ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Кабулов Н.А.

Заведующий кафедрой «Компьютерная инженерия и цифровые технологии» Кокандского университета, Доктор технических наук

Андижанский филиал

Email: kabulov69@mail.ru

Сабиров У.К.

Профессор Андижанского государственного технического института

Окилов А.К.

Базовый докторант Андижанского государственного технического института

Email: oqilovazizbek078@gmail.com

Аннотация. В условиях цифровой трансформации и перехода к концепции «Индустрия 4.0» особую актуальность приобретает использование интеллектуальных технологий для оптимизации производственных процессов пищевой промышленности. В статье рассмотрен подход к повышению эффективности и точности контроля бутылок и подобных сосудов для молочных продуктов с использованием цифрового двойника. Представлены теоретические основы, математическая модель и экспериментальные исследования, проведённые на автоматизированной линии ООО «ROJN MILK». Применение цифрового двойника позволило реализовать предиктивно-оптимальное управление технологическим процессом, снизить долю брака на 3,5 раза и повысить энергоэффективность на 8 %. Результаты исследования подтверждают потенциал цифровых двойников как ключевого инструмента интеллектуальной автоматизации в пищевой отрасли.

Ключевые слова: цифровой двойник, Индустрия 4.0, оптимизация, молочная промышленность, предиктивное управление, SCADA, машинное обучение.

Abstract. In the context of digital transformation and the transition to the Industry 4.0 paradigm, the use of intelligent technologies for process optimization in the food industry has become increasingly relevant. This paper presents an approach to improving the efficiency and accuracy of bottle and container inspection for dairy production using a digital twin. The theoretical foundations, mathematical modeling, and experimental validation conducted on the automated production line of “ROJN MILK” LLC are described. The implementation of the digital twin enabled predictive and adaptive process control, reducing the defect rate by a factor

ISSN 3030-3907

of 3.5 and improving energy efficiency by 8%. The results confirm the potential of digital twins as a cornerstone of intelligent automation in the dairy industry.

Keywords: digital twin, Industry 4.0, optimization, dairy production, predictive control, SCADA, machine learning.

Annotatsiya. Raqamli transformatsiya jarayoni va “Industriya 4.0” konsepsiyasiga o‘tish sharoitida oziq-ovqat sanoatidagi ishlab chiqarish jarayonlarini optimallashtirishda intellektual texnologiyalarni qo‘llash alohida ahamiyat kasb etmoqda. Ushbu maqolada sut mahsulotlari uchun mo‘ljallangan idishlar — xususan, butilkalar va ularga o‘xshash tarelkalarni nazorat qilish samaradorligi va aniqligini oshirishga doir raqamli egizakdan foydalanish asosidagi yondashuv yoritiladi. “ROJN MILK” MCHJning avtomatlashtirilgan ishlab chiqarish liniyasida o‘tkazilgan tajribaviy tadqiqotlar, nazariy asoslar hamda ishlab chiqilgan matematik model batafsil bayon etiladi. Raqamli egizakdan foydalanish texnologik jarayonni prediktiv-optimal boshqarishni ta’minlab, brakka chiqish ko‘rsatkichini 3,5 baravarga kamaytirish va energiya samaradorligini 8 % ga oshirish imkonini berdi. Olingan natijalar raqamli egizaklarning oziq-ovqat sanoati uchun intellektual avtomatlashtirishning muhim vositasi sifatidagi salohiyatini tasdiqlaydi.

Kalit so‘zlar: raqamli egizak, Industriya 4.0, optimallashtirish, sut sanoati, prediktiv boshqaruv, SCADA, mashinaviy o‘qitish.

Введение

Современная пищевая промышленность переживает стремительный переход к концепциям «умного производства» и киберфизических систем, основанных на цифровизации процессов и интеграции искусственного интеллекта [1]. Одним из ключевых инструментов данного перехода является цифровой двойник — виртуальная модель физического объекта или процесса, функционирующая в режиме синхронизации с реальной системой [2].

