМНОЙ СНЕГОУБОРОЧНОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ
НЕСТАБИЛЬНОЙ АТМОСФЕРНОЙ СРЕДЫ
METHOD FOR BUILDING A NAVIGATION COMPLEX
FOR AUTONOMOUS SNOW-MELTING EQUIPMENT IN AN UNSTABLE
ATMOSPHERIC ENVIRONMENT

Богданов И.В., студент

Мещерякова А.А., к.т.н., доцент

Мельников А.В., д.т.н., профессор

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет

имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

lomalo.8200@mail.ru

Bogdanov I.V., Student

Meshcheryakova A.A., CSc (Engineering), Associate Professor

Melnikov A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor

Voronezh State University of Forestry and Technologies

named after G.F. Morozov,

Voronezh, Russia

Аннотация: Рассматриваются вопросы обеспечения навигационной надежности беспилотных машин, предназначенных для зимнего содержания территорий. Показано, что традиционные подходы, основанные на совместном использовании глобальных навигационных спутниковых систем в кинематическом режиме реального времени, лидарного SLAM и колесной одометрии, демонстрируют недостаточную устойчивость в условиях снежного покрова, перепадов температур и гидрометеоров. Предложена методология выбора и интеграции сенсорных подсистем, учитывающая физические механизмы воздей-

ствия осадков и тумана на различные физические принципы детектирования. Сформулированы правила динамического перераспределения весов источников данных в расширенном фильтре Калмана.

Abstract: The paper discusses the issues of ensuring the navigational reliability of unmanned vehicles designed for winter maintenance of territories. It is shown that traditional approaches based on the combined use of global navigation satellite systems in real-time kinematic mode, lidar SLAM, and wheel odometry demonstrate insufficient stability in snow-covered conditions, temperature fluctuations, and hydrometeorological conditions. The paper proposes a methodology for selecting and integrating sensor subsystems that takes into account the physical mechanisms of precipitation and fog effects on various physical principles of detection. The rules for dynamically redistributing the weights of data sources in the extended Kalman filter have been formulated.

Ключевые слова: Навигация мобильных роботов, снежный покров, сверхширокополосные системы, радиолокация 77 ГГц, постобработка измерений, температурная стабилизация, адаптивная фильтрация.

Keywords: Navigation of mobile robots, snow cover, ultra-wideband systems, 77 GHz radar, post-processing of measurements, temperature stabilization, adaptive filtering.

Функционирование автономной техники в зимний период сопряжено с комплексом факторов, существенно снижающих эффективность стандартных навигационных решений. К числу таких факторов относятся: многолучевое распространение сигналов ГНСС при отражении от снежной поверхности; нестабильность сцепления колесного или гусеничного движителя с подстилающей поверхностью; изменение характеристик распространения радиоволн в среде с жидкой и твердой фазой воды; а также термоциклические воздействия, вызывающие дрейф опорных частот приемной аппаратуры.

Анализ существующих коммерческих разработок показывает, что их архитектура зачастую заимствуется из сегмента робототехники для газонокосилок, где доминируют GNSS-приемники с поддержкой RTK и оптические системы технического зрения. Перенос таких решений в условия эксплуатации при отрицательных температурах, высокой влажности и наличии снежного покрова приводит к регулярным сбоям позиционирования, потере фиксированного решения и накоплению неконтролируемой ошибки.

Снежный покров, особенно в стадии фирнизации, характеризуется высокими значениями коэффициента отражения для сигналов ГНСС. Экспериментальные данные, приведенные в работе Соловьева В.А., Зима И.В. «Влияние подстилающей поверхности на точность позиционирования», показывают, что коэффициент отражения может достигать 0,7–0,8 на частотах L-диапазона при углах падения менее 30°. Следствием является многолучевость: приемная антенна регистрирует суперпозицию прямого и отраженного сигналов, что вызывает осцилляции псевдодальности с амплитудой до 10–30 см по вертикальной координате и дрейф горизонтальных координат.

Традиционные патч-антенны без средств пространственной селекции не позволяют эффективно подавить отраженные лучи. Решением является применение антенн с круговой поляризацией и экранированием по типу «choke-ring», а также программное исключение спутников с углом места менее 15°. Как показали испытания, описанные в разделе 4, такие меры снижают среднеквадратическую ошибку RTK-решения в два раза, однако не устраняют проблему периодической потери фиксированного режима.

Различные типы осадков и туман по-разному воздействуют на сенсоры, основанные на оптическом и радиочастотном принципах.

Для лидарных систем снегопад создает эффект «ложных целей»: каждая снежинка в пределах луча формирует пик отраженной мощности, что при отсутствии специальной фильтрации приводит к зашумлению облака точек. В случае мокрого снега или дождя добавляется эффект ослабления сигнала за счет поглощения и рассеяния на каплях воды. Камеры технического зрения в тумане теряют контрастность, а при обледенении — полностью блокируются.

В отличие от оптических систем, радиолокационные станции миллиметрового диапазона (77 ГГц) демонстрируют значительно более высокую устойчивость к гидрометеорам. Длина волны (около 4 мм) позволяет проникать через слой мокрого снега и капельного аэрозоля, а отражение происходит не от верхней границы снега, а от подповерхностных слоев и стационарных объектов (бордюров, люков, уплотненного основания). Это свойство делает радар основным кандидатом для навигации в сложных метеоусловиях.

В процессе работы снегоуборочного аппарата внутренний объем корпуса нагревается за счет аккумуляторных батарей и силовой электроники до +30...+40 °С, в то время как ходовая часть и шнековый механизм находятся в контакте со снегом и сохраняют температуру окружающей среды (до –30 °С).

Конденсация влаги на платах радиочастотных модулей в сочетании с термоциклированием приводит к дрейфу частоты опорных генераторов.

Применяемые в массовых GNSS-модулях температурно-компенсируемые кварцевые генераторы (TCXO) имеют долговременную стабильность не выше 0,5 ppm, что недостаточно для поддержания когерентной обработки в RTK-режиме при быстрых изменениях температуры. Альтернативой выступают термостатированные кварцевые генераторы (OCXO) со стабильностью 10^{-9} и более. Размещение OCXO в термоизолированном отсеке с подачей его сигнала на все радиочастотные подсистемы (GNSS-приемник, UWB-модули, радар) позволяет синхронизировать измерения и существенно повысить устойчивость навигационного решения.

Предлагаемый навигационный комплекс строится на основе пяти подсистем, объединенных в единую вычислительную среду с расширенным фильтром Калмана (EKF). Состав и назначение подсистем приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Подсистемы навигационного комплекса

Подсистема	Технологическая база	Функциональная роль
Спутниковая навигация	GNSS (L1/L2/L5), choke-ring антенна	Глобальная привязка, коррекция долговременного дрейфа
Локальная позиционирующая сеть	UWB (6,5 ГГц), TDoA	Абсолютная привязка в локальной системе координат, погрешность 2–5 см
Радиолокационный дальномер	FMCW-радар 77 ГГц	Картирование подповерхностных отражателей, устойчивое к изменению рельефа снега
Инерциальная система	MEMS-IMU промышленного класса	Высокочастотное восполнение траектории, интеграция дискретных измерений
Оптические сенсоры	Стереокамеры, лидар	Работа в благоприятных условиях, идентификация препятствий

UWB-технология в режиме разности времени прихода (TDoA) позволяет создать локальную систему координат с тремя–четырьмя стационарными якорями, установленными по периметру обслуживаемой территории. В отличие от одометрии, которая на снежном покрове дает значительную погрешность из-за

пробуксовки (коэффициент сцепления может изменяться на 40–70 %), UWB обеспечивает абсолютную привязку с ошибкой 2–5 см без накопления дрейфа.

Выбор диапазона 6,5 ГГц обусловлен меньшим ослаблением сигнала в условиях повышенной влажности по сравнению с более низкочастотными вариантами (2,4 ГГц). Синхронизация якорей осуществляется по сигналу точного времени (PPS) от единого ОСХО-генератора.

В большинстве современных исследований для локальной навигации предлагается использование SLAM на основе лидара. Однако снежный покров характеризуется низкой текстурной неоднородностью, что приводит к потере трекинга при сопоставлении кадров. Лидарные алгоритмы типа LOAM или LeGO-LOAM в условиях чистой снежной поверхности не находят достаточного количества уникальных особенностей.

Радар миллиметрового диапазона (77 ГГц) решает эту проблему, поскольку его сигнал проникает в снежную толщу на глубину до 0,5 м и отражается от границы «снег — уплотненное основание» или от стационарных подповерхностных объектов. Формируемая карта отражателей остается неизменной даже при активной работе шнека, изменяющего верхний рельеф. Это позволяет использовать радарную одометрию в качестве основного источника локальной привязки в тех случаях, когда GNSS-сигнал недоступен или деградирован.

В условиях отсутствия сотового покрытия или при работе на удаленных участках традиционный RTK-режим становится неприменимым. В качестве альтернативы предлагается использование постобработки измерений (PPK). Методика включает:

- непрерывную запись сырых GNSS-данных в формате RINEX на борту аппарата и на стационарной базовой станции с известными координатами;
- синхронизацию записей по меткам времени PPS от ОСХО-генератора;
- постобработку по завершении цикла работы с получением дифференциальных поправок.

Такой подход позволяет достичь точности 1–2 см без поддержания непрерывного радиоканала, снижая энергопотребление и повышая автономность системы.

Для обеспечения надежности позиционирования при изменяющихся погодных условиях разработан алгоритм классификации внешней среды и динамического назначения весов источникам данных. Классификация выполняется по четырем сценариям, различающимся механизмами воздействия на сенсоры (таблица 2).

Таблица 2 — Сценарии внешних условий

Сценарий	Условия	Доминирующие помехи
Сухой снег	$T < -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, низкая влажность	«Снежный шум» для лидара, рассеяние света
Влажный снег / снег с дождем	$T \approx 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, высокая влажность	Налипание на линзы, экранирование сигналов, затухание
Дождь	$T > 2\text{ }^{\circ}\text{C}$	Поглощение ИК-излучения, блики на камерах
Туман	Видимость $< 200\text{ м}$	Рассеяние света, слепота оптических систем

Динамическое взвешивание в фильтре Калмана реализуется через оценку качества каждого источника:

- для ГНСС — снижение веса при влажности $>80\%$ и температуре около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ из-за тропосферной рефракции;
- для камер — обнуление веса при падении контрастности изображения ниже порога;
- для лидара — снижение веса при превышении доли точек, классифицированных как снег или дождь, более 30% ;
- для радара — сохранение высокого веса во всех сценариях при отсутствии обледенения антенны.

В результате выполненного исследования выбрана методика построения навигационного комплекса для беспилотной снегоуборочной техники, функционирующей в условиях отрицательных температур, снежного покрова и нестабильной атмосферной среды.

Эффективность перехода от RTK к постобработке РРК в условиях отсутствия канала передачи поправок позволяет снизить энергопотребление и повысить автономность работы техники.

Список литературы

1. Groves P.D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. — 2nd ed. — Boston: Artech House, 2013. — 776 p.
2. Соловьев, В. А. Влияние подстилающей поверхности на точность позиционирования по сигналам ГНСС / В. А. Соловьев, И. В. Зима // Успехи современной радиоэлектроники. — 2022. — № 4. — С. 44–51.

3. Wang H., Zhang X., Li Y. Integration of UWB and IMU for Robust Localization in GPS-Denied Environments // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2024. — Vol. 73. — P. 1–12.

4. Kim S.H., Lee J.H. Ground Penetrating Radar Using 77 GHz FMCW Technology for Snow Layer Detection // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. — 2023. — Vol. 20. — Art. no. 3500805.

5. Глушков, А. Н. Применение высокостабильных опорных генераторов в навигационном оборудовании мобильных роботов / А. Н. Глушков, О. А. Морозов, С. В. Федоров // Датчики и системы. — 2024. — № 2. — С. 18–25.

6. Takasu T., Yasuda A. Development of a Low-Cost RTK-GPS Receiver Using an Open Source Software Package RTKLIB // Proceedings of the International Symposium on GPS/GNSS. — Jeju, 2009. — P. 4–6.

References

1. Groves P.D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. — 2nd ed. — Boston: Artech House, 2013. — 776 p.

2. Solovyev V.A., Zima I.V. Influence of the underlying surface on GNSS positioning accuracy // Advances in Modern Radioelectronics. — 2022. — № 4. — Pp. 44–51.

3. Wang H., Zhang X., Li Y. Integration of UWB and IMU for Robust Localization in GPS-Denied Environments // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. — 2024. — Vol. 73. — Pp. 1–12.

4. Kim S.H., Lee J.H. Ground Penetrating Radar Using 77 GHz FMCW Technology for Snow Layer Detection // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. — 2023. — Vol. 20. — Art. no. 3500805.

5. Glushkov A.N., Morozov O.A., Fedorov S.V. Application of highly stable reference oscillators in mobile robot navigation equipment // Sensors and Systems. — 2024. — № 2. — Pp. 18–25.

6. Takasu T., Yasuda A. Development of a Low-Cost RTK-GPS Receiver Using an Open Source Software Package RTKLIB // Proceedings of the International Symposium on GPS/GNSS. — Jeju, 2009. — Pp. 4–6.

**УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКАЯ ШТАНГА
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА – АМФИБИИ
IMPROVED TELESCOPIC RACK UNMANNED AERIAL
VEHICLE – AMPHIBIOUS**

Васильев В.В., к.т.н. доцент

Афоничев Д.Н., д.т.н., профессор

Аксенов И.И., к.т.н. доцент

**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный
университет имени императора Петра I»**

г. Воронеж, Россия

vasiliev.vladimir87@mail.ru

Vasiliev V.V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Afonichev D.N., Doctor of Technical Sciences, Professor

Axenov I.I., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

FSBEI HE «Voronezh State Agrarian University

named after Emperor Peter the Great»

Voronezh, Russian Federation

Аннотация: Предложено техническое решение телескопической штанги беспилотного летательного аппарата – амфибии. Отличительной особенностью данной телескопической штанги является то, что полая неподвижная секция оснащена внутренним пазом, где она с одной торцевой стороны снабжена крышкой с прокладкой, а с другой торцевой стороны – кольцевым отверстием. Крышка закреплена болтами, где с внутренней ее стороны закреплен водонепроницаемый серводвигатель, вал которого соединен с ходовым винтом и проходит через подшипниковый узел. При этом в неподвижную секцию вставлена полая подвижная секция, оснащенная на наружной стороне шпонкой, таким образом, что шпонка заходит в паз, а ходовой винт проходит через резьбовое отверстие, выполненное в верхней заглушке подвижной секции. В кольцевое отверстие вставлен сальник, зафиксированный крышкой, а свободный конец по-

лой подвижной секции снабжен нижней заглушкой, к которой закреплен рабочий орган.

