

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К УНИФИКАЦИИ ИНТЕГРАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ МУЛЬТИПРОТОКОЛЬНОЙ СРЕДЫ

Н.Д. Савельев, магистрант

Научный руководитель: В.И. Воронов, канд. техн. наук, доцент

Московский технический университет связи и информатики
(Россия, г. Москва)

DOI:10.24412/2500-1000-2026-3-2-99-103

***Аннотация.** В статье рассматриваются проблемы интеграции промышленного оборудования в условиях современной мультипротокольной среды. Выполнен анализ распространенных коммуникационных протоколов и существующих средств интеграции, включая инженерные среды и OPC-ориентированные решения. Выявлены ключевые ограничения, связанные с гетерогенностью адресации, различием моделей данных и отсутствием унификации. Обосновано перспективное направление повышения интероперабельности на основе абстракции протоколов и использования единой модели данных.*

***Ключевые слова:** промышленная автоматизация; интеграция оборудования; мультипротокольная среда; OPC UA; интероперабельность; унификация данных; промышленный интернет вещей.*

В условиях развития концепции Industry 4.0 задача интеграции промышленного оборудования в единое информационное пространство становится все более значимой. Современные производственные системы включают разнородные устройства, программные средства и каналы обмена данными, что приводит к росту гетерогенности промышленной среды и усложняет взаимодействие между ее компонентами [1, 2]. Это обуславливает необходимость разработки более универсальных подходов к интеграции.

Дополнительную сложность создает использование большого числа коммуникационных протоколов и платформенных решений, предназначенных для различных классов оборудования и нередко жестко связанных с экосистемой конкретного производителя. В результате интеграция таких систем требует значительных затрат на согласование моделей данных, организацию обмена и сопровождение инфраструктуры. Современные исследования в области цифрового производства показывают, что повышение интероперабельности и снижение зависимости от вендор-ориентированных решений остаются одними из ключевых направлений развития промышленных информационных систем [1, 3].

Обзор коммуникационных протоколов и подходов к интеграции промышленного оборудования

Современные системы промышленной автоматизации функционируют в условиях мультипротокольной среды, в которой одновременно используются различные коммуникационные технологии, сформированные в разное время и ориентированные на разные прикладные задачи. Это приводит к существенным различиям в способах организации обмена данными, структуре адресного пространства и уровнях абстракции. Протоколы промышленной коммуникации могут быть ориентированы как на низкоуровневый обмен сигналами и регистрами, так и на представление данных в виде структурированных объектов, что напрямую влияет на возможности их интеграции в единые системы управления [4]. В условиях роста сложности производственных систем данное разнообразие становится одним из ключевых факторов, ограничивающих интероперабельность оборудования.

Одним из наиболее широко используемых протоколов является Modbus, применяемый для обмена данными между контроллерами, датчиками и исполнительными устройствами. Его распространенность обусловлена простотой реализации, открытостью спецификации и широкой поддержкой со стороны производителей оборудования. В соответствии со спецификацией протокола обмен осуществляется по модели клиент-сервер с использованием фиксированного набора функций доступа к

регистрам и дискретным значениям [5]. Вместе с тем данная модель ориентирована преимущественно на передачу числовых значений и не предусматривает средств описания сложных структур данных, что ограничивает ее применение в задачах интеграции высокоуровневых систем. В результате при объединении устройств, использующих Modbus, с более сложными системами требуется дополнительное преобразование данных и согласование форматов их представления.

В качестве более универсального подхода рассматривается стандарт OPC Unified Architecture, ориентированный на обеспечение платформенно-независимого взаимодействия между компонентами промышленной системы. В отличие от протоколов, оперирующих регистрами, OPC UA предлагает концепцию единого адресного пространства и объектно-ориентированной модели данных, позволяющей описывать не только значения, но и их семантику, взаимосвязи и свойства [6]. Это обеспечивает более высокий уровень абстракции и упрощает интеграцию оборудования различных производителей. Однако внедрение OPC UA не устраняет полностью проблему мультипротокольности, поскольку на уровне полевых устройств и контроллеров продолжают использоваться специализированные протоколы, такие как S7 или Ethernet/IP, что требует применения шлюзов и промежуточных слоев трансляции [4].

