

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СУШКИ В СОСТАВЕ ОКРАСОЧНОЙ ЛИНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Нажекенова Жанель Наурызбайқызы¹
Жамангарин Дусмат Саматович²

Введение

В современных условиях развития промышленности особое внимание уделяется повышению качества и эффективности технологических процессов обработки строительных материалов. Одним из актуальных направлений является совершенствование процессов нанесения и сушки лакокрасочных покрытий на фиброцементных панелях, широко применяемых в строительстве благодаря высокой прочности, долговечности и устойчивости к внешним воздействиям.

Качество готовой продукции в значительной степени определяется условиями протекания технологических процессов, в частности равномерностью нанесения покрытия и стабильностью режимов его сушки. Отклонения температурных параметров, скорости транспортировки или интенсивности воздушного потока могут привести к образованию дефектов, снижению адгезии покрытия и ухудшению эксплуатационных характеристик изделий [7].

Современные валиковые покрасочные линии, в том числе оборудование компании Purete, позволяют реализовать непрерывный технологический процесс с высокой степенью механизации и автоматизации. Использование автоматизированных систем управления обеспечивает контроль и регулирование ключевых параметров в реальном времени, что способствует повышению стабильности и эффективности

УДК 681.51

¹**Автор:** Нажекенова Ж.Н., студентка, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан.
E-mail: nazhekenovaa06@mail.ru

²**Научный руководитель:** Жамангарин Д.С., PhD, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан.

В данной работе рассматривается технологический процесс сушки фиброцементных панелей в составе валиковой покрасочной линии компании Purete. Основное внимание уделяется анализу параметров, влияющих на качество формирования лакокрасочного покрытия, включая температурный режим сушильной камеры, скорость движения конвейера, интенсивность воздушного потока и время экспозиции. Нанесение покрытия осуществляется механическим способом с использованием валиковых механизмов, обеспечивающих равномерное распределение материала по поверхности изделия и снижение расхода краски. Процесс сушки реализуется в туннельной камере с организованной системой тепло- и воздухообмена, что позволяет обеспечить равномерное высыхание покрытия по всей поверхности панели. Рассматриваемая линия относится к автоматизированным производственным системам, в которых управление технологическими параметрами осуществляется с использованием исполнительных механизмов и средств контроля [1]. Проведённый анализ позволяет определить влияние основных технологических факторов на качество сушки и обосновать необходимость поддержания стабильных режимов работы оборудования для повышения эффективности и надежности производственного процесса.

Ключевые слова: валиковая покрасочная линия, фиброцементные панели, процесс сушки, автоматизированная система управления

производства.

В связи с этим актуальной задачей является исследование технологического процесса сушки в составе покрасочной линии с целью выявления влияния основных параметров на качество покрытия и повышения эффективности работы оборудования.

Техническая характеристика и функциональная структура оборудования

Объект исследования представляет собой многомодульный комплекс Purete, спроектированный для потоковой обработки фиброцементных изделий.



Рисунок 1. Автоматизированная линия для нанесения и сушки лакокрасочных покрытий Purete

С позиций системного анализа линия классифицируется как детерминированная автоматизированная система с распределенными параметрами. В состав линии входят следующие ключевые сегменты:

Узел прецизионного вальцового нанесения (Roller Coater): Данный модуль реализует метод механического переноса лакокрасочного материала (ЛКМ) на поверхность панели. Конструкция включает в себя дозирующий и наносящий валы с эластичным покрытием. Высокая точность нанесения (до $\pm 2-5 \text{ г/м}^2$) достигается за счет автоматизированной юстировки межвалкового зазора и стабилизации угловой скорости вращения валов, что обеспечивает адгезионную однородность перед входом в зону сушки.

Комбинированная туннельная сушильная камера: Является основным звеном тепловой обработки. Модуль интегрирует две технологии теплопередачи:

- Конвективная система: обеспечивает удаление летучих фракций растворителя путем принудительной циркуляции разогретого воздушного потока. Система оснащена регулируемы дефлекторами для создания ламинарного течения воздуха.

- Инфракрасный (ИК) излучатель: воздействует непосредственно на молекулярную структуру покрытия, инициируя процесс полимеризации «изнутри», что предотвращает образование поверхностной корки и последующее растрескивание фиброцемента.

