

УДК 65.011.56:681.5

Организация эффективного обмена данными в управлении безлюдным производством изделий ракетно - космической техники

Котов Андрей Константинович

Лагута Виктор Степанович (*научный руководитель*)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрен вариант изготовления шар-баллонов с использованием технологии электронно-лучевой наплавки. Показана необходимость использования концепции безлюдного производства на основе организации процесса управления с использованием современной многоуровневой архитектуры (edge-fog-cloud). Описана архитектура управления, принципы ее функционирования и преимущества предлагаемого подхода, включая быструю масштабируемость, возможность интеграции собственных решений и независимость от внешних поставщиков услуг. Показана возможность апробации вариантов организации управления производственным модулем на объекте-аналоге. В рамках экспериментальной части работы проведены практические испытания на учебно-практической гибкой производственной системе лаборатории кафедры РК9 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Представлены результаты сравнения различных режимов управления технологическими объектами, в том числе выполнен детальней анализ длительности и качества передачи данных.

Ключевые слова: безлюдное производство, электронно-лучевая наплавка, многоуровневая архитектура управления, информационный обмен, экспериментальная апробация

Введение. Современные тенденции развития промышленного производства требуют постоянного совершенствования используемых технологий, в том числе информационных [1]. Традиционные технологии, применяемые в изготовлении шар-баллонов, включают процессы складирования и титановых листов различной толщины, вырезания плоских заготовок, технологически сложный процесс горячей штамповки (вытяжки), последующей механической обработки и сварки. Альтернативой является аддитивная технология — электронно-лучевая наплавка (ЭЛН), позволяющая существенно улучшить характеристики производственного процесса и сократить трудозатраты [2, 3]. Основным недостатком использования такого оборудования является длительное время цикла создания изделия на установке ЭЛН — для изготовления полуфабрикатов шар-баллона от 4-х часов в расчете на одну полусферу.

Постановка задачи. Необходимо обеспечить бесперебойное функционирование производственного оборудования ЭЛН в течение длительного времени, минимизировать время простоя и исключить ошибки, обусловленные человеческим фактором. В настоящее время это возможно с использованием многоуровневой системы управления оборудованием на участке произ-

водства. Цель настоящего исследования заключается в выборе и апробации вариантов организации обмена данными при управлении безлюдным производством шар-баллонов с применением технологии ЭЛН.

Обзор существующих подходов. На сегодняшний день автоматизация промышленных процессов опирается на несколько ключевых парадигм, среди которых наиболее известны edge computing, fog computing и cloud computing.

Периферийные вычисления (edge computing) характеризуются тем, что обработка данных производится максимально близко к источнику их возникновения, что позволяет значительно уменьшить задержки в обмене информацией и обеспечить мгновенное реагирование на критические события. Однако ограниченные вычислительные ресурсы на периферийных устройствах часто не позволяют применить данную технологию в задачах с высоким уровнем сложности или при необходимости глубокой (дополнительной) аналитики данных.

Туманные вычисления (fog computing) возникли как решение, сочетающее в себе преимущества периферийных и облачных вычислений [4]. В этой модели данные передаются на промежуточный уровень, где осуществляется их обработка и фильтрация, прежде чем передавать их дальше на облачные сервисы. Такой подход позволяет существенно снизить нагрузку на каналы связи, обеспечивая баланс между скоростью обработки и доступностью вычислительных ресурсов.

Облачные вычисления (cloud computing), напротив, характеризуются практически неограниченной вычислительной мощностью и емкостью для хранения данных. Значительным недостатком данной модели является высокая задержка передачи информации и зависимость от качества каналов связи. В результате облачные решения не всегда подходят для задач, требующих оперативного реагирования в реальном времени, и вариантов организации передачи информации по защищенным каналам, что характерно для процессов управления производством в ракетно-космической отрасли. Вывод — наиболее перспективным представляется использование комбинированной, многоуровневой архитектуры, которая позволяет объединить преимущества всех трех подходов.

