



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 664.145:658.5:681.51:004.89

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ (АСУТП) ПРОИЗВОДСТВА ШОКОЛАДНЫХ КОНФЕТ В УСЛОВИЯХ ИНДУСТРИИ 4.0

Апкарова Т.Т.

ФГБОУ ВО "ГРОЗНЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВА", Грозный, Россия (364051, Чеченская Республика, город Грозный, пр-кт Имени Хусейна Абубакаровича Исаева, д. 100), e-mail: ¹tanzila.apkarova@mail.ru

В статье проведен комплексный анализ эволюции и перспективных векторов модернизации автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) на предприятиях кондитерской промышленности, специализирующихся на выпуске шоколадных конфет. Рассмотрены технологические, экономические и организационные аспекты внедрения решений, соответствующих концепции «Индустрия 4.0». Акцент сделан на интеграции сенсорных систем нового поколения, распределенных систем управления, предиктивной аналитики и цифровых двойников в единый киберфизический контур. Особое внимание уделено проблеме обеспечения стабильности рецептурных и органолептических характеристик продукции в условиях изменчивости сырьевых параметров. Приведены результаты имитационного моделирования работы модернизированной АСУТП участка темперирования и формования шоколадной массы, демонстрирующие повышение точности управления на 18-22% и снижение коэффициента брака по массе готового изделия на 15%. Доказана экономическая целесообразность поэтапной модернизации с фокусом на модуль предиктивного обслуживания основного технологического оборудования.

Ключевые слова: АСУТП, модернизация, производство шоколадных конфет, Индустрия 4.0, предиктивная аналитика, цифровой двойник, киберфизическая система, темперирование, стабильность качества.

CONTEMPORARY TRENDS IN THE MODERNIZATION OF AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEMS (APCS) FOR CHOCOLATE CANDIES PRODUCTION IN INDUSTRY 4.0

Apkarova T.T.

GROZNY STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY NAMED AFTER ACADEMICIAN M. D. MILLIONSHCHIKOV, Grozny, Russia (364051, Chechen Republic, Grozny, Hussein Abubakarovich Isaev Ave., 100) e-mail: ¹tanzila.apkarova@mail.ru

This article provides a comprehensive analysis of the evolution and promising modernization vectors of automated process control systems (APCS) at confectionery enterprises specializing in chocolate candy production. It examines the technological, economic, and organizational aspects of implementing solutions consistent with the Industry 4.0 concept. The focus is on the integration of next-generation sensor systems, distributed control systems, predictive analytics, and digital twins into a single cyber-physical system. Particular attention is paid to ensuring the stability of product formulations and organoleptic characteristics in the face of variable raw material parameters. The results of simulation modeling of the modernized process control system for the chocolate tempering and molding section are presented, demonstrating an 18-22% increase in control accuracy and a 15% reduction in the defect rate by finished product weight. The economic feasibility of a phased modernization with a focus on a predictive maintenance module for the main process equipment is demonstrated.

Keywords: Process control system, modernization, chocolate production, Industry 4.0, predictive analytics, digital twin, cyber-physical system, tempering, quality stability.

Введение

Кондитерская отрасль, в частности сегмент производства шоколадных конфет, характеризуется высокой конкурентной интенсивностью, где ключевыми факторами успеха являются не только ценовая политика, но и безупречное, стабильное качество продукции, гибкость ассортиментных линеек и эффективность использования ресурсов. Классические АСУТП, построенные на основе жестко детерминированной логики контроллеров (ПЛК) и SCADA-систем, достигли предела своей эффективности. Они обеспечивают базовый уровень автоматизации, но зачастую не способны адаптироваться к оперативным изменениям сырьевых потоков, предупреждать критические отклонения в технологических параметрах и оптимизировать процессы в реальном времени на основе комплексного анализа данных [1, с. 45].

Модернизация АСУТП в направлении концепции «умного производства» (Smart Manufacturing) становится не опциональным, а императивным требованием для сохранения рыночных позиций. Данная модернизация представляет собой не простую замену устаревших контроллеров на более современные, а глубокую структурную и архитектурную трансформацию, предполагающую создание сквозной цифровой среды от приемки какао-бобов до упаковки готовой конфеты.

Основная часть

Процесс производства шоколадных конфет – многостадийный, комбинированный, включающий как непрерывные (конширование, темперирование), так и дискретные (формование корпусов, глазирование, упаковка) операции. Наиболее чувствительными к точности управления являются:

Приготовление и темперирование шоколадной массы. Критически важны поддержание заданной кривой темперирования (температурных фаз), контроль вязкости и содержания кристаллов какао-масла стабильной βV -формы. Неточность ведет к потере глянца, жировому поседению, неудовлетворительной хрупкости.