Интеллектуальная транспортная система: Включает ленточный конвейер, кинематика которого управляется асинхронным электродвигателем с частотно-регулируемым приводом (ЧРП). Интеграция привода в общую шину управления позволяет динамически изменять время экспозиции панелей в камере сушки в зависимости от текущих показателей влажности и температуры, обеспечивая инвариантность процесса к внешним возмущениям.

Система автоматизированного контроля и управления: Построена на базе промышленного контроллера (ПЛК), осуществляющего сбор данных с первичных преобразователей (датчиков температуры, расхода воздуха и оптических датчиков положения). САКУ реализует алгоритмы поддержания заданных технологических уставок и обеспечивает синхронизацию

всех модулей линии в режиме реального времени.

Методы и алгоритмы управления технологическим процессом

Научное обоснование методов управления процессом сушки базируется на интеграции аппаратных средств и программных алгоритмов, представленных на структурной схеме управления. Основным методом организации системы является создание единого информационного канала связи между центральным контроллером и исполнительными узлами по протоколу RS-485. Использование последовательного порта COM2 обеспечивает помехоустойчивую передачу данных, что позволяет реализовать концепцию синхронного управления всеми звеньями линии в режиме реального времени.

Процесс перемещения фиброцементных панелей регулируется методом частотного управления скоростью приводного двигателя через инвертор Shihlin SS2-043 [6]. Данный подход гарантирует высокую стабильность скорости конвейера, что является критическим фактором для соблюдения расчетного времени нахождения изделия в зоне облучения. Программный алгоритм ПЛК динамически сопоставляет заданные оператором параметры на HMI-панели с текущей частотой инвертора, обеспечивая тем самым инвариантность процесса к изменениям механической нагрузки.

Особое значение в методологии исследования имеет алгоритм адаптивного регулирования мощности ультрафиолетового излучения. Работа модулей 10CPU-V53 координируется на основе сигналов от оптических датчиков присутствия заготовки. Система активирует номинальный режим сушки непосредственно в момент вхождения панели в рабочую зону, что позволяет значительно снизить удельные энергозатраты и предотвратить термическую деградацию материала при кратковременных остановках линии. Таким образом, достигается оптимальный баланс между интенсивностью полимеризации покрытия и энергоэффективностью всего технологического комплекса [6].

Безопасность и отказоустойчивость методов управления обеспечиваются через реализацию логических блокировок в среде программирования контроллера. Метод непрерывного мониторинга состояния аварийных выходов и датчиков температуры позволяет системе мгновенно реагировать на любые отклонения от технологического регламента. В случае возникновения нештатных ситуаций алгоритм инициирует защитный останов всей линии, блокируя силовые цепи через систему магнитных контакторов, что подтверждает высокую надежность выбранной архитектуры автоматизации.

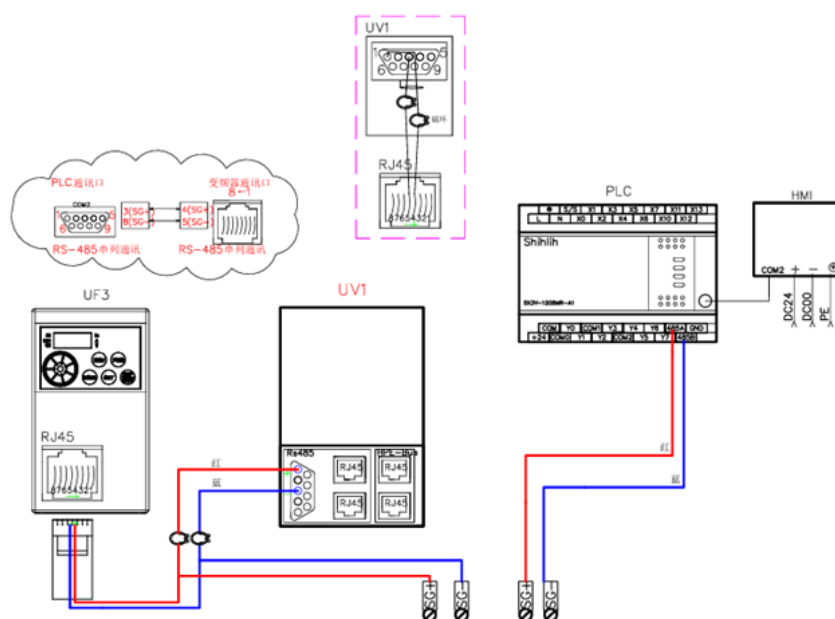


Рисунок 2. Структурная схема автоматизированной системы управления FUTURUM DIGITALIS (ЦИФРОВОЕ БУДУЩЕЕ)

Для анализа и оптимизации процесса сушки фиброцементных панелей было проведено математическое моделирование в среде MATLAB. Процесс включал в себя идентификацию объекта, синтез классического ПИД-регулятора и разработку адаптивной системы управления [4].

