

## КОНТРОЛЬ НАД ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННОГО СТАНДАРТА MTCCONNECT

С.Л. Добрынин, В.Л. Бурковский (ВГУ)

Рассмотрен метод повышения эффективности управления 3D-принтером, аппаратная реализация которого основана на одноплатном компьютере Raspberry Pi. Программной составляющей является интегрированное в операционную систему OctoPi программное обеспечение OctoPrint, позволяющее реализовать полноценный контроль и удаленное управление 3D-принтером через Web-интерфейс в режиме реального времени. Рассмотрена базовая структура промышленного стандарта MTCconnect, созданного для получения информации от технологического оборудования с числовым программным управлением и обмена данными через Internet. Описана архитектура промышленного стандарта MTCconnect в общем случае состоящая из трех основных компонентов: технологического оборудования, адаптера и агента. Рассмотрены основные запросы от пользовательского приложения для получения информации от агента MTCconnect.

Ключевые слова: аддитивное производство, промышленный интернет вещей, промышленный стандарт MTCconnect, система удаленного контроля.

### Введение

За последние несколько десятилетий в мире производства произошли радикальные изменения. Быстрое развитие технологий автоматизации сильно изменило производственный процесс. В настоящее время производство становится цифровым благодаря конвергенции таких технологий, как «интеллектуальное» программное обеспечение, новые материалы, адаптивные роботы и новые процессы, среди которых 3D-печать. Технологическое оборудование и программное обеспечение для 3D-печати с открытым исходным кодом открыли широкий спектр возможностей для пользователей всех типов от энтузиастов до крупных профессиональных производителей. Преимущества платформ с открытым исходным кодом позволяют разрабатывать программное обеспечение и приложения, чтобы предоставить пользователям более надежный доступ к 3D-принтерам. Идея удаленного доступа к 3D-принтерам через Internet вызывает большой интерес. Внедрение устройств Internet of Thing (IoT) добавило новые возможности в этом направлении. Но до сих пор не существует стандартизированного протокола связи, специально предназначенного для доступа к 3D-принтерам на расстоянии, который действительно необходим для достижения полномасштабной автоматизации производства.

### Повышение эффективности управления 3D-принтером на базе Internet вещей

Для повышения эффективности управления аддитивным производством, в частности моделирования методом послойного наплавления (FDM/FFF), необходимо расширить возможности технологического оборудования. Система управления 3D-принтера (обычно основанная на микроконтроллере) не обладает боль-

шими вычислительными ресурсами, ограничиваясь реализацией управления периферией 3D принтера: исполнительными приводами, датчиками положения, датчиками обрыва рабочего материала (нити), нагревательными элементами, датчиками температуры, системой охлаждения, вводом/выводом информации на экран в качестве HMI-интерфейса. Для извлечения и обработки информации о протекании процессов печати, а также их мониторинга и контроля в режиме реального времени необходима реализация системы управления контроллером 3D-принтера. На рис. 1 представлена структура улучшенной системы управления 3D-принтером.

В качестве исследуемого объекта рассматривается 3D-принтер компании Creality 3D, модель Ender-3, основой которого является материнская плата BIGTREE TECH SKR mini E3 V1.2 на базе 32-битного микроконтроллера STM32F103RCT6, на которую установлена прошивка Marlin с открытым исходным кодом вер. 2.0.5.3. 3D-принтер соединяется с одноплатным компьютером Raspberry Pi 4B (Raspberry Pi) при помощи USB (виртуальный COM-порт). На Raspberry Pi установлена операционная система OctoPi 0.17.0. на базе Raspberry Pi OS с интегрированным программным обеспечением OctoPrint, позволяющим реализовать полноценный контроль и удален-

