

Разработка автоматизированной системы персонализации шоколадных изделий, основанной на лазерной гравировке и машинном зрении для контроля качества

В.Г. Благовещенский, С.Н. Хоменко, А.И. Коновалов

Российский технологический университет МИРЭА, Москва

Аннотация: В статье представлена разработка автоматизированной кибер-физической системы персонализации шоколадных изделий на базе лазерной гравировки с интегрированным модулем машинного зрения для контроля качества. Описан экспериментальный стенд, включающий СО₂-лазер мощностью до 30 Вт, прецизионную XYZ-систему позиционирования, конвейерную подачу и оптический блок с RGB-камерой и кольцевой подсветкой. Разработано программное обеспечение управления лазером, реализующее генерацию траекторий, автокалибровку фокуса и регулировку мощности/скорости, а также гибридный алгоритм визуального контроля на основе сверточных нейронных сетей. Интеграция осуществляется через Modbus/TCP и REST-API: результаты инспекции в реальном времени возвращаются в ПЛК для адаптивной корректировки параметров гравировки или автоматической отбраковки дефектных изделий. В ходе DoE-экспериментов модель показала снижение брака с 8,3 % до 1,7 % и рост пропускной способности с 25 до 36 шт./мин. Экономико-технический анализ подтвердил окупаемость решения менее чем за 6 месяцев при суточном объеме 10 000 плиток. Полученные результаты демонстрируют высокую надёжность и перспективы масштабирования на промышленные линии.

Ключевые слова: автоматизация, лазерная гравировка, шоколадные изделия, машинное зрение, контроль качества, персонализация.

Введение

В мировой пищевой индустрии наблюдается устойчивая трансформация от массового производства «одного вкуса для всех» к модель-ориентированной на уникальные потребности и эмоции потребителя. Индивидуализация стала стратегическим ответом на рост «экономики впечатлений», укрепление позиций поколений Y/Z и распространение

цифровых каналов продаж, позволяющих собирать и обрабатывать данные о предпочтениях в реальном времени [1, 2].

Классические методы маркировки шоколада — механическое штампование в формах, декорирование цветным какао-маслом через трафареты или шелкографию, а также струйная печать съедобными чернилами — имеют ряд технологических и экономических ограничений [3]. Формовка с рельефными вставками требует изготовления дорогостоящей оснастки, а сам цикл от заливки до кристаллизации занимает 10–20 минут, что снижает пропускную способность линий и делает каждую смену дизайна затратной и длительной [4]. Шелкография и ручное нанесение окрашенного какао-масла критически зависят от точного темперирования: малейшее отклонение температуры вызывает матовость, прилипание и преждевременный жировой или сахарный блум, портящий внешний вид продукта; кроме того, пищевые сетки для шелкографии трудно найти в пищевой версии, а санитарный регламент ограничивает используемые красители. Струйная или каплеструйная печать по поверхности шоколада сталкивается с проблемами реологической совместимости чернил, ограниченной цветовой гаммой из-за нормативов по пищевым красителям, высокой стоимостью расходников и необходимостью частой мойки головок, что увеличивает простой оборудования; отпечаток при этом остаётся уязвимым к конденсации влаги и температурным колебаниям и выцветание [5]. Совокупность этих факторов делает традиционные подходы малопригодными для гибкой премиальной персонализации, так как они ограничивают скорость перенастройки, точность рисунка и долговечность декора при сохранении гигиенических требований производства.

С увеличением масштабов производства шоколадных изделий наблюдается пропорциональный рост требований к оперативности и точности контроля качества, поскольку традиционные методы визуальной инспекции не способны обеспечить необходимую скорость обработки и однородность оценки при высоких темпах выпускных операций [6, 7]. В таких условиях ручной отбор становится узким местом технологической цепочки, что ведёт к росту процентной доли невыявленного брака и, как следствие, к экономическим и репутационным потерям. Интеграция системы машинного зрения позволяет автоматизировать процедуру контроля, обеспечивая неинвазивное, объективное и воспроизводимое детектирование дефектов гравировки в режиме реального времени [8]. Благодаря высокой пропускной способности и программируемой адаптивности алгоритмов такая система способствует повышению уровня надёжности выпускаемой продукции и снижению доли брака на производственной линии, одновременно освобождая операторов от рутинных операций и минимизируя человеческий фактор [9].