Идентификация и анализ динамики объекта управления

Объектом исследования является сушильная камера линии Purete, динамические свойства которой аппроксимированы инерционным звеном второго порядка. Передаточная функция объекта имеет вид:

$$G(s) = \frac{17}{8s^2 + 3s + 1}$$

Анализ разомкнутой системы (без регулятора) показал, что объект обладает высокой статической чувствительностью ($K=17$) и значительной инерционностью. Как показано на Рис. 3, при подаче единичного ступенчатого воздействия выходной сигнал стремится к значению 17, что недопустимо для технологического регламента, требующего точности поддержания температуры.

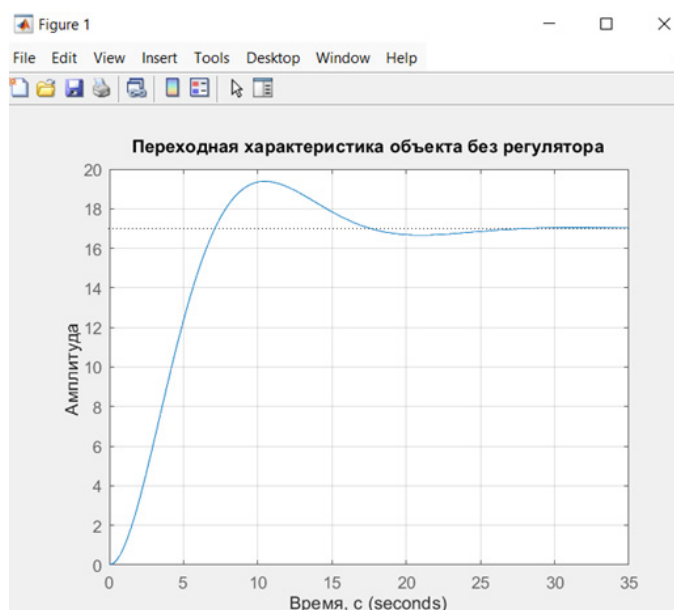


Рисунок 3. Переходная характеристика объекта без регулятора

Синтез и верификация ПИД-регулирования

Для стабилизации системы на уровне заданной уставки ($y=1$) был внедрен ПИД-регулятор. Структура замкнутой системы описывается передаточной функцией:

$$T_{PID}(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

На Рис. 4 представлен переходный процесс системы с ПИД-регулятором. Использование функции `stepinfo` позволило определить точные количественные показатели качества:

- Время установления (t_s): 15.89 с;
- Перерегулирование (σ): 1.91%;
- Статическая ошибка (e_{st}): 0.

