

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2026, Том 13, № s1 / 2026, Vol. 13, Iss. s1 <https://resources.today/issue-s1-2026.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/03FAOR126.pdf>

DOI: 10.15862/03FAOR126 (<https://doi.org/10.15862/03FAOR126>)

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Непогода, Ф. В. Разработка методов распределённого управления многокоординатными приводами в составе гибких производственных участков / Ф. В. Непогода, А. В. Гончаров, А. В. Шаховской, В. В. Тараканова // Отходы и ресурсы. — 2026. — Т. 13. — № s1. — URL: <https://resources.today/PDF/03FAOR126.pdf>.
DOI: 10.15862/03FAOR126.

For citation:

Nepegoda Ph.V., Goncharov A.V., Shakhovskoy A.V., Tarakanova V.V. Development of distributed control methods for multi-axis drives in flexible manufacturing cells. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2026; 13(s1): 03FAOR126. Available at: <https://resources.today/PDF/03FAOR126.pdf>.
DOI: 10.15862/03FAOR126. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 681.5:621.313

Непогода Филипп Владимирович

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского»,
Москва, Россия
Аспирант
E-mail: a.goncharov@mgutm.ru

Гончаров Андрей Витальевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского»,
Москва, Россия
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: a.goncharov@mgutm.ru

Шаховской Андрей Владимирович

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского»,
Москва, Россия
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: a.shakhovskoy@mgutm.ru

Тараканова Валентина Викторовна

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского»,
Москва, Россия
Кандидат педагогических наук, доцент
E-mail: walentt@yandex.ru

Разработка методов распределённого управления многокоординатными приводами в составе гибких производственных участков

Аннотация. Современные тенденции развития промышленного производства характеризуются фундаментальной трансформацией подходов к построению систем управления технологическим оборудованием, обусловленной переходом к парадигме Индустрии 4.0, широким внедрением киберфизических систем и возрастающими требованиями к гибкости и адаптивности производственных комплексов. Исследование посвящено комплексному анализу

методов распределённого управления многокоординатными приводами в контексте их интеграции в состав гибких производственных участков, что представляет особую актуальность для обеспечения технологического суверенитета и повышения конкурентоспособности отечественного машиностроения. Предметом исследования выступают теоретические основания, алгоритмические подходы и практические механизмы реализации распределённых систем управления многокоординатным движением в современном производственном оборудовании, включая станки с числовым программным управлением, промышленные роботы и комплексные автоматизированные линии. Рассматриваются классические теории автоматического управления, концепции построения распределённых систем на базе промышленного Ethernet, методы интерполяции и контурного управления, а также современные подходы к синхронизации многоосевых приводов. Анализируется эволюция представлений о построении систем управления приводами от централизованных архитектур с программируемыми логическими контроллерами к распределённым структурам с интеллектуальными сервоприводами и периферийными вычислениями. Выявлены ключевые факторы эффективной реализации распределённого управления, включающие коммуникационную инфраструктуру с детерминированными протоколами реального времени, алгоритмическое обеспечение для координации движения по нескольким осям, механизмы прецизионной синхронизации распределённых часов, а также программные компоненты для обеспечения переносимости и интероперабельности. Разработанная концептуальная модель распределённого управления многокоординатными приводами демонстрирует многоуровневую архитектуру взаимодействия между центральным контроллером, периферийными интеллектуальными приводами и системой управления производством, где промышленные сети обеспечивают инфраструктуру для обмена данными в реальном времени, алгоритмы интерполяции формируют траектории движения, а механизмы синхронизации гарантируют согласованную работу всех осей.

Ключевые слова: распределённое управление; многокоординатные приводы; гибкие производственные системы; EtherCAT; PROFINET; интерполяция траектории; синхронизация приводов; станки с ЧПУ; промышленная автоматизация; контурное управление; сервопривод; киберфизические системы; промышленные роботы

Введение

Глобальная трансформация промышленного производства, обусловленная переходом к парадигме четвёртой промышленной революции, катализировала беспрецедентные изменения в подходах к построению систем автоматизации и управления технологическим оборудованием, при чем согласно данным International Federation of Robotics, в 2024 году количество установленных промышленных роботов в мире достигло 542 000 единиц, что более чем вдвое превышает показатели десятилетней давности, а общее число роботов в эксплуатации составило 4 664 000 единиц с приростом 9 % по сравнению с предыдущим годом.¹ Современные исследования демонстрируют, что рынок многоосевых сервосистем оценивается в 1,2 млрд долларов США в 2024 году и прогнозируется рост до 2,5 млрд долларов к 2033 году при среднегодовом темпе 9,2 %, что свидетельствует о возрастающей потребности в прецизионном координированном управлении движением.²

¹ International Federation of Robotics. World Robotics 2025: Industrial Robots. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robot-demand-in-factories-doubles-over-10-years> (дата обращения 03.12.2025).

² Verified Market Reports. Multi-axis Servo System Market Size and Forecast. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/multi-axis-servo-system-market/> (дата обращения 03.12.2025).

Трансформация архитектур систем управления сопровождается фундаментальными изменениями в организации взаимодействия между компонентами автоматизированного оборудования, при чем координированные многоосевые платформы занимали 61,3 % рынка сервоприводов в 2024 году и сохраняют темпы роста на уровне 8,6 % CAGR благодаря интегрированной кинематике, обеспечивающей работу шестиосевых роботов и пятикоординатных обрабатывающих центров.³ Протокол EtherCAT с временем обновления менее 100 микросекунд обеспечивает синхронизацию распределённых приводов без применения проприетарного аппаратного обеспечения, что создаёт технологическую базу для построения открытых систем управления. Актуальность темы исследования определяется несколькими взаимосвязанными факторами, формирующими современный контекст развития промышленной автоматизации и требующими системного научного осмысления происходящих технологических трансформаций в области управления многокоординатным движением.

Во-первых, переход к гибким производственным системам создаёт новые требования к архитектуре управления приводами, при чем согласно данным отраслевых исследований, тенденция 2025 года характеризуется переходом к распределённым архитектурам управления, где интеллект разделён между уровнями операторских станций, контроллеров и сенсоров, с высоким интересом к решениям, способным интегрироваться в существующие ERP- и MES-системы.⁴

Во-вторых, развитие промышленных сетей реального времени радикально изменяет возможности построения распределённых систем управления, при чем протоколы EtherCAT и PROFINET IRT обеспечивают детерминированную передачу данных с джиттером менее 1 микросекунды, что позволяет реализовывать прецизионную синхронизацию движения на физически распределённых компонентах с точностью, ранее достижимой только в централизованных системах.⁵

В-третьих, российский контекст характеризуется стратегической необходимостью обеспечения технологической независимости в области систем управления производственным оборудованием, при чем указом Президента РФ от 7 мая 2024 года поставлена задача вхождения России к 2030 году в топ-25 стран по плотности роботизации, что требует кратного увеличения производства отечественных систем управления приводами.⁶ Объектом исследования выступает система распределённого управления многокоординатными приводами в составе гибких производственных участков, включающая станки с числовым программным управлением, промышленные роботы и комплексное автоматизированное оборудование.