Abstract: A technical solution for a telescopic rod of an amphibious unmanned aerial vehicle has been proposed. A distinctive feature of this telescopic rod is that the hollow fixed section is equipped with an internal groove, where it is provided with a cover and a gasket on one end, and an annular hole on the other end. The cover is secured with bolts, and a waterproof servo motor is attached to its inner side, with its shaft connected to the lead screw and passing through a bearing unit. At the same time, a hollow movable section is inserted into the fixed section, which is equipped with a key on the outside, so that the key fits into the groove, and the lead screw passes through the threaded hole made in the upper plug of the movable section. A gland is inserted into the annular hole and fixed with a cover, and the free end of the hollow movable section is equipped with a lower plug, to which the working tool is attached.

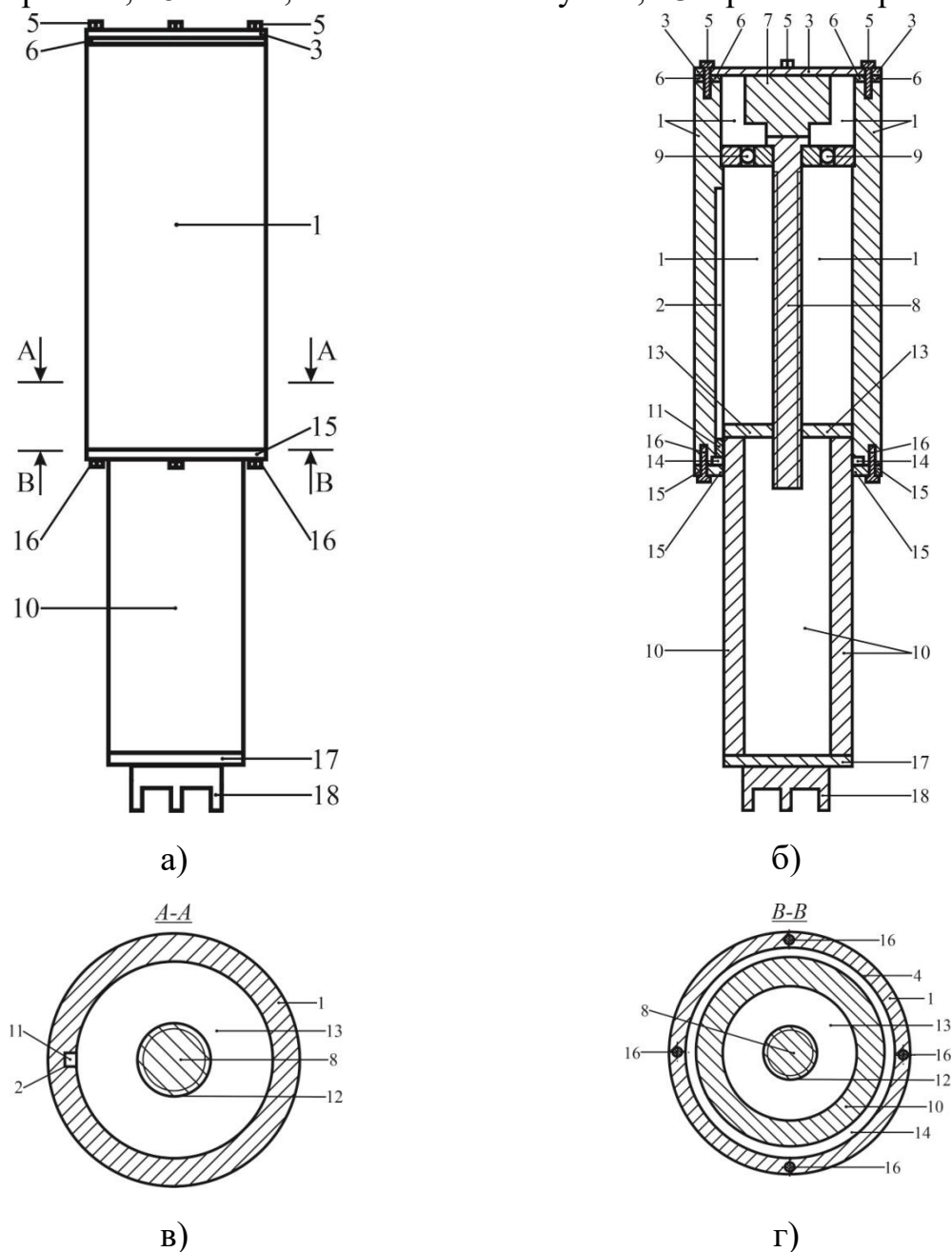
Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат – амфибия, телескопическая штанга, секция, серводвигатель, ходовой винт.

Keywords: unmanned aerial vehicle – amphibious, telescopic rod, section, servo motor, propeller.

Автоматизация процессов выполнения широкого спектра работ в сельском, лесном и водном хозяйстве требует в первую очередь разработку современных роботизированных комплексов на базе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), которые должны учитывать достижения мировой практики в данном направлении [1, 2, 3, 4]. На основе анализа достижений в области разработки роботизированных комплексов на базе БПЛА, предназначенных для обследования и изучения земель, и водных объектов в сельском, лесном и водном хозяйстве, а также для контроля плавучих средств и наплавных сооружений [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] были созданы БПЛА – амфибии [9, 10, 11], которые отличаются от известных аналогов высокой маневренностью и пониженным потреблением энергии. При этом для автоматизированного выполнения широкого спектра подводных работ БПЛА – амфибия должен оснащаться специализированной телескопической штангой, адаптированной к работе в водной среде.

Изучив ряд известных телескопических штанг для БПЛА [12, 13, 14], было установлено, что у них присутствуют недостатки, связанные с низкой надежностью и сложностью конструкции. Учитывая выявленные недостатки, и взяв за прототип телескопическую штангу, разработанную в Китае (см. патент CN № 117773986 A) [13], была разработана телескопическая штанга [14], конструкция которой представлена на рисунке 1.

На рисунке 1 обозначены: 1 – полая неподвижная секция; 2 – внутренний паз в этой секции; 3 – крышка, установленная с торцевой стороны полой неподвижной секции; 4 – кольцевое отверстие на полой неподвижной секции; 5 – болт; 6 – прокладка; 7 – водонепроницаемый серводвигатель; 8 – ходовой винт; 9 – подшипниковый узел; 10 – полая подвижная секция; 11 – шпонка; 12 – резьбовое отверстие; 13 – верхняя заглушка в полой подвижной секции; 14 – сальник; 15 – крышка; 16 – болт; 17 – нижняя заглушка; 18 – рабочий орган.



а – в рабочем положении, вид сбоку;
 б – в рабочем положении, разрез по продольной оси;
 в – разрез А-А; г – разрез В-В
 Рисунок 1 – Телескопическая штанга БПЛА – амфибии

Принцип действия усовершенствованной телескопической штанги БПЛА – амфибии следующий. При работе в водоемах под водой оператор сигналами с пульта управления выводит штангу из транспортного положения. Водонепроницаемый серводвигатель начинает вращать ходовой винт против часовой стрелки. Последний при этом выкручивается из резьбового отверстия, расположенного в верхней заглушке полый подвижной секции. Полая подвижная секция выдвигается из полый неподвижной секции, а шпонка начинает перемещаться в пазе от серводвигателя, что исключает возможность вращения полый подвижной секции внутри полый неподвижной секции. Когда телескопическая штанга выходит на требуемый вылет оператор сигналом с пульта управления останавливает серводвигатель, а соответственно остановиться и ходовой винт. В процессе выполнения подводных работ при необходимости оператор также сигналами с пульта управления корректирует вылет штанги.

Для увеличения вылета серводвигатель пускается на вращение против часовой стрелки, а для уменьшения вылета или для установки штаги в транспортное положение серводвигатель пускается на вращение по часовой стрелке. Ходовой винт вращается также по часовой стрелке и вкручивается в резьбовое отверстие, расположенное в верхней заглушке полый подвижной секции, а полая подвижная секция втягивается в полую неподвижную секцию. Серводвигатель останавливается сигналами с пульта управления при достижении штангой требуемого вылета или минимального вылета (при установке ее в транспортное положение).

Применение усовершенствованной телескопической штанги [14] на БПЛА – амфибиях [10, 11] позволит снизить энергозатраты в процессе автоматизированного обследования и изучения земель, и водных объектов в сельском, лесном и водном хозяйстве, а также плавучих средств и наплавных сооружений. При этом простота конструкции телескопической штанги обеспечит снижение стоимости ее изготовления.

Список литературы

1. Sundaravadivazhagan, B. Intelligent robots and drones for precision agriculture / B. Sundaravadivazhagan, G. Natarajan, P. R. Chelliah. – Springer, 2024. – 490 p.
2. Krishna, K. R. Agricultural drones: a peaceful pursuit / K. R. Krishna. – Oakville: Apple Academic Press; CRC Press, 2018. – 394 p.
3. Patent № 218316114U CN, Int. Cl. B 60 F 5/02; B 64 C 35/00. Cross-medium water-air amphibious aircraft / M. Zihao, W. Meiling; applicant and patent holder

NANTONG POLYTECHNIC COLLEGE. № 202222933973.3; filed: 04.11.2022; date application 17.01.2023. – 9 p.

4. Patent № 110282129A CN, Int. Cl. B 64 C 27/08, 27/10, 27/52, B 64 C 35/00, B 64 D 27/24. Cross-type coaxial tilting rotor amphibious drone / Y. Jiapeng, D. Yihui, X. Lijie, G. Haotian, Z. Zongkai, L. Renquan; applicant and patent holder UNIV GUANGDONG TECHNOLOGY. № 201910533404.x; filed: 27.09.2019; date application 27.09.2019. – 11 p.

5. Оценка эффективности использования усовершенствованного беспилотного летательного аппарата при внесении сухих минеральных удобрений / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, И. И. Аксенов, М. Ю. Еремин // Resources and Technology. – 2026. – № 1, Т. 23. – С. 80–102. – URL: <https://rt.petrstu.ru/article/genpdf.php?id=9063>. DOI: 10.15393/j2.art.2026.9063.

6. Афоничев, Д. Н. Обоснование целесообразности использования беспилотных летательных аппаратов для ухода за посевами сельскохозяйственных культур / Д. Н. Афоничев, В. В. Васильев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2025. – Т. 18, № 2(85). – С. 94–100. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2025_94.

7. Васильев, В. В. Усовершенствованный посевной беспилотный летательный аппарат / В. В. Васильев // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы международной научно-практической конференции; г. Воронеж, 29 января 2026 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2026. – С. 320–326.

8. Васильев, В. В. Беспилотный летательный аппарат для ухода за сельскохозяйственными растениями / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, И. И. Аксенов // Агротехника и энергообеспечение. – 2025. – № 4(49). – С. 200–206.

9. Сельскохозяйственный беспилотный летательный аппарат – амфибия повышенной маневренности / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, А. Н. Беляев, И. И. Аксенов // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции; г. Воронеж, 20 июня 2025 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2025. – С. 184–191.

10. Патент № 2837420 РФ, МПК В 64 U 10/70 В 64 С 35/00. Сельскохозяйственный беспилотный летательный аппарат – амфибия / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, А. Н. Беляев, И. И. Аксенов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2024124244; заявл. 21.08.2024; опубл. 31.03.2025, бюл. № 10. – 12 с.

11. Патент № 2858919 РФ, МПК В 64 С 39/02; В 64 U 10/70; В 64 С 35/00. Беспилотный летательный аппарат – амфибия / В. В. Васильев; заявитель и патен-

тообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2025125939; заявл. 22.09.2025; опубл. 24.03.2026, бюл. № 9. – 16 с.

12. Patent № 205390129 U (CN), Int. Cl. A 01 M 7/00. Scalable spray lance of agricultural unmanned aerial vehicle / L. Zhou, Y. He, K. Yu, H. Cen, L. Feng (CN). – Patent holder UNIV ZHEJIANG (CN). – № 201620172846.8; filed: 07.03.2016; date application 27.07.2016. – 6 p.

13. Patent № 117773986 A (CN), Int. Cl. B 25 J 15/00, 15/02, B 63 C 11/52, 8/00. Telescopic grabbing manipulator of underwater unmanned vehicle / Z. Yang, X. Zhou, F. Yang, G. Tang, J. Zhou (CN). – Patent holder YICHANG INSTITUTE OF TESTING TECH (CN). – № 202311738638.0; filed: 18.12.2023; date application 29.03.2024. – 8 p.

14. Патент № 2853825 РФ, МПК В 64 С 7/00; В 64 U 101/00. Телескопическая штанга беспилотного летательного аппарата – амфибии / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, И. И. Аксенов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2025124576; заявл. 05.09.2025; опубл. 26.12.2025, бюл. № 36. – 12 с.

References

1. Sundaravadivazhagan, B. Intelligent robots and drones for precision agriculture / B. Sundaravadivazhagan, G. Natarajan, P. R. Chelliah. Springer, 2024. – 490 p.

2. Krishna, K. R. Agricultural drones: a peaceful pursuit / K. R. Krishna. Oakville: Apple Academic Press; CRC Press, 2018. – 394 p.

3. Patent № 218316114U CN, Int. Cl. B 60 F 5/02; B 64 C 35/00. Cross-medium water-air amphibious aircraft / M. Zihao, W. Meiling; applicant and patent holder NANTONG POLYTECHNIC COLLEGE. № 202222933973.3; filed: 04.11.2022; date application 17.01.2023. – 9 p.