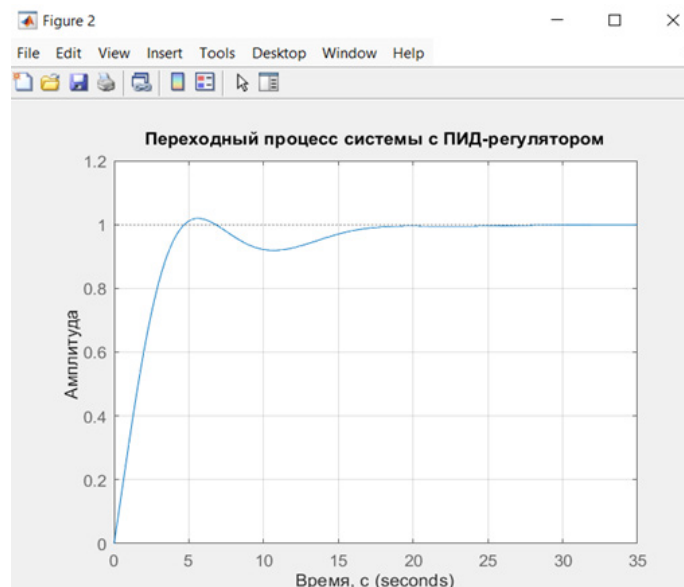


Рисунок 4. Переходный процесс системы с ПИД-регулятором

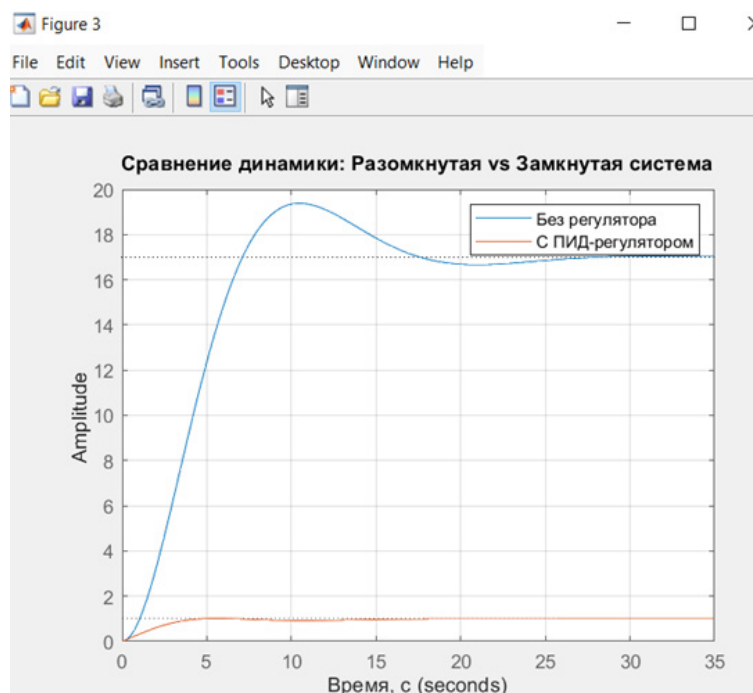


Рисунок 5. Сравнение динамики: Разомкнутая и Замкнутая система

Реализация адаптивного управления (MRAC)

Для компенсации возможных неопределенностей параметров объекта применен алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью (Model Reference Adaptive Control). В качестве эталонной динамики выбрана модель

$$M(s) = 1 / (5s + 1).$$

Параметры регулятора корректируются в реальном времени по градиентному закону:

$$\dot{K}_{ad} = \gamma \cdot e(t) \cdot r(t)$$

где $e(t)$ — ошибка рассогласования. На Рис. 6 показано высокоточное следование выхода системы за траекторией эталона.

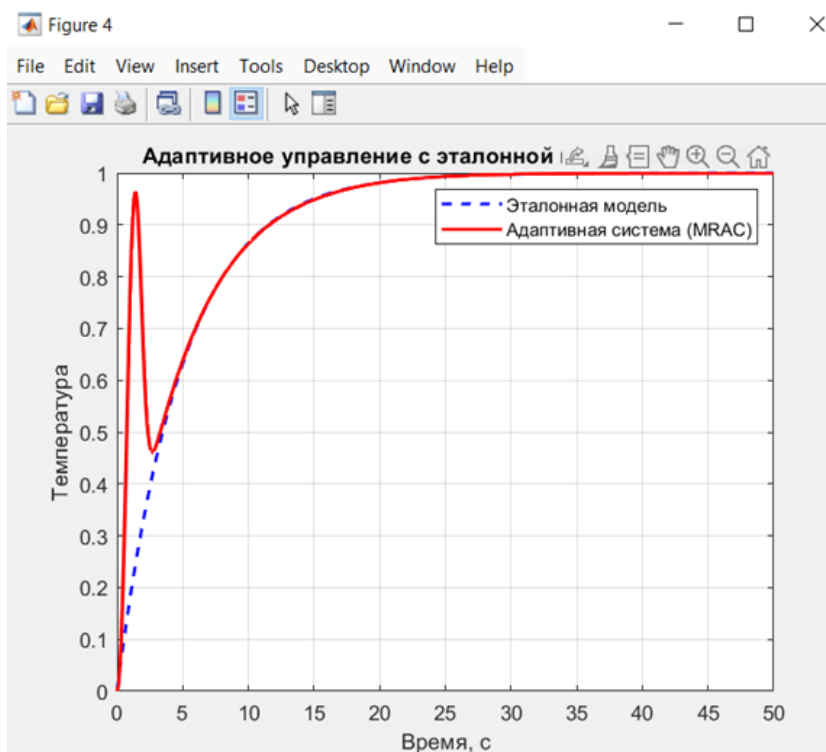


Рисунок 7. Сравнительный анализ: ПИД vs Адаптивный алгоритм

Анализ помехоустойчивости системы

Важным критерием надежности АСУ ТП является способность подавлять внешние возмущения. Для проверки устойчивости в модель введено гармоническое воздействие $d(t)=0.3\sin(0.4t)$. Результаты моделирования подтвердили высокую робастность разработанной системы: амплитуда колебаний выходного параметра остается в пределах технологического допуска, что гарантирует стабильное качество сушки лакокрасочных покрытий [4].