Предметом исследования являются теоретические подходы, алгоритмические методы и практические механизмы реализации распределённого управления многокоординатным движением, а также процессы интеграции компонентов системы управления в единую производственную инфраструктуру.

³ Mordor Intelligence. Servo Motor Market Size, Share and Growth 2025–2030. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-servo-motor-market> (дата обращения 03.12.2025).

⁴ Клеверенс. Промышленная автоматизация в России: текущее состояние и перспективы. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.cleverence.ru/articles/promyshlennaya-avtomatizatsiya/-promyshlennaya-avtomatizatsiya-v-rossii-tekushchee-sostoyanie-i-perspektivy/> (дата обращения 03.12.2025).

⁵ Analog Devices. Why It Is Worth It to Explore Ethernet for Motion Control. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/why-it-is-worth-it-to-explore-ethernet-for-motion-control.html> (дата обращения 03.12.2025).

⁶ Forbes. Декларация независимости: как в России растёт рынок промышленных роботов. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.forbes.ru/tekhnologii/533789-deklaracia-nezavisimosti-kak-v-rossii-rastet-rynok-promyslennyh-robotov> (дата обращения 03.12.2025).

Цель исследования — проведение комплексного теоретико-методологического анализа методов распределённого управления многокоординатными приводами и выявление ключевых факторов эффективной реализации систем координированного управления движением в составе гибких производственных участков.

Задачи исследования:

1. Проанализировать эволюцию теоретических подходов к построению систем управления многокоординатными приводами в контексте перехода от централизованных к распределённым архитектурам и выявить специфику современного этапа трансформации.
2. Систематизировать и классифицировать методы обеспечения прецизионной синхронизации и координации многоосевого движения в условиях распределённой обработки с использованием промышленных сетей реального времени.
3. Разработать концептуальную модель распределённого управления многокоординатными приводами, учитывающую взаимосвязь коммуникационных, алгоритмических и программных компонентов системы.

Научная новизна исследования заключается в выявлении и систематизации комплекса взаимосвязанных методов и подходов, обеспечивающих эффективную реализацию распределённого управления многокоординатными приводами, а также в разработке интегративной модели, синтезирующей различные теоретические концепции и учитывающей специфику современного технологического оборудования и требования промышленных стандартов.

Практическая значимость работы определяется возможностью применения разработанных теоретических положений и методологических подходов для проектирования систем управления современным технологическим оборудованием, модернизации существующих гибких производственных систем, создания отечественных программно-аппаратных комплексов управления движением, а также подготовки специалистов в области промышленной автоматизации.

1. Методы и материалы

Методологическую основу исследования составляют фундаментальные принципы теории автоматического управления, позволяющие рассматривать распределённые системы управления многокоординатными приводами как сложные динамические системы с обратной связью, требующие согласованной работы множества взаимодействующих компонентов. Теоретическим базисом выступают классические и современные концепции построения систем управления движением, включая теорию следящих систем и сервомеханизмов, методы интерполяции траекторий и контурного управления, теорию промышленных коммуникаций и распределённых вычислений, а также современные подходы к проектированию киберфизических производственных систем.

В качестве основных методов исследования использован комплекс теоретических и аналитических методов, включающий контент-анализ научной литературы по проблематике распределённого управления приводами и промышленных сетей реального времени, компаративный анализ различных архитектур построения многоосевых систем управления, метод систематизации и классификации для выявления и группировки методов обеспечения синхронизации и координации движения, а также методы концептуального моделирования для разработки интегративной модели распределённого управления многокоординатными приводами.

Эмпирическую базу исследования составили технические спецификации и стандарты международных организаций (IEC, ISO, IEEE), данные отраслевых ассоциаций (EtherCAT Technology Group, PROFIBUS & PROFINET International, PLCopen), результаты исследований аналитических компаний (Mordor Intelligence, Grand View Research, Market Research Future), технические отчёты ведущих производителей систем управления движением (Siemens, Beckhoff, Rockwell Automation, FANUC), а также актуальные научные публикации в области автоматизации производства. Информационной основой исследования послужили научные публикации в отечественных и международных журналах по автоматизации и управлению: Г. Жонг [1], М. Дж. Хашеми [2], Л. Юан [3], И.Е. Карпенко [4], А.Е. Яковлевой [5], А.К. Абулхакова [6], А.А. Зеленского [7], С.Н. Масаева [8], О.Н. Крахмалева [9], Г.В. Гурьянова [10], материалы технических конференций по промышленной автоматизации (IEEE ETFA, SPS), стандарты IEC 61131-3 и IEC 61499 в области программирования промышленных контроллеров, а также актуальные данные о развитии рынка систем управления приводами в России и мире за период 2020–2025 годов.

Для анализа российской специфики использованы данные исследований профильных министерств и ведомств (Минпромторг РФ, Минцифры России), материалы отраслевых ассоциаций (НАУРР, Станкоинструмент), отчёты консалтинговых компаний о состоянии рынка промышленной автоматизации в России, а также нормативные документы, регламентирующие развитие отечественного станкостроения и робототехники.

2. Результаты и обсуждение

Формирование современной парадигмы распределённого управления многокоординатными приводами представляет собой результат длительной эволюции теоретических концепций и технологических решений в области автоматизации производственного оборудования, при чем каждый этап развития привносил качественно новые элементы в понимание принципов построения и механизмов функционирования систем координированного управления движением. Теоретические основания современных подходов к распределённому управлению восходят к классической теории следящих систем, разработанной в середине XX века, которая рассматривала системы управления положением и скоростью как замкнутые контуры с обратной связью, обеспечивающие отслеживание задающего воздействия исполнительным механизмом с заданной точностью, однако современная интерпретация данных концепций в контексте распределённых систем существенно расширяет понимание архитектуры управления, включая в неё не только локальные контуры регулирования, но и механизмы межосевой координации, алгоритмы интерполяции траекторий и протоколы детерминированного обмена данными между физически распределёнными компонентами. Концепция распределённых систем управления, первоначально разработанная для непрерывных технологических процессов в нефтехимической и энергетической отраслях, претерпела существенную трансформацию при адаптации к задачам управления дискретным производственным оборудованием, поскольку требования к временным характеристикам и точности синхронизации в системах управления движением на порядки превышают аналогичные требования для управления непрерывными процессами. Согласно данным Grand View Research, мировой рынок распределённых систем управления оценивался в 18,99 млрд долларов в 2023 году с прогнозируемым ростом до 29,19 млрд долларов к 2030 году при среднегодовом темпе 6,1 %, при чем ключевым драйвером развития выступает интеграция возможностей DCS и PLC в единые платформы автоматизации процессов.⁷

⁷ Grand View Research. Distributed Control Systems Market Industry Report 2030. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/distributed-control-systems-market> (дата обращения 03.12.2025).