В молочной отрасли применение цифровых двойников позволяет решать задачи контроля качества, диагностики оборудования и оптимизации технологических параметров в реальном времени. Однако большинство существующих решений носят реактивный характер, основываясь на корректировке после возникновения отклонений [3]. Настоящее исследование направлено на разработку предиктивно-оптимальной методики управления технологическим процессом контроля бутылок и сосудов с использованием цифрового двойника.

Теоретические основы и обзор литературы.

Цифровые двойники рассматриваются как основа для построения замкнутых интеллектуальных контуров управления, интегрирующих сенсорные данные, математическое моделирование и машинное обучение

ISSN 3030-3907

[4]. Современные исследования [5,6] подтверждают, что внедрение цифровых двойников обеспечивает повышение эффективности производства на 10–30 % за счёт оптимизации параметров и снижения неопределённости.
Для пищевой промышленности цифровые двойники выполняют функции:
− мониторинга технологических узлов и качества продукции;
− предиктивной диагностики оборудования;
− оптимизации энергетических и ресурсных затрат [7];
− моделирования сценариев изменений параметров [8].

Тем не менее, комплексные решения, объединяющие цифровой двойник, машинное обучение и адаптивную оптимизацию для систем контроля упаковки молочной продукции, в научной литературе представлены ограниченно. Настоящая работа восполняет данный пробел, предлагая математическую модель и алгоритм оптимизации на основе данных промышленного эксперимента.

Материалы и методы.

Исследования проводились на автоматизированной линии розлива и контроля молочных продуктов предприятия ООО «ROJN MILK». Линия включает:
− модуль дозирования и укупорки;
− конвейерную систему подачи бутылок;
− мультисенсорный блок (оптические, ИК и УФ-датчики, сканеры Data Matrix);
− роботизированный модуль удаления брака.
Информационная архитектура цифрового двойника.

Цифровой двойник реализован на платформе Ignition SCADA с интеграцией модулей Python и TensorFlow. Данные передаются между физическим и виртуальным уровнями через протокол OPC UA, обеспечивая синхронизацию в реальном времени [9].
Оптимизируемые параметры.
В качестве управляемых параметров выбраны:
− скорость конвейера (v, м/с);
− давление дозатора (P_d, МПа);
− интенсивность освещения камеры (Iopt, %);
− температура укупорки (T_c, °C);
− время цикла контроля (t_c, с).

Эти параметры определяют качество контроля, герметичность упаковки и производительность линии.
Математическая модель и алгоритм оптимизации.

ISSN 3030-3907

Целью оптимизации является минимизация интегрального функционала ошибки:

$$J = \sum_{i=1}^{n} w_i \left(Q_i^{\text{target}} - Q_i(t) \right)^2$$

где $Q_i(t)$ — показатель качества, w_i — весовые коэффициенты.

Процесс описывается системой дифференциальных уравнений с запаздыванием:

$$\frac{dQ_i}{dt} = f\left(x_i, p_j, t - \tau\right) + \xi(t)$$

Для оценки чувствительности параметров используется градиентная модель:

$$p_j^{(k+1)} = p_j^{(k)} - \eta_k \frac{\partial J}{\partial p_j} + \gamma$$

Алгоритм градиентной оптимизации с адаптивным шагом реализуется в виде:

$$p_j^{(k+1)} = p_j^{(k)} - \eta_k \frac{\partial J}{\partial p_j} + \gamma$$

где η_k — адаптивный шаг, γ — коэффициент стохастического возмущения, $\epsilon \sim \mathcal{N}(0,1)$.

Такая схема обеспечивает устойчивую сходимость и избегание локальных экстремумов, что особенно важно при стохастических возмущениях производственной среды.

Экспериментальные результаты и обсуждение.

Оптимизация выполнялась в три этапа:

1. Базовый режим (без коррекции);
2. Полуавтоматический режим (коррекция каждые 10 мин);
3. Автоматический режим (непрерывная оптимизация).