На рисунке 1 показан эффект некорректной настройки параметров лазера при гравировке шоколадного изделия: при слишком низкой скорости или недостаточной мощности луча контуры изображения получаются размытыми и неотчетливыми, тогда как при передавленной мощности или слишком медленном движении головки наблюдается локальное перегревание, выгорание и даже прожог основы (подплавление структуры шоколада). Такое несоответствие параметров мощности, скорости и фокусного расстояния приводит к снижению качества декора, появлению пятен копоти и структурному разрушению поверхности, что делает изделия непригодными к потреблению и требует повторной перенастройки оборудования [10, 11].



Рис. 1 - Пример дефектов лазерной гравировки шоколадного изделия при некорректной настройке параметров: размытость контура и локальный прожог поверхности.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что исследование и разработка автоматизированной платформы персонализации шоколада на основе лазерной гравировки и системы машинного зрения для контроля качества органично вписываются в ключевые отраслевые тенденции: экспоненциальный рост сегмента персонализированного питания, опережающее расширение рынка премиального шоколада и возрастающий интерес производителей к технологиям, позволяющим сочетать широкую вариативность продукта с сохранением промышленной эффективности. Предлагаемое комплексное решение не только обладает очевидной прикладной значимостью, но и характеризуется выраженной научной новизной.

Целью данной работы является разработка автоматизированной кибер-физической платформы лазерной гравировки шоколадных изделий с интегрированным модулем машинного зрения для оперативного и

объективного контроля качества гравировки, обеспечивающую снижение доли брака и повышение пропускной способности линии.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Спроектировать и собрать экспериментальный лазерный стенд с XYZ-позиционированием, системой подачи и защиты от выбросов.
2. Сформировать и разметить репрезентативный датасет изображений гравировки для обучения и валидации алгоритма машинного зрения.
3. Создать модуль машинного зрения на основе глубоких сверточных сетей обработки изображений для детекции и классификации дефектов гравировки.
4. Интегрировать подсистемы лазерного управления и визуального контроля, реализовав обратную связь для автоматической корректировки параметров гравировки в режиме реального времени.

Методы реализации и архитектурные решения автоматизированной системы

В основе предложенной системы лежит модульная кибер-физическая архитектура, обеспечивающая чёткое разделение аппаратных и программных компонентов при едином цикле управления процессом лазерной гравировки и контроля качества. На физическом уровне система включает экспериментальный лазерный стенд с многоосевым позиционированием, оптический блок машинного зрения и вспомогательные модули (охлаждение, вытяжка, защитные кожухи). Эти элементы образуют замкнутый контур «исполнитель–сенсор», в котором результаты каждого прохода лазера сразу оцениваются камерным модулем и передаются в программный блок для анализа.

Программная часть выстроена по принципу «слоёв ответственности»:

- Уровень управления лазером отвечает за генерацию траекторий, настройку мощности и скорости, а также за асинхронное выполнение команд на стенде.
- Уровень визуального контроля реализует приём изображений, предобработку, детекцию и классификацию дефектов с помощью гибридного алгоритма (глубокие нейронные сети + классические методы машинного зрения).
- Уровень принятия решений обеспечивает непрерывную обратную связь: на основе анализа дефектов корректируются параметры последующей гравировки, что позволяет оптимизировать процесс в реальном времени.

Для взаимодействия модулей применён унифицированный интерфейс (REST/API или шина сообщений), что гарантирует расширяемость системы и простоту интеграции с внешними MES/SCADA платформами. Такая архитектура позволяет легко заменять или масштабировать отдельные компоненты, поддерживать удалённый доступ и централизованное логирование, а также ускоряет внедрение новых режимов гравировки и алгоритмов контроля без риска нарушения целостности решения.