Следующий важный теоретический фундамент составляет концепция промышленного Ethernet как коммуникационной основы распределённых систем управления, при чем протокол EtherCAT, разработанный компанией Beckhoff Automation и стандартизированный в рамках ИЕС 61158, реализует уникальный подход «обработки на лету», когда каждое ведомое устройство извлекает адресованные ему данные из проходящего кадра Ethernet и записывает ответные данные без необходимости полного приёма и повторной передачи пакета, что обеспечивает минимальные задержки и высокую точность синхронизации.⁸ Время обновления для 1 000 дискретных входов-выходов, распределённых по произвольному количеству станций, составляет всего 30 микросекунд, а обмен данными со 100 сервоосями занимает около 100 микросекунд, что создаёт технологическую базу для построения высокопроизводительных распределённых систем управления движением.

Теория контурного управления многоосевыми станками, разработанная в работах Y. Koren и K. Erkorkmaz, предоставляет важную методологическую основу для понимания задач координации движения по нескольким осям, при чем ключевой проблемой выступает минимизация контурной погрешности — отклонения фактической траектории инструмента от заданной при одновременном движении по нескольким координатам. Современные исследования демонстрируют, что использование предиктивного управления на основе интерполяции состояний сервоосей позволяет снизить контурную погрешность приблизительно на 20 % в положении центра инструмента и на 40 % в ориентации инструмента без увеличения горизонта предсказания [11].

Анализ современной практики построения распределённых систем управления многокоординатными приводами демонстрирует существенную вариативность архитектурных решений в зависимости от требований приложения, количества управляемых осей, необходимой точности и временных характеристик, при чем исследования показывают, что распределённые сервоприводы приобретают всё большее распространение благодаря способности децентрализовать управление и повысить гибкость системы. В отличие от традиционных централизованных систем, распределённые сервоприводы позволяют распределить функции управления по множеству узлов, снижая сложность и стоимость кабельной инфраструктуры, а также упрощая масштабирование и модификацию системы.⁹

Российский контекст развития систем управления многокоординатными приводами характеризуется специфическими особенностями, обусловленными структурой промышленности, историческим развитием станкостроения и современными геополитическими факторами, при чем согласно данным Ведомостей, рынок промышленной автоматизации в России продемонстрировал среднегодовой темп роста 6 % в 2023–2024 годах, увеличившись с 77 до 83 млрд рублей, при этом прогнозируется рост до 1,16 трлн рублей к 2030 году.¹⁰ В 2024 году в Российской Федерации разработан национальный проект «Средства производства и автоматизации», направленный на обеспечение технологической независимости в области производства высокотехнологичных станков и повышение уровня промышленной роботизации.

Как представлено в таблице 1, различные архитектуры построения систем управления многокоординатными приводами характеризуются существенными различиями в технических параметрах и областях применения.

⁸ Dewesoft. What Is EtherCAT Protocol and How Does It Work. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://dewesoft.com/blog/what-is-ethercat-protocol> (дата обращения 03.12.2025).

⁹ Dataintel. AC Multi Axis Servo Drive Market Report. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://dataintel.com/report/ac-multi-axis-servo-drive-market> (дата обращения 03.12.2025).

¹⁰ Ведомости. Рынок промышленной автоматизации в России вырастет вдвое к 2030 году. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2025/03/26/1100515-rinok-promishlennoi-avtomatizatsii> (дата обращения 03.12.2025).

Таблица 1

**Сравнительный анализ архитектур
систем управления многокоординатными приводами**

Архитектура	Время цикла	Количество осей	Джиттер синхронизации	Область применения
Централизованная на базе ПЛК	1–10 мс	До 8–16	100–500 мкс	Простые многоосевые системы
Распределённая EtherCAT	100–250 мкс	До 65535	< 1 мкс	Высокопроизводительные станки, роботы
Распределённая PROFINET IRT	< 1 мс	До 256	< 1 мкс	Автоматизированные линии, модульные машины
Гибридная DCS/PLC	10–100 мс	Десятки–сотни	1–10 мс	Комплексные производственные системы
Встроенная CNC	0,5–2 мс	3–9	10–50 мкс	Станки с ЧПУ, обрабатывающие центры

Составлено авторами на основе анализа материалов¹¹

Данные таблицы 1 свидетельствуют о существенных различиях в характеристиках различных архитектур, при чем выбор конкретного решения определяется совокупностью требований к количеству управляемых осей, точности синхронизации, временным характеристикам и возможностям масштабирования. Централизованные архитектуры на базе ПЛК сохраняют актуальность для относительно простых приложений с ограниченным количеством осей, тогда как распределённые архитектуры на базе промышленного Ethernet становятся стандартом для высокопроизводительного оборудования.

Протокол EtherCAT демонстрирует наилучшие показатели по времени цикла и точности синхронизации, что обусловлено его архитектурными особенностями — механизмом обработки на лету и распределёнными часами, встроенными в каждое ведомое устройство. Согласно данным EtherCAT Technology Group, организация насчитывает 8 575 компаний-членов по всему миру, а протокол соответствует требованиям безопасности уровня Security Level 2 в рамках регламента CRA без модификаций.

Методы интерполяции траекторий и контурного управления составляют алгоритмическое ядро систем управления многокоординатными приводами, обеспечивая преобразование заданной программой геометрии детали в последовательность команд для отдельных приводов осей. Интерполятор координирует движение по осям станка, которые приводятся отдельными двигателями, для формирования требуемой траектории обработки, согласовывая движения таким образом, чтобы запрограммированная траектория постоянно выдерживалась от начала до конца перемещения.¹² Наиболее распространёнными типами интерполяции являются линейная и круговая, однако современные системы реализуют также сплайновую интерполяцию на базе кривых NURBS для обеспечения более плавного и непрерывного движения.

