https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-30-46

CC BY

УДК 004.896, 621.865.8

Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Часть 1. Промышленная робототехника

А.М. Романов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
@Автор для переписки, e-mail: romanov@mirea.ru

В работе представлен обзор роботов различного масштаба и назначения. В ходе обзора анализируются применяемые аппаратные и программные решения и обобщаются наиболее распространенные структурные схемы систем управления. По результатам обзора проводится анализ подходов к масштабированию систем управления, применению алгоритмов интеллектуального управления, обеспечению отказоустойчивости, снижению массогабаритных размеров элементов систем управления, свойственных для разных классов роботов. Целью работы является поиск общих подходов, применяемых в различных областях робототехники для построения на их основе единой методологии проектирования масштабируемых интеллектуальных систем управления робототехническими комплексами с заданным уровнем отказоустойчивости на унифицированной элементной базе. Данная часть обзора посвящена промышленной робототехнике. По результатам проведенного обзора и анализа сделаны следующие выводы: масштабирование в промышленной робототехнике достигается за счет использования модульного принципа построения систем управления и типорядов основных компонентов; групповое взаимодействие нескольких промышленных роботов организуется за счет централизованного глобального планирования или использования заранее созданных и промоделированных управляющих программ, исключающих возможные коллизии при работе нескольких роботов в одной рабочей зоне; интеллектуальные технологии в промышленной робототехнике находят применение в первую очередь на стратегическом уровне системы управления, который, как правило, исполняется вне режима реального времени, а в отдельных случаях вынесен из блока управления роботом в виде удаленного облачного сервиса; с точки зрения обеспечения отказоустойчивости, разработчики в первую очередь сфокусированы на заблаговременном предсказании неисправностей и плановом выводе робота из эксплуатации, а не на сохранении его работоспособности в случае каких-либо сбоев; промышленная робототехника не предъявляет серьезных требований к массогабаритным размерам устройств управления.

Ключевые слова: робототехника, промышленные роботы, системы управления, мобильные роботы, манипуляторы.

Для цитирования: Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Часть 1. Промышленная робототехника // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 5. С. 30–46. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-30-46

A review on control systems hardware and software for robots of various scale and purpose. Part 1. Industrial robotics

Aleksey M. Romanov

MIREA – Russian Technological University, 119454 Russia, Moscow
@Corresponding author, e-mail: romanov@mirea.ru

A review of robotic systems is presented. The paper analyzes applied hardware and software solutions and summarizes the most common block diagrams of control systems. The analysis of approaches to control systems scaling, the use of intelligent control, achieving fault tolerance, reducing the weight and size of control system elements belonging to various classes of robotic systems is carried out. The goal of the review is finding common approaches used in various areas of robotics to build on their basis a uniform methodology for designing scalable intelligent control systems for robots with a given level of fault tolerance on a unified component base. This part is dedicated to industrial robotics. The following conclusions are made: scaling in industrial robotics is achieved through the use of the modular control systems and unification of main components; multiple industrial robot interaction is organized using centralized global planning or the use of previously simulated control programs, eliminating possible collisions in working area; intellectual technologies in industrial robotics are used primarily at the strategic level of the control system which is usually non-real time, and in some cases even implemented as a remote cloud service; from the point of view of ensuring fault tolerance, the industrial robots developers are primarily focused on the early prediction of faults and the planned decommissioning of the robots, and are not on highly-avaliability in case of failures; industrial robotics does not impose serious requirements on the dimensions and weight of the control devices.

Keywords: robotics, industrial robots, control systems, mobile robots, manipulators.

For citation: Romanov A.M. A review on control systems hardware and software for robots of various scale and purpose. Part 1. Industrial robotics. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(5):30-46 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-30-46

Введение

В условиях ускорения темпов промышленного развития, высокой конкуренции и, как следствие, стремительного сокращения времени выхода устройств на рынок возникает острая необходимость в оптимизации процесса разработки. Считавшиеся ранее обычными сроки в 2-3 года для проектирования и создания систем управления на сегодняшний день являются неприемлемыми. Ответом на этот тренд стало появление и внедрение новых гибких методологий ведения проектов, основанных на Scrum и Agile [1–5], вместо «традиционной» каскадной методологии [2], применявшейся ранее. Данные методологии предполагают переход от предварительного планирования всех аспектов будущего продукта с последующим их воплощением к итерационной разработке. Первой итерацией является создание минимально жизнеспособного продукта (продукта, обладающего минимальным набором функций, достаточным, чтобы удовлетворить первых потребителей) [5], который выпускается на рынок для оценки реального спроса и фактических потребностей потенциальных пользователей. На последующих итерациях происходит доработка и масштабирование минимально жизнеспособного продукта с наделением его новым функционалом.