Дополнительным аспектом является организация программной логики управления, которая в большинстве промышленных систем реализуется в соответствии со стандартом IEC 61131-3. Данный стандарт определяет унифицированные языки программирования контроллеров, включая графические и текстовые нотации, что обеспечивает определенную степень переносимости алгоритмов управления [7]. Однако унификация на уровне языков программирования не сопровождается унификацией на уровне коммуникаций и моделей данных. В результате даже при использовании стандартных средств разработки взаимодействие между системами различных производителей сохраняет ограничения, связанные с различиями протоколов и форматов данных. Для решения задач мониторинга и диспетчеризации применяются SCADA-системы, обеспечивающие сбор и визуализацию дан-

ных, однако их функциональность в части унификации логики и параметризации оборудования, как правило, остается ограниченной [8].

Анализ существующих средств интеграции промышленного оборудования

Существующие средства интеграции промышленного оборудования можно условно разделить на три основные группы: инженерные среды производителей, коммуникационные платформы на базе OPC и инструменты визуального проектирования. К первой группе относятся, в частности, Siemens TIA Portal и Rockwell Studio 5000 – интегрированные среды, предназначенные для конфигурирования, программирования и сопровождения соответствующих семейств контроллеров и связанных устройств в рамках экосистемы конкретного производителя. Такой подход обеспечивает высокую согласованность инженерных процедур и удобство при работе с оборудованием одного вендора, однако одновременно усиливает зависимость от его программной и аппаратной платформы. На практике это означает, что при построении мультивендорных систем требуется использование нескольких специализированных сред разработки, что усложняет сопровождение проекта, повышает требования к квалификации персонала и затрудняет повторное использование инженерных решений вне исходной экосистемы [8, 9].

К отдельному классу относятся коммуникационные решения, ориентированные на обеспечение связности между промышленными устройствами и внешними системами верхнего уровня. К ним относятся, в частности, продукты семейства Kerware и Matrikon, базирующиеся на стандартизированных механизмах обмена и унификации данных, реализованных в рамках OPC Unified Architecture [6]. Преимуществом подобных платформ является широкий набор драйверов и возможность быстрого подключения разнородных источников данных без необходимости разработки низкоуровневого обмена. Однако по своей природе они ориентированы преимущественно на транспорт и нормализацию данных, а не на реализацию логики управления, параметризацию оборудования или построение сложных сценариев взаимодействия. В результате такие решения высту-

пают в роли промежуточного слоя между оборудованием и SCADA-, MES- или IoT-системами, но не заменяют полноценную инженерную среду [8, 9].

Третью группу составляют инструменты визуального и событийно-ориентированного проектирования, среди которых наиболее показательным является Node-RED. Подобные решения реализуют подход к построению приложений на основе событийной архитектуры и потоков данных, что соответствует современным тенденциям развития промышленных информационных систем [3, 10]. Их преимуществом является возможность быстрого связывания источников данных, сервисов и исполнительных компонентов через граф потоков, что делает их удобными для прототипирования и разработки простых автоматизационных сценариев, в том числе в рамках IoT [10, 11]. Однако по мере роста числа потоков и связей такие системы усложняются в сопровождении и требуют дополнительных практик структурирования. В условиях крупных промышленных систем это проявляется в ограниченной масштабируемости, слабой формализации моделей данных и недостаточной строгости типизации, что снижает их пригодность в качестве универсальной среды интеграции оборудования [11, 12].