Анализ эволюции стандартов программирования промышленных контроллеров демонстрирует переход от проприетарных решений к унифицированным подходам на базе стандартов IEC, при чем стандарт IEC 61131-3 определяет минимальный набор структур, базовых программных элементов и синтаксических правил для языков программирования

¹¹ Mordor Intelligence. Servo Motor Market. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-servo-motor-market> (дата обращения 03.12.2025).

Dewesoft. What Is EtherCAT Protocol. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://dewesoft.com/blog/what-is-ethercat-protocol> (дата обращения 03.12.2025).

DN.org. Profinet vs EtherCAT for Real-Time Factory Ethernet. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://dn.org/profinet-vs-ethercat-for-real-time-factory-ethernet/> (дата обращения 03.12.2025).

¹² Testbook. The Function of Interpolator in a CNC Machine Controller. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://testbook.com/question-answer/the-function-of-interpolator-in-a-cnc-machine-cont--565bfd6203282114ca1d1df5> (дата обращения 03.12.2025).

контроллеров, обеспечивая улучшенную интероперабельность и возможность повторного использования программного кода.¹³

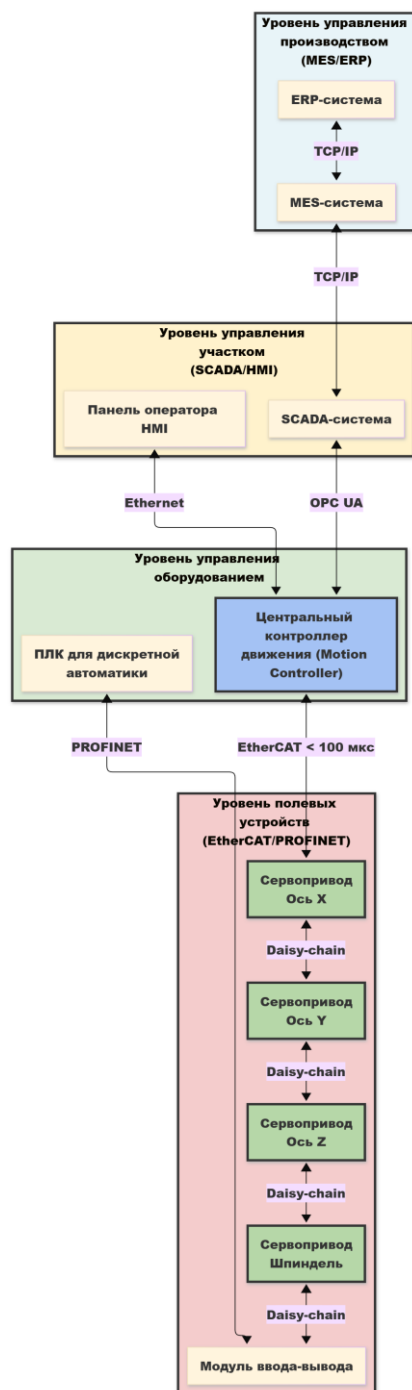


Рисунок 1. Архитектура распределённой системы управления многокоординатными приводами (составлено авторами на основе анализа материалов¹⁴)

¹³ Control.com. PLC Programming: Overview of IEC 61131-3 in Industrial Automation Systems. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://control.com/technical-articles/an-overview-of-iec-61131-3-Industrial-Automation-Systems/> (дата обращения 03.12.2025).

¹⁴ Schneider Electric Blog. What is a DCS. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://blog.se.com/industry/2024/01/30/what-is-a-dcs/> (дата обращения 03.12.2025).

EtherCAT Technology Group. Official Website. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.ethercat.org/default.htm> (дата обращения 03.12.2025).

Стандарт поддерживает пять языков программирования: функциональные блоки (FBD), список инструкций (IL), релейные диаграммы (LD), последовательные функциональные схемы (SFC) и структурированный текст (ST), при чем текущая четвёртая редакция стандарта опубликована в мае 2025 года.

Стандарт IEC 61499, развивающий концепции IEC 61131-3 для распределённых систем, определяет модель для построения распределённых систем управления на основе событийно-управляемых функциональных блоков, при чем в отличие от циклической модели выполнения IEC 61131, стандарт IEC 61499 позволяет явно специфицировать порядок выполнения функциональных блоков через механизм событий.¹⁵ Стандарт обеспечивает возможность разработки приложения для всей системы в целом с последующим распределением по доступным устройствам, что соответствует парадигме распределённого управления.

На рисунке 1 представлена концептуальная схема архитектуры распределённой системы управления многокоординатными приводами с использованием промышленного Ethernet.

Представленная на рисунке 1 архитектура иллюстрирует многоуровневую организацию распределённой системы управления, где центральный контроллер движения выполняет функции интерполяции траектории и формирования заданий для отдельных осей, а интеллектуальные сервоприводы реализуют локальные контуры регулирования положения, скорости и тока с обменом данными по протоколу EtherCAT в режиме реального времени. Топология последовательного соединения (daisy-chain) типична для EtherCAT и обеспечивает минимальную латентность за счёт обработки данных на лету при прохождении кадра через каждое устройство.

Таблица 2

Региональная структура мирового рынка промышленных роботов в 2024 году

Регион	Установлено роботов в 2024, тыс. шт.	Доля в мировом рынке, %	Динамика к 2023, %	Операционный парк, тыс. шт.
Китай	295	54	+4	2 027
Япония	44,5	8	-4	450,5
США	34,2	6	-9	393,7
Республика Корея	30,6	6	-3	н/д
Германия	27,0	5	-5	269,4
Индия	9,1	2	+7	~50
Прочие	~102	19	н/д	~1 474
Мир в целом	542	100	-2	4 664

Составлено авторами на основе данных¹⁶

Спрос на многоосевые сервоприводы особенно высок в секторе робототехники, где прецизионное и координированное управление движением является критическим для функционирования робототехнических систем. Согласно данным исследования, многоосевые сервоприводы позволяют роботам выполнять сложные задачи с высокой точностью, делая их незаменимыми в современной промышленной автоматизации, при чем растущая тенденция к использованию коллаборативных роботов (коботов) на производстве дополнительно стимулирует спрос на многоосевые сервосистемы.¹⁷

¹⁵ Automation.com. Industrial Controller Software Standards Discussions at ARC Forum 2024. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.automation.com/en-us/articles/march-2024/industrial-controller-software-standards-arc-2024> (дата обращения 03.12.2025).

¹⁶ International Federation of Robotics. World Robotics 2025. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robot-demand-in-factories-doubles-over-10-years> (дата обращения 03.12.2025).

¹⁷ Dataintel. AC Multi Axis Servo Drive Market Report. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://dataintel.com/report/ac-multi-axis-servo-drive-marke> (дата обращения 03.12.2025).