4. Patent № 110282129A CN, Int. Cl. B 64 C 27/08, 27/10, 27/52, B 64 C 35/00, B 64 D 27/24. Cross-type coaxial tilting rotor amphibious drone / Y. Jiapeng, D. Yihui, X. Lijie, G. Haotian, Z. Zongkai, L. Renquan; applicant and patent holder UNIV GUANGDONG TECHNOLOGY. № 201910533404.x; filed: 27.09.2019; date application 27.09.2019. – 11 p.

5. Evaluation of the effectiveness of using an improved unmanned aerial vehicle when applying dry mineral fertilizers / V. V. Vasiliev, D. N. Afonichev, I. I. Aksenov, M. Yu. Eremin // Resources and Technology. – 2026. – No. 1, Vol. 23. – pp. 80-102. – URL: <https://rt.petsu.ru/article/genpdf.php?id=9063>. DOI: 10.15393/j2.art.2026.9063.

6. Afonichev, D. N. Justification of the expediency of using unmanned aerial vehicles for crop care / D. N. Afonichev, V. V. Vasiliev // Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. – 2025. – Vol. 18, No. 2(85). – pp. 94-100. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2025_94.

7. Vasiliev, V. V. Improved sowing unmanned aerial vehicle / V. V. Vasiliev // Trends in the development of technical means and technologies in agriculture: materials of the international scientific and practical conference; Voronezh, January 29, 2026. - Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2026. – pp. 320-326.

8. Vasiliev, V. V. An unmanned aerial vehicle for the care of agricultural plants / V. V. Vasiliev, D. N. Afonichev, I. I. Aksenov // Agrotechnics and energy supply. – 2025. – № 4(49). – Pp. 200-206.

9. Agricultural amphibious unmanned aerial vehicle with increased maneuverability / V. V. Vasiliev, D. N. Afonichev, A. N. Belyaev, I. I. Aksenov // Energy efficiency and energy conservation in modern production and society: proceedings of the international scientific and practical conference; Voronezh, June 20, 2025 – Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2025. – pp. 184-191.

10. Patent No. 2837420 of the Russian Federation, IPC B 64 U 10/70 B 64 C 35/00. Agricultural amphibious unmanned aerial vehicle / V. V. Vasiliev, D. N. Afonichev, A. N. Belyaev, I. I. Aksenov; applicant and patent holder of Voronezh State Agrarian University. - No. 2024124244; published on 08/21/2024; published on 03/31/2025, bul. No. 10. – 12 p.

11. Patent No. 2858919 of the Russian Federation, IPC B 64 C 39/02; B 64 U 10/70; B 64 C 35/00. Amphibious unmanned aerial vehicle / V. V. Vasiliev; applicant and patent holder of Voronezh State Agrarian University. – No. 2025125939; application. 22.09.2025; publ. 24.03.2026, bul. No. 9. – 16 p.

12. Patent № 205390129 U (CN), Int. Cl. A 01 M 7/00. Scalable spray lance of agricultural unmanned aerial vehicle / L. Zhou, Y. He, K. Yu, H. Cen, L. Feng (CN). – Patent holder UNIV ZHEJIANG (CN). – № 201620172846.8; filed: 07.03.2016; date application 27.07.2016. – 6 p.

13. Patent № 117773986 A (CN), Int. Cl. B 25 J 15/00, 15/02, B 63 C 11/52, 8/00. Telescopic grabbing manipulator of underwater unmanned vehicle / Z. Yang, X. Zhou, F. Yang, G. Tang, J. Zhou (CN). – Patent holder YICHANG INSTITUTE OF TESTING TECH (CN). – № 202311738638.0; filed: 18.12.2023; date application 29.03.2024. – 8 p.

14. Patent No. 2853825 of the Russian Federation, IPC B 64 C 7/00; B 64 U 101/00. Telescopic rod of an amphibious unmanned aerial vehicle / V. V. Vasiliev, D. N. Afonichev, I. I. Aksenov; applicant and patent holder of Voronezh State Agrarian University. – No. 2025124576; application 05.09.2025; publ. 26.12.2025, bul. No. 36. – 12 p.

**ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ
В ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЯХ
THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES
IN SEARCH AND RESCUE OPERATIONS**

Казаковцев А.С., курсант

Калков Д.Ю., к.т.н.

**ФГКОУ ВО «Воронежский институт Министерства внутренних дел
Российской Федерации»**

г. Воронеж, Россия

kazakovtsev_04@mail.ru

Kazakovtsev A.S., cadet

Kalkov D.Y., PhD (Engineering)

**FSFEI HE «Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of
Russian Federation»**

Voronezh, Russian Federation

Аннотация: В статье рассматриваются основные преимущества, задачи, беспилотные воздушные суда при проведении поисково-спасательных операций. Рассмотрен комплекс «Скайрон О», применяемый при проведении спасательных операций, от российского разработчика и производителя специальной техники «СТИЛСОФТ».

Abstract: This article examines the key advantages, objectives, and uses of unmanned aerial vehicles in search and rescue operations. It also examines the Skyron O system, developed by the Russian developer and manufacturer of specialized equipment, STILSOFT, used in search and rescue operations.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, поисково-спасательные операции, полезная нагрузка, комплекс «Скайрон О».

Keywords: unmanned aerial vehicle, search and rescue operations, payload, complex «Skyron O».

На сегодняшний день технологии беспилотной авиации внедрены практически во все сферы: военное дело, сельское хозяйство, государственное и муниципальное управления, обеспечение общественной безопасности, а также активно внедряются для обеспечения эффективности при проведении поисково-спасательных операциях (далее - ПСО).

В рамках государственной программы «Защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, обеспечение пожарной безопасности и безопасности людей на водных объектах» Правительством Российской Федерации в интересах Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (далее - МЧС России) планируется выделение финансирования в период 2025-2027 гг. на закупку беспилотных авиационных систем [5].

Эффективность ПСО напрямую зависит от скорости сбора и обработки информации о местности и местонахождения объекта поиска, поэтому выделим основные преимущества беспилотных воздушных судов (далее – БВС) при проведении спасательных операций [4]:

- возможность расширения зоны видимости в месте чрезвычайного происшествия;
- возможность проведение мониторинга местности в труднодоступных районах;
- возможность проведения поисковых мероприятий в условиях ограниченной видимости с помощью «полезной нагрузки», установленной на БВС;
- быстрое развертывание комплексов разведки с применением БВС.

Стоит отметить, что под «полезной нагрузкой» будем понимать оборудование, которое способно нести БВС на борту для выполнения конкретных задач.

Наиболее распространенное оборудование, применяемое при ПСО, на БВС является - видеокамеры, системы сброса грузов, ИК-датчики.

Исходя из задач проведения ПСО, можно определить задачи, выполняемые БВС [1]:

1. Организация воздушного мониторинга с передачей в реальном времени оперативному штабу видеоинформации.
2. Поиск пострадавших в зоне поиска при различных погодноклиматических условиях и рельефов местности.
3. Обнаружение и идентификация объекта поиска по заданным параметрам.

4. Оказание первой помощи посредством доставки медикаментов и оборудования.

На российском рынке беспилотных систем существуют разнообразные технические решения, способные выполнять различные функциональные возможности. Однако особое внимание хотим обратить внимание на разработчика и производителя специальной техники «СТИЛСОФТ», который реализовал комплекс, контроля прилегающей территории на основе БВС - «Скайрон О», представленный на рисунке 1, предназначенный для осуществления оперативного наблюдения, фиксации мест чрезвычайных происшествий [3].



Рисунок 1 – Комплекс контроля прилегающей территории на основе БВС – «Скайрон О»

Техническое исполнение комплекса «Скайрон О»:

- комплекс состоит из БВС, представленного в виде квадрокоптера неразборной конструкции с четырьмя несущими винтами, оснащенного съемной «полезной нагрузкой», антенного модуля с поворотным устройством и наземной станции управления (далее – НСУ);

- «полезная нагрузка» БВС представляет собой видеокамеру или тепловизор на гиростабилизированной платформе, или видеокамеру-тепловизор;
- НСУ включает в себя ноутбук с установленным специальным программным обеспечением, манипулятор типа «джойстик».

При проведении ПСО особенно полезны следующие функции комплекса:

1) ведение видео- и тепловизионного наблюдения с воздуха, оперативная передача данных на НСУ и одновременный просмотр и запись видеосигнала с борта БВС в режиме реального времени;

2) составление, редактирование, сохранение и загрузка полётного задания в БВС с точным указанием высоты и времени пребывания в каждой контрольной точке;

3) отображение на НСУ данных телеметрии от БВС и его местоположения на полётной карте;

4) с помощью поворотного устройства автоматическое отслеживание угла места и направления на БВС во время полёта, что гарантирует устойчивую связь и точное позиционирование.

Наземная станция управления, оснащённая предустановленным специализированным программным обеспечением «Скайрон» (см. рисунок 2), обеспечивает выполнение следующих функций: управление комплексом в целом, формирование и редактирование полётного задания, индикация нештатных ситуаций, отображение текущего местоположения беспилотного воздушного судна, непосредственное управление БВС, а также управление его «полезной нагрузкой» и иные функциональные задачи.

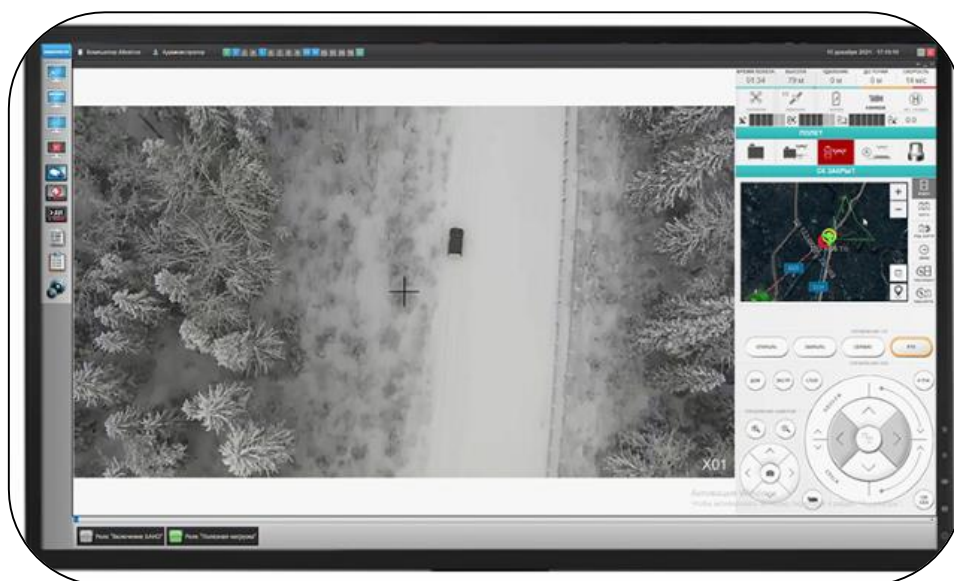


Рисунок 2 – СПО «Скайрон»

Отметим, что это не единственное техническое решение, подходящее для проведения ПСО, однако является комплексным, не требующим дополнительных средств на разработку программного обеспечения либо приобретение «полезной нагрузки».

Внедрение беспилотных воздушных судов в практику поисково-спасательных подразделений является необходимостью, поскольку эффективность БВС подтверждается тремя факторами: скорость реагирования и поиска, возможность применения в сложных условиях, точность обнаружения объекта.

Список литературы

1. Авелина, М. А. К вопросу о применении беспилотных летательных аппаратов в различных сферах жизнедеятельности общества / М. А. Авелина // Право и управление. – 2024. – №4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-primenenii-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-v-razlichnyh-sferah-zhiznedeyatelnosti-obschestva> (дата обращения: 01.04.2026).

2. Писаренко, Л. В. О возможностях и значении беспилотных летательных аппаратов для догоспитального этапа медицинской помощи / Л. В. Писаренко, С. А. Гуменюк, В. И. Потапов // Журнал им. Н.В. Склифосовского «Неотложная медицинская помощь». – 2024;13(3):501-513. <https://doi.org/10.23934/2223-9022-2024-13-3-501-513>.

3. СТИЛСОФТ. Комплексы с беспилотным воздушным судном. – URL: <https://stilsoft.ru/products/bpla> (дата обращения: 01.04.2026).

4. COS NEWS. Дроны в поисково-спасательных операциях: экспертный взгляд. – URL: <https://cos-news.ru/drones-in-search-and-rescue-operations-an-experts-perspective/> (дата обращения: 01.04.2026).

5. TADVISER. Проект: МЧС РФ выделено 2,4 млрд рублей на закупку дронов. – URL: <https://clck.ru/3St6Pr> (дата обращения: 01.04.2026).

References

1. Avelina M. A. On the issue of using unmanned aerial vehicles in various spheres of society // Law and Management. 2024. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-primenenii-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-v-razlichnyh-sferah-zhiznedeyatelnosti-obschestva> (date of access: 01.04.2026).

2. Pisarenko L. V., Gumenyuk S. A., Potapov V. I. On the Possibilities and Significance of Unmanned Aerial Vehicles for the Pre-Hospital Stage of Medical Care.

Russian Sklifosovsky Journal "Emergency Medical Care". 2024;13(3):501-513.
<https://doi.org/10.23934/2223-9022-2024-13-3-501-513>.

3. STILSOFT. Unmanned Aerial Vehicle Systems. – URL: <https://stilsoft.ru/products/bpla> (date of access: 01.04.2026).

4. COS NEWS. Drones in Search and Rescue Operations: An Expert View. – URL: <https://cos-news.ru/drones-in-search-and-rescue-operations-an-experts-perspective/> (date of access: 01.04.2026).

5. TADVISED. Project: The Russian Ministry of Emergency Situations has allocated 2.4 billion rubles for the purchase of drones. – URL: <https://clck.ru/3St6Pr> (date of access: 01.04.2026).