Ключевым отличием новых гибких методологий от применявшихся ранее является отсутствие единого этапа проектирования применительно к окончательному продукту, как и самого понятия окончательного продукта (рис. 1). Вместо этого происходит проектирование каждой отдельной итерации развития продукта, которое охватывает только новый функционал, добавляемый на этой итерации, и связанные с ним изменения. Таким образом, вместо окончательного получается постоянно развивающийся продукт, который может находиться на рынке неопределенно долгое время, пока на него существует спрос, постоянно адаптируясь под запросы потребителей. Разделение процесса проектирования продукта на несколько несвязанных этапов накладывает повышенные требования к архитектуре минимально жизнеспособного продукта с точки зрения ее масштабируемости. С одной стороны, она должна позволять и изначально предполагать многократное добавление нового функционала в будущем. С другой стороны, сам по себе минимально жизнеспособный продукт должен обеспечивать минимальные трудозатраты на выпуск, поскольку всегда существует вероятность, что данный продукт будет не востребован, а его разработка свернута, не дойдя до стадии развития в следующих итерациях. Здесь присутствует сложный компромисс между масштабируемостью архитектуры, ресурсами, требуемыми на ее реализацию, и ресурсами, требуемыми для создания на ее основе минимально жизнеспособного продукта.

Рис. 1. Стадии развития продукта при использовании «традиционной» каскадной методологии (а) и гибких методологий проектирования, основанных на Scrum и Agile (б).

Если архитектура будет недостаточно масштабируемой, то даже при низких затратах на реализацию минимально жизнеспособного продукта это выразится в высокой стоимости последующих итераций, которые потребуют внесения в проект глобальных изменений, что в в итоге может привести к нерентабельности всего проекта. Если архитектура будет требовать слишком много ресурсов для реализации (мощные вычислительные устройства, быстродействующие интерфейсы, дорогие сплавы и т. д.), то, несмотря на весь заложенный запас для будущих улучшений, первая версия продукта, обладающая минимальным функционалом, окажется не востребована рынком из-за завышенной стоимости, что также приведет к закрытию проекта. Наконец, если для создания минимально жизнеспособного продукта с выбранной архитектурой будет требоваться чрезмерно большое количество трудозатрат, то такой продукт либо будет иметь завышенную стоимость, либо выйдет на рынок слишком поздно.

На сегодняшний день наиболее удачные пути для разрешения этого компромисса были реализованы в разработке программного обеспечения, что и объясняет наибольшее

распространение гибких методологий ведения проектов, основанных на Scrum и Agile, именно в этой области [6, 7]. Современная разработка программного обеспечения в подавляющем большинстве случаев происходит не «с нуля», а на основе так называемых «фреймворков»: набора инструментов и библиотек программного кода, позволяющих в короткие сроки создавать новые программные продукты в той или иной предметной области.

Уже достаточно давно программистами используются операционные системы для абстрагирования от конкретного аппаратного обеспечения компьютера, на котором выполняется программный код. Современные кросс-платформные фреймворки позволяют сделать следующий шаг и абстрагировать программный код от операционной системы, на которой он запускается. В отдельных случаях фреймворк позволяет в принципе абстрагироваться от вычислительного устройства, на котором исполняется код, делая с точки зрения разработчика абсолютно одинаковым процесс организации вычислений и на мобильном устройстве, и на распределенном вычислительном кластере, состоящем из десятков отдельных серверов. Таким образом, проблема масштабирования будущего минимально жизнеспособного продукта сводится к выбору фреймворка, обладающего необходимым функционалом.

Высокий уровень абстракции, которым пользуются современные программисты прикладного программного обеспечения для персональных компьютеров и мобильных устройств, естественным образом повышает требования вычислительной мощности, необходимой для их исполнения, однако стремительное удешевление компьютерной техники создало условия, когда даже самые дешевые устройства обладают избыточными ресурсами как с точки зрения потребительских задач, так и с точки зрения запуска современных фреймворков.

Внедрение итерационной разработки систем управления роботов сопряжено с рядом дополнительных трудностей, связанных с необходимостью масштабирования и изменения функционала аппаратного обеспечения, главной из которых является трудоемкость внесения изменений в печатные платы при изменении функционала устройства. В отличие от аналогичных изменений в программном обеспечении, это, как правило, сопряжено с многочисленными временными и материальными затратами.