Как представлено в таблице 2, мировой рынок промышленных роботов демонстрирует устойчивый рост с доминированием Азиатско-Тихоокеанского региона. Данные таблицы 2 демонстрируют абсолютное доминирование Китая на мировом рынке промышленных роботов, при чем объём установок в Китае почти в девять раз превышает показатели США, а операционный парк роботов в Китае впервые превысил 2 миллиона единиц. Впервые отечественные китайские производители продали больше роботов, чем иностранные поставщики, достигнув 57 % рынка, что свидетельствует о стратегическом успехе национальной программы развития робототехники. Глобальные установки роботов, по прогнозам IFR, вырастут на 6 % до 575 000 единиц в 2025 году, а к 2028 году превысят отметку в 700 000 единиц.

Тенденция к объединению нескольких осей приводов в единый модуль с общей шиной питания представляет собой важное направление развития распределённых систем управления. Проектирование системы координированного движения с тремя-четырьмя отдельными приводами означает сложную кабельную инфраструктуру, увеличенные размеры шкафов и потери энергии, поэтому тенденция развивается в направлении заказных инженерных решений, объединяющих несколько осей в единый модуль с общей шиной питания.¹⁸ Такой подход упрощает проектирование, уменьшает габариты оборудования и повышает энергоэффективность за счёт возможности рекуперации энергии между осями.

Алгоритмы компенсации контурной погрешности и виброгашения представляют критический компонент систем управления высокоскоростным многоосевым движением, при чем современные исследования демонстрируют эффективность применения фильтров с конечной импульсной характеристикой (FIR) для генерации эталонных команд движения с робастным подавлением вибраций. Разработанные методы позволяют реализовать интерполяцию линейных траекторий с ограничением контурной погрешности при высокоскоростном движении по углам траектории, при чем простота проектирования фильтра и минимальные вычислительные затраты на его выполнение делают метод пригодным для реализации на различных системах управления движением и станках с ЧПУ [12].

Интеграция искусственного интеллекта в системы управления движением становится значимой тенденцией развития промышленной автоматизации, при чем согласно данным Rockwell Automation, ИИ и машинное обучение представляют наиболее обсуждаемые технологии, влияющие на автоматизацию и являющиеся растущей частью пространства ИИ.¹⁹ ИИ поддерживает новый способ работы, при котором программное обеспечение действует скорее как коллаборатор, чем инструмент, позволяя машинам учиться, адаптироваться и принимать решения самостоятельно, что может повысить эффективность и помочь смягчить дефицит квалифицированных кадров.

Как представлено в таблице 3, методы интерполяции траекторий характеризуются различными свойствами и областями применения в системах управления многокоординатными приводами. Данные таблицы 3 свидетельствуют о прогрессивном развитии методов интерполяции от простых линейных и круговых алгоритмов к сложным сплайновым и предиктивным методам, обеспечивающим высокую непрерывность производных траектории и минимальную контурную погрешность. Выбор метода определяется балансом между требуемой точностью обработки и доступными вычислительными ресурсами системы управления.

¹⁸ ADVANCED Motion Controls. Servo Drive Trends for 2025. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.a-m-c.com/servo-drive-trends-for-2025/> (дата обращения 03.12.2025).

¹⁹ Rockwell Automation. 8 Key Industrial Automation Trends in 2025. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/company/news/the-journal/8-key-industrial-automation-trends-in-2025.html> (дата обращения 03.12.2025).

Таблица 3

Классификация методов интерполяции траекторий в системах ЧПУ

Метод интерполяции	Непрерывность производных	Вычислительная сложность	Контурная погрешность	Типичное применение
Линейная (G01)	C^0	Низкая	Высокая на углах	Черновая обработка
Круговая (G02/G03)	C^1	Низкая	Средняя	Обработка дуг
Сплайновая (B-spline)	C^2	Средняя	Низкая	Чистовая обработка
NURBS	C^2 и выше	Высокая	Очень низкая	Сложные поверхности
Полиномиальная предиктивная	C^2	Высокая	Минимальная	Пятиосевая обработка

Составлено авторами на основе анализа материалов [13]

Особое значение в контексте распределённого управления приобретают методы кросс-связанного управления контурной погрешностью, позволяющие компенсировать динамические рассогласования между осями путём введения корректирующих воздействий на основе оценки текущей контурной погрешности в реальном времени. Нелинейная и конфигурационно-зависимая кинематика пятиосевых станков делает оценку и управление контурной погрешностью сложной задачей, при чем современные методы используют обобщённую функцию Якоби на основе теории винтов для синхронизации движений линейных и ротационных приводов [14].

Российский рынок систем автоматизации технологических процессов демонстрирует положительную динамику после периода адаптации к новым условиям, при чем согласно экспертным оценкам, в 2024 году уровень внедрения АСУТП на крупных предприятиях нефтехимии, химии и нефтепереработки превышает 88 %. ²⁰ Более половины заказчиков отмечают положительный эффект от использования отечественных АСУТП, которые апробировались и внедрялись в прошлом году, и на практике не уступают иностранным решениям, при чем сохраняются сложности с заменой отдельных компонентов, включая высокоточные сервоприводы и шпиндельные двигатели в станках с ЧПУ.

На рисунке 2 представлена функциональная модель алгоритма интерполяции и управления контурной погрешностью в системе координированного управления многоосевым движением.

Представленная на рисунке 2 модель иллюстрирует последовательность преобразований от исходной NC-программы до команд управления отдельными приводами с учётом компенсации контурной погрешности. Блок интерполяции выполняет разбор программы, геометрическую обработку и формирование опорных точек траектории с планированием скорости подачи. Блок контурного управления использует информацию обратной связи от энкодеров для оценки текущей контурной погрешности и формирования корректирующих воздействий через механизм кросс-связанного управления.

Рынок HR Tech в области промышленной автоматизации также демонстрирует значительный рост, при чем согласно данным TAdviser, объём российского рынка систем управления производством в 2024 году составил 17 млрд рублей, показав рост на 7,2 % по сравнению с предыдущим годом, а прогноз на 2025 год предполагает увеличение до 18 млрд рублей. ²¹ Факторами роста становятся нацеленность предприятий на оптимизацию производственных процессов и увеличение производительности без потери качества выпускаемой продукции.

²⁰ ComNews. АСУТП в России: итоги 2024 и прогнозы на 2025 год. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.comnews.ru/content/237425/2025-01-28/2025-w05/1019/asutp-rossii-itogi-2024-i-prognozy-2025-god> (дата обращения 03.12.2025).