Описание предлагаемого решения. Разработанная многоуровневая архитектура управления основана на комбинации трех вышеописанных подходов. Концептуальная схема архитектуры представлена на рис. 1.

Edge-уровень отвечает за локальное управление и быструю реакцию на события. Здесь происходит сбор первичных данных, их быстрая предварительная обработка и принятие решений в режиме реального времени.

Fog-уровень выполняет промежуточную обработку и обеспечивает распределение задач между узлами, расположенными ближе к источникам данных. Его задача — агрегировать, фильтровать и предварительно анализировать данные, полученные от edge-устройств. На этом уровне также осуществляется управление потоками данных, перераспределение задач и координация действий между периферийными устройствами.

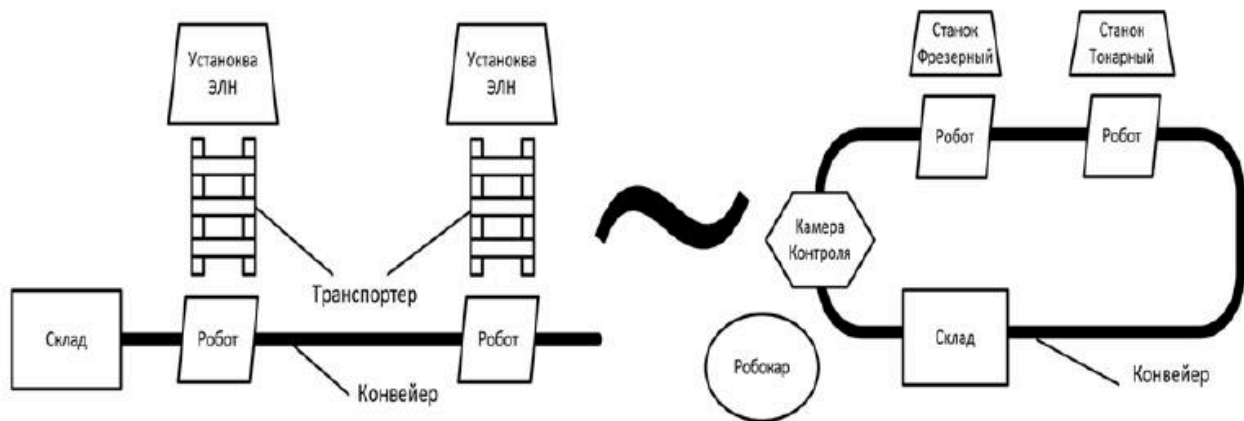


Рис. 2. Условные схемы производственных участков для ЭЛН TETA 30E1200 и учебно-практической ГПС Denford лаборатории РК9 МГТУ им. Н.Э. Баумана

На первом этапе проводилось тестирование системы в трех режимах по отдельности с целью определения базовых характеристик каждого уровня управления, таких как скорость реакции системы, задержки передачи данных и общая стабильность работы. Результаты представлены на рис. 3. На втором этапе были исследованы комбинированные режимы работы, которые позволили выявить оптимальные условия и параметры взаимодействия между уровнями. Были выполнены тесты на стрессовую нагрузку системы, симулирующие возможные критические ситуации в производственном процессе.

