

УДК 621.7: 004.4

Фроликова Е. А.

Студент

Научный руководитель: Фефелов О. С.

Белгородский государственный национальный исследовательский
университет Российская Федерация, г. Белгород

ОРГАНИЗАЦИЯ УДАЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ FDM- ПРИНТЕРОВ НА БАЗЕ OPEN-SOURCE СЕРВИСОВ МОНИТОРИНГА

Аннотация: Статья посвящена организации эффективного удаленного мониторинга и управления FDM-печатью с использованием open-source инструментов. В работе рассматриваются возможности популярных систем OctoPrint и Klipper, а также роль видеосервисов и AI-алгоритмов в раннем обнаружении дефектов печати.

Ключевые слова: аддитивное производство, послойное наплавление, удаленный мониторинг, открытый исходный код, видеомониторинг, машинное зрение, нейронные сети, автоматизация производства, дистанционное управление, послойный контроль.

Frolikova Ekaterina Alekseevna, student 4 courses, setting up remote management of FDM printers using open-source monitoring services.

Abstract: This article focuses on setting up effective remote monitoring and control of FDM printing using open-source tools. It explores the capabilities of the popular OctoPrint and Klipper systems, as well as the role of video services and AI algorithms in the early detection of printing defects

Keywords: additive manufacturing, layer-by-layer deposition, remote monitoring, open source, video monitoring, computer vision, neural networks, manufacturing automation, remote control, layer-by-layer inspection

Технология FDM относится к наиболее распространенным вариантам экструзионного аддитивного производства, применяемым в образовании, инженерном прототипировании и опытном изготовлении изделий. Процесс изготовления изделия значительно зависит от стабильной подачи материала и температурного режима. Сам процесс достаточно продолжителен и может занимать десятки часов. В обзоре «Мониторинг процессов экструзионного аддитивного производства» (Process monitoring for material extrusion additive manufacturing) отмечается, что для дальнейшего совершенствования процесса существенное значение имеют методы in-situ контроля состояний процесса и свойств получаемых деталей [1, 2].

Актуальность визуального контроля и сбора телеметрии продиктована тем, что отклонения в процессе печати необходимо выявлять как можно раньше. Анализируя видеопоток и данные датчиков, оператор может оценить состояние изделия и обнаружить дефекты.

Для практической эксплуатации FDM-принтеров в учебных и инженерных условиях важен не только сам факт удаленного наблюдения, но и организационная модель, в которой программные компоненты остаются доступными, воспроизводимыми и модифицируемыми. Именно поэтому особую значимость приобретают open-source решения, позволяющие развернуть систему на стандартном одноплатном компьютере или рабочей станции без привязки к закрытой облачной инфраструктуре. К числу наиболее зрелых решений такого класса относятся OctoPrint, экосистема Klipper/Moonraker с интерфейсами Mainsail и Fluidd, а также self-hosted вариант платформы Obico.

В рамках исследования не ставилась задача экспериментально определить превосходство одного программного стека над другим по производительности или надежности, поскольку такие выводы требуют отдельного стендового тестирования при одинаковой аппаратной

конфигурации. Поэтому статья ориентирована на архитектурный и организационный уровень анализа: какие компоненты следует включать в систему удаленной эксплуатации, какие функции между ними распределяются и какие ограничения необходимо учитывать при реальном внедрении.

OctoPrint представляет собой свободное программное обеспечение с веб-интерфейсом для управления потребительскими 3D-принтерами. Проект распространяется по лицензии AGPLv3 [3]. OctoPrint обеспечивает дистанционное управление заданиями печати, отображение статуса, работу со встроенным видеопотоком, визуализацию G-code и изменение параметров печати через браузер.

Альтернативный подход реализован в экосистеме Klipper. В этой архитектуре Moonraker выступает как Python-based веб-сервер, предоставляющий API для взаимодействия с прошивкой Klipper [4]. Moonraker поддерживает HTTP и JSON-RPC API, а для получения событий, обновления статусов и ответов на G-code-команды используется WebSocket-механизм. Moonraker выполняет роль серверного интеграционного слоя, на который опираются пользовательские веб-интерфейсы.

В качестве клиентских интерфейсов для Moonraker широко применяются Mainsail и Fluidd. Mainsail – это open-source веб-интерфейс для управления принтерами на базе Klipper, поддерживающий мониторинг печати в реальном времени, статистику, управление макросами и настраиваемый интерфейс. Fluidd позиционируется как легковесный и адаптивный интерфейс Klipper UI. Экосистема Klipper логически разделяет сервер API и пользовательский фронтенд.

Для видеонаблюдения в Klipper-ориентированном стеке важную роль играет Crowsnest. Он является сервисной службой для работы с

видеопотоком для Raspberry Pi OS-подобных систем и предназначен для того, чтобы держать принтер под наблюдением на расстоянии.

Интерфейс Moonraker напрямую камерами не управляет, он хранит конфигурацию камер и предоставляет унифицированный интерфейс доступа к ней, тогда как фактическое взаимодействие с камерой осуществляют внешние приложения, например Crowsnest.