²¹ TAdviser. MES-системы — функции и преимущества. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:MES-системы_-_функции_и_преимущества (дата обращения 03.12.2025).

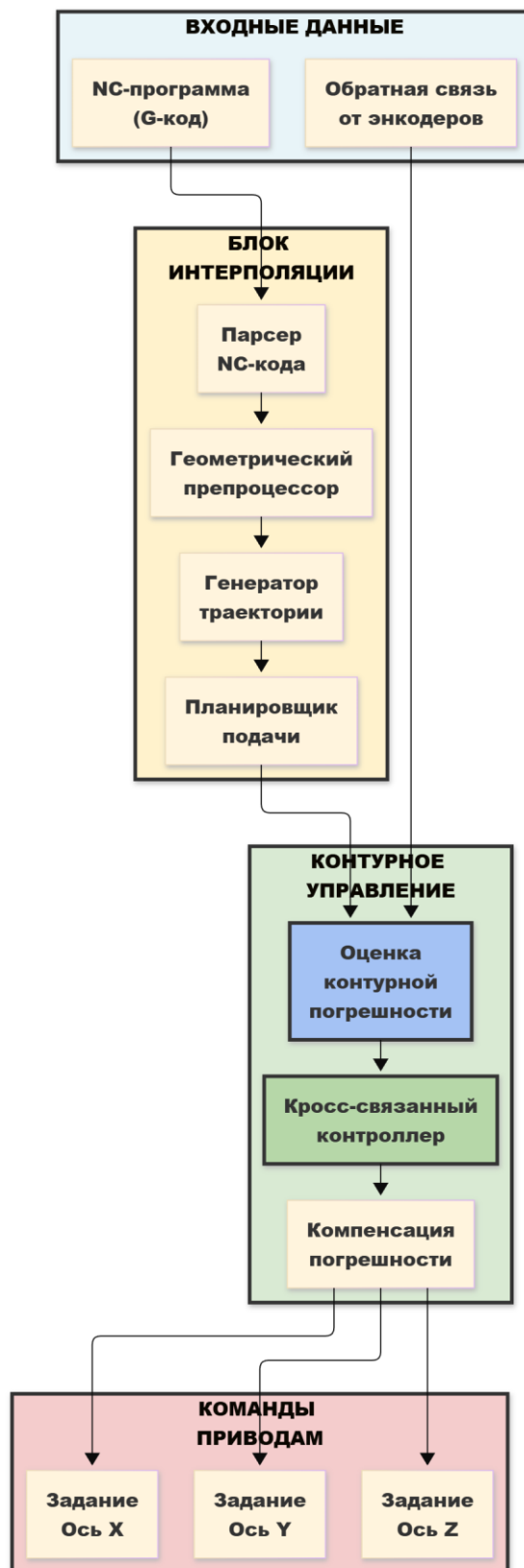


Рисунок 2. Функциональная модель алгоритма интерполяции и контурного управления (составлено авторами на основе анализа материалов [15])

Как представлено в таблице 4, промышленные сети реального времени характеризуются различными техническими параметрами, определяющими их применимость для задач управления многокоординатными приводами.

Таблица 4

**Сравнительная характеристика протоколов
 промышленного Ethernet для управления движением**

Параметр	EtherCAT	PROFINET IRT	EtherNet/IP	SERCOS III	Powerlink
Минимальное время цикла	12,5 мкс	31,25 мкс	~1 мс	31,25 мкс	200 мкс
Джиттер синхронизации	< 1 мкс	< 1 мкс	~100 мкс	< 1 мкс	< 1 мкс
Топология	Линейная, звезда, дерево	Звезда, дерево	Любая	Кольцо	Линейная
Макс. количество узлов	65 535	256	Не ограничено	511	240
Использование полосы	> 90 %	~50 %	~30 %	> 90 %	> 90 %
Стандарт	IEC 61158	IEC 61158	IEC 61158	IEC 61491	IEC 61158

Составлено авторами на основе анализа материалов²²

Данные таблицы 4 свидетельствуют о превосходстве протокола EtherCAT по ключевым параметрам, критичным для управления многокоординатным движением, включая минимальное время цикла, точность синхронизации и масштабируемость. Механизм обработки на лету позволяет достигать эффективности использования полосы пропускания свыше 90 % при минимальных задержках передачи данных. Протокол PROFINET IRT также обеспечивает высокие характеристики реального времени и широко используется благодаря поддержке компании Siemens, являющейся крупнейшим производителем средств автоматизации.

Развитие технологий цифровых двойников оказывает существенное влияние на методы проектирования и оптимизации систем управления многокоординатными приводами, при чем критической частью создания цифрового двойника является необходимость наличия полного набора данных, включая сбор информации в реальном времени.²³ Стратегии сбора данных могут включать использование существующих подключённых датчиков, добавление новых датчиков к существующим ПЛК и контроллерам, а также установку периферийных устройств и интеллектуальных сенсоров.

Количество промышленных роботов в эксплуатации в России в 2024 году достигло 20 864 единиц, что примерно на 62 % больше по сравнению с предыдущим годом, когда показатель составлял 12 841 штуку.²⁴ На федеральный проект «Развитие промышленной робототехники и автоматизации производства» выделено около 350 млрд рублей бюджетных средств до 2030 года, что создаёт беспрецедентные возможности для развития отечественных систем управления приводами. Разработки передовых производственных технологий в сфере промышленной робототехники ведутся преимущественно в отношении роботов для выполнения традиционных операций, при чем наметился существенный прирост разработок в направлениях коллаборативных роботов и систем технического зрения на 55 % и 33 % соответственно.

Как представлено в таблице 5, динамика российского рынка средств автоматизации демонстрирует устойчивый рост с прогнозируемым ускорением в период до 2030 года.

Данные таблицы 5 демонстрируют позитивную динамику развития российского рынка промышленной автоматизации с особенно высокими темпами роста в секторе робототехники.

²² Dewesoft. What Is EtherCAT Protocol. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://dewesoft.com/blog/what-is-ethercat-protocol> (дата обращения 03.12.2025).

DN.org. Profinet vs EtherCAT for Real-Time Factory Ethernet. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://dn.org/profinet-vs-ethercat-for-real-time-factory-ethernet/> (дата обращения 03.12.2025).

²³ Rockwell Automation. 8 Key Industrial Automation Trends in 2025. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/company/news/the-journal/8-key-industrial-automation-trends-in-2025.html> (дата обращения 03.12.2025).

²⁴ VC.ru. Промышленные роботы в России. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://vc.ru/id5073810/2102297-promyshlennyye-roboty-v-rossii> (дата обращения 03.12.2025).