**РАЗРАБОТКА И УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЕТОМ БЕСПИЛОТНОГО
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА МАЛОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ
DEVELOPMENT AND FLIGHT CONTROL OF A LOW-LIFT UNMANNED
AERIAL VEHICLE**

Кожемякин А.Е., курсант

Сушко Т.И., к.т.н., доцент

ВУНЦ ВВС ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина
г. Воронеж, Россия

Kozhemyakin A.E., military student

Sushko T.I., PhD, Associate Professor

VUNTS VVA named after Prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin
Voronezh, Russia
tane2020102010@mail.ru

Аннотация: В работе описываются возможности создания беспилотного летательного аппарата самолетного типа грузоподъемностью до 140 кг на высоте 1500 м. Моделирование CAD/CAE средствами показало, что разработанный мультикоптер с электромагнитным замком позволит поднимать и более тяжелые грузы благодаря шести электродвигателям.

Abstract: The paper describes the possibilities of creating an aircraft-type unmanned aerial vehicle with a payload capacity of up to 140 kg at an altitude of 1,500 m. CAD/CAE simulations have shown that the developed multicopter with an electromagnetic lock will allow lifting heavier loads thanks to six electric motors.

Ключевые слова: моделирование, трехмерные модели, мультикоптер, подъемная сила, электромагнитный замок.

Keywords: simulations, 3D-models, multicopter, lifting force, electromagnetic lock.

Исследования в области аэродинамики относятся ко времени изобретения и использования баллистических устройств, позволявших дальше и точнее посылать снаряд в цель, начиная от стрел и копий. Настоящее время характеризуется изобретением аппаратов многоразового или условно-многоразового ис-

пользования, без экипажа (человека-пилота) и способных самостоятельно перемещаться в пространстве для выполнения различных задач с помощью управляющей программы или дистанционного управления диспетчерским центром с человеком-оператором. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) - это объекты, которые имеют собственные энергетические подсистемы и двигатели. Дальность полета некоторых моделей достигает длительности в несколько месяцев, [1].

Диапазон современных разрабатываемых беспилотных аппаратов широк как по грузоподъемности (от мини-БПЛА до тяжелых многотонных аппаратов), так и по взлету с площадок (горизонтальный и вертикальный), т.е. запуска. С увеличением применения БПЛА в различных сферах, таких как военные операции, мониторинг окружающей среды, доставка грузов, возникает задача поиска эффективных методов их запуска. К основным элементам БПЛА самолетного типа относят: планер, крыло, фюзеляж и хвостовое оперение, двигатель, систему управления с автопилотом, шасси, авионику: трехосевой гироскоп, акселерометр, приемник спутниковой навигационной системы, датчик давления, датчик воздушной скорости и программное обеспечение. Двигатель может быть поршневым или электрическим в зависимости от заданного времени полета. Так поршневой двигатель внутреннего сгорания обеспечивает большее полетное время, но очень сложен в обслуживании, а электродвигатель, наоборот. Наиболее важный элемент системы управления - автопилот с инерциальной системой, [2].

Цель данной работы является разработка трехмерной модели БПЛА самолетного типа вертикального взлета с силовой установкой шести электродвигателей для подъема грузов массой до 140 кг на высоту 1500 м и моделирование его полета средствами САД программ. Данная модель БПЛА должна осуществлять воздушный старт в условиях ограниченного пространства (площадь зоны старта – 10 м²), стабилизироваться при зависании и компенсировать внешние возмущения (ветер, смещение груза). Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: изучить физические и аэродинамические характеристики БПЛА при запуске с ограниченных стартовых площадок (взлет мультикоптера вертикальный), внести корректировки и выбрать модели и количество двигателей. Далее, рассчитать конструкцию карбоновой рамы и балок крепления двигателей, подобрать компоненты силовой установки (моторы, пропеллеры, аккумуляторы), разработать систему электромагнитного крепления груза с резервированием, интегрировать датчики и алгоритмы активной балансировки,

провести расчёты времени полёта, прочности узлов и выбрать оптимальный вариант БПЛА, соответствующий заданным критериям.

Цифровые элементы модели крестовины, подкоса, вставки крепления, штанги для крепления и других представленных выше элементов (рисунок 1) БПЛА (рисунок 2) разрабатывались в программном комплексе *SolidWorks* [3] на основе конечно-разностной сетки. Электрические расчеты тяговой силы, дальности полета и имитационное моделирование работы двигателя, проводилось в условно-бесплатном веб-сервисе *eCalc*, предоставляющего услуги по моделированию и оценке проектов радиоуправляемых моделей посредством онлайн-калькулятора [4]. Математическое моделирование описания основных видов взлета и посадки современных БПЛА остается в закрытом доступе, что не позволяет в полной мере в *eCalc* учитывать характеристики местности взлетно-посадочных площадок для беспилотных подразделений.

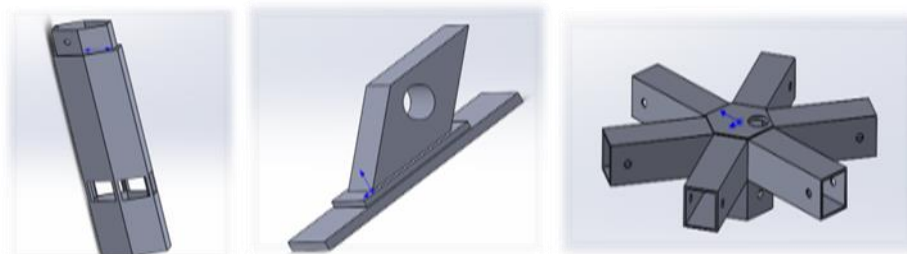


Рисунок 1- Цифровые элементы модели мультикоптера



Рисунок 2 – Цифровая модель разработанного БПЛА самолетного типа

Для тяговой силы и маневренности БПЛА выбрано шесть электродвигателей типа T-Motor V13L-65 (тяга 65 кг каждый), пропеллеры T-Motor T1345S (34.5" × 11", карбон), аккумуляторы типа LiFePO4 48В 100А·ч (4800 Вт·ч), проведен расчет силовых характеристик при полезной нагрузке от 140 до 170 кг

(рисунок 3). Система управления включает: полетный контроллер Pixhawk 6X + RTK-GPS, гироскопы, акселерометры, лидар, ультразвуковые сенсоры.

Основное	Вес модели: 99000 г 3492.1 унций	Кол-во винтов: 6 единичный	Размер рамы: 2400 мм 94.49 дюйм	Ограничение угла крена: Нет	Высота над уровнем моря: 1000 м 3281 футов	Температура воздуха: 25 °C 77 °F	Давление воздуха (QNH): 1013 гПа 29.91 дюйм.рт.ст.	
Аккумулятор	Тип (ток разряда / макс. ток C) - состояние заряда: LiPo 2200mAh - 65/100C - Полный	Сборка: 2 S 5 P	Емкость банки: 22000 мАч 110000 мАч ч всего	Макс. разрядка: 85%	Сопротивление: 0.0006 Ом	Напряжение: 3.7 В	Ток отдачи(C): 65 С постоянная. 100 С макс.	Вес: 617 г 21.8 унций
Регулятор	Тип: max 300A	ток: 300 А пост. 300 А макс.	Сопротивление: 0.0008 Ом	Вес: 390 г 13.8 унций	Навесное оборудование		Потребление: 0 А	Вес: 0 г 0 унций
Мотор	Производитель - Тип (KV) - Охлаждение: (Г = переключено) T-Motor - V13L-65 (65) отличное	KV (без нагрузки): 65 об/В	Ток без нагрузки: 3 А @ 20 В	Предел (до 15с): 18000 Вт	Сопротивление: 0.026 Ом	Длина корпуса: 52 мм 2.05 дюйм	Кол-во магнитов: 38	Вес: 1680 г 59.3 унций
Пропеллер	Тип - угол кручения: Generic - thin - -2.5°	Диаметр: 40 дюйм 1016 мм	Шаг: 15 дюйм 381 мм	Кол-во лопастей: 2	Мощ. пост./Тяга пост.: 1.06 / 1.0	Передаточное число: 1 : 1	Расчитать	

Нагрузка (в А):	Время висения:	Элект. мощность:	Температура:	Тяговооруженность:	Удельная тяга:	Конфигурация

Примечания:

- макс. мощность превышает предельную нагрузку на мотор. Проверьте хар-и мотора по мощности! (Элект. мощность: 18628.5 Вт > Предел (до 15с): 18000 Вт)
- Расчетная температура мотора критическая (>80°C/175°F). Опасность перегрева, проверьте!

Рисунок 3- Расчет силовых характеристик БПЛА

В ходе моделирования рассмотрены три модели работы мультикоптера с шестью двигателями для выбора оптимальной. Каждая модель учитывала различные конфигурации работы двигателей, что позволяло оценить их влияние на подъемную силу и маневренность аппарата [5].

Модель 1. Все шесть двигателей работали одновременно, обеспечивая максимальную подъемную силу и стабильность.

Модель 2. Использовали только четыре двигателя для запуска. Установили, что данная модель позволит сэкономить энергию и продлить время полета.

Модель 3. Осуществили запуск с использованием двух двигателей в одной плоскости. Данная модель позволит осуществлять маневры в ограниченном пространстве.

Анализ всех моделей наглядно показал, что использование одновременно шести двигателей обеспечивает максимальную подъемную силу, однако запуск может быть осуществлен и с использованием только части двигателей, позволяющих адаптироваться к различным условиям.

Применение рекомендуемых механизмов закрепления переносимых грузов, таких как электромагнитные замки, значительно повысят интенсивность операций подъема и спуска в любой точке пространства. По – нашему мнению, время на установку, закрепление, сбрасывания груза, станет значительно меньшим в сравнении с аналогичными запусками с механическими или блочно - веревочными подъёмниками, что является одним из важнейших технологических факторов оценки работы БПЛА вертикального взлета.

Таким образом, представленный БПЛА с оптимальным количеством электродвигателей и закреплением грузов по нашим расчетам, сможет нести полезную нагрузку более 140 кг. Данный факт позволяет рекомендовать его для применения при решении разного вида задач и в любых местностях от суши до моря, при этом построенных площадок не требуется, запуск вертикальный.

Список литературы

1. Булат, П. В. Основы аэродинамики и динамики беспилотных летательных аппаратов: учебное пособие / П. В. Булат, С. Ю. Дудников, П. Н. Кузнецов – М.: Спутник+, 2021. – 273 с.
2. Аэродинамика и самолетостроение: учеб. пособие / В. В. Бирюк [и др.]. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. – 180 с.: ил.
3. eCalc - reliable electric drive simulations. – URL: <https://www.ecalc.ch> (дата обращения 01.12.2025)
4. Прохоренко, В. П. Solid Works. Практическое руководство / В. П. Прохоренко. – М.: БИНОМ, 2004. – 448 с.: ил.
5. Кожемякин, А. Е. Расчет радиуса кривизны полета самолета при переходе к набору вертикальной скорости с учетом тяги двигателя и лобового сопротивления при старте с нулевой скоростью / А. Е. Кожемякин. – Свидетельство о государственной регистрации программы № 2024681669 от 06 сентября 2024 г.

References

1. Bulat, P. V. Fundamentals of Aerodynamics and Dynamics of Unmanned Aerial Vehicles: Textbook / P. V. Bulat, S. Yu. Dudnikov, P. N. Kuznetsov – M.: Sputnik+, 2021. – 273 p.
2. Aerodynamics and Aircraft Engineering: Textbook. manual / V. V. Biryuk [et al.]. – Samara: Publishing House of Samara University, 2018. – 180 p.: ill.
3. eCalc - reliable electric drive simulations. – URL: <https://www.ecalc.ch> (accessed on 01.12.2025)
4. Prokhorenko, V.P. Solid Works. A Practical Guide / V. P. Prokhorenko. – Moscow: BINOM, 2004. – 448 p.: ill.
5. Kozhemyakin, A. E. Calculation of the radius of curvature of an aircraft's flight during the transition to vertical speed gain, taking into account engine thrust and drag at zero-speed takeoff / A. E. Kozhemyakin. – Certificate of State Registration of the program No. 2024681669 dated September 6, 2024.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ В СОСТАВЕ
СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ «УМНОГО ДОМА»
DESIGNING A MECHATRONIC MODULE AS PART OF A SMART HOME
VENTILATION SYSTEM**

Копёнкин К. Н., студент

Поляков С. И., к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

kinstantin.kopyonkin@gmail.com

Kopyonkin K. N., Student

Polyakov S. I., PhD (Engineering), Associate Professor

Voronezh State University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Аннотация: в статье рассматривается автоматизация системы вентиляции в составе умного дома, а также проектирование мехатронного модуля необходимого для реализации автоматической вентиляции. Производится анализ основных параметров качества воздуха и отбор подходящих для контроля. Рассмотрена структурная схема алгоритма управления исполнительными устройствами, разработана программа управления и схема подключения датчиков и исполнительных устройств.

Abstract: this article examines the automation of a ventilation system within a smart home, as well as the design of a mechatronic module required for automated ventilation. Key air quality parameters are analyzed and suitable ones are selected for monitoring. A structural diagram of the actuator control algorithm is presented, and a control program and connection diagram for sensors and actuators are developed.

Ключевые слова: автоматизация, мехатронный модуль, система управления, микропроцессор.

Keywords: automation, mechatronic module, control system, microprocessor.

Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования необходима для обеспечения бесперебойной работы процессов регулирования и управления, связанных с поддержанием требуемого температурного режима, уровня влажности и оптимального полноценного воздухообмена в помещениях. Чаще всего автоматизированные системы управления приточной вентиляцией и кондиционированием устанавливаются на крупных объектах различного назначения – в аэропортах, больницах, на производственных предприятиях, в школах, торговых и бизнес-центрах. Автоматизированное управление позволяет сократить риск ошибок, оптимизировать все процессы управления системами. Так же системы автоматической вентиляции применяются в частные жилые помещения для повышения уровня качества жизни. Автоматизация систем вентиляции необходима в первую очередь для отслеживания состава воздуха в помещении, и коррекции основных трёх параметров качества воздуха: температуры, влажности, чистоты.