В качестве основного подхода к снижению себестоимости обновления аппаратного обеспечения систем управления большинство исследователей предлагают использовать модульный подход к его проектированию [8–16]. В системах промышленной автоматизации, где такой подход является основным, типоряды программируемых логических контроллеров, модулей ввода/вывода, сервоприводов уже стали своего рода аналогами фреймворков, применяемых в разработке программного обеспечения, с точки зрения обеспечения простоты масштабирования систем управления.

Внедрение модульных принципов разработки делает создание аппаратного обеспечения куда более гибким, но не решает всех существующих проблем. В подавляющем большинстве случаев под модулем системы управления понимается законченное устройство: сервопривод, блок ввода-вывода, логический контроллер, которое объединяется с остальными компонентами при помощи информационной сети, как правило, реализованной в виде той или иной полевой шины. Каждый модуль имеет свой функционал и реализующий его набор печатных плат, который может быть изменен только заменой модуля

целиком. Из модулей с одинаковым функционалом создаются типоряды, позволяющие в процессе масштабирования заменить вычислительное устройство на более мощное или при необходимости добавить дополнительный сервопривод. Таким образом, модуль становится минимальной единицей масштабирования системы: его можно заменить, убрать, добавить, но сам функционал аппаратного обеспечения этого модуля изменить нельзя.

Модульный подход вполне соответствует потребностям разработчиков при создании промышленных роботов и крупных робототехнических комплексов, однако у него присутствуют существенные ограничения при масштабировании «вниз». Так, использование типорядов программируемых логических контроллеров, применяемых в промышленной робототехнике, основано на использовании единой операционной системы с набором специализированных программных инструментов, которые абстрагируют прикладной программный код от конкретного аппаратного обеспечения. Однако, как отмечалось выше, такая программная абстракция требует дополнительных вычислительных ресурсов, которые становятся недоступны в миниатюрных роботах и малых беспилотных летательных аппаратах, где во главу угла ставятся минимальные габариты и энергопотребление, что часто заставляет использовать менее мощные вычислительные устройства и отказываться от использования операционных систем.

Одним из основных трендов развития современной робототехники является применение алгоритмов интеллектуального управления [17–19], которое делится на три уровня: стратегический, тактический и исполнительный. С точки зрения аппаратного обеспечения, наибольшим уровнем абстракции обладают алгоритмы стратегического уровня. Для их исполнения могут быть задействованы не только вычислительные устройства самого робота, но и дополнительные, расположенные в облаке [20, 21]. Алгоритмы тактического уровня используются для непосредственного формирования траекторий перемещения элементов робототехнического комплекса. Они, как правило, реализуются на центральном бортовом вычислителе в виде программного обеспечения и могут быть абстрагированы от аппаратного обеспечения операционной системой. Наибольшую сложность составляет реализация интеллектуальных алгоритмов управления исполнительного уровня, так как, с одной стороны, этот уровень предъявляет наиболее высокие требования к частоте обработки информации и формирования управляющего воздействия, а с другой стороны, данные алгоритмы реализуются на вычислительных устройствах отдельных модулей, которые, как правило, имеют существенно меньшую производительность по отношению к центральному бортовому вычислительному устройству и во многих случаях работают без операционной системы. Еще больше задача реализации интеллектуальных функций усложняется при создании миниатюрных роботов, когда все три уровня системы управления реализуются на базе одного устройства управления.

Также существенной проблемой при создании систем управления роботов является зависимость аппаратного обеспечения самих модулей от используемой элементной базы. Например, если модуль был основан на микроконтроллере одной серии, при необходимости перехода на микроконтроллеры другой серии приходится изменять и схемотехнику печатных плат, и программное обеспечение. Особенно актуально это для устройств управления исполнительного уровня, где из-за высоких требований к частоте обработки информации используется минимальное количество слоев абстракции.

Данная проблема усугубляется в задачах конверсии технологий между различными областями. Так, при попытке перенести удачное решение из аэрокосмической отрасли в машиностроение и наоборот, разработчик сталкивается с существенными различиями в применяемой элементной базе, связанными с разными требованиями к надежности устройств. В то же время существующие подходы не позволяют гибко управлять отказоустойчивостью отдельного модуля, позволяя при необходимости только переработать весь модуль с нуля на новой элементной базе.