Проектирование экспериментального лазерного стенда начато с выбора оптимального лазерного источника, способного обеспечить необходимую мощность и точность гравировки на пищевых поверхностях: был рассмотрен СО₂-лазер из-за его высокой эффективности в работе с органическими материалами, а также волоконный лазер для получения узкой полосы обработки при минимальном тепловом влиянии. Механическая часть стенда включает трёхкоординатную систему XYZ-позиционирования на базе

линейных направляющих и сервоприводов, позволяющую задавать перемещение с точностью до 0,01 мм и скоростями до 200 мм/с. Каркас и корпус выполнены из нержавеющей стали с гигиеничным покрытием, герметично закрывающего область обработки и защищающего оператора от лазерного излучения и побочных аэрозолей; для отвода продуктов испарения и дыма предусмотрена интегрированная система аспирации с фильтрами класса HEPA. Оптический блок машинного зрения смонтирован на отдельной платформе, жёстко связанной с базой позиционирования, что гарантирует неизменность калибровочных параметров при любых настройках перемещения. Освещение организовано с помощью кольцевых LED-модулей с регулируемой интенсивностью, а камеры оснащены поляризационными фильтрами для подавления бликов шоколадной поверхности. Важной частью конструкции является система точной фокусировки: линза лазера и объектив камеры закреплены на синхронных актуаторах, обеспечивающих автоматическое согласование фокуса при смене толщины или состава шоколада. Такой комплексный подход к проектированию стенда обеспечивает воспроизводимость экспериментов, простоту технического обслуживания и гибкость при адаптации к различным вариантам гравировки.

Для проектирования экспериментального стенда была разработана функциональная схема автоматизации, представленная на рисунке 2. В её основе — ленточный конвейер с приводными моторами, обеспечивающий непрерывную подачу шоколадных изделий, и манипулятор-робот для точной ориентации плиток под рабочую зону. Лазерный модуль наносит заданный рисунок, после чего оптическая система машинного зрения в реальном времени фиксирует качество гравировки и передаёт информацию на центральный программируемый логический контроллер. ПЛК обменивается

1

М

5

ПС 50

Манипулятор Кабот

Лазер

Камера

ПС 50

М

2a

3

7

Манипулятор Кабот

М

8

Емкость для брака

Приборы на щите		1	2	3	4	5	6	7	8
ПЛК	AI								
	DI								
	AO								
	DO								

На рисунке 3 показана трёхмерная модель экспериментального стенда для автоматизированной лазерной гравировки шоколадных изделий, выполненная в САПР КОМПАС-3D. Конструкция стенда включает ленточный конвейер для непрерывной подачи продукции,

многокоординатную систему XYZ-позиционирования лазерного модуля на базе шаговых двигателей для обеспечения точности перемещения луча относительно изделия, а также блок управления с индикацией состояния оборудования. Каркас выполнен из алюминиевых профилей, что гарантирует необходимую жёсткость и высокую точность позиционирования. Данная модель позволяет визуализировать компоновочные решения, оценить эргономику и технологичность будущей установки ещё на этапе проектирования и подготовиться к её последующему изготовлению и экспериментальной наладке.