Достижение целевого показателя плотности роботизации, соответствующего вхождению в топ-25 стран мира, требует увеличения парка промышленных роботов примерно в 4,5–5 раз к 2030 году, что создаёт масштабный рынок для систем управления многокоординатными приводами. Производство токарных станков с ЧПУ в России за год выросло на 17 % до 1 034 штук, что свидетельствует о восстановлении отечественного станкостроения.

Таблица 5

Показатели развития рынка промышленной автоматизации в России

Показатель	2023	2024	2025 (прогноз)	2030 (прогноз)	CAGR 2024-2030
Рынок промавтоматизации, млрд руб.	77	83	~90	~165	10 %
Рынок систем управления производством, млрд руб.	15,9	17	18	19,2	7,2 %
Промышленные роботы в эксплуатации, тыс. шт.	12,8	20,9	~30	94	28 %
Плотность роботизации (роботов на 10 000 работников)	10	11	~15	150+	~50 %
Производство станков с ЧПУ, шт.	885	1034	~1200	~1300	17 %

Составлено авторами на основе данных²⁵

Интеграция систем управления приводами с верхними уровнями автоматизации производства реализуется посредством протоколов OPC UA и концепции цифрового предприятия, при чем согласно данным отраслевых экспертов, смарт-производственные системы находятся в центре Индустрии 4.0, воплощая бесшовную интеграцию киберфизических систем, Интернета вещей, робототехники и искусственного интеллекта для повышения эффективности и гибкости производства [16]. Киберфизические системы обеспечивают взаимодействие в реальном времени между физическими активами и вычислительными процессами, позволяя реализовать адаптивное управление и мониторинг.

Перспективы развития распределённых систем управления многокоординатными приводами связаны с дальнейшим совершенствованием коммуникационных технологий, алгоритмического обеспечения и интеграцией методов искусственного интеллекта, при чем важным направлением является разработка унифицированных платформ, объединяющих функциональность DCS и PLC в единых решениях. Традиционные поставщики DCS представили системы нового поколения на базе актуальных коммуникационных стандартов и стандартов IEC, что привело к тенденции объединения традиционных концепций и функциональности PLC и DCS в универсальные решения, называемые системами автоматизации процессов (PAS).

Развитие методов машинного обучения для предсказания и компенсации погрешностей управления открывает новые возможности повышения точности многокоординатного движения, при чем современные исследования демонстрируют эффективность применения нейронных сетей с долгой краткосрочной памятью (LSTM) для предсказания и компенсации контурной погрешности систем ЧПУ. Динамические характеристики системы привода непосредственно влияют на точность обрабатываемых деталей, поэтому развитие методов интеллектуального управления представляет критически важное направление исследований.

Выводы

Анализ эволюции теоретических подходов к построению систем управления многокоординатными приводами показал фундаментальную трансформацию от централизованных

²⁵ Ведомости. Рынок промышленной автоматизации в России. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2025/03/26/1100515-rinok-promishlennoi-avtomatizatsii> (дата обращения 03.12.2025).

TAdviser. MES-системы. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:MES-системы_-_функции_и_преимущества. (дата обращения 03.12.2025).

TAdviser. Станкостроение в России. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Станкостроение_в_России (дата обращения 03.12.2025).

архитектур с монолитными контроллерами к распределённым системам на базе промышленного Ethernet реального времени. Современный этап характеризуется конвергенцией концепций DCS и PLC, интеграцией интеллектуальных функций непосредственно в приводы и широким применением протоколов EtherCAT и PROFINET IRT, обеспечивающих детерминированный обмен данными с джиттером менее 1 микросекунды. Результаты исследования свидетельствуют, что координированные многоосевые платформы занимают доминирующее положение на рынке сервоприводов с долей 61,3 % и темпами роста 8,6 % CAGR, что обусловлено требованиями современного высокопроизводительного оборудования к прецизионной синхронизации движения.

Систематизация методов обеспечения синхронизации и координации многоосевого движения выявила критическую роль трёх взаимосвязанных компонентов: коммуникационной инфраструктуры на базе детерминированных протоколов с распределёнными часами, алгоритмов интерполяции траекторий с компенсацией контурной погрешности и программных компонентов на базе стандартов IEC 61131-3 и IEC 61499. Протокол EtherCAT демонстрирует наилучшие показатели по времени цикла (до 12,5 мкс), масштабируемости (до 65 535 узлов) и эффективности использования полосы пропускания (свыше 90 %), что делает его предпочтительным решением для высокопроизводительных многоосевых систем. Методы предиктивного управления на основе интерполяции состояний сервоосей позволяют снизить контурную погрешность на 20–40 %, что имеет критическое значение для прецизионной обработки.

Разработанная концептуальная модель распределённого управления многокоординатными приводами демонстрирует многоуровневую архитектуру взаимодействия между центральным контроллером движения, интеллектуальными сервоприводами и верхними уровнями автоматизации производства. Модель интегрирует коммуникационные, алгоритмические и программные аспекты, учитывая требования современных стандартов и тенденции развития технологий Индустрии 4.0. Практическая значимость разработанных положений подтверждается данными о российском рынке, где количество промышленных роботов в эксплуатации выросло на 62 % за год, а федеральным проектом выделено 350 млрд рублей на развитие промышленной робототехники до 2030 года, что создаёт беспрецедентные возможности для внедрения отечественных систем распределённого управления многокоординатными приводами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhong G. et al. Precise position synchronous control for multi-axis servo systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2017. — Т. 64. — № 5. — С. 3707–3717. — URL: https://www.researchgate.net/publication/312479865_Precise_Position_Synchronous_Control_for_Multi-Axis_Servo_Systems.
2. Hashemi M.J. et al. Development and validation of multi-axis substructure testing system for full-scale experiments // Australian Journal of Structural Engineering. — 2015. — Т. 16. — № 4. — С. 302–315. — URL: https://www.researchgate.net/publication/287686700_Development_and_validation_of_multi-axis_substructure_testing_system_for_full-scale_experiments.
3. Yuan L. et al. Design of Multi-axis Motion Control System Based on EtherCAT // The Proceedings of the 17th Annual Conference of China Electrotechnical Society, 2022. — С. 321–332. — URL: https://www.researchgate.net/publication/369614763_Design_of_Multi-axis_Motion_Control_System_Based_on_EtherCAT.