Температура. Для контроля используется датчик температуры, для регулирования температурного показателя в помещениях используют обогреватели/системы отопления или кондиционеры – в зависимости от поставленной задачи. Комфортные параметры жилых помещений включают температуру 20–22 °C (допустимо 18–24 °C). [1]

Влажность. Для контроля влажности используется гигрометр, для регулирования влажности воздуха используются осушители/увлажнители. Комфортная влажность 30–60% (оптимально 40–50%).

Чистота воздуха. Для измерения используется анализатор газа и датчик твёрдых частиц. Для улучшения показателя чистоты воздуха в помещении используют специальные устройства – воздухоочистители. С помощью системы фильтров глубокой очистки приборы удаляют загрязнители, такие как пыль, пыльцу, дым, бактерии и другие аллергены, а вентиляция способствует притоку свежего воздуха. Уровень CO₂ не должен превышать 800–1000 ppm. [1]

Для реализации мехатронной системы необходимы физические элементы и логика управления ими.

Микропроцессор. Центр контроля и управления процессами. В этом месте обрабатывается и оценивается вся информация, полученная с датчиков. После анализа программа автоматически рассылает команды на подчиненные ей элементы системы.

Датчики. Это обратная связь, они собирают информацию и передают её в микропроцессор.

Исполнительные устройства. Это устройства, которые непосредственно влияют на микроклимат и находятся под управлением микропроцессора. Реализация включения и выключения будет осуществляться при помощи реле, которое будет подавать питание на прибор при подаче управляющего сигнала с микропроцессора. В качестве исполнительных устройств можно подобрать любые подходящие устройства, либо подключиться к уже существующим. [2]

Достаточно большим ограничением является то, управлять возможно только навесным котлом, так же достаточно большой проблемой является большая инерционность системы отопления (длительный нагрев и также длительное остывание), так что в большинстве случаев есть смысл отказаться от управления системой отопления, так как современные навесные котлы достаточно точны в саморегуляции и не требуют вмешательства со стороны, требуя только первичную настройку, а напольным котлом программно управлять невозможно. Для реализации управления будет использоваться микроконтроллер ATmega328P, который имеет достаточное количество входов/выходов для данной задачи и имеет небольшую стоимость по сравнению с аналогами.

Для измерения температуры и влажности в помещении возьмём DHT11, совместимый с выбранным микропроцессором, стоимость.

Для измерения углекислого газа в помещении возьмём ARDUINO B27 MQ9, так же совместимый с выбранным микропроцессором, стоимость.

Для активации исполнительных устройств используется электромагнитное реле SRD-05VDC-SL-C управление которым осуществляется сигналом 5В. [4]

В соответствии с алгоритмом программа управления приведена ниже.

```
// Определение пинов для подключения датчиков и исполнительных устройств
const int CO2_SENSOR_PIN = A0;           // Аналоговый пин для датчика CO2
const int TEMPERATURE_SENSOR_PIN = A1;   // Аналоговый пин для датчика температуры
const int HUMIDITY_SENSOR_PIN = A2;      // Аналоговый пин для датчика влажности

const int VENTILATION_PIN = 2;           // Цифровой пин для управления вентиляцией
const int CONDITIONER_PIN = 3;          // Цифровой пин для управления кондиционером
const int DEHUMIDIFIER_PIN = 4;         // Цифровой пин для управления осушителем
const int HUMIDIFIER_PIN = 5;           // Цифровой пин для управления увлажнителем

// Пороговые значения
const int CO2_THRESHOLD = 900;          // Порог концентрации CO2
const float HIGH_TEMP_THRESHOLD = 25.0; // Верхний порог температуры для кондиционера
const float MEDIUM_TEMP_THRESHOLD = 22.0; // Порог температуры для выключения кондиционера

const float HIGH_HUMIDITY_THRESHOLD = 50.0; // Верхний порог влажности для осушителя
const float LOW_HUMIDITY_THRESHOLD = 40.0; // Нижний порог влажности для увлажнителя
```

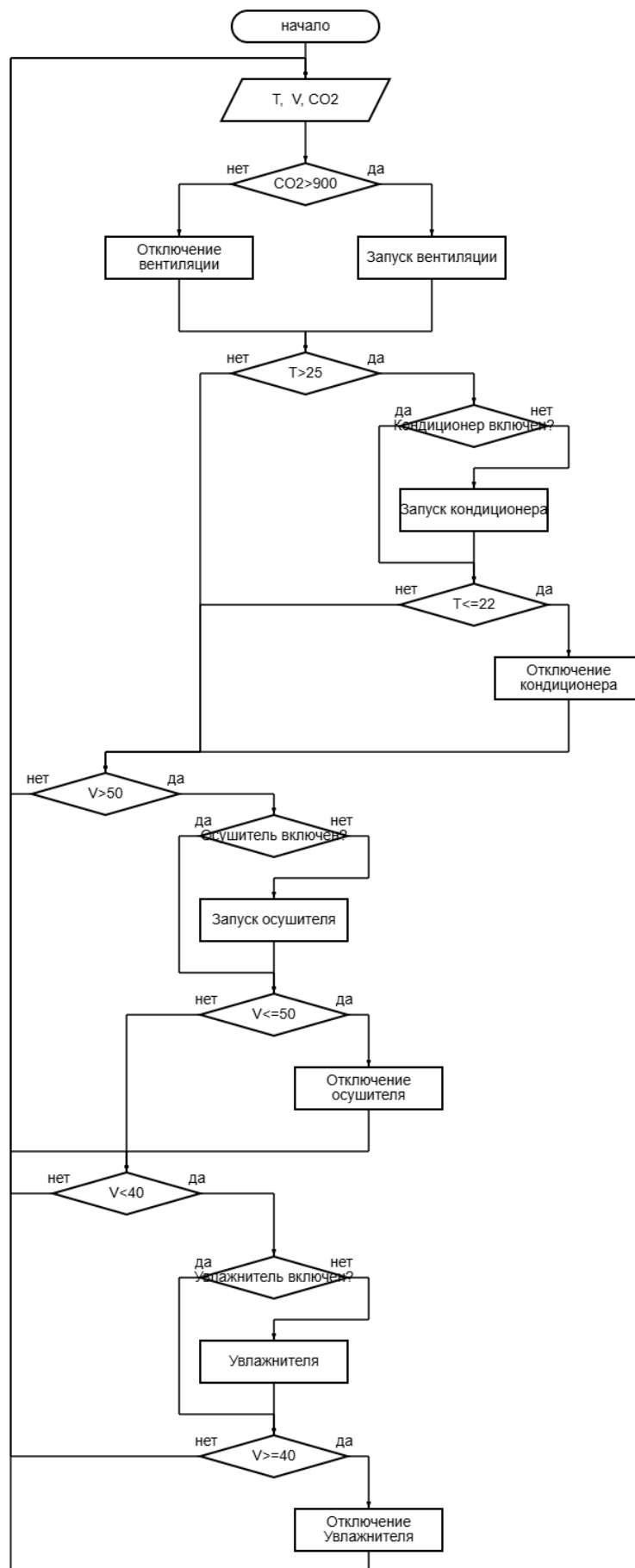


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма для микропроцессора

```

// Переменные для хранения текущих показаний датчиков
float temperature;
float humidity;
int co2Level;

// Флаги состояния устройств (для отслеживания, включено ли устройство, чтобы
избежать повторного включения/выключения)
bool ventilationState = false;
bool conditionerState = false;
bool dehumidifierState = false;
bool isHumidifierOn = false;

void setup() {
  // Инициализация последовательного порта для отладки
  Serial.begin(9600);

  // Настройка пинов как выходов
  pinMode(VENTILATION_PIN, OUTPUT);
  pinMode(CONDITIONER_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DEHUMIDIFIER_PIN, OUTPUT);
  pinMode(HUMIDIFIER_PIN, OUTPUT);

  // Инициализация устройств в выключенном состоянии
  digitalWrite(VENTILATION_PIN, LOW);
  digitalWrite(CONDITIONER_PIN, LOW);
  digitalWrite(DEHUMIDIFIER_PIN, LOW);
  digitalWrite(HUMIDIFIER_PIN, LOW);
}

void loop() {
  // Считывание показаний датчиков
  readSensors();

  // Управление вентиляцией
  if (co2Level > CO2_THRESHOLD) { // CO2 > 900
    Serial.println("CO2 is high, starting ventilation.");
    digitalWrite(VENTILATION_PIN, HIGH);
    ventilationState = true;
  } else { // CO2 <= 900
    Serial.println("CO2 is normal, stopping ventilation.");
    digitalWrite(VENTILATION_PIN, LOW);
    ventilationState = false;
  }

  // Управление кондиционером
  if (temperature > HIGH_TEMP_THRESHOLD) {
    Serial.println("Temperature is high.");
    if (!conditionerState) {
      Serial.println("Starting conditioner.");
      digitalWrite(CONDITIONER_PIN, HIGH);
      conditionerState = true;
    }
  } else if (temperature <= MEDIUM_TEMP_THRESHOLD) { // T <= 22
    Serial.println("Temperature is optimal or low.");
    if (conditionerState) { // Если кондиционер включен
      Serial.println("Stopping conditioner.");
      digitalWrite(CONDITIONER_PIN, LOW);
      conditionerState = false;
    }
  }

  // Управление осушителем
  if (humidity > HIGH_HUMIDITY_THRESHOLD) {
    Serial.println("Humidity is high.");
  }
}

```

```

Serial.println("Starting dehumidifier.");
digitalWrite(DEHUMIDIFIER_PIN, HIGH);
dehumidifierState = true; // Устанавливаем флаг, что он включен
} else if (humidity <= HIGH_HUMIDITY_THRESHOLD) { // V <= 50
Serial.println("Humidity is optimal or low.");
if (dehumidifierState)
    Serial.println("Stopping dehumidifier.");
    digitalWrite(DEHUMIDIFIER_PIN, LOW);
    dehumidifierState = false; // Сбрасываем флаг
}
}

// Управление увлажнителем
if (humidity < LOW_HUMIDITY_THRESHOLD) {
Serial.println("Humidity is low.");
if (!isHumidifierOn) {
    Serial.println("Starting humidifier.");
    digitalWrite(HUMIDIFIER_PIN, HIGH);
    isHumidifierOn = true;
}
} else if (humidity >= LOW_HUMIDITY_THRESHOLD) {
Serial.println("Humidity is optimal or high.");
if (isHumidifierOn) {
    Serial.println("Stopping humidifier.");
    digitalWrite(HUMIDIFIER_PIN, LOW);
    isHumidifierOn = false;
}
}

// Небольшая задержка перед следующим циклом считывания датчиков и принятия
решений
delay(1000);
}

// Функция для считывания показаний датчиков
void readSensors() {
    co2Level = analogRead(CO2_SENSOR_PIN);
    temperature = map(analogRead(TEMPERATURE_SENSOR_PIN), 0, 1023, -10, 50);
    humidity = map(analogRead(HUMIDITY_SENSOR_PIN), 0, 1023, 0, 100);
}

```

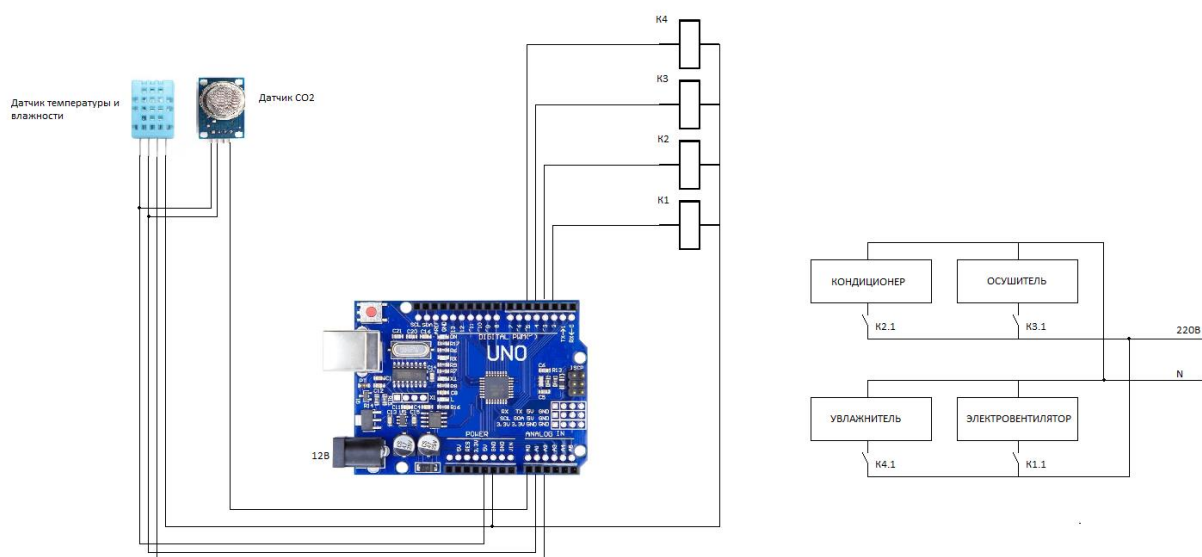


Рисунок 2 – Электросхема управления исполнительными устройствами и работы с датчиками

Разработанная схема управления для контроля качества воздуха позволяет регулировать параметр температуры, влажности и очищать воздух от примесей, что в свою очередь благоприятно сказывается на состоянии организма. Система полностью автоматизирована и не требует вмешательства со стороны, кроме зимнего периода, когда требуется работа отопления. Наличие обратной связи в виде датчиков положительно сказывается на точности регулирования заданных параметров и исключает наличие ошибок.

Список литературы

1. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 ; зарег. в Минюсте России 29.01.2021 № 62296 (в ред. от 24.12.2025) // КонсультантПлюс. – URL: <https://www.consultant.ru/law/hotdocs/67487.html>.
2. Официальный сайт компании Arduino. – URL: <https://arduino.ru/> (дата обращения: 11.03.2026).
3. Arduino.ru – Русскоязычное комьюнити ардуино энтузиастов. – URL: <https://forum.arduino.ru/> (дата обращения: 11.03.2026).
4. Поляков, С. И. Автоматика и автоматизация производственных процессов: учеб. пособие / С. И. Поляков; Фед. агентство по образованию, ГОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2008. – 372 с.