Ключевые проблемы интеграции промышленного оборудования в мультипротокольной среде

Одной из основных причин, затрудняющих построение единого информационного пространства на промышленном объекте, является гетерогенность адресации. Различные протоколы и программные платформы используют принципиально разные способы обращения к данным: от регистровой модели и дискретных областей в Modbus до объектно-ориентированного адресного пространства в OPC UA. В спецификации Modbus прикладной обмен строится вокруг функций доступа к дискретным входам, областям coils и регистрам (input и holding registers) [5], тогда как OPC UA опирается на модель AddressSpace, в которой данные представлены в виде узлов, атрибутов и связей между ними [6]. Даже при совпадении физического смысла параметра способы его идентификации, чтения и интерпретации в различных системах оказываются несопоставимыми без промежуточного уров-

ня преобразования. Это существенно усложняет прямую интеграцию разнородного оборудования и повышает требования к программным средствам, обеспечивающим согласование адресных пространств.

Существенной проблемой является различие моделей данных. Низкоуровневые промышленные протоколы, как правило, ориентированы на передачу отдельных значений или небольших групп параметров, тогда как современные интеграционные подходы требуют описания структуры объекта, его свойств, состояний и связей с другими компонентами системы. Вследствие этого протоколы, эффективно работающие на уровне обмена сигналами, оказываются недостаточно выразительными при построении верхнеуровневых систем мониторинга, аналитики и межсистемного взаимодействия. OPC UA предлагает более развитую концептуальную основу, поскольку предусматривает единое адресное пространство, типовые определения объектов, сервисную модель и встроенные механизмы безопасности [6]. Однако в реальной эксплуатации такие возможности сосуществуют с оборудованием, использующим более простые схемы обмена, что сохраняет разрыв между полевым и интеграционным уровнями [4, 6].

Из различия адресных пространств и моделей данных непосредственно вытекает проблема отсутствия унификации представления технологической информации. Одно и то же технологическое понятие, например температура, давление или состояние исполнительного механизма, может быть представлено в различных системах через разные типы переменных, единицы измерения, форматы хранения и правила доступа. Даже при использовании единых инженерных сред стандартизация логики управления не обеспечивает автоматической совместимости на уровне обмена данными. Стандарт IEC 61131-3 унифицирует языки программирования контроллеров, однако не устраняет различия между протоколами, форматами параметров и механизмами внешнего доступа к данным [7]. В таких условиях интеграция требует применения специализированных шлюзов или разработки дополнительного программного слоя, выполняющего функции нормализации и интерпретации данных [8, 10].

Отдельную сложность представляет параметризация оборудования в мультивендорной среде. Инженерные процедуры настройки, адресации, загрузки конфигурации и сопровождения проекта, как правило, жестко связаны с инструментами конкретного производителя. Интегрированные среды, такие как TIA Portal и Studio 5000, позиционируются как единые инженерные платформы для работы с оборудованием соответствующих экосистем, включая контроллеры, распределенный ввод-вывод и средства визуализации. Такой подход эффективен в рамках одного технологического стека, однако при объединении оборудования различных производителей приводит к необходимости использования нескольких инженерных сред и разнородных процедур конфигурирования [8, 9]. Это, в свою очередь, увеличивает сложность наладки, повышает требования к квалификации персонала и снижает переносимость инженерных решений.

Обоснование направлений унификации взаимодействия промышленного оборудования

Проведенный анализ показывает, что одним из перспективных направлений преодоления ограничений мультипротокольной среды может рассматриваться переход от прямого взаимодействия с конкретными протоколами к более высокому уровню абстракции, в котором ключевую роль играет единая модель данных. Такой подход позволяет описывать технологические параметры не через особенности конкретных механизмов обмена, а через унифицированные сущности, пригодные для обработки в рамках общей интеграционной среды. В этом контексте показательным является стандарт OPC Unified Architecture, в котором данные, события и история объединяются в едином адресном пространстве и доступны через согласованный набор сервисов [6]. При этом ключевым является не использование конкретной технологии, а принцип отделения логической структуры данных от низкоуровневых механизмов их передачи, обеспечивающий интероперабельность и снижение зависимости прикладной логики от особенностей оборудования.