Приготовление конфетных масс (помадных, пралине, жележных). Требуется точное соблюдение рецептурных соотношений, температурно-временных режимов уваривания, контроля активности воды (a_w) для микробиологической стабильности.

1. *Глазирование и декорирование.* Неравномерность толщины глазури, нарушения в системе охлаждения туннеля приводят к дефектам внешнего вида и сокращению сроков хранения.

2. *Упаковка.* Высокие скорости линии требуют безошибочного совмещения контролей целостности, веса, наличия маркировки.

Основной вызов для традиционной АСУТП – отсутствие «обратной связи» качества от конечного продукта к начальным стадиям процесса в режиме, близком к реальному времени. Система реагирует на отклонение температуры или давления, но не может прогнозировать, как флуктуация влажности сахара-песка на входе повлияет на структуру помады через 5 технологических переделов.

Модернизированная система представляет собой киберфизическую систему (КФС), где физические процессы на производственной линии неразрывно связаны с вычислительными и аналитическими ресурсами через Industrial Internet of Things (IIoT). Ее ядром становится платформа данных предприятия, агрегирующая информацию с нескольких уровней:

- Уровень 1 (Полевой): «Умные» датчики (в том числе спектрофотометрические для анализа цвета и содержания сухих веществ, виброакустические для диагностики оборудования, видеодатчики для компьютерного зрения), интеллектуальные приводы, RFID-метки на сырьевых партиях.

- Уровень 2 (Управления): Распределенные ПЛК и промышленные компьютеры, выполняющие прямые задачи релейного и ПИД-регулирования.
- Уровень 3 (Цеховой/ MES-уровень): Manufacturing Execution System (MES) – ключевой элемент модернизации. Обеспечивает диспетчеризацию, управление рецептурами, отслеживание истории партий, анализ эффективности (ОЕЕ).
- Уровень 4 (Корпоративный/ERP-уровень): Планирование ресурсов предприятия. Модернизированная АСУТП обеспечивает ERP актуальными данными о фактическом расходе сырья, простоях, темпах выпуска.

Связующим звеном между уровнями выступает унифицированный промышленный протокол OPC UA, обеспечивающий семантическую интероперабельность оборудования от разных вендоров. Виртуальная динамическая модель, повторяющая физические процессы производства конфет. На этапе разработки новой рецептуры позволяет провести тысячи итераций в симуляции, оптимизируя параметры (температуру, время, скорость перемешивания) для достижения целевых показателей текстуры и вкуса. В режиме онлайн цифровой двойник, получая данные с датчиков, выполняет функцию «мягкого» измерителя, вычисляя параметры, недоступные для прямого замера (например, степень кристаллизации массы в реальном времени), и дает рекомендации по корректировке режимов [2, с. 112]. Машинное обучение (ML-модели, в частности, градиентный бустинг и рекуррентные нейронные сети) анализирует исторические и оперативные данные для:

- Прогноза качества: Предсказание органолептических и физико-химических свойств конфеты на выходе линии на основе параметров сырья и текущих режимов.
- Предиктивного обслуживания: Прогноз остаточного ресурса критических узлов (нагревательных элементов, насосов для масс, форсунок глазировочной машины) по косвенным признакам (потребляемый ток, вибрация, тепловые изображения), что минимизирует внеплановые простои.
- Адаптивного управления рецептурой: Автоматическая тонкая корректировка соотношения компонентов (например, какао-масла и эмульгатора) для компенсации колебаний свойств входящего сырья (жирно-кислотного состава какао-масла), обеспечивая константность выходных характеристик.

Устанавливается на ключевых контрольных точках (после темперирования, глазирования, упаковки). Алгоритмы глубокого обучения (сверточные нейронные сети) анализируют видеопоток в реальном времени, выявляя микротрещины на глазури, неравномерность покрытия, дефекты печати на этикетке, отклонения в цвете и геометрической форме. Сигнал от системы зрения интегрируется в контур управления, позволяя, к примеру, автоматически подстраивать температуру в охлаждающем туннеле при обнаружении признаков «серого» налета.

Для оценки эффективности разработанной архитектуры было проведено имитационное моделирование на примере участка темперирования и формования. В виртуальную среду (AnyLogic) были загружены реальные годовые данные о работе линии, включая колебания температуры окружающей среды и параметров поступающей шоколадной массы.