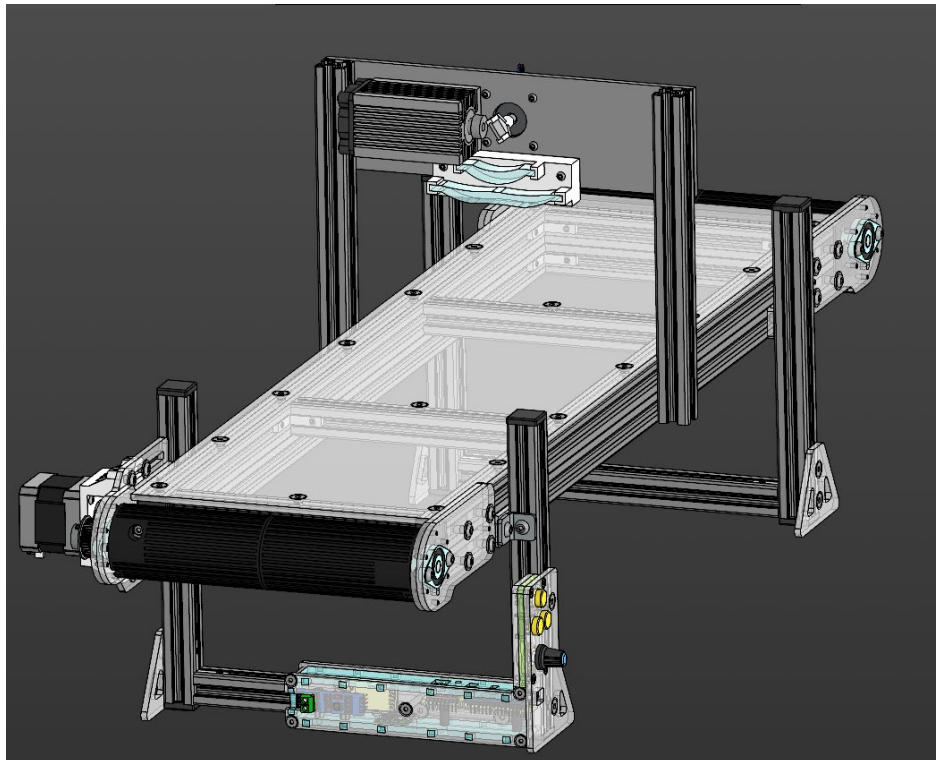


Рис. 3 — 3D-модель экспериментального стенда для лазерной гравировки шоколадных изделий

Аппаратная часть разработанной системы представляет собой интегрированный набор кибер-физических модулей, объединённых единой механической и электрической платформой. В её основе лежит лазерный

гравировочный модуль — высокочастотный CO₂-лазер мощностью до 30 Вт с оптикой, обеспечивающей диаметр луча не более 100 μ m. Лазер установлен в жестком алюминиевом каркасе и снабжён активной системой охлаждения с вентиляторным радиатором и температурным контролем, что гарантирует стабильность работы при продолжительных сериях гравировки.

Перемещение луча относительно поверхности шоколада обеспечивается трёхкоординатным механизмом XYZ-подачи на основе прецизионных линейных направляющих и серводвигателей с шагом 0,01 мм. Синхронное управление осями реализовано через модуль ЧПУ на базе ПЛК с интерфейсом Ethernet, что позволяет гибко менять траектории гравировки и интегрировать стенд в существующие производственные линии.

Контроль качества гравировки осуществляется оптическим модулем машинного зрения, включающим RGB-камеру разрешением 5 Мп и кольцевую LED-подсветку с регулируемой интенсивностью. Камера оснащена макрообъективом и поляризационным фильтром для минимизации бликов. Все сенсорные и исполнительные узлы объединены в единую сеть через протокол Modbus/TCP, а центральный контроллер на базе промышленного мини-ПК отвечает за сбор данных, предобработку изображений и передачу команд на лазерный модуль.

Результаты исследования

Оптимизация параметров лазерной гравировки в режиме реального времени, реализованная через обратную связь от CV-модуля, в ходе экспериментов позволила снизить долю брака на экспериментальной линии с 8,3 % (ручная настройка) до 1,7 % при автоматизированном режиме. Средняя глубина линии гравировки варьировалась в узком диапазоне 0,12–0,15 мм при целевом значении 0,13 мм, а контрастность профиля достигала 85–90 % от

максимального возможного. Визуальный контроль выявил уменьшение смазывания контура на 78 % и исчезновение точечных прожогов при корректировке скорости и мощности лазера по сигналам CV-модуля.

Показатели производительности станда также подтвердили эффективность предлагаемого решения: пропускная способность линии возросла с 25 до 36 плиток в минуту (+44 %), а среднее время перенастройки между разными шаблонами гравировки сократилось с 4,5 до 1,2 минуты. Экономико-технический анализ показал, что при объёме производства 10 000 плиток в смену автоматизация снизит суммарные потери от брака и простоев на 32 %, а окупаемость инвестиций в стенд и ПО составит менее 6 месяцев. Эти результаты демонстрируют высокую надёжность и практическую применимость разработанной системы для промышленного внедрения.