На Рис. 7 представлен выходной сигнал системы автоматического управления при воздействии внешнего гармонического возмущения. Результаты моделирования показали, что система сохраняет устойчивость и эффективно компенсирует влияние внешних возмущений. Несмотря на наличие колебаний, выходной сигнал остается в пределах допустимых значений, что подтверждает высокую помехоустойчивость и надежность разработанной системы управления.

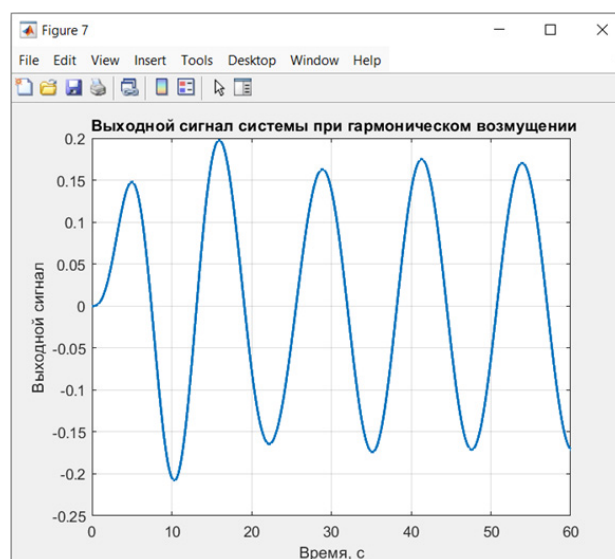


Рисунок 8. Выходной сигнал системы при воздействии гармонического возмущения

Заключение

В рамках проведенного исследования была решена актуальная задача автоматизации температурного режима сушильной камеры промышленной линии Purete. Комплексный подход, сочетающий методы классического и адаптивного управления, позволил достичь следующих научно-практических результатов:

Во-первых, на основе идентификации динамических свойств объекта была разработана математическая модель сушильной печи в виде инерционного звена второго порядка. Предварительный анализ показал, что высокая чувствительность и инерционность объекта требуют применения высокоточных алгоритмов регулирования для исключения технологического брака.

Во-вторых, синтезированный ПИД-регулятор продемонстрировал высокую эффективность в стабилизации системы. Численный анализ переходных процессов в среде MATLAB подтвердил достижение оптимальных показателей качества: время установления составило 15.89 сек, а величина перерегулирования не превысила 1.91%. Эти данные свидетельствуют о способности системы поддерживать заданный температурный режим с минимальными отклонениями.

В-третьих, внедрение адаптивного управления с эталонной моделью (MRAC) позволило значительно улучшить динамику системы. Сравнительный анализ подтвердил, что адаптивный алгоритм обеспечивает более плавный выход на рабочий режим без осцилляций, характерных для классических схем. Это гарантирует бережную эксплуатацию нагревательных элементов и стабильность качества покрытия при изменении внешних условий.

В завершение, проверка системы на помехоустойчивость подтвердила робастность предложенных решений. Разработанная автоматизированная система управления способна эффективно подавлять внешние возмущения, обеспечивая прецизионное соблюдение технологического регламента. Результаты работы могут быть рекомендованы для внедрения на автоматизированных линиях покраски и сушки фиброцементных панелей с целью повышения энергоэффективности и качества выпускаемой продукции.

Библиографический список

1. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2003. 263 с.
2. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. 4-е изд., перераб. и доп. СПб.: Профессия, 2003. 752 с.
3. Герман-Галкин С. Г. MATLAB & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Корона-Век, 2008. 368 с.
4. Дьяконов В. П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. М.: ДМК Пресс, 2011. 976 с.
5. Пантелеев А. В., Бортакровский А. С. Теория управления в примерах и задачах. М.: Высш. шк., 2003. 583 с.
6. Purete Machinery. Technical Specification and Operation Manual for Automatic Coating and Drying Line. Foshan: Purete Mechanical Co., Ltd, 2024. 120 p.
7. Sastry S., Bodson M. Adaptive Control: Stability, Convergence and Robustness. New York: Prentice-Hall, 1989. 400 p.