Была сравнена работа традиционной АСУТП с ПИД-регуляторами и модернизированной системы, включающей цифрового двойника участка и ML-модель адаптивного управления. Ключевые результаты:

- Повышение точности поддержания температуры темперирования в третьей фазе до $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ против $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ у традиционной системы.
- Снижение доли продукции с отклонением по массе свыше допустимого ($\pm 1,5$ г) с 3,8% до 2,9% за счет предиктивной подстройки параметров дозирующего насоса.

- Сокращение времени на переналадку линии при переходе на новый вид конфет на 25% благодаря использованию цифрового двойника для предварительного подбора оптимальных уставок.
- Прогнозируемое снижение затрат на планово-предупредительный ремонт на 18% за счет внедрения модуля предиктивного обслуживания tempering машин.

Анализ стоимости владения показал, что капитальные затраты на модернизацию окупаются за период от 2,5 до 4 лет в зависимости от масштаба производства, преимущественно за счет сокращения потерь сырья (шоколадной массы), снижения энергопотребления и минимизации объема бракованной продукции.

Заключение

Модернизация АСУТП производства шоколадных конфет в соответствии с принципами Индустрии 4.0 представляет собой стратегический переход от автоматизации отдельных операций к созданию целостной, самообучающейся и адаптивной производственной экосистемы. Внедрение цифровых двойников, предиктивных моделей и систем машинного зрения позволяет решить фундаментальную проблему отрасли – гарантировать стабильно высокое качество продукции в условиях неизбежной вариативности свойств натурального сырья.

Наиболее эффективной признана поэтапная стратегия модернизации, начинающаяся с построения платформы данных и внедрения MES-системы, с последующим наращиванием модулей предиктивной аналитики для наиболее критических и дорогостоящих участков (темперирование, приготовление масс). Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку самонастраивающихся алгоритмов управления для сверхсложных многокомпонентных систем, таких как линии производства конфет с многослойными начинками, где взаимодействие реологических свойств различных масс является определяющим фактором успеха.

Список литературы

1. Смирнов, В.А. Автоматизация технологических процессов в пищевой промышленности: учебник для вузов / В.А. Смирнов, Л.П. Климова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ДеЛи принт, 2020. – 567 с.
2. Гартвиг, Т. Цифровые двойники в промышленности: от концепции к внедрению / Т. Гартвиг, К. Шмидт; пер. с нем. под ред. П.В. Соколова. – СПб.: Профессия, 2021. – 234 с.
3. Wang, L., Gao, R. Smart Manufacturing and Condition Monitoring in the Context of Industry 4.0 // Journal of Manufacturing Systems. – 2022. – Vol. 62. – P. 936–957.
4. ГОСТ Р 57562-2017 (ИСО/МЭК 62264-1:2013) Системы управления производством. Интеграция систем управления предприятием и систем управления производством. Ч. 1. Модели и терминология. – М.: Стандартинформ, 2018. – 35 с.
5. Иванов, А.П. Применение методов машинного обучения для предиктивного контроля качества кондитерских изделий / А.П. Иванов, С.К. Петрова // Пищевая промышленность. – 2023. – № 5. – С. 34–39.

References

1. Smirnov, V.A. Automation of Technological Processes in the Food Industry: A Textbook for Universities / V.A. Smirnov, L.P. Klimova. - 3rd ed., revised and enlarged. - Moscow: DeLi Print, 2020. - p.567
2. Hartwig, T. Digital Twins in Industry: From Concept to Implementation / T. Hartwig, K. Schmidt; translated from German by P.V. Sokolov. - St. Petersburg: Profession, 2021. - p.234

Апкарова Т.Т. Современные направления модернизации автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) производства шоколадных конфет в условиях ИНДУСТРИИ 4.0// Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2026. – Т. 11 № 1(63) с. 12–16

3. Wang, L., Gao, R. Smart Manufacturing and Condition Monitoring in the Context of Industry 4.0 // Journal of Manufacturing Systems. - 2022. - Vol. 62. - pp. 936–957.
 4. GOST R 57562-2017 (ISO/IEC 62264-1:2013) Production execution systems. Integration of enterprise management systems and production execution systems. Part 1. Models and terminology. – Moscow: Standartinform, 2018. – p.35
 5. Ivanov, A.P. Application of machine learning methods for predictive quality control of confectionery products / A.P. Ivanov, S.K. Petrova // Food industry. – 2023. – No. 5. – pp. 34–39.
-