References

1. SanPiN 1.2.3685-21 "Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans" : approved by Resolution No. 2 of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28, 2021 ; reg. in the Ministry of Justice of Russia on 29.01.2021 No. 62296 (as amended dated 12/24/2025) // ConsultantPlus. – URL: <https://www.consultant.ru/law/hotdocs/67487.html>.
2. Official website of the Arduino company. – URL: <https://arduino.ru/> / (date of request: 03/11/2026).
3. Arduino.ru – The Russian-speaking community of Arduino enthusiasts. – URL: <https://forum.arduino.ru/> / (date of access: 03/11/2026).
4. Polyakov, S. I. Automation and automation of production processes: textbook. manual / S. I. Polyakov; Federal Agency for Education, State Educational Institution of Higher Professional Education "VGLTA". Voronezh, 2008. 372 p. (in Russian).

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ
РОБОТОВ В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ
A REVIEW OF THE USE OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS
IN URBAN ENVIRONMENTS**

Локтионов А.С., студент

Стариков А.В., д.т.н., профессор

Мельников А.В., д.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

sasaloktionov255@gmail.com

Loktionov A.S., Student

Starikov A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor

Melnikov A.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Voronezh State University of Forestry and Technologies

named after G.F. Morozov,

Voronezh, Russia

Аннотация: Рассмотрены автономные мобильные роботы для применения в городских условиях. Приведена классификация мобильных городских роботов, показаны примеры их использования, отмечены особенности их конструкции, а также возможности расширения областей их применения.

Abstract: Autonomous mobile robots for use in urban environments are examined. A classification of urban mobile robots is presented, examples of their use are shown, their design features are highlighted, and potential applications for their use are explored.

Ключевые слова: Робот, городская среда, взаимодействие.

Keywords: Robot, urban environment, interaction.

Перечень областей применения мобильных роботов постоянно расширяется. В последние годы все больше моделей мобильных роботов разрабатываются и используются для выполнения различных функций в условиях совре-

менного города. От мобильных городских роботов требуется не только автоматически выполнять поставленные задачи, но и идентифицировать и обходить препятствия, а также осуществлять взаимодействие с человеком. Использование в системе управления средств искусственного интеллекта позволяет разрабатывать автономные мобильные роботы, которые способны адаптировать алгоритмы своего поведения под изменяющиеся внешние условия.

Городские роботы могут выполнять следующие функциональные задачи:

- уборка территорий;
- патрулирование улиц;
- доставка товаров;
- экологический мониторинг;
- обслуживание человека.

Помимо выполнения функциональных задач роботам приходится взаимодействовать с окружающим их миром. С помощью датчиков и алгоритмов управления они обходят препятствия, строят маршруты движения и взаимодействуют с людьми.

Основу конструкции данных роботов составляют следующие элементы:

1. Корпус, который является оболочкой для всех компонентов робота.
2. Электродвигатели, приводящие механические части робота в движение и позволяющие передвигаться по территории.
3. Исполнительные органы, предназначенные для выполнения функциональных задач, для которых проектировался робот.
4. Камеры и датчики, с помощью которых робот может получать информацию об окружающем мире.
5. Искусственный интеллект, являющийся неотделимой частью автономного робота. Он позволяет ориентироваться в пространстве, обходить препятствия и взаимодействовать с человеком, а также принимать решения в нестандартных ситуациях.

Помимо перечисленных выше компонентов могут использоваться и другие: индикаторы, экраны и т.д.

Городские роботы могут классифицироваться по следующим критериям:

- по конструкции (робот, может быть, компактных размеров или громоздких);
- по степени с взаимодействием с людьми (робот, который может взаимодействовать с ними или не может);

– по типу выполняемой функциональной задачи (уборщик, парильщик и т.д.).

В большинстве случаев роботы классифицируются по типу выполняемых функциональных задач. Рассмотрим следующие виды роботов:

1) Патрульный робот – это автономный робот, который поддерживает безопасность на отведенной ему территории. Такие роботы могут вести съёмку происходящего, фиксировать правонарушения и передавать информацию о них в ближайший отдел полиции. Данный тип роботов могут быть как наземного типа, так и надземного.

2) Робот-доставщик – это автономный робот для доставки груза заказчику, который может перемещаться по дорогам и тротуарам. Такие роботы взаимодействуют не только с людьми, но и анализируют дорожную ситуацию, выполняют правила дорожного движения.

3) Робот для экологического мониторинга – это автономный робот, который предназначен для сбора данных о состоянии окружающей среды в режиме реального времени. Такие роботы позволяют оценить экологическое состояние города.

4) Сервисные роботы – это роботы, предназначенные для обслуживания людей. Такие роботов используются в парках и торговых центрах, в кафе и т.д.

5) Робот-уборщик – это автономное устройство, которое предназначено для уборки городских территорий, в том числе тротуаров и дорожек. Кроме этого, такие роботы могут убирать и жилые территории, парковочные места и т.д.

Ниже рассмотрены примеры использования автономных роботов в городских условиях.

Робот-полицейский. Xavier – автономный робот-полицейский, который в 2021 году участвовал в экспериментах по контролю общественного порядка в Сингапуре. Данный робот оснащён камерой, имеющей угол обзора 360 градусов, а также функцию ночного зрения. Также у робота имеются сенсоры, позволяющие различать ему статичные и движущиеся объекты. Автономный робот-патрульный может развивать скорость до 5 км/ч и работать без подзарядки около 5 часов.

Робот может наблюдать за порядком в общественных местах и при обнаружении нарушения может отправить оповещение своим коллегам-полицейским. Xavier может сделать предупреждение человеку за курение в непредназначенных для этого местах, за незаконную парковку, за пренебрежение социальной дистанцией и скопление группами более пяти человек, за проезд механических транспортных средств в неположенных для этого местах. Он может транслировать заранее записанные аудиосообщения или же связываться с сотрудниками полиции, которые через громкую связь будут вести диалог с нарушителем [1, 2].

Внешний вид робота-полицейского Xavier представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Робот-полицейский Xavier

Имеется также отечественная разработка робота-полицейского, получившего кодовое наименование «Патрульный». Это городской робот, основными задачами которого являются патрулирование больших территорий в дневное и ночное время, поддержка условий безопасности, распознавание нештатных ситуаций, оказание помощи людям, в том числе маломобильным гражданам. Данный робот разрабатывался в расчете на климатические условия России и обладает большей проходимостью, чем рассмотренный выше китайский робот-

полицейский, при схожем с ним функционале [3]. Внешний вид робота «Патрульный» представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Робот-полицейский «Патрульный»

Робот-курьер (ровер) Яндекса – автономный робот, разработанный компанией «Яндекс» для доставки малогабаритных грузов, посылок и почты, который эксплуатируется с 2019 года.

Робот представляет собой небольшой вездеход с тремя парами колес. В контейнер робота упаковываются грузы и посылки весом до 20 кг. Робот оснащен множеством датчиков, камерами и лидаром, что обеспечивает ему высокую степень автономности. Ровер способен двигаться по различной местности, включая заснеженную, но все же предпочтительным является перемещение по дорогам. Робот способен обходить препятствия, людей и машины. В случае возникновения каких-либо проблем, например, столкновения с машиной или нападения хулиганов, робот посылает сигнал в ближайший пункт управления Яндекса. Вес робота составляет 70 кг, он развивает скорость до 8 км/ч. С начала использования робот модифицировался 5 раз. Каждая модификация повышала продолжительность работы, грузоподъемность и уровень автоматизации [4].

Принцип работы ровера заключается в следующем:

- Робот передвигается по городу, самостоятельно определяя оптимальный маршрут, обладает возможностями для преодоления ряда препятствий (например, невысоких бордюров).
- Робот способен пользоваться пешеходными переходами, распознает сигналы светофора, обеспечивает обзор 360°, идентифицирует приближающиеся объекты.

– Если на пути робота оказывается человек или какое-либо препятствие (например, ограждение), робот останавливается и предпринимает действия по его объезду.

– При сильном сближении с людьми, робот останавливается и ожидает, действий со стороны человека. Особую осторожность робот проявляет при сближении с детьми, при активных действиях ребёнка в отношении робота, он может связаться с оператором и запросить помощь [5].

Внешний вид ровера от Яндекса представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Ровер от Яндекса

Робот экологического мониторинга Т5 Экобот – это автономный передвижной комплекс для оперативного экологического мониторинга воздуха, воды и почвы в промышленных, урбанизированных и природных зонах. Данный робот разработан для круглосуточного применения в полевых условиях, где требуется точное измерение концентраций вредных веществ без участия человека. Робот обеспечивает выполнение функций лабораторного анализа, навигации и передачи данных.

Корпус робота выполнен из антикоррозионных материалов, которые обеспечивают надёжную защиту при температурных перепадах и воздействии агрессивной среды. Робот оснащен системой позиционирования и автономного передвижения, что позволяет проводить маршрутный отбор проб по заданным координатам.

Встроенный аналитический блок позволяет выполнить экспресс-обработку данных и передать результаты на сервер. Модульная конструкция робота позволяет легко адаптировать комплекс под разные задачи: экологический аудит, промышленный контроль, оценку влияния предприятий на окружающую среду. Робот может применяться в различных условиях для экологического мониторинга региона или предприятия [6].

Робот экологического контроля состояния атмосферы способен работать как днем, так и ночь, поскольку оснащен собственной инфракрасной подсветкой пути движения, так же может обходить препятствия [7].

Внешний вид робота T5 Экобот показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – T5 Экобот

BellaBot Pro – робот-официант, который включает в себя функции доставки, взаимодействия с людьми и рекламной платформы. Данный робот предназначен для повышения эффективности обслуживания и привлечения внимания посетителей [8].

Особенности BellaBot Pro:

Автономная работа. Робот самостоятельно перемещается по залу и доставляет заказы на столики клиентов. Умные лотки автоматически распознают блюда и оповещают гостей о прибытии заказа.

Большой рекламный экран. Робот оснащен 18,5-дюймовым дисплеем на котором показывает рекламу и промо-материалы, привлекая посетителей.

Интерактивное общение. Робот приветствует гостей голосом, реагирует на прикосновения, выражает эмоции на экране и с помощью световой индикации.

Безопасность и стабильность. Система Omni-Sense с камерами, 3D-датчиками и лидаром гарантирует безопасное перемещение робота в пространстве [9].

Данный робот может применяться в парках, кафе и ресторанах, а также и в больницах. Внешний вид робота BellaBot Pro показан на рисунке 5.



Рисунок 5 – BellaBot Pro

Пиксель – робот-уборщик, который может работать в парках и на улицах города. Разработчиком робота является московская компания «Автономика». Робот может работать как в автономном режиме, так и в ручном – с использованием пульта дистанционного управления [10].

Робот предназначен для работы с навесным оборудованием, что позволяет использовать его в любое время года. Кроме смены оборудования робот может использовать различные программы, обеспечивающие выполнение различных функций – от снегоуборщика до пылесоса. Размеры и мощность робота рассчитаны на московский климат, т.е. робот способен выдерживать как жару, так морозы. Возможно обучение робота с помощью цифрового двойника улиц города, что повышает его «топографические» способности.

Робот может развивать скорость до 10 км/ч и работать до 16 часов в сутки с промежуточными подзарядками, производя уборку до 2 гектаров территории. Робот оснащен многосенсорной системой навигации и компьютерным зрением, благодаря чему может без проблем ориентироваться в пространстве и избегать столкновений [11].

На рисунках 6 и 7 показано оснащение робота для использования в разные сезоны (лето/зима).



Рисунок 6 – Пиксель для использования летом



Рисунок 7 – Пиксель для использования зимой

Рассмотренные выше роботы различаются не только сферой деятельностью, но и степенью взаимодействия с городской средой, представленной живыми и неживыми объектами.

Рассмотрим основные возможности представленных роботов:

1. Роботы-полицейские Xavier и «Патрульный» могут взаимодействовать с людьми и обходить препятствия.

2. Ровер от Яндекса может взаимодействовать с людьми, обходить препятствия, а также соблюдать правила дорожного движения.

3. T5 Экобот может обходить препятствия. Информация о взаимодействии робота с людьми отсутствует.

4. BellaBot Pro может взаимодействовать с людьми и обходить препятствия.

5. «Пиксель» может обходить препятствия. При виде человека может корректировать свои действия.

На основе рассмотренных возможностей роботов можно выделить 4 ключевых критерия:

1. Мобильность и адаптация в городской среде

– Способность перемещаться по разным типам поверхностей (тротуар, снег, листва и грязь).

– Учет погодных условий (влагозащита, работа при морозах и в жару).

Пример: «Пиксель» работает и зимой, и летом; ровер от Яндекса может двигаться по снегу.

2. Навигационная автономность и безопасность

– Уровень объезда препятствий.

– Соблюдение правил населенного пункта (ПДД, пешеходные переходы, светофоры).

– Работа в темноте (фонари, инфракрасная подсветка, ночное зрение).

Пример: Xavier имеет обзор 360°; ровер от Яндекса распознает сигналы светофора.

3. Социальное взаимодействие (Человек-Робот)

– Способность распознавать людей и их действия (дети, нарушители).

– Наличие обратной связи (голосовое оповещение, экран, индикация, аудиосообщения).

– Реакция на нестандартное поведение человека (агрессия, просьба о помощи).

Пример: BellaBot Pro выражает эмоции; «Патрульный» помогает маломобильным людям.

4. Интеллектуальная обработка данных (ИИ)

- Способность к обучению в новых условиях (цифровые двойники).
- Принятие решений в нестандартных ситуациях.
- Связь с внешними системами (передача данных в участок, на сервер, оператору).

Пример: «Пиксель» обучается на цифровом двойнике; «Т5 Экобот» передает данные на сервер.