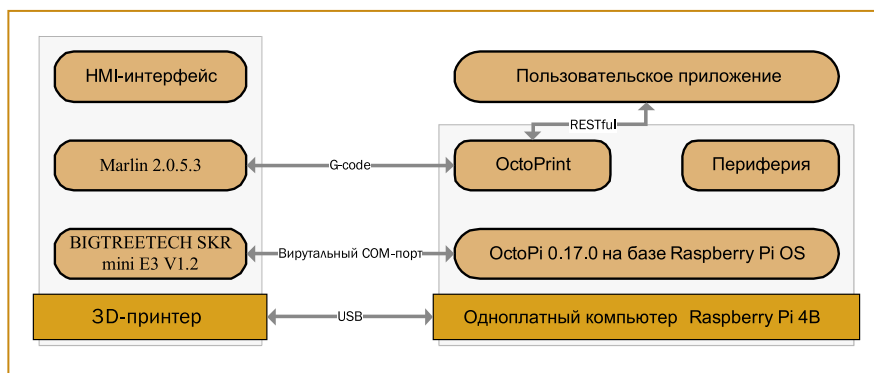


Рис. 1. Структура улучшенной системы управления FDM/FFF 3D-принтером

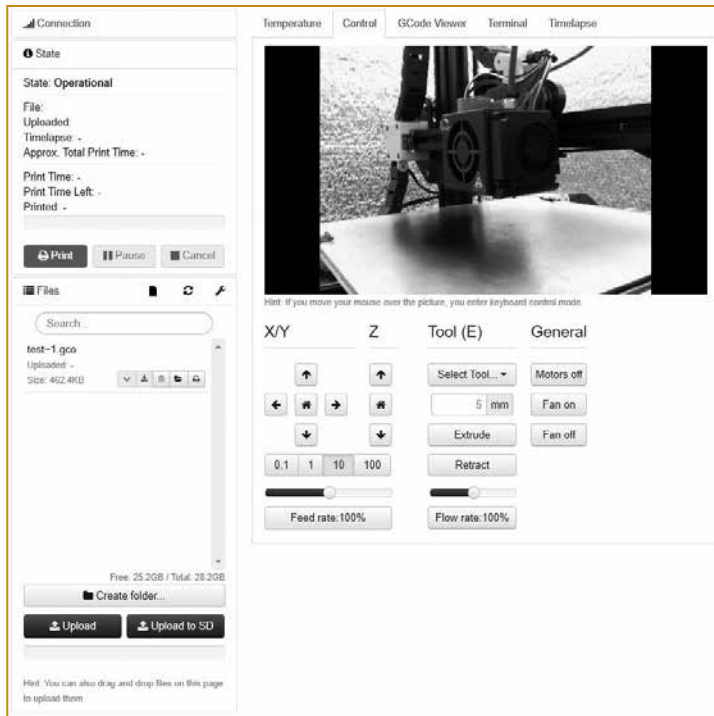


Рис. 2. Графический интерфейс пользователя приложения OctoPrint

ное управление 3D-принтером через Web-интерфейс в режиме реального времени (<https://octoprint.org>). Данное ПО поддерживает: трансляцию видеопотока через внешнюю камеру, визуализацию G-code (позволяет получить представление о выполняемых в данный момент времени командах), контроль и управление температурой рабочих зон (в общем случае температура сопла и подогреваемой рабочей платформы (стола)), запуск, паузу и остановку текущего задания на печать, обратную связь по протеканию процесса печати (готовности). ПО OctoPrint совместимо с большинством доступных FFF/FDM 3D-принтеров, а мощная система плагинов позволяет расширять функциональность различными способами, такими как: поддержка устаревших принтеров, поддержка MQTT (сетевой протокол, работающий поверх TCP/IP по принципу издатель-подписчик), ведение статистики печати, оценки энергопотребления в кВт/ч, взаимодействие с различными мессенджерами (оповещение о сбое, завершении печати), запись таймлапсов (при наличии подключенной внешней камеры), автоматический расчет стоимости печати при загрузке CAD-модели, обновление прошивки 3D-принтера, гибкое управление подключаемой к Raspberry Pi периферией (дополнительное освещение, вентиляторы, датчики). Установка различных датчиков, таких как датчик обрыва нити, позволяет детектировать отсутствие рабочего материала, акселерометр позволяет оценить реальные ускорения и ввести корректирующие коэффициенты. Подключение Web-камеры (Logitech HD Webcam C525) позволяет в режиме реального

времени наблюдать за процессами печати текущей модели. Использование OpenCV - библиотеки алгоритмов компьютерного зрения и машинного обучения на Raspberry Pi позволит идентифицировать отклонения параметров изготавливаемого изделия от его CAD-модели и возможные нарушения в работе 3D принтера, такие как эффект «спагетти» и прочие деформации объекта. Графический интерфейс пользователя приложения OctoPrint с доступом через Web-браузер изображен на рис. 2.