В процессе получения компетенций в той или иной предметной области каждый разработчик накапливает свою библиотеку наиболее удачных решений, которая позволяет ему создавать новые продукты с минимальными трудозатратами. Современные методологии проектирования программного обеспечения позволяют сделать эти решения максимально независимыми от применяемого оборудования и операционной системы, в то время как существующий порядок вещей в разработке аппаратного обеспечения, напротив, делает разработчика зависимым от ранее использованной элементной базы. По сути, чем больше конкретный инженер использует микросхемы или иные аппаратные модули конкретного производителя, тем более дорогим и менее выгодным становится для него переход на другую элементную базу, даже если она обладает более высокими технико-экономическими характеристиками. Таким образом, элементная база превращается из параметра проекта, на который влияет разработчик, в фактор, оказывающий существенное влияние на весь ход разработки.

Особенную актуальность данная проблема получила в нашей стране, когда, помимо экономических факторов, на целесообразность использования тех или иных компонент влияние стали оказывать геополитические ограничения. Необходимо четко осознавать, что полномасштабный переход исключительно на отечественную элементную базу сейчас невозможен, как в силу существенно меньшей номенклатуры компонентов, так и в силу экономических факторов. В итоге разработчикам приходится одновременно поддерживать однотипные продукты, созданные на отечественных и зарубежных компонентах, без возможности автоматического применения результатов, полученных на одной элементной базе, к другой.

Для снижения издержек и сокращения сроков разработки новых систем управления роботами актуальным является создание новых единых методик к проектированию роботов различного типа и назначения, которые бы обеспечивали масштабируемость, необходимую для внедрения итерационных методологий проектирования, возможность использования алгоритмов интеллектуального управления как на стратегическом и тактическом, так и на исполнительном уровне, позволили бы гибко управлять соотношением между себестоимостью и отказоустойчивостью, предоставляли бы возможность непрерывной модернизации, позволяли бы в каждом проекте подбирать элементную базу исходя из технических, экономических и иных требований проекта с минимальной зависимостью от конкретных производителей и поставщиков. Первой задачей, которую необходимо решить для создания такой методологии, является обзор и анализ существующих и перспективных робототехнических систем различного масштаба и назначения с точки зрения обобщения основных тенденций в области проектирования роботов и требований, предъявляемых к их аппаратному и программному обеспечению.

Классификация роботов

На данный момент в робототехнике не существует единой всеобщей классификации, что связано с огромной номенклатурой разрабатываемых и производимых изделий по всему миру. Если не считать нанороботов [22] и биороботов [23], которые остались за пределами данной работы, современные робототехнические комплексы могут иметь размеры от десятков миллиметров до нескольких метров и быть предназначены для работы в различных отраслях – от машиностроения до космических исследований. На основе анализа широкого спектра работ [24–28], так и или иначе затрагивающих вопросы классификации в робототехнике, можно выделить три наиболее крупных класса по области применения: промышленная, сервисная и экстремальная робототехника. В каждом их этих классов существует разделение на мобильные и манипуляционные роботы. Мобильные роботы, в свою очередь, подразделяют на воздушные, наземные, морские и разносредные [24].

Проанализируем основные подходы к построению системы управления роботов каждого класса.

Промышленные манипуляционные роботы

Промышленные роботы – это самый распространенный класс [25] в робототехнике. Существенную его часть составляют манипуляционные роботы. Примеры промышленных роботов с различными кинематическими схемами представлены на рис. 2.

а) *б)* *в)*

Рис. 2. Манипуляционные промышленные роботы:
а) ABB IRB 4600, ангулярная кинематическая схема;
б) Fanuc M-1, кинематическая схема Дельта; в) Comau Rebel-S, кинематическая схема Скара.

Системы управления таких роботов, как правило, имеют схожую структуру [11, 29–41], которая в обобщенном виде представлена на рис. 3. Для управления отдельными степенями подвижности используются промышленные сервоприводы, на базе которых реализованы регуляторы исполнительного уровня. Сервоприводы подключаются к устройству управления тактического уровня, которое может быть выполнено на базе программируемого логического контроллера [32] или промышленного компьютера [29]. В отдельных случаях в качестве устройства управления тактического уровня используется обычный персональный компьютер [34, 37]. Главной задачей данного устройства управления является формирование в каждый момент времени целевых значений скорости и положения для каждого из сервоприводов с учетом кинематики и динамики

