

Итоговым функционалом системы является модуль генерации отчетности на базе библиотеки *ClosedXML*. Техническая сложность реализации данного модуля заключалась в необходимости сохранения структуры оригинального университетского бланка. Результатом является файл формата *XLSX*, готовый к подаче на подпись заведующему кафедрой.

Универсальность разработанного программного комплекса заключается в его архитектурной гибкости, позволяющей использовать систему как в качестве локального инструмента персонального планирования, так и в роли централизованного университетского сервиса.

Для личного использования преимуществом является выбор СУБД *SQLite* и платформы *.NET*, что обеспечивает портативность: приложение может быть запущено на ПК преподавателя без необходимости настройки серверной инфраструктуры. Модули импорта и экспорта позволяют пользователю автономно обрабатывать вузовские ведомости и получать готовые отчеты, не дожидаясь внедрения системы на уровне всего учебного заведения.

Для внедрения в масштабе университета система обладает необходимым запасом масштабируемости и безопасности. Использование *ASP.NET Core Identity* обеспечивает разграничение прав доступа и изоляцию данных между пользователями. Наличие централизованных справочников дает администрации вуза возможность унифицировать формулировки отчетности для всех кафедр.

Надежность разработанного программного комплекса подтверждена комплексом из 18 модульных и интеграционных тестов на базе фреймворка *xUnit*.

Разработанное программное средство обеспечивает комплексную автоматизацию учета учебной нагрузки, устраняя основные недостатки традиционных методов планирования. Внедрение реактивного интерфейса *Blazor Server* в сочетании с алгоритмами распределения позволило создать надежный и удобный инструмент для профессорско-преподавательского состава. Результаты тестирования и апробации модуля импорта/экспорта подтвердили готовность системы к эксплуатации в условиях реального документооборота кафедры. Репозиторий проекта расположен по адресу <https://github.com/kussz/PersonalPlanShowcase>.

Л и т е р а т у р а

1. Илья Лебедев / Принципы реактивного программирования в веб-разработке. – URL: <https://tenchat.ru/media/2080930-printsipy-reaktivnogo-programmirovaniya-v-vebrazrabotke> (дата обращения: 02.04.2026).
2. Широченко, В. А. / Автоматизированная система расчета, распределения и анализа учебной нагрузки кафедры вуза / В. А. Широченко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 3 (84). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannaya-sistema-rascheta-raspredeleniya-i-analiza-uchebnoy-nagruzki-kafedry-vuza> (дата обращения: 03.04.2026).

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА FDM-ПЕЧАТИ НА БАЗЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ И АНАЛИЗА G-КОДА

Е. В. Леонович

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель В. В. Комраков

Рассмотрен процесс разработки программного обеспечения для автоматизированного контроля качества аддитивного производства методом FDM. Описаны алгоритмические

подходы, технологии компьютерного зрения и функциональные модули системы, направленные на выявление производственных дефектов в режиме реального времени. Особое внимание уделено вопросам пространственного позиционирования печатающей головки с использованием фидуциальных маркеров *ArUco* и верификации траектории путем сравнения с эталонным *G*-кодом.

Ключевые слова: автоматизация контроля, компьютерное зрение, 3D-печать, *ArUco*, *OpenCV*, C++, оптический трекинг, *G*-код, обнаружение аномалий.

В эпоху развития парадигмы индустрии 4.0 аддитивное производство требует перехода от систем управления без обратной связи к интеллектуальным комплексам, способным к самодиагностике. Одной из наиболее критических проблем популярного метода моделирования методом послойного наплавления (*FDM*) остается принципиальное отсутствие контроля реального положения печатающей головки в пространстве. Процесс создания физических объектов данным методом всегда сопряжен с высоким риском возникновения таких непоправимых дефектов, как смещение слоев, пропуск шагов шагового двигателя ввиду механических перегрузок, а также частичная или полная деламинация модели [1]. Подобные аномалии крайне сложно выявить на ранних этапах без непрерывного визуального наблюдения, что приводит к нерациональному расходу полимерных материалов и машинного времени. Целью данного исследования является разработка и программная реализация комплекса визуальной верификации координат экструдера в режиме реального времени, способного автономно прерывать процесс при обнаружении критических отклонений.

