DOI: 10.58168/IAARMT2026_201-206
УДК 681.5

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-

© Ходарев С. Р., Щербакова И. В., 2026

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 – IIoT-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 ; ВГЛТУ. – 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 ; ВГЛТУ. – 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 ; ВГЛТУ. – Воронеж, 2025. – С. 278–283.

4. Студеникин, П. В. Исследование и разработка инновационной автоматизированной системы управления процессом сушки паркетной фризы 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 ; ВГЛТУ. – 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.