В городской среде очень важны «Безопасность» и «Социальное взаимодействие», так как робот находится среди людей. Интеллект важен для автономности, но является скорее инструментом для выполнения критериев 2 и 3. Мобильность – базовая необходимость, но уступает в приоритете безопасности.

Составим таблицу приоритеты критериев (К относительно Цели).

Таблица 1 – таблица приоритетов

Критерий	1	2	3	4	Вектор приоритетов
Мобильность	1	1/3	1/3	2	0.15
Навигация/Безопасность	3	1	2	3	0.44
Социальное взаимодействие	3	1/2	1	3	0.31
Интеллект (ИИ)	1/2	1/3	1/3	1	0.10
Сумма					1.00

Составим таблицу оценка роботов, по данным, которые уже имеются.

Таблица 2 – Экспертная оценка роботов

Робот	К1 (Мобильность)	К2 (Безопасность/Навигация)	К3 (Социальное)	К4 (ИИ/Аналитика)
Патрульный	7 (до 5 км/ч, ровные	9 (360° камера,	8 (аудиоопо-	7 (распознавание нару-

Робот	К1 (Мобильность)	К2 (Безопасность/Навигация)	К3 (Социальное)	К4 (ИИ/Аналитика)
(Xavier)	поверхности)	ночь, сенсоры)	вещение, связь с оператором)	шений)
Доставщик (Ровер)	8 (вездеход, 3 пары колес, снег)	10 (ПДД, светофоры, объезд людей)	6 (дистантное, связь при ЧП)	9 (обновления, оптимизация маршрута)
Эколог (T5)	6 (специализированное шасси)	8 (инфракрасное зрение, объезд)	2 (не предусмотрено статьей)	8 (анализ проб, передача данных)
Сервисный (BellaBot)	5 (помещения/парк, ровный пол)	7 (лидар, 3D-датчики)	10 (эмоции, экран, голос)	6 (распознавание блюд)
Уборщик (Пиксель)	9 (вездеход, смена навесного, климат)	8 (компьютерное зрение, избегание)	5 (корректировка при виде человека)	8 (обучение на двойнике)

В рассмотренных выше роботах за взаимодействия с окружающим миром отвечают различные датчики, лидары и камеры, но важнейшим элементом является программное обеспечение, чем оно совершеннее, тем роботы лучше взаимодействуют с людьми и другими объектами окружающего мира. Также для лучшего взаимодействия с городской средой используются не только компоненты для обработки поступающих данных об окружающем мире, но и компоненты для вывода информации в окружающую среду. С ее помощью можно уведомить человека о цели робота, не прибегая к длительному простоя и ожиданию команды оператора.

Для использования в мегаполисе с высокой плотностью населения оптимальным решением (согласно данным представленным в таблицах) является Ровер от Яндекса или модернизированный Патрульный с усиленной функцией социального ИИ.

В заключении отметим, что в настоящее время существует множество роботов для городской среды, которые могут выполнять различные задачи: от обслуживания человека до уборки территорий. Имеются роботы, которые не сильно взаимодействуют с людьми, но для выполнения их функциональных задач это не является необходимым. Однако появляется все больше разновидностей роботов, которые могут в полной мере общаться с человеком. Эти роботы имеют более сложное устройство, включая алгоритмы его работы.

Для городской среды предпочтительнее использовать роботы, которые могут достаточно полно взаимодействовать с городской средой, в частности, ориентироваться в городе, обходить препятствия и взаимодействовать с людьми. Такие роботы являются более универсальными и их можно будет использовать в различных целях.

Список литературы

1. Робот-полицейский начал патрулировать Сингапур // Skillbox. – URL: <https://skillbox.ru/media/business/robotpolitseyskiy-nachal-patrulirovat-singapur/?ysclid=mlxzshpmhe149997121> (дата обращения: 20.02.2026).
2. На улицах Сингапура появился робот-полицейский Xavier // РБК Тренды. – URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/613f04739a7947af25776881> (дата обращения: 20.02.2026).
3. Патрульный робот // Гумич-РТК : официальный сайт компании. – URL: <https://gumich-rtk.ru/roboty/patrulnyj/?ysclid=mly08dkeaj96048262> (дата обращения: 20.02.2026).
4. Робот-доставщик «Яндекса» // Википедия: свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Робот-доставщик_«Яндекса» (дата обращения: 20.02.2026).
5. Робот-доставщик // Яндекс: официальный сайт. – URL: <https://autonomy.yandex.ru/products/robot> (дата обращения: 20.02.2026).
6. Мобильный роботизированный экопост Экобот-Лаборант // Газанализатор.ру. – URL: <https://gazoanalizator.ru/catalog/gazoanalizatory/mobilnyy-robotizirovannyu-ekopost-ekobot-laborant/> (дата обращения: 21.02.2026).
7. Робот экологического мониторинга загрязнения воздуха Т5 Экобот // Промвест: информационный портал. – URL: <https://promvest.info/ru/goods/robot-ekologicheskogo-monitoringa-zagryazneniya-vozduha-t5-ekobot/> (дата обращения: 21.02.2026).

8. BellaBot – робот-официант // ТЕХНОРОБОТ: официальный сайт компании. – URL: <https://xn--4-btb7b.xn--p1ai/bellabot> (дата обращения: 22.02.2026).
9. Робот-официант Pudu BellaBot PRO // TINVEST: интернет-магазин. – URL: <https://tnvst.ru/catalog/servisnye-roboty/robot-ofitsiant-pudu-bellabot-pro/> (дата обращения: 22.02.2026).
10. Пиксель (робот-уборщик) // Tadviser: [портал]. – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:Пиксель_\(робот-уборщик\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:Пиксель_(робот-уборщик)) (дата обращения: 22.02.2026).

References

1. A police robot has started patrolling Singapore // Skillbox. – URL: <https://skillbox.ru/media/business/robotpolitseyskiy-nachal-patrulirovat-singapur/?ysclid=mlxzshpmhe149997121> (date of conversion: 02/20/2026).
2. Xavier police robot appeared on the streets of Singapore // RBC Trends. – URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/613f04739a7947af25776881> (date of access: 02/20/2026).
3. Patrol robot // Gumich-RTK : the official website of the company. – URL: <https://gumich-rtk.ru/roboty/patrulnyj/?ysclid=mly08dkeaj96048262> (accessed: 02/20/2026).
4. The Yandex delivery robot // Wikipedia: a free encyclopedia. –URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Yandex_Delivery_robot_ (accessed: 02/20/2026).
5. Delivery robot // Yandex: the official website. – URL: <https://autonomy.yandex.ru/products/robot> (date of access: 02/20/2026).
6. Mobile robotic ecostat Ecobot-Laboratory assistant // <url> – URL: <https://gazoanalizator.ru/catalog/gazoanalizatory/mobilnyy-robotizirovanny-ekopost-ekobot-laborant/> (date of access: 02/21/2026).
7. Robot for environmental monitoring of air pollution T5 Ecobot // Promvest: information portal. – URL: <https://promvest.info/ru/goods/robot-ekologicheskogo-monitoringa-zagryazneniya-vozduha-t5-ekobot/> (date of access: 02/21/2026).
8. BellaBot robot waiter // TECHNOROBOT: the official website of the company. – URL: <https://xn--4-btb7b.xn--p1ai/bellabot> (date of conversion: 02/22/2026).
9. Pudu BellaBot PRO waiter robot // TINVEST: online store. – URL: <https://tnvst.ru/catalog/servisnye-roboty/robot-ofitsiant-pudu-bellabot-pro/> (date of access: 02/22/2026).
10. Pixel (cleaning robot) // Tadviser: [portal]. – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Product:Pixel_\(cleaning_robot\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Product:Pixel_(cleaning_robot)) (accessed: 02/22/2026).

**ГИБРИДНАЯ АРХИТЕКТУРА ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА
ВЕЩЕЙ: ИНТЕГРАЦИЯ СУШИЛЬНЫХ КАМЕР С СИСТЕМАМИ
SCADA/MES ПОСРЕДСТВОМ ПРОТОКОЛОВ OPC UA И MQTT
HYBRID ARCHITECTURE OF THE INDUSTRIAL INTERNET
OF THINGS: INTEGRATION OF DRYING CHAMBERS WITH
SCADA/MES SYSTEMS VIA OPC UA AND MQTT PROTOCOLS**

Черных М.Е., студент

Руссу А.В., к.т.н., доцент

Щербакова И.В., к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет

имени Г.Ф. Морозова» г. Воронеж, Россия

shcherbakovaiv@vglta.vrn.ru

Chernykh M.E., student

Russu A.V., CSc (Engineering), Associate Professor

Shcherbakova I.V., CSc (Engineering), Associate Professor

Voronezh State University of Forestry and Technologies named

after G.F. Morozov,

Voronezh, Russia

Аннотация: В условиях цифровизации производственных процессов актуальной задачей становится преодоление проблемы «информационных островов» при мониторинге технологического оборудования. Целью исследования являлась разработка архитектуры системы удаленного мониторинга сушильных камер, обеспечивающей одновременную поддержку облачного доступа и глубокой интеграции с корпоративными системами управления производством. В работе применён сравнительный анализ двух архитектурных парадигм: автономного облачного решения и гибридной системы «Край-Облако». Методология включает моделирование потоков данных с использованием протоколов OPC UA для семантической интероперабельности на уровне оборудования и MQTT для эффективной транспортировки данных в облачную среду. Ключе-

вым результатом является обоснование гибридной архитектуры, позволяющей снизить сетевой трафик на 30-40% за счёт edge-аналитики и обеспечить задержку реакции на критические события менее 200 мс. Предложенное решение поддерживает интеграцию с MES через RESTful API и масштабируется благодаря использованию стандарта Sparkplug B. Гибридная модель «Край-Облако» является оптимальным выбором для предприятий, стремящихся к поэтапной цифровой трансформации без замены существующей ОТ-инфраструктуры.

Abstract: In the context of production digitalization, overcoming the "data silo" problem in technological equipment monitoring becomes a critical challenge. The study aims to develop a remote monitoring system architecture for drying chambers that simultaneously supports cloud access and deep integration with corporate manufacturing execution systems. A comparative analysis of two architectural paradigms was applied: autonomous cloud solution and hybrid "Edge-Cloud" system. The methodology includes data flow modeling using OPC UA protocol for semantic interoperability at the equipment level and MQTT for efficient data transport to the cloud environment. The key result substantiates the hybrid architecture, enabling a 30-40% reduction in network traffic through edge analytics and ensuring sub-200 ms response latency for critical events. The proposed solution supports MES integration via RESTful API and scales through Sparkplug B standard adoption. Conclusion: the "Edge-Cloud" hybrid model represents the optimal choice for enterprises pursuing phased digital transformation without replacing existing OT infrastructure.

Ключевые слова: промышленный интернет вещей, гибридная архитектура, OPC UA, MQTT, SCADA, MES, временные ряды.

Keywords: Industrial Internet of Things, hybrid architecture, OPC UA, MQTT, SCADA, MES, time-series data.

Цифровая трансформация промышленного сектора в рамках концепции Индустрии 4.0 требует создания единого информационного пространства, объединяющего операционные технологии и информационные системы [1]. Однако на практике предприятия часто сталкиваются с фрагментацией данных: системы мониторинга оборудования функционируют изолированно от корпоративных платформ планирования и управления качеством, что ограничивает возможности аналитики и оперативного принятия решений [2].

Особую актуальность решение данной проблемы приобретает в технологических процессах сушки материалов, где возможность контроля температурно-влажностных режимов в реальном времени во многом определяет качество

конечной продукции. Существующие решения на базе автономных облачных платформ позволяют обеспечить удалённый доступ к данным, однако они не поддерживают семантическую интеграцию с промышленными контроллерами [3].

Целью данного исследования является разработка и обоснование архитектуры системы мониторинга сушильных камер, сочетающей преимущества облачных технологий с возможностью глубокой интеграции с промышленной инфраструктурой предприятия. Предлагаемое решение базируется на гибридной архитектуре «Край-Облако», в которой интеллектуальный шлюз на периферии сети выполняет функции как семантического преобразователя данных, так и платформы для edge-аналитики. Методика исследования включает сравнительный анализ архитектурных подходов, моделирование потоков данных и оценку производительности ключевых компонентов системы. Экспериментальная проверка проводилась на тестовом стенде, имитирующем работу сушильной камеры с датчиками температуры и влажности типа SHT30, подключёнными к микроконтроллеру на базе RaspberryPi 4 [4].

Алгоритм работы системы:

1. Сбор данных с датчиков через интерфейсы I2C/SPI с адаптивной частотой опроса.
2. Локальная предобработка: расчёт производных параметров, скорость изменения влажности, фильтрация шумов.
3. Трансляция данных в формат OPC UA для интеграции с локальными SCADA-системами.
4. Преобразование в MQTT-сообщения с метаданными по спецификации Sparkplug B и публикация в облачный брокер.
5. Приём, агрегация и сохранение данных в облачной временной базе данных (TSDB).
6. Предоставление доступа к данным через RESTful API для MES и веб-интерфейсов.

Для взаимодействия с оборудованием выбран протокол OPC UA как стандарт, обеспечивающий платформенную независимость, безопасность и семантическую интероперабельность. Это выполнено за счёт встроенной информации о типах данных, единицах измерения и контексте [5]. Для передачи данных в облако применён MQTT благодаря его легковесности, асинхронной модели «публикация/подписка» и устойчивости к нестабильным каналам связи.

Использование надстройки Sparkplug В позволяет автоматизировать конфигурацию новых устройств и унифицировать структуру сообщений [6].

Архитектура системы включает три уровня:

- OT-уровень: датчики, ПЛК, HMI, SCADA-серверы.
- Сетевой уровень: интеллектуальный шлюз с ПО на базе Node-RED, выполняющий протокольную трансляцию и edge-аналитику.
- IT-уровень: облачный MQTT-брокер, TSDB, сервисы аналитики и REST API.