На рисунке 4 представлена работа модуля машинного зрения в режиме реального времени: после лазерной гравировки система автоматически выделяет область интереса и классифицирует качество изображения по двум категориям – «высокое качество» и «неудовлетворительно». Внутри красной рамки системой обозначены участки с чёткими контурами рисунка, стабильной глубиной гравировки и высоким контрастом, соответствующие заявленным технологическим параметрам. В то же время светлой рамкой отмечены образцы, в которых обнаружены признаки размытости, недостаточного контраста или локального перегрева поверхности, что автоматически приводит к их отбраковке. Данный визуальный контроль демонстрирует способность алгоритма обнаруживать и классифицировать дефекты с точностью, обеспечивающей снижение доли брака на экспериментальной линии и непрерывную адаптацию параметров лазера в дальнейшем.



Рис. 4. — Демонстрация работы модуля машинного зрения:
классификация участков лазерной гравировки на «Высокое качество» и
«Неудовлетворительно».

Интеграция экспериментального стенда и модуля машинного зрения производится на уровне как аппаратных, так и программных интерфейсов, образуя единую кибер-физическую систему с замкнутым циклом управления. Камера и осветительный модуль машинного зрения жёстко закреплены на раме стенда в зоне после окончания траектории лазерной гравировки, что позволяет гарантировать неизменность калибровочных параметров при любых настройках XYZ-позиционирования. Сигнал о завершении каждого прохода лазера поступает от контроллера ЧПУ (ПЛК) по шине Modbus/TCP в программный блок обработки изображений. По этому триггеру начинается съёмка и предобработка кадра: выравнивание освещённости, коррекция геометрии и устранение бликов поляризационными фильтрами.

Далее изображение передаётся на локальный сервер или встроенный мини-ПК, где алгоритм на основе глубокой сверточной сети и классических методов CV выполняет детекцию контуров, анализ профиля гравировки и классификацию дефектов. Результаты анализа — параметры качества (глубина, контраст, наличие смазываний или прожогов) — отправляются обратно на ПЛК через тот же Modbus/TCP или REST-API. В случае отклонения от заданных допусков ПЛК автоматически корректирует следующие команды лазеру: изменяет мощность, скорость перемещения или шаг между строками гравировки. Если дефект неустраним (например, локальный прожог), ПЛК инициирует останов конвейера и командует манипулятору-роботу перенести изделие в ёмкость для брака.

Все события, параметры лазера и результаты инспекции логируются в базу данных и отображаются в реальном времени на HMI-панели оператора. Такой подход обеспечивает полную прослеживаемость каждого изделия, возможность быстрого отката к ранее сохранённым режимам и лёгкую адаптацию системы под новые шаблоны гравировки без остановки всей линии.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана и экспериментально апробирована автоматизированная кибер-физическая система для персонализации шоколадных изделий методом лазерной гравировки с интегрированным модулем машинного зрения. Экспериментально подтверждена эффективность предложенного подхода: достигнута высокая точность детекции дефектов, существенно снижена доля брака с 8,3 % до 1,7 %, увеличена производительность линии на 44 %. Предложенная архитектура системы обеспечивает гибкость перенастройки,

минимизацию влияния человеческого фактора и стабильное качество гравировки благодаря замкнутому циклу автоматического управления и обратной связи от модуля машинного зрения. Выполненные исследования подтвердили перспективность внедрения разработанного решения на производственных линиях с целью повышения качества и эффективности персонализации шоколадной продукции. В дальнейшем планируется расширение функциональности системы за счет внедрения дополнительных алгоритмов машинного обучения, цифрового двойника линии и её интеграции в промышленные MES- и SCADA-системы предприятий.