4. Карпенко, И.Е. Обзор промышленных программируемых логических контроллеров для системы энергосберегающего управления / И.Е. Карпенко, Д.А. Федотов // Энергосбережение и эффективность в технических системах: Материалы IV Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Тамбов, 10–12 июля 2017 года / Тамбовский государственный технический университет. — Тамбов: Издательство Першина Р.В., 2017. — С. 113–114. — EDN ZDLFVT.
5. Яковлева, А.Е. Программируемые логические контроллеры в промышленных системах управления / А.Е. Яковлева, Е.Е. Бизюкова // Наука через призму времени. — 2019. — № 12(33). — С. 53–56. — EDN IDFKEM.
6. Особенности построения систем автоматизированного управления движением трамваев / А.К. Абдулхаков, П.П. Павлов, А.Э. Аухадеев, Р.С. Литвиненко // Международный форум KAZAN DIGITAL WEEK — 2021: Сборник материалов, Казань, 21–24 сентября 2021 года. Том Часть 1. — Казань: ГБУ «НЦБЖД», 2021. — С. 20–25. — EDN XNCASR.
7. Зеленский, А.А. Концепция построения конкурентоспособных быстродействующих систем управления станков и промышленных роботов в условиях технологических ограничений электронной компонентной базы России / А.А. Зеленский — DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-123-133. // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2023. — № 1(231). — С. 123–133 — EDN IJREAC.
8. Масаев, С.Н. Концепция построения структуры управления динамической системой / С.Н. Масаев — DOI 10.17586/0021-3454-2021-64-1-40-46. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2021. — Т. 64, № 1. — С. 40–46. — EDN XWHVXS.
9. Крахмалев, О.Н. Математическое обеспечение систем управления промышленными роботами и многокоординатными станками для коррекции влияния на их движение геометрических отклонений / О.Н. Крахмалев, Д.И. Петрешин, О.Н. Федонин // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2016. — № 3. — С. 28–35. — EDN WKRDNH.
10. Гурьянов, Г.В. Специфика развития, требований микроконтроллеров в электроприводе энергоемких сельскохозяйственных машин / Г.В. Гурьянов, А.В. Малякко // Проблемы энергетики, природопользования, экологии: Сборник материалов международной научно-технической конференции, Брянск, 22–24 сентября 2009 года / Под общей редакцией Л.М. Маркарянц. — Брянск: Брянская государственная сельскохозяйственная академия, 2009. — С. 100–105. — EDN TTIRPV.
11. Lv S. et al. Servo State-Based Polynomial Interpolation Model Predictive Control for Enhanced Contouring Control // Actuators. — MDPI, 2025. — Т. 14. — № 8. — С. 409. — URL: <https://www.mdpi.com/2076-0825/14/8/409>.
12. Sencer, B. Linear Interpolation of machining tool-paths with robust vibration avoidance and contouring error control / B. Sencer, Ya. Kakinuma, Yu. Yamada — DOI 10.1016/j.precisioneng.2020.04.007. // Precision Engineering. — 2020. — Т. 66. — С. 269–281. — EDN UJGKU.
13. Toolpath Interpolation and Smoothing for Computer Numerical Control Machining of Freeform Surfaces: A Review / W.B. Zhong, Xi.Ch. Luo, W.L. Chang [et al.] — DOI 10.1007/s11633-019-1190-y. // International Journal of Automation and Computing. — 2020. — Т. 17, № 1. — С. 1–16. — EDN SOISYS.

14. Altintas Y., Khoshdarregi M.R. Contour error control of CNC machine tools with vibration avoidance // CIRP annals. — 2012. — Т. 61. — № 1. — С. 335–338. — URL: https://www.researchgate.net/publication/256673842_Contour_error_control_of_CNC_machine_tools_with_vibration_avoidance.
15. A data-driven rolling optimization method for trajectory tracking error prediction of CNC machine tools / Y. Guan, J. Yang, Sh. Tan, H. Ding — DOI 10.1007/s11431-024-2785-y. // Science China Technological Sciences. — 2025. — Т. 68, № 1. — С. 1120301 — EDN DTILAW.
16. Barua D.A., Sami S.A., Barua L. Leveraging artificial intelligence for smart production management in industry 4.0 //Scientific Reports. — 2025. — Т. 15. — № 1. — С. 41559. — URL: <https://colab.ws/articles/10.1038%2Fs41598-025-25413-6>.

Nepogoda Philip Vladimirovich

K.G. Razumovsky Moscow State University of Technology and Management, Moscow, Russia
E-mail: a.goncharov@mgutm.ru

Goncharov Andrey Vitalievich

K.G. Razumovsky Moscow State University of Technology and Management, Moscow, Russia
E-mail: a.goncharov@mgutm.ru

Shakhovskoy Andrey Vladimirovich

K.G. Razumovsky Moscow State University of Technology and Management, Moscow, Russia
E-mail: a.shakhovskoy@mgutm.ru

Tarakanova Valentina Viktorovna

K.G. Razumovsky Moscow State University of Technology and Management, Moscow, Russia
E-mail: walentt@yandex.ru

Development of distributed control methods for multi-axis drives in flexible manufacturing cells

Abstract. Modern trends in industrial production are characterized by a fundamental transformation in approaches to building process equipment control systems, driven by the transition to the Industry 4.0 paradigm, the widespread adoption of cyber-physical systems, and increasing demands for flexibility and adaptability in production facilities. This study provides a comprehensive analysis of distributed control methods for multi-axis drives in the context of their integration into flexible production areas, which is particularly relevant for ensuring technological sovereignty and enhancing the competitiveness of the domestic mechanical engineering industry. The study focuses on the theoretical foundations, algorithmic approaches, and practical mechanisms for implementing distributed multi-axis motion control systems in modern production equipment, including CNC machines, industrial robots, and complex automated production lines. Classical theories of automatic control, concepts for building distributed systems based on industrial Ethernet, interpolation and contour control methods, and modern approaches to synchronizing multi-axis drives are considered. This paper analyzes the evolution of concepts in drive control systems, from centralized architectures with programmable logic controllers to distributed structures with intelligent servo drives and edge computing. Key factors for the effective implementation of distributed control are identified, including a communication infrastructure with deterministic real-time protocols, algorithmic support for coordinating motion across multiple axes, mechanisms for precise synchronization of distributed clocks, and software components for ensuring portability and interoperability. The developed conceptual model for distributed control of multi-axis drives demonstrates a multi-level architecture for interaction between a central controller, peripheral intelligent drives, and a production control system, where industrial networks provide the infrastructure for real-time data exchange, interpolation algorithms generate motion trajectories, and synchronization mechanisms ensure the coordinated operation of all axes.

Keywords: distributed control; multi-axis drives; flexible manufacturing systems; EtherCAT; PROFINET; trajectory interpolation; drive synchronization; CNC machine tools; industrial automation; contouring control; servo drive; Industry 4.0; IEC 61131; cyber-physical systems; industrial robots