Несмотря на то, что ПО OctoPrint обладает широкой функциональностью по управлению и контролю FFF/FDM 3D-принтером, позволяя получить удаленный доступ в режиме реального времени через Internet, этого недостаточно для современного цифрового производства, которое не ограничивается одним видом используемого технологического оборудования. Помимо 3D-принтеров различных типов и производителей в технологических процессах аддитивного производства применяется вспомогательное оборудование: роботизированные манипуляторы (для выгрузки готовых изделий или прототипов из рабочей зоны 3D-принтера), конвейеры (для перемещения готовых изделий или прототипов на дальнейшие технологические операции: постобработка, покраска, упаковка) и др. В интересах предприятия выходные данные гетерогенного технологического оборудования необходимо интегрировать в единую систему управления и контроля.

ПО OctoPrint не поддерживает преобразование данных, полученных с 3D-принтера, в формат, который абстрагирует свойства конкретного типа оборудования, с целью интеграции их в общую производственную систему управления. Для решения данной проблемы целесообразно использование современных промышленных стандартов, которые позволяют интегрировать гетерогенное оборудование в единую систему управления и взаимодействовать в ней.

#### Промышленный стандарт MTConnect

Среди протоколов связи, разработанных за последние несколько десятилетий для автоматизации производства, широкое распространение получил стандарт MTConnect, вер. 1.0 которого была выпущена в 2008 г. Промышленный технический стандарт MTConnect создан для получения информации о протекании процессов в технологическом оборудовании с числовым программным управлением (но не ограничивается им). MTConnect предназначен для обмена данными между технологическим оборудованием и программными приложениями через Internet (<https://www.mtconnect.org/resources>), для улучшения взаимодействия производственных машин путем предоставления единой структуры данных. MTConnect является стандартом только

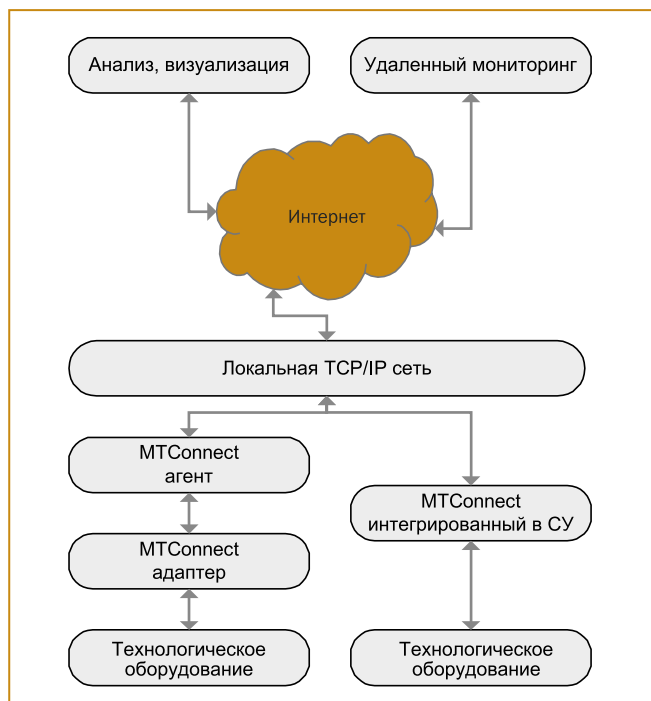


Рис. 3. Базовая структура промышленного стандарта MTConnect

для чтения, он регламентирует извлечение (чтение) данных из технологического оборудования, основное внимание уделяется мониторингу и анализу данных. Базовая структура MTConnect изображена на рис. 3. Основная цель MTConnect – создать «универсальный машинный язык», понятный всем машинам, а также пользователям. Данные с технологического оборудования представляются в формате XML от агентов с использованием протокола передачи гипертекста (HTTP) в качестве основного транспортного протокола. MTConnect предоставляет интерфейс RESTful (без состояния), что означает отсутствие необходимости устанавливать какой-либо сеанс или последовательность входа/выхода для сбора данных с помощью MTConnect.