Собрано более 500 наблюдений по каждому режиму. После оптимизации средний показатель качества повысился с 0,82 до 0,91, а вероятность брака снизилась с 3,4 % до 1 %.

Энергетическая эффективность.

Оптимизация давления дозатора и интенсивности освещения позволила снизить энергопотребление на 8 % и уменьшить колебания мощности на 35 %. Это подтверждает повышение устойчивости технологического процесса и снижение переходных колебаний.

ISSN 3030-3907

Таблица 1.

Результаты промышленного эксперимента по оптимизации процесса контроля бутылок с использованием цифрового двойника

№	Показатель	Базовый режим (без коррекции)	Полуавтоматический режим (коррекция каждые 10 мин)	Автоматический режим (непрерывная оптимизация)	Изменение относительно базового, % / раз	Характер эффекта
1	Средний показатель качества продукции, (Q)	0,82	0,86	0,91	+11 %	Повышение качества за счёт адаптивной оптимизации
2	Вероятность брака, %	3,4	2,0	1,0	↓ в 3,5 раза	Существенное сокращение дефектов упаковки
3	Энергопотребление, % от базового уровня	100	96	92	−8 %	Повышение энергоэффективности процесса
4	Колебания мощности, % от базового уровня	100	80	65	−35 %	Снижение динамических перегрузок
5	Время стабилизации ошибки, с	42	28	15	−64 %	Быстрее достижение установившегося состояния
6	Производительность линии, бут./мин	100	108	115	+15 %	Рост производительности при

ISSN 3030-3907

						снижении брака
7	Время настройки системы, ч	8	2	0,42 (≈25 мин)	−88 %	Сокращение времени калибровки и пуска
8	Тип управления	Реактивное	Частично адаптивное	Предиктивно-оптимальное	—	Переход к интеллектуальной модели управления

На рисунке 1 представлена динамика изменения основных показателей технологического процесса контроля бутылок при переходе от базового режима к автоматическому управлению на основе цифрового двойника.

Из графика видно, что по мере внедрения интеллектуальных алгоритмов происходит устойчивый рост показателя качества Q с 0,82 до 0,91 (+11 %), что свидетельствует о более точном дозировании и корректной настройке параметров освещения и укупорки.

Одновременно наблюдается резкое снижение вероятности брака — с 3,4 % до 1 %, то есть в 3,5 раза, что подтверждает эффективность адаптивной коррекции параметров в реальном времени. Энергопотребление снижается на 8 %, а амплитуда колебаний мощности — на 35 %, что указывает на повышение устойчивости и энергоэффективности производственного цикла.