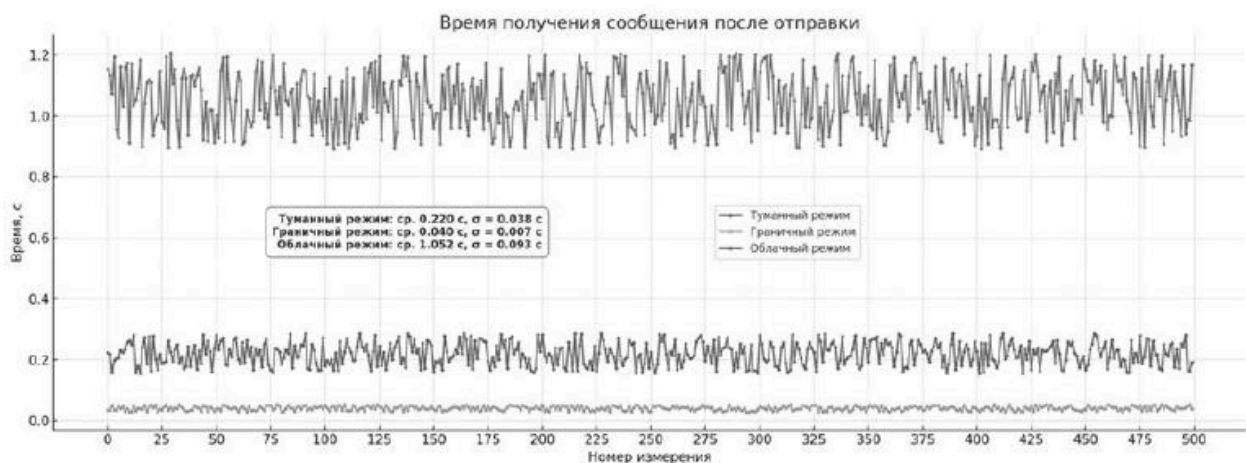


Рис. 3. График времени получения сообщения после отправки:
 верхний — для облачной технологии, средний — для туманной и нижний — для периферийной (на оборудовании)

Заключение. Результаты экспериментов подтвердили высокую эффективность предложенной архитектуры управления. Показано, что при правильно организованной интеграции всех трех уровней можно добиться оптимального соотношения скорости обработки данных и качества аналитических решений, обеспечивая надежность и оперативность работы системы управления в усло-

виях безлюдного производства. Использование многоуровневой архитектуры позволяет существенно повысить эффективность управления производственными процессами, минимизировать риски и сократить производственные издержки. Дальнейшие исследования будут направлены на расширение функциональных возможностей системы, разработку новых алгоритмов оптимизации и адаптацию архитектуры под другие типы производственных задач.

Литература

- [1] Лагута В.С., Ясиновский С.И. Проектирование компьютерно-интегрированных производств в составе систем управления жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении. *Вопросы инновационной экономики*, 2020, т. 10, № 3, с. 1245–1258.
- [2] Ломакин И.В., Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С., Широкожухова А.А. Создание передовой технологии и оборудования для изготовления титановых шар-баллонов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 12, с. 37–43.
- [3] Ivanov A. et al. Recent advances in electron beam additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 81, pp. 1213–1225.
- [4] Yang L. et al. Fog computing: Concepts, challenges and practices. *IEEE Access*, 2020. vol. 8, pp. 56323–56337.
- [5] Рачков М.Ю., Кузнецов И.А. Автоматизация управления производственными процессами. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2021, № 4, с. 27–36.

Organization of effective data exchange in the management of unpopulated production of rocket and space technology products

Kotov Andrey Konstantinovich

Laguta Viktor Stepanovich (*scientific advisor*)

BMSTU, Moscow, Russia

This paper investigates a method for producing spherical tanks via electron beam additive manufacturing. The necessity of adopting an unmanned production paradigm is substantiated, leveraging a contemporary multi-layered control architecture (edge-fog-cloud). The structure, operational logic, and advantages of the proposed control system are detailed, highlighting features such as fast scalability, support for proprietary integrations, and autonomy from third-party service providers. The potential for piloting control strategies within a production module prototype is confirmed. Experimental validation was carried out using a training-oriented flexible manufacturing system at the RK9 Laboratory of Bauman Moscow State Technical University. Comparative results of different control regimes for technological systems are provided, including in-depth analysis of data transmission latency and integrity.

Keywords: unmanned production, electron beam deposition, layered control systems, information exchange, experimental testing