В основе предлагаемой системы лежит сочетание алгоритмов компьютерного зрения и лексического анализа управляющего *G*-кода. Для обеспечения максимальной вычислительной производительности и минимизации задержек ядро системы реализовано на языке программирования C++ с использованием открытой библиотеки компьютерного зрения *OpenCV* [2]. Выбор данного инструментария обусловлен необходимостью обработки видеопотока высокого разрешения в режиме реального времени без создания дополнительной нагрузки на управляющий контроллер принтера. Ключевым элементом оптического трекинга выступает использование фидуциальных маркеров формата *ArUco* [3], которые жестко закрепляются на корпусе движущегося экструдера. Использование таких маркеров позволяет камере решать классическую задачу нахождения перспективы по n точкам (*Perspective-n-Point*, *PnP*). Благодаря этому алгоритму система вычисляет точные векторы трансляции и ротации маркера относительно объектива камеры, формируя пространственную матрицу трансформации (рис. 1).

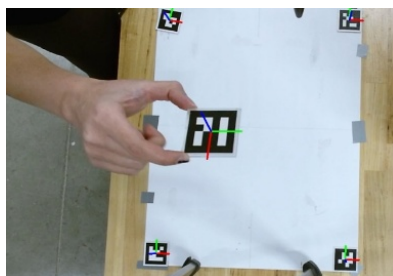


Рис. 1. Пример *ArUco*-маркера и его детектирования

В отличие от стандартных методов слежения за объектами, основанных на цветовых фильтрах или каскадах Хаара, подход на базе маркеров *ArUco* демонстрирует

высокую устойчивость к динамическим изменениям освещения сцены и эффекту размытия в движении, что является критически важным условием для работы с высокоскоростными 3D-принтерами.

Работа программного комплекса логически организована как непрерывный трехэтапный конвейер данных. На этапе препроцессинга специализированный модуль парсинга считывает эталонный файл *G*-кода, отсекая вспомогательные команды и формируя упорядоченный массив целевых координат позиционирования экструдера. На этапе оптического трекинга система выполняет захват актуального кадра, его поканальную бинаризацию и субпиксельное уточнение углов обнаруженного маркера. Для корректной трансформации двумерных координат изображения в трехмерные физические координаты рабочего пространства принтера предварительно проводится калибровка камеры с целью получения матрицы внутренних параметров и коэффициентов дисторсии линзы. На финальном этапе компаративного анализа программный комплекс синхронизирует временные метки кадров с текущей выполняемой строкой *G*-кода и вычисляет абсолютное отклонение фактического положения от целевого. Математически данное отклонение вычисляется как евклидово расстояние между двумя точками в трехмерном пространстве.

Программный комплекс прошел успешную валидацию по методологии *Software-in-the-Loop (SITL)* с использованием синтетических наборов данных и эмуляции управляющего контроллера. При использовании вычислительной мощности процессора архитектуры x86 (уровня *Intel Core i7*) разработанный алгоритм демонстрирует производительность, значительно превышающую стандартную частоту кадров большинства веб-камер (стабильные 60 и более кадров в секунду). Это полностью исключает возникновение задержек на этапе анализа и позволяет системе реагировать на сбои практически мгновенно. Важной архитектурной особенностью проекта является метод взаимодействия с оборудованием: связь с принтером осуществляется посредством *API* интерфейса *Moonraker*, что обеспечивает прямую интеграцию с современной прошивкой *Klipper*. В ходе проведенных стендовых тестов было эмпирически установлено допустимое пороговое значение отклонения, равное 2 миллиметрам. При достижении или превышении данного лимита система немедленно инициирует автоматизированный сценарий защиты. В рамках этого сценария происходит отправка текстового уведомления оператору, а также прямая трансляция команды экстренной паузы в прошивку принтера по сетевому протоколу. Такая логика позволяет остановить процесс печати до того момента, как дефект станет критическим и приведет к разрушению детали.