В настоящее время многие производители станков с ЧПУ и промышленных роботов предусматривают поддержку промышленного стандарта MTConnect.

При этом реализации совместимости 3D-принтера с MTConnect уделяется очень мало внимания. Интеграция аддитивного оборудования (3D-принтеров) в единую систему производственных ресурсов позволяет повысить уровень автоматизации, эффективность управления и глобального контроля над протеканием технологических процессов в АП. В рамках сотрудничества компаний NCDMM, АМТ, MTConnect Institute и MAYA Design в 2014 г. на крупнейший Web-сервис для хостинга IT-проектов и их совместной разработки GitHub был добавлен проект с открытым исходным кодом под названием `makerbot_agent` (<https://github.com>). Приложение представляло собой готовую комбина-

цию агента MTConnect и адаптера для 3D-принтера Makerbot для изучения возможности реализации MTConnect на 3D-принтере. Данное приложение было протестировано на 3D-принтере Makerbot Replicator 2 и успешно опубликовало данные в стандарте MTConnect. Хотя этот проект показал многообещающие возможности сочетания MTConnect и 3D-принтера, он был специально разработан для 3D-принтера Makerbot, который имеет закрытый исходный код и не может быть применен к другим 3D-принтерам. В связи с этим возникает необходимость разработки полноценной реализации поддержки MTConnect 3D-принтером с открытым исходным кодом.

#### Архитектура промышленного стандарта MTConnect

Архитектура промышленного стандарта MTConnect в общем случае состоит из трех основных компонентов: технологическое оборудование, адаптер MTConnect (адаптер) и агент MTConnect (агент) [1].

Адаптер – это программа, специально настроенная для перевода специфичных для устройства данных в эквивалентную терминологию, определенную стандартом MTConnect для агента. Адаптеры обычно производятся поставщиком технологического оборудования, поставщиком программного обеспечения или фирмой-интегратором. Адаптеры фактически не охватываются стандартом MTConnect, они представляют собой отдельное приложение, предоставляемое на стороне реализации устройства [2]. Тем не менее адаптер является жизненно важной частью MTConnect, поскольку он обеспечивает возможность коммуникации с разными типами машин, оснащенных различными протоколами, и позволяет использовать одного общего агента для всех устройств, совместимых с MTConnect. Адаптер может быть программным приложением или сочетанием программного и аппаратного обеспечения. В настоящее время большинство адаптеров представляют собой программное обеспечение, в то время как некоторые старые производственные машины нуждаются в особом сочетании программного и аппаратного обеспечения для сбора данных. Интерфейс между адаптером и машиной может быть различным – соединение может осуществляться через RS-232/485, Ethernet и т. д. Также адаптер может быть встроен в операционную систему используе-