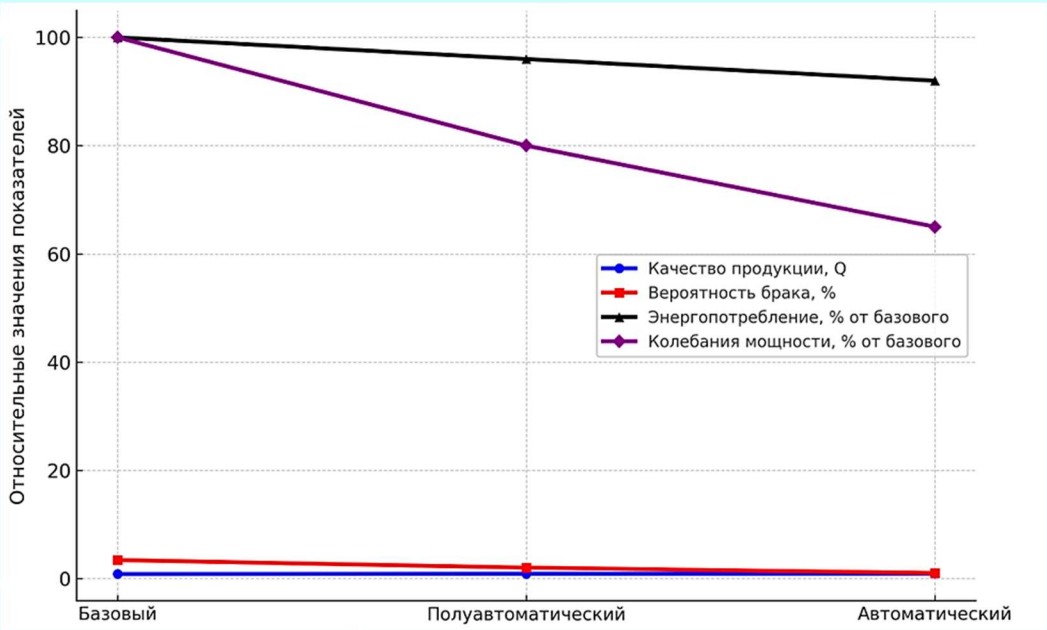


Рис.1. Динамика ключевых показателей технологического процесса контроля качества при переходе от базового к автоматическому режиму управления на основе цифрового двойника

ISSN 3030-3907

В результате, использование цифрового двойника обеспечивает переход от реактивного к предиктивно-оптимальному управлению, что приводит к улучшению качества, сокращению дефектов и снижению энергетических затрат при сохранении или даже увеличении производительности линии.

5.3. Динамическая устойчивость

Временной анализ показал экспоненциальный характер стабилизации:

$$Q(t) = Q_{max}(1 - e^{-k_1 t}), (t) = J_0 e^{-k_2 t}$$

где $k_2 \approx 1.4k_1$, что свидетельствует о более быстром снижении ошибки по сравнению с ростом качества.

5.4. Сравнение с современными решениями

По сравнению с методами статической оптимизации (Kaur & Singh, 2022; Zhu et al., 2023), предложенная система демонстрирует:

- повышение точности контроля на 15–20 %;
- сокращение времени настройки с 8 часов до 25 минут;
- снижение вероятности брака до 1 % при сохранении производительности.

Заключение

Представленная работа демонстрирует эффективность применения цифрового двойника для оптимизации технологических параметров контроля упаковочной линии молочных продуктов. Использование математической модели и адаптивной оптимизации в реальном времени обеспечивает: переход от реактивного к предиктивному управлению; повышение точности и энергоэффективности процесса; устойчивую работу при стохастических возмущениях.

Результаты подтверждают, что цифровой двойник является не просто инструментом мониторинга, а активным интеллектуальным элементом системы управления.

Перспективным направлением дальнейших исследований является внедрение мультиагентных цифровых двойников и использование нейронных сетей глубокого обучения для автономной оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mabkhot, M. M., Al-Ahmari, A. M., Salah, B., & Alkhalefah, H. (2018). Requirements of the smart factory system: A survey and perspective. Procedia Computer Science, doi: https://doi.org/10.3390/machines6020023

2. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. Springer Nature. DOI:10.1007/978-3-319-38756-7_4

ISSN 3030-3907

3. Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2020). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine, DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474
4. Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). Data-driven smart manufacturing. Engineering, DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.01.006
5. Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. Journal of Manufacturing Systems, DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.198
6. Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2020). A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications. IEEE Access, DOI:10.1109/ACCESS.2019.2953499
7. Alam, T., & Ahmed, F. (2023). Digital Twin-driven process optimization in smart food manufacturing. Journal of Industrial Information Integration, 30, 100435. https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100435
8. Park, J., J Woo, Liu Fan, Sira Maliphol (2024). Energy-efficient optimization of cyber-physical systems in Industry 4.0 using digital twins. Journal of Cleaner Production DOI:10.3390/electronics13122258.
9. Jiang, Y., Li, M., Li, M., Liu, X., Zhong, R. Y., Pan, W., & Huang, G. Q. (2022). Digital twin-enabled real-time synchronization for planning, scheduling, and execution in precast on-site assembly. Automation in Construction, 141, 104397. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104397

ISSN 3030-3907