Теоретическая точность применяемого метода при условии использования качественной оптики и отсутствии существенных оптических искажений или загрязнений линзы достигает 0,5 миллиметра при расстоянии до маркера в 0,5 метра. Разработанное программное обеспечение фактически превращает стандартный *FDM*-принтер в адаптивную интеллектуальную систему с полноценной обратной связью по положению рабочего органа. Дальнейший вектор развития данного проекта предполагает внедрение программных модулей автоматической калибровки камеры без участия пользователя, а также более глубокую интеграцию вычислительного ядра с микроконтроллерами для обеспечения полной автономности процесса контроля на уровне встраиваемых систем.

Литература

1. Дефекты 3D печати – Попробуем ввести классификацию – URL: <https://3dtoday.ru/blogs/leoluch/defects-3d-printing-will-try-to-introduce-a-classification> (дата обращения: 02.03.2026).
2. Кэлер, А. Изучаем OpenCV 3. Разработка программ компьютерного зрения на C++ с применением библиотеки OpenCV / А. Кэлер, Г. Брэдски. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 826 с.
3. Обзор технологий трекинга: AR маркеры – URL: <https://habr.com/ru/articles/563666/> (дата обращения: 02.03.2026).

SENSORS FOR INTELLIGENT OIL CONDITION PREDICTION SYSTEM**Wang Hao, Zhang Nan***Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

Scientific supervisor V. V. Komrakov

Lubricating oil degradation seriously impairs the operational stability and service life of industrial machinery. Traditional manual sampling and laboratory detection methods for oil condition monitoring suffer from low efficiency, high cost, and inability to capture early degradation anomalies. To solve this problem, this paper designs and implements a low-cost and scalable intelligent oil condition prediction system based on ESP32 microcontroller. The system uses a distributed telemetry framework to collect multi-dimensional oil parameters via temperature, torque, viscosity, and light sensors, transmits data wirelessly over MQTT, and runs moving average filtering, adaptive outlier detection, and real-time visualization on a Python server. This small article systematically expounds the research purpose, technical methods and experimental results of the system. The constructed multi-sensor monitoring scheme can realize continuous real-time perception of oil health status, which provides a feasible technical reference for industrial equipment predictive maintenance and intelligent oil condition monitoring.

Keywords: ESP32 microcontroller, intelligent oil condition prediction, multi-sensor telemetry, MQTT protocol, data processing, real-time monitoring.

Research Purpose

Lubricating oil undertakes core functions such as friction reduction, heat dissipation, wear resistance and contamination isolation in industrial mechanical operation. Long-term service will lead to oil aging, oxidation and particle contamination under the influence of thermal stress and mechanical load, resulting in the decline of lubrication performance, and further inducing equipment overheating, mechanical failure and unplanned downtime. Traditional telemetry monitoring schemes represented by commercial industrial controllers and cloud IoT platforms [1] have high deployment cost, complex licensing mechanism and strong dependence on external infrastructure, which are not suitable for small-scale deployment, prototype verification and educational application scenarios.

It is necessary to develop an open, low-power and scalable distributed telemetry system based on microcontroller. The research objectives are as follows: firstly, construct an edge sensing platform compatible with multiple sensors to obtain multi-dimensional data reflecting oil state; secondly, establish a stable MQTT wireless transmission and server data processing pipeline to ensure reliable data interaction and efficient analysis; thirdly, realize real-time data visualization and threshold anomaly early warning, so as to provide decision basis for oil degradation evaluation and equipment fault prediction, and reduce the operation and maintenance cost of industrial equipment.

Research Methods

The system adopts a layered architecture of edge sensing node, wireless transmission