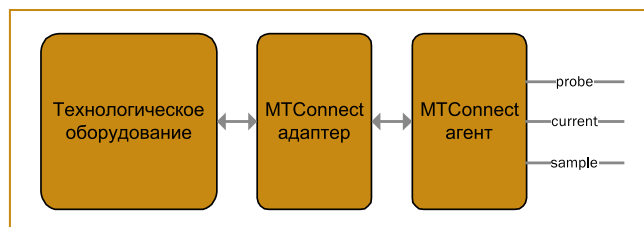


Рис. 4. RESTful архитектура промышленного стандарта MTConnect

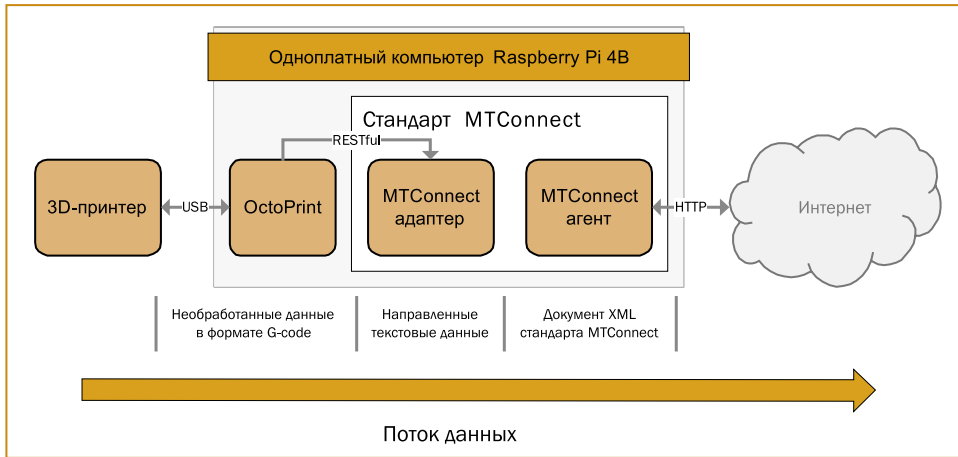


Рис. 5. Архитектура и поток данных системы мониторинга 3D-принтера с помощью промышленного стандарта MTConnect

мого технологического оборудования. Адаптеры могут использоваться для сбора данных от различных типов датчиков, которые предоставляют дополнительную информацию, относящуюся к работе машины. После сбора данных с технологического оборудования адаптер преобразует их в простой текстовый словарь, понятный агенту. MTConnect имеет набор определенной терминологии, которая может постоянно расширяться за счет добавления новых записей, это является ключевым моментом. Наличие своего рода словаря гарантирует, что данные с машин или устройств, предоставленные разными поставщиками, будут иметь одинаковое

значение. После преобразования в формат MTConnect различные типы данных становятся согласованными. Возможность увеличить этот словарь является еще одним важным фактором. Это делает стандарт расширяемым. Производители не должны беспокоиться о том, что MTConnect перестанет поддерживать старую или появляющиеся новые технологии. Однако адаптеры должны быть разработаны на заказ, потому что значения данных обычно различаются от машины к машине и от устройства к устройству в следствии того, что они часто поддерживают исключительный формат данных, указанный поставщиком. После установки адаптера и подключения его к агенту машине или устройству больше не нужны дополнительные устройства или программное обеспечение для взаимодействия с другими устройствами, сетями или приложениями MTConnect.

Работа агента начинается там, где заканчивается адаптер. Одна из основных обязанностей агента – обработать данные, собранные с машины адаптером, и преобразовать их в стандарт XML [2]. Это формат, который