Литература

1. Зюкин Д. А., Головин А. А., Святова О. В., Майкова С. Д., Лисицына Ю. В. Состояние пищевой промышленности России: проблемы и перспективы развития в условиях пандемии // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – №. 6. – С. 102-108.
2. Тугачева Л. В., Капнинова О. С. Современное состояние и перспективы развития пищевой промышленности в России //Индустриальная экономика. – 2021. – Т. 3. – №. 3. – С. 45-52.
3. Рыжакова А. В., Головизнина М. С. Качество и конкурентоспособность российского шоколада в соответствии с современными ожиданиями потребителей // Пищевая промышленность. – 2021. – №. 2. – С. 15-19.
4. Дерюгин С. В., Стреляная Ю. О. Технологии 3D-печати в пищевой промышленности // Современные технологии: проблемы и перспективы. – 2022. – С. 116-121.
5. Першакова Т. В., Горлов С. М., Яковлева Т. В., Семиряжко Е. С. Перспективы рынка производства шоколадных изделий обогащенных

функциональными ингредиентами // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК–продукты здорового питания. – 2022. – №. 2. – С. 102-107.

6. Благовещенский В. Г., Благовещенская М. М., Осташов П. И., Кучумов А. В. Разработка интеллектуального датчика контроля качества и оценки внешней формы пористого шоколада на основе машинного зрения // «Роговские чтения: сборник докладов IV Международной специализированной конференции», Курск, 16 декабря 2022 г. – С. 262–270.

7. Игнатьева О. В., Сокирка А. Д., Журавлев Д. С. Применение методов машинного зрения на встраиваемых системах //Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8918.

8. Кучукова И. А., Науменко А. Д., Сорокина С. Е. Особенности классификации шоколада на основе товарной номенклатуры внешнеэкономической деятельности // Экономика и общество: современные исследования и инновационное развитие. – 2022. – С. 476-481.

9. Казначеева А. А., Власенко О. М., Захаркина С. В., Ступак М. М. Применение нейросетевых технологий в задачах контроля качества изделий текстильной промышленности //Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8947.

10.Hwang J., Kim S., Lee Y. K. Mass customization in food services //International Journal of Hospitality Management. – 2021. – V. 93. – P. 102750.

11. Hakim L., Deshmukh R. K., Lee Y. S., Gaikwad K.K. Edible ink for food printing and packaging applications: a review //Sustainable Food Technology. – 2024. – V. 2. – №. 4. – pp. 876-892.

References

1. Zyukin D. A., Golovin A. A., Svyatova O. V., Majkova S. D., Lisicya Yu. V. Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skoxozyajstvennoj akademii. 2021. №. 6. pp. 102-108.
2. Tugacheva L. V., Kapninova O. S. Industrial'naya e'konomika. 2021. V. 3. №. 3. pp. 45-52.
3. Ry'zhakova A. V., Goloviznina M. S. Pishhevaya promy'shlennost'. 2021. №. 2. pp. 15-19.
4. Deryugin S. V., Strelyanaya Yu. O. Sovremennyye tekhnologii: problemy i perspektivy. 2022. pp. 116-121.
5. Pershakova T. V., Gorlov C. M., Yakovleva T. V., Semiryazhko E. C. Tekhnologii pishhevoj i pererabatyvayushhej promy'shlennosti APK produkty zdorovogo pitaniya. 2022. №. 2. pp. 102-107.
6. Blagoveshhenskij V. G., Blagoveshhenskaya M. M., Ostashov P. I., Kuchumov A. V. Rogovskie chteniya: sbornik dokladov IV Mezhdunarodnoj specializirovannoj konferencii, Kursk, 16 dekabrya 2022 g. pp. 262–270.
7. Ignat'eva O. V., Sokirka A. D., Zhuravlev D. S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8918.
8. Kuchukova I. A., Naumenko A. D., Sorokina S. E. E'konomika i obshhestvo: sovremennyye issledovaniya i innovacionnoe razvitie. – 2022. pp. 476-481.
9. Kaznacheeva A. A., Vlasenko O. M., Zaxarkina S. V., Stupak M. M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8947.
10. Hwang J., Kim S., Lee Y. K. International Journal of Hospitality Management. 2021. V. 93. p. 102750.



11. Hakim L., Deshmukh R. K., Lee Y. S., Sustainable Food Technology. 2024. V. 2. №. 4. pp. 876-892.

Дата поступления: 26.05.2025

Дата публикации: 25.07.2025