Дополнительный уровень удаленной эксплуатации может быть реализован через self-hosted Obico Server. Его можно развернуть на собственном компьютере, в проекте доступен self-hosted сценарий, а также заявлена поддержка AI-based failure detection [5]. Для self-hosted режима настройка туннеля OctoPrint/Klipper имеет смысл только при корректно настроенном reverse проху. Следовательно, Obico целесообразно рассматривать не как замену локальному стеку управления, а как надстройку для внешнего безопасного доступа, уведомлений и дополнительных интеллектуальных функций.

Рациональная архитектура удаленной эксплуатации FDM-принтера должна включать несколько функциональных уровней. На нижнем уровне располагаются сам принтер, управляющая электроника и локальный вычислительный узел, например Raspberry Pi или иной SBC/мини-ПК. На среднем уровне размещается программный стек управления печатью: либо OctoPrint как монолитное решение, либо связка Klipper + Moonraker. На верхнем уровне находится пользовательский веб-интерфейс, через который оператор получает доступ к статусу, заданиям, журналам и визуальному наблюдению. Видеопоток при этом должен обслуживаться отдельным компонентом или отдельным сервисом, а не смешиваться с логикой управления устройством.

Для локальной сети такая система может функционировать без внешней публикации в Интернет. Однако при организации действительно удаленной эксплуатации требуется решить задачу безопасного внешнего

доступа. OctoPrint также заявляет возможность работы за reverse proxy и указывает специальные настройки для префикса, схемы и host fallback. Поэтому корректная схема удаленного доступа должна строиться не через прямое пробрасывание портов, а через управляемый прокси-слой с HTTPS и контролируемой аутентификацией.

OctoPrint целесообразно применять в ситуациях, где требуется относительно быстрое развертывание системы удаленного доступа к одному или нескольким потребительским FDM-принтерам, а также когда важна зрелая экосистема плагинов и единая точка администрирования. Его сильной стороной является цельность платформы: базовое управление, интерфейс и расширяемость объединены в одном продукте. Однако при проектировании системы необходимо отдельно решать вопрос защиты внешнего видеопотока и безопасной публикации сервиса.

Решение Klipper более модульное. Moonraker предоставляет API-слой, Mainsail и Fluidt – пользовательский интерфейс, а Crowsnest уровень видеонаблюдения. Такое разделение облегчает адаптацию системы под конкретные задачи, но одновременно предъявляет более высокие требования к первоначальной настройке и сетевой интеграции. С организационной точки зрения это решение особенно уместно там, где требуется гибкость конфигурации, развитые сценарии автоматизации и современный веб-доступ к телеметрии и камерам.

Self-hosted Obico логично использовать как внешний сервисный слой поверх уже работающего локального стека. Он может быть полезен в случае, когда необходимо централизовать удаленный доступ, получать уведомления и использовать функции, связанные с интеллектуальным анализом хода печати. Для корректной эксплуатации требуется более зрелая серверная инфраструктура, включая reverse proxy. Поэтому Obico не заменяет локальную систему управления принтером, а дополняет ее.

Для образовательной лаборатории или малого инженерного центра можно рекомендовать следующую модель. Если парк оборудования состоит в основном из типовых FDM-принтеров и требуется быстрое внедрение удаленного мониторинга, оправдано использование OctoPrint на выделенном одноплатном компьютере для каждого устройства либо для групповой конфигурации. Если же принтеры уже ориентированы на экосистему Klipper, более перспективно развернуть Moonraker как API-слой, выбрать Mainsail или Fluidd в качестве операторского. Для межсетевого или межплощадочного доступа следует добавлять reverse проху и, при необходимости, self-hosted Obico как внешний слой публикации сервиса.

Проведенный анализ показывает, что организация удаленной эксплуатации FDM-принтеров на базе open-source сервисов мониторинга является технически реализуемой и методически обоснованной задачей. Наиболее важным организационным условием корректного внедрения является не только выбор программной платформы, но и соблюдение требований безопасности: разграничение прав, защита API, управление видеопотоком и использование reverse проху при публикации системы вне локальной сети.

Источники:

1. Parandian A., Zarini S., et al. In-situ monitoring and adaptive control of additive manufacturing process: a review // *Progress in Additive Manufacturing*. – 2021. – Vol. 7. – P. 343–360.
2. Tlegenov Y., Hong G. S., Pang K. Process monitoring for material extrusion additive manufacturing: A review // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2018. – Vol. 19. – P. 1927–1939.
3. OctoPrint: The snappy web interface for your 3D printer [Электронный ресурс]. – URL: <https://octoprint.org/> (дата обращения: 11.03.2026).

4. Klipper: Open-source 3D printer firmware [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.klipper3d.org/> (дата обращения: 11.03.2026).
5. Obico: Smart 3D printing for everyone [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.obico.io/> (дата обращения: 11.03.2026).