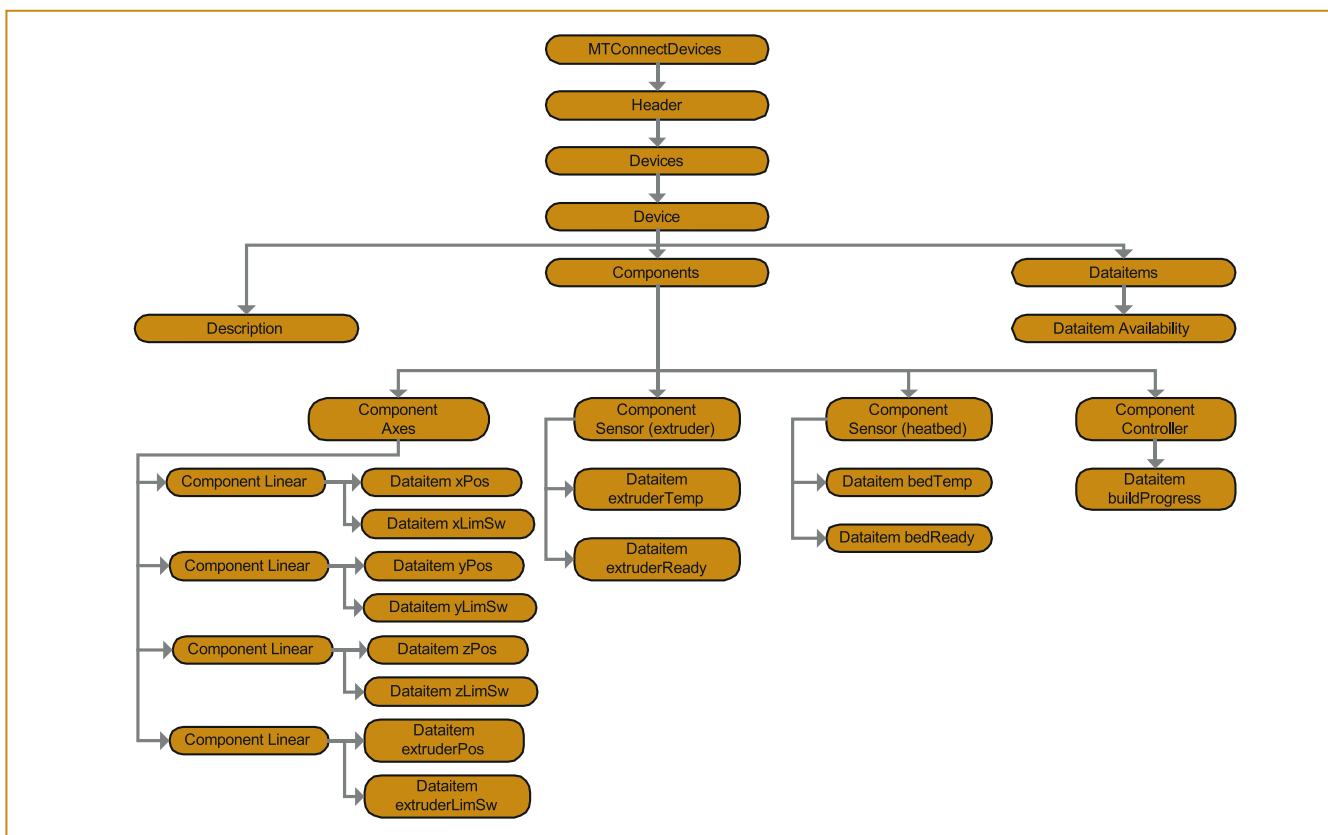


Рис. 6. Иерархия схемы XML предложенной системы для 3D-принтера

Таблица. Элементы данных для описания информации о 3D-принтере

Имя	Описание	Тип элемента данных
Availability	Доступность устройства	True/False, Bool
xPos	Позиция оси x	Линейное положение (мм)
xLimSw	Концевой переключатель оси x	True/False, Bool
yPos	Позиция оси y	Линейное положение (мм)
yLimSw	Концевой переключатель оси y	True/False, Bool
zPos	Позиция оси z	Линейное положение (мм)
zLimSw	Концевой переключатель оси z	True/False, Bool
extruderPos	Расход рабочего материала	Линейное положение (мм)
extruderLimSw	Датчик обрыва рабочего материала	True/False, Bool
extruderTemp	Температура сопла	Температура, °C
extruderReady	Готовность нагрева сопла	True/False, Bool
bedTemp	Температура стола	Температура, °C
bedReady	Готовность нагрева стола	True/False, Bool
buildProgress	Прогресс печати	Готовность, %

позволяет понимать данные почти всем пользовательским приложениям, предназначенным для получения данных из Internet. Агент также должен иметь достаточную буферную память для хранения данных до тех пор, пока пользовательское приложение не запросит их. Размер буфера может отличаться в зависимости от требований реализации. Другая важная задача агента — предоставить интерфейс для сети, чтобы данные были доступны для пользовательских приложений. Используя HTTP интерфейс, агент получает запросы от пользовательских приложений, обрабатывает и передает запрошенные данные обратно приложению.