робота. Датчики скорости и положения подключаются, как правило, непосредственно к сервоприводам, в то время как остальные средства очувствления: система технического зрения, силомоментные датчики инструмента, световые барьеры рабочей зоны робота и т. д. объединяются в систему очувствления, которая подключается непосредственно к устройству управления тактического уровня. Для связи между устройством управления тактического уровня, сервоприводами и системой очувствления используется одна из промышленных полевых шин на базе RS485, CAN или Ethernet, работающая в режиме реального времени. Сложные датчики, такие, как система технического зрения, имеют встроенный интерфейс к одной или нескольким полевым шинам, в то время как более простые средства очувствления подключаются при помощи контроллеров шин, оснащенных дискретными и, реже, аналоговыми входами.

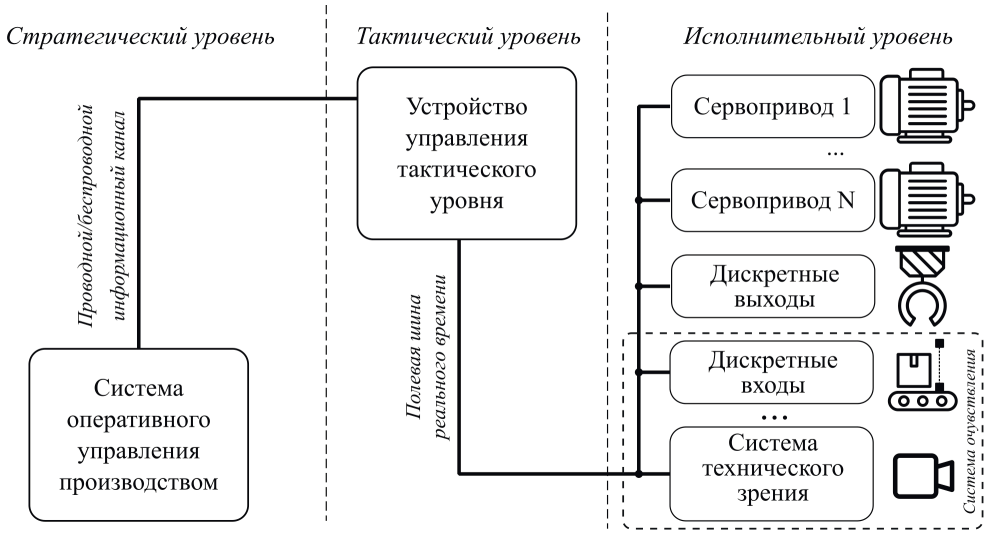

Рис. 3. Обобщенная структурная схема системы управления манипуляционного промышленного робота.

Для задания траектории движения рабочего органа робота и управления его дополнительным оборудованием используются как команды, поступающие по внешним сетевым интерфейсам, так и управляющие программы, реализованные на одном из задачно-ориентированных языков программирования (ARPS, RAPID, KRL и др.) или в форме G-кодов. В последнем случае на устройстве управления тактического уровня должна быть реализована система числового программного управления. В подавляющем большинстве случаев на устройстве управления тактического уровня используется операционная система для абстрагирования программного обеспечения от конкретной элементной базы. Чаще всего в качестве операционной системы используется система реального времени VxWorks [29, 31, 38–40] и Linux с патчем реального времени [41, 42], реже операционные системы на базе Windows [36]. Все элементы системы управления, вне зависимости от габаритов робота, в подавляющем большинстве случаев размещают в отдельном блоке или стойке управления.

Мобильные промышленные роботы

Промышленная мобильная робототехника в подавляющем большинстве случаев представлена наземными транспортными роботами для сборочных (рис. 4, а) и обрабатывающих производств (рис. 4, в), а также автоматизированных систем складского хранения (рис. 4, б).

а) *б)* *в)*

Рис. 4. Мобильные промышленные роботы:
Omron Lynx (а); Divel DAV 4000-GS (б); KUKA KMP 600 (в).

Типовая структура системы управления промышленного мобильного робота (рис. 5) сходна с аналогичной структурой для манипуляционных роботов (рис. 3). Отличие состоит, в первую очередь, в наличии навигационной системы и преимущественном использовании беспроводного канала связи с системами управления производством на стратегическом уровне. С точки зрения элементной базы, также как и в манипуляционных роботах, в промышленной мобильной робототехнике в качестве устройства управления тактического уровня используются программируемые логические контроллеры и промышленные компьютеры [43–45]. В качестве