На краю сети реализуется алгоритм адаптивного опроса: при стабильных значениях параметров частота считывания снижается, что сокращает энергопотребление и сетевой трафик. Расчёт скорости изменения влажности выполняется локально, что позволяет генерировать тревожные события с минимальной задержкой. Сравнительная оценка двух архитектурных подходов представлена в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика архитектурных решений

Компоненты на «краю» сети	Минимальный шлюз	Интеллектуальный шлюз
Протоколы	MQTT	OPC UA (вход), MQTT (выход)
Интеграция с SCADA/MES	Отсутствует	Полная
Масштабируемость	Ограничена, требует ручной настройки	Высокая
Задержка реакции на событие	500–1000 мс	<200 мс
Снижение сетевого трафика	До 15%	30–40%
Сложность внедрения	Низкая	Высокая

Количественные метрики получены в ходе тестирования на стенде с эмуляцией 10 сушильных камер, генерирующих данные с частотой 1 Гц. При использовании edge-аналитики объём передаваемых данных сократился с 864 000 записей/сутки до ~520 000 записей/сутки за счёт агрегации и фильтрации.

Полученные результаты подтверждают, что гибридная архитектура обеспечивает оптимальный баланс между скоростью развёртывания системы и глубиной интеграции в инфраструктуру предприятия. Снижение сетевого трафика на 30-40% достигается не только за счёт адаптивного опроса, но и благодаря выполнению аналитических функций на краю сети. Это особенно важно при использовании беспроводных каналов связи с ограниченной пропускной способностью [4].

Итак, в ходе исследования разработана и обоснована концепция гибридной архитектуры «Край-Облако» для системы удалённого мониторинга сушильных камер. Доказано, что сочетание протоколов OPC UA и MQTT, дополненное edge-аналитикой и стандартом Sparkplug B, обеспечивает семантическую интероперабельность, снижение сетевого трафика на 30–40% и задержку реакции на критические события менее 200 мс. В результате получен универсальный инструмент цифровой трансформации предприятия лесоперерабатывающей отрасли.

Перспективы дальнейших исследований включают разработку адаптивных алгоритмов машинного обучения для прогнозирования режимов сушки древесины на основе анализа архивных данных.

Список литературы

1. Industrial IoT Implementation with OPC UA and SCADA Architecture // LinkedIn. – 2025. – URL: https://www.linkedin.com/posts/ritesh-purwat-955860268_iiot-industry40-opcua-activity-7431301655343583232-sOSN (дата обращения 22.03.2026).
2. EMQX Neuron – Industrial IoT Connectivity Gateway // EMQ. – 2026. – URL: <https://www.emqx.com/en/products/emqx-neuron> (дата обращения: 22.03.2026).
3. OPC UA Protocol: Features, Working Principle & MQTT Synergy // EMQ Blog. – 2025. – URL: <https://www.emqx.com/en/blog/opc-ua-protocol> (дата обращения 22.03.2026).
4. A Data-Driven Adaptive Sampling Method Based on Edge Computing // Sensors. – 2020. – Vol. 20, № 8. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/8/2174> (дата обращения: 22.03.2026).
5. OPC UA Use of Alarms and Conditions // Scribd. – 2021. – URL: <https://www.scribd.com/document/505391569/OPC-UA-Use-of-Alarms-and-Conditions> (дата обращения: 22.03.2026).

6. From PLC to MQTT in 10 Minutes: A Zero-Code Path to Industrial... // EMQ Blog. – 2025. – URL: <https://www.emqx.com/en/blog/from-plc-to-mqtt> (дата обращения: 22.03.2026).

References

1. Industrial IoT Implementation with OPC UA and SCADA Architecture // LinkedIn. – 2025. – URL: https://www.linkedin.com/posts/ritesh-purwat-955860268_iiot-industry40-opcua-activity-7431301655343583232-sOSN (Accessed on 22.03.2026).

2. EMQX Neuron – Industrial IoT Connectivity Gateway // EMQ. – 2026. – URL: <https://www.emqx.com/en/products/emqx-neuron> (Accessed on 22.03.2026).

3. OPC UA Protocol: Features, Working Principle & MQTT Synergy // EMQ Blog. – 2025. – URL: <https://www.emqx.com/en/blog/opc-ua-protocol> (Accessed on 22.03.2026).

4. A Data-Driven Adaptive Sampling Method Based on Edge Computing // Sensors. – 2020. – Vol. 20, № 8. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/8/2174> (Accessed on 22.03.2026)

5. OPC UA Use of Alarms and Conditions // Scribd. – 2021. – URL: <https://www.scribd.com/document/505391569/OPC-UA-Use-of-Alarms-and-Conditions> (Accessed on 22.03.2026).

6. From PLC to MQTT in 10 Minutes: A Zero-Code Path to Industrial... // EMQ Blog. – 2025. – URL: <https://www.emqx.com/en/blog/from-plc-to-mqtt> (Accessed on 22.03.2026)

**МЕХАТРОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ
УПРАВЛЕНИЯ РУЛОННЫМИ ШТОРАМИ НА ОСНОВЕ
ДВИГАТЕЛЯ И МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ
A MECHATRONIC DEVICE FOR AUTOMATING THE CONTROL
OF ROTARY BLINDS BASED ON AN ENGINE
AND A MICROPROCESSOR SYSTEM**

Шаназаров М.Б., студент

Поляков С. И., к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет

имени Г.Ф. Морозова»,

г. Воронеж, Россия

shanazarovmahmud01@mail.ru

Shanazarov M.B., student

Polyakov S.I., PhD, Associate professor

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,

Voronezh, Russia

Аннотация: Основной задачей является создание мехатронного модуля для автоматизации рулонных штор. Идея проекта заключается в том, чтобы сделать управление светом не просто дистанционным, а интеллектуальным, с возможностью встраивания в системы автоматизации зданий. В работе рассматриваются существующие аналоги, от простых цепочечных приводов до премиальных решений с линейными двигателями. На основе анализа недостатков существующих систем был сформулирован перечень требований к собственной разработке.

Abstract: The main objective is to create a mechatronic module for the automation of roller blinds. The idea behind the project is to make light control not only remote, but also intelligent, with the ability to integrate it into building automation systems. The paper examines existing alternatives, ranging from simple chain drives to premium solutions with linear motors. Based on an analysis of the drawbacks of existing systems, a list of requirements for the project was formulated.

Ключевые слова: Рулонные шторы, инновации мехатронных устройств, умный дом, автоматическое управление рулонными шторами.

Keywords: Roller blinds, mechatronic device innovations, smart home, automatic control of roller blinds.

Когда заходит речь об автоматизации квартиры, обычно представляют себе какой-нибудь дорогой "умный дом" с центральным контроллером и щитком, напичканным реле. Но на практике большинство людей живут в обычных квартирах, где тянуть витую пару к каждой шторе или менять проводку, это скорее уже полноценный ремонт. И тут возникает простая бытовая проблема, шторы либо открыты, либо закрыты, а солнце в течение дня ходит по кругу и то светит в монитор, то начинает нагревать комнату так, что кондиционер работает на износ.

Почему именно рулонные шторы? Потому что это самый массовый и простой тип солнцезащиты. Карнизы с электроприводом - это сложно и дорого, а рулонные шторы может повесить практически любой. Но готовые решения на рынке либо представляют собой просто мотор с пультом суть в которых, нажал - поехала, без какой-либо обратной связи, либо привязаны к какому-нибудь облачному сервису, который при отключении интернета превращается в нечто. Ещё момент, большинство таких приводов даже не знают, открыта штора или закрыта, они просто крутят мотор определённое время, и если сбилось, приходится перекалибровать вручную.

Поэтому я остановился на разработке именно мехатронного устройства, которое стоит недорого, со встроенным помощником на основе искусственного интеллекта, которое само принимает решения на основе показаний света и температуры. Особенно если сделать алгоритм, который не тупо реагирует на порог, а, скажем, притормаживает, чтобы не хлопнуть шторой, или запоминает, что в это время дня хозяин обычно любит полутьму. Такая автоматизация действительно экономит энергию и нервы, и её можно внедрить без разрушения стен.

Обзор существующих моделей и решений в области автоматизации управления мехатронными шторами.

Лучший вариант – это не копирование одного существующего решения, а разумный гибрид. Берём проверенную механику трубчатых моторов, начинаем её современной электроникой с энкодером и микроконтроллером, добавляем адаптивные алгоритмы и делаем установку максимально простой. По сути, мы

создаем устройство, которое должно занять пустующую нишу "умных, но не дорогих" приводов для штор.

Параметр	Трубчатые моторы (бюджетные, напр. Zemismart)	Цепные/ реечные приводы (для карнизов)	Китайский ширпотреб (Wi-Fi/Zigbee)	Самодельные решения (DIY)
Тип привода	Трубчатый электродвигатель внутри вала	Цепной или реечный механизм, внешний мотор	Разнообразные (трубчатые, накладные)	Любой, в зависимости от проекта
Автоматизация	Только дистанционный пульт (иногда таймер)	В основном ручное или пульт	Пульт, приложение, голосовые ассистенты	Программируемая под задачи
Стоимость	Низкая–средняя (2–5 тыс. руб.)	Средняя (3–8 тыс. руб.)	Низкая (2–5 тыс. руб.)	Зависит от компонентов (может быть дешевле)
Совместимость с другими системами	Часто закрытые протоколы (свои пульты), реже Zigbee/Tuya	Обычно только пульт	Разнообразно (Wi-Fi, Zigbee), но возможны проблемы с интеграцией	Полная свобода, можно под любой протокол

Таблица 1 – Сравнительный анализ моделей

В отличие от классических систем, использующих коллекторные двигатели с механическими концевыми выключателями, предлагаемое устройство построено по принципу мехатронного модуля. Под мехатронным модулем здесь понимается совокупность механической части, электропривода и микропроцессорного блока управления, объединенных информационными потоками.

Двигатель 28BYJ-48. На различных онлайн площадках можно найти миниатюрные шаговые двигатели, они доступны в 5 вольтовых и 12 вольтовых версиях. Мы в свою очередь рассмотрим 5 вольтовый вариант.

Разберемся с электроникой. Возьмем микроконтроллер ESP8266, ему для работы требуется внешняя память, и паять вручную его не просто. Поэтому мы возьмем готовый модуль. На рынке очень много различных плат, но остановимся на ESP-07. Сам по себе он небольшой и имеет керамическую антенну на борту. Цена вопроса небольшая.

Питание. Мотору необходимы 5 вольт, а для этого без стабилизатора обойтись невозможно. Выбор их конечно огромен, мы предпочтем самую известную и народную AMS1117-3.3 в корпусе SOT-223. Цена у них недорогая, для литиевых батареек она конечно не подойдет, на ней просаживается напряжение, а вот для бортовой линии 5в, то что нужно.

Устройство спроектировано с учетом концепции Интернета вещей (IoT). Для связи с центральным контроллером или пользователем предусмотрено два интерфейса:

1. Radio: для локального управления пультами дистанционного управления с фиксированными кодами KeeLoq;
2. Wi-Fi (ESP8266): для интеграции в сеть.

Через Wi-Fi модуль устройство обменивается данными по протоколу MQTT с сервером Home Assistant. Это позволяет реализовать сложные сценарии автоматизации.

В ходе выполнения работы было разработано мехатронное устройство для автоматизации управления рулонными шторами, лишенное основных недостатков существующих решений. Основные результаты работы заключаются в следующем:

Предложена структурная схема и обоснован выбор элементной базы, обеспечивающей высокую надежность и ремонтпригодность по сравнению с монолитными китайскими приводами.

Дальнейшие исследования планируется направить на внедрение адаптивных алгоритмов прогнозирования положения штор на основе данных о погоде, получаемых из открытых API, что позволит снизить нагрузку на привод в неблагоприятных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Гололобов, В. Н. Умный дом своими руками / В. Н. Гололобов. – М.: Наука и техника, 2020. – 320 с. (Дата обращения 21.03.2026).
2. Шишов, О. В. Современные средства автоматизации. Микроконтроллеры / О. В. Шишов. – М.: Инфра-Инженерия, 2021. – 244 с. (Дата обращения 21.03.2026).
3. Иванов, А. А. Мехатронные системы в строительстве и ЖКХ / А. А. Иванов, С. С. Петров // Вестник машиностроения. – 2023. – № 5. – С. 42-47. (Дата обращения 22.03.2026).
4. Texas Instruments. BLDC Motor Control with Hall Sensors Based on TMS320F2803x. – Application Report, 2022. (Дата обращения 21.03.2026).
5. Сайт технической документации проекта ESP8266. – URL: https://documentation.espressif.com/esp8266-technical_reference_en.pdf (Дата обращения 22.03.2026).

References

1. Gololobov, V. N. Smart Home with Your Own Hands / V. N. Gololobov. – M.: Science and Technology, 2020. – 320 p. (Accessed on 21.03.2026).
2. Shishov, O. V. Modern Means of Automation. Microcontrollers / O. V. Shishov. – M.: Infra-Engineering, 2021. – 244 p. (Accessed on 21.03.2026).
3. Ivanov, A. A. Mechatronic systems in construction and housing and communal services / A. A. Ivanov, S. S. Petrov // Bulletin of Mechanical Engineering. – 2023. – No. 5. – Pp. 42-47. (Accessed on 22.03.2026).
4. Texas Instruments. BLDC Motor Control with Hall Sensors Based on TMS320F2803x. – Application Report, 2022. (Accessed on 21.03.2026).
5. ESP8266 Technical Documentation Website. – URL: https://documentation.espressif.com/esp8266-technical_reference_en.pdf (Accessed on 22.03.2026).

Научное издание

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К АВТОМАТИЗАЦИИ, РОБОТИЗАЦИИ
И УПРАВЛЕНИЮ В ТЕХНИЧЕСКИХ,
ОРГАНИЗАЦИОННЫХ, ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Материалы Всероссийской научно-практической конференции преподавателей
и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции
студентов и молодых ученых

Воронеж, 19 и 26 марта 2026 г.

Ответственный редактор Ю.С. Никитина

Материалы издаются в авторской редакции

Подписано к изданию 01.07.2026. Объем данных 15,3 Мб
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»
394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8