Стандарт MTCConnect определяет запрос probe, в котором пользовательское приложение запрашивает информацию о физических атрибутах для каждой единицы технологического оборудования, которое может публиковать информацию о себе через агента. Агент отправляет ответный документ MTCConnectDevices Response Document, содержащий запрошенную информацию. Это помогает пользовательскому приложению установить параметры для обмена данными. Следующим стандартным запросом является current, в котором пользовательское приложение запрашивает текущее значение для каждого из типов данных, которые были опубликованы оборудованием через агента. Агент отправляет ответный документ MTCConnectStreams Response Document, содержащий самое последнее значение по каждому из типов данных. Запрос sample определяет серию значений данных, запрашиваемых пользовательским приложением из буфера агента, указывая диапазон (порядковые номера) этих данных за определенный период времени. Агент также отправляет ответный документ MTCConnectStreams Response Document, содержащий запрошенную информацию. Агент — это программное обеспечение, но у пользователей есть несколько вариантов того, где оно будет установлено. Например, оно может работать на том же компьютере с блоком управления, на котором установлен адаптер, на

отдельном компьютере или рабочей станции, подключенной в качестве узла к сети, или на сетевом файловом сервере, на котором также выполняется программное приложение для мониторинга или анализа данных. На рис. 4 изображена RESTful архитектура промышленного стандарта MTCConnect.

#### Применение стандарта MTCConnect в мониторинге 3D принтера

На рис. 5 представлена архитектура и поток данных системы мониторинга 3D-принтера с помощью промышленного стандарта MTCConnect. В качестве технологического оборудования рассматривается 3D-принтер с открытым исходным кодом, характеристики которого были приведены ранее. Адаптер был разработан как плагин для ПО OctoPrint, реализованный на языках C#, C/C++ в интегрированной среде раз-

работки Microsoft Visual Studio. Поскольку OctoPrint позволяет получить всю необходимую информацию от 3D-принтера, работа адаптера заключается в преобразовании полученных данных к стандарту MTCConnect. OctoPrint имеет RESTful интерфейс для связи с пользовательскими приложениями, также возможно расширить его функциональность за счет плагина поддержки интерфейса MQTT. В данной реализации адаптер использует RESTful интерфейс для связи с OctoPrint. В качестве агента используется srragent, предоставляемый MTCConnect в открытых исходных кодах на сайте GitHub (<https://github.com>). Данный агент представляет собой протокол и структуру сбора данных, обеспечивает полную реализацию HTTP-сервера, требуемого стандартом MTCConnect. Важной особенностью данной системы является тот факт, что и адаптер, и агент реализованы на Raspberry Pi. Таким образом, предлагаемая система устраняет необходимость использования TCP/IP для связи между адаптером и агентом, как это делается в типичной реализации стандарта MTCConnect.

Использование одноплатных компьютеров, в частности платформы Raspberry Pi, дает несколько преимуществ. Наиболее очевидные из них — низкая стоимость, небольшие размеры и низкое энергопотребление. Современные Raspberry Pi содержат объем памяти, достаточный для обеспечения буферного хранилища, необходимого агенту MTCConnect для хранения данных. Кроме того, Raspberry Pi с комбинацией адаптер-агент можно легко подключить к любому 3D-принтеру с открытым исходным кодом через USB, COM-порт, Bluetooth, Wi-Fi. Raspberry Pi также представляет собой эффективный способ виртуализации 3D-принтера в облачном производстве для реализации концепции цифрового двойника.

Для реализации комбинации адаптер-агент самой первой задачей, которую необходимо решить, является установка связи с 3D-принтером и сбор данных о его состоянии. Поскольку большинство 3D-принтеров с

открытым исходным кодом предполагают возможность подключения по USB, предлагаемая система также использует USB для связи с принтером. Процесс связи и сбора данных реализуется с помощью ПО OctoPrint, которое отправляет G-code команды в прошивку Marlin и получает в ответ необходимые данные для передачи адаптеру через RESTful интерфейс. Полученные данные необходимо преобразовать в словарь данных на основе текста и отправить агенту.

Рабочий процесс предложенной системы имеет следующий вид: агент периодически вызывает адаптер для чтения и отправки данных с 3D-принтера. После этого адаптер связывается с 3D-принтером (при условии, что принтер уже подключен к Raspberry Pi) через RESTful интерфейс OctoPrint и отправляет команды, чтобы сообщить о полученном от агента запросе. Принтер отвечает на полученный запрос данными в формате G-code. Затем адаптер переводит необработанные машинные данные в формате G-code и создает словарь данных на основе текста, понятный агенту, используя пары ключ-значение. Агент получает словарь данных от адаптера и сохраняет данные в буферной памяти. Также агент создает RESTful HTTP-сервер и ждет запроса. Агент получает запрос (probe, current или sample), обрабатывает его и преобразует соответствующие сохраненные данные в документ XML, используя стандартизованные потоки данных MTConnect. В заключении агент публикует документ XML через свой HTTP-сервер.

Агент MTConnect по своей сути одинаков почти для всех систем, совместимых с MTConnect. В предлагаемой системе агент представляет собой класс на языке C++, функциональные возможности которого можно разделить на четыре части: размещение RESTful HTTP-сервера, ответ на запросы, отправленные через сервер, сбор и хранение машинной информации из класса адаптера и преобразование данных в XML с использованием стандарта MTConnect. Размещение сервера и ответ на входящие запросы осуществляется с помощью классов HTTPServer и BaseHTTPRequestHandler из модуля BaseHTTPServer. Для преобразования данных в стандартный документ XML MTConnect агент использует схемы XML.

Разработка соответствующей MTConnect схемы XML для технологического оборудования является важной частью реализации промышленного стандарта MTConnect. Иерархия схемы XML (рис. 6), соответствующей MTConnect, всегда начинается с тега MTConnectDevices. Header содержит основную информацию: время создания, идентификатор отправителя, размер буфера и т.д. Devices может иметь один или несколько тегов, по одному для каждой единицы технологического оборудования, зарегистрированного в системе. Device может иметь Description, предоставляющее информацию о конкретной машине. У каждого Device есть некоторое число Components и

Dataitems. Каждый Component также может содержать несколько элементов данных. Dataitem описывает часть информации, которая может быть собрана из компонента машины. Dataitem обычно включает несколько атрибутов, таких как имя, тип и категория данных. Для этой конкретной реализации определены 14 элементов данных для описания информации о 3D-принтере (таблица).

После реализации адаптера для 3D-принтера как плагина ПО OctoPrint, установки агента на Raspberry Pi, создания XML описания 3D-принтера необходимо проверить правильность работы предложенной системы удаленного мониторинга. Для тестирования предложенной системы через Web-браузер отправляется запрос на предоставление описания физических атрибутов и элементов данных 3D-принтера от агента. Были протестированы запросы probe, current и sample.

Реализация поддержки MTConnect позволяет расширить функциональность ПО OctoPrint для обеспечения требований по унификации выходных данных с 3D-принтера, что позволяет осуществить не только комплексный контроль гетерогенного технологического оборудования в аддитивном производстве, но и его взаимодействие в режиме реального времени.

#### Заключение

В рамках четвертой промышленной революции использование технологий АП совместно с IoT позволяет повысить эффективность управления 3D-принтером. Промышленные стандарты, такие как MTConnect, позволяют абстрагировать гетерогенные производственные ресурсы и интегрировать их в единую систему управления. Недостатком MTConnect является ограничение возможностей только чтением данных из технологического оборудования, невозможность принимать оперативные управляющие воздействия в режиме реального времени. Будущие исследования направлены на промышленный стандарт OPC UA, лишенный данного недостатка [3]. OPC UA определяет передачу данных в промышленных сетях и взаимодействие устройств в них, позволяя не только извлекать данные с технологического оборудования, но и осуществлять запись и установку требуемых параметров.

#### Список литературы

1. Edrington, B., Zhao, B., Hansel, A., Mori, M., & Fujishima, M. (2014). Machine Monitoring System Based on MTConnect Technology. *Procedia CIRP*, 22, 92–97.
2. Liu, C., Xu, X., Peng, Q., & Zhou, Z. (2018). MTConnect-based Cyber-Physical Machine Tool: a case study. *Procedia CIRP*, 72, 492–497.
3. Фортин Т., Хокинсон Б. OPC UA и роль стандартов связи в развитии промышленного Internet вещей // Автоматизация в промышленности. 2016. №8.

*Добрынин Степан Леонидович — аспирант,  
Бурковский Виктор Леонидович — д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой ЭАУТС ВГТУ.  
E-mail: bvl@vorstu.ru, dobryninsl1994@gmail.com*