С практической точки зрения реализация данного подхода предполагает абстракцию протоколов на уровне программной архитектуры. Вместо разработки прикладной логики непосредственно поверх конкретных протоколов (Modbus, S7, Ethernet/IP) более устойчивым является подход, при котором особенности адресации, форматов обмена и вызова сервисов выносятся в специализированные модули взаимодействия. Такая декомпозиция соответствует принципам построения расширяемых программных систем и повторно используемых интерфейсных слоев, а в инженерной практике позволяет упростить подключение новых типов оборудования без переработки верхнего уровня системы [9, 10]. Дополнительно стандартизированные языки и средства описания логики управления, определяемые IEC 61131-3, подтверждают обоснованность унификации не только на уровне программирования контроллеров, но и на уровне интеграционного взаимодействия между устройствами и прикладными системами [7].

Заключение

Проведенный анализ показал, что интеграция промышленного оборудования в условиях мультипротокольной среды сопряжена с рядом системных ограничений, обусловленных гетерогенностью адресации, различием моделей данных, отсутствием унифицированного представления технологической информации и зависимостью от вендор-ориентированных инженерных решений. Рассмотренные протоколы и существующие средства интеграции обеспечивают частичное решение данных задач, однако не устраняют их в полной мере на уровне архитектуры взаимодействия. В связи с этим перспективным направлением развития является переход к более высокому уровню абстракции, основанному на использовании единой модели данных, унифицированных интерфейсов и изоляции особенностей конкретных протоколов на уровне специализированных модулей. Реализация подобных подходов позволяет повысить интероперабельность оборудования, снизить сложность интеграции и создать основу для построения масштабируемых и расширяемых промышленных информационных систем.

Библиографический список

1. Gilchrist A. Industry 4.0: The Industrial Internet of Things. – New York: Apress, 2016. – 250 p. – ISBN 9781484220474.
2. Monostori L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 17. – P. 9-13.
3. Theorin A., Bengtsson K., Provost J., Lieder M., Johnsson C., Lundholm T., Lennartson B. An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0 // *International Journal of Production Research*. – 2017. – Vol. 55, № 5. – P. 1297-1311.
4. *Industrial Communication Technology Handbook* / ed. by R. Zurawski. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 1756 p.
5. Modbus Application Protocol Specification V1.1b3. – Modbus Organization, Inc., 26 April 2012.
6. IEC TR 62541-1:2020. OPC Unified Architecture – Part 1: Overview and Concepts. – Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC), 2020.
7. IEC 61131-3:2013. Programmable controllers – Part 3: Programming languages. – Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC), 2013.
8. Boyer S.A. SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition. – 4th ed. – Research Triangle Park, NC: International Society of Automation (ISA), 2009. – 257 p.
9. Goma H. Software Modeling and Design: UML, Use Cases, Patterns, and Software Architectures. – Cambridge: Cambridge University Press, 2011. – 578 p. – ISBN 9781139494731.
10. Wan J., Tang S., Shu Z. et al. Software-defined industrial internet of things in the context of Industry 4.0 // *IEEE Sensors Journal*. – 2016. – Vol. 16, № 20. – P. 8085-8094.
11. Leitão P., Colombo A.W., Karnouskos S. Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges // *Computers in Industry*. – 2016. – Vol. 81. – P. 11-25.
12. Benigno J. Reusable Firmware Development: A Practical Approach to APIs, HALs and Drivers. – New York: Apress, 2017. – 308 p. – ISBN 9781484232972.

**ANALYSIS OF APPROACHES TO THE UNIFICATION OF INDUSTRIAL EQUIPMENT
INTEGRATION IN MULTI-PROTOCOL ENVIRONMENTS**

N.D. Savelev, *Graduate Student*

Supervisor: *V.I. Voronov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

Moscow Technical University of Communications and Informatics

(Russia, Moscow)

***Abstract.** This paper examines the challenges of integrating industrial equipment in a modern multi-protocol environment. An analysis of widely used communication protocols and existing integration solutions, including engineering environments and OPC-based platforms, is presented. Key limitations related to addressing heterogeneity, differences in data models, and the lack of unification are identified. A promising direction for improving interoperability based on protocol abstraction and a unified data model is substantiated.*

***Keywords:** industrial automation; equipment integration; multi-protocol environment; OPC UA; interoperability; data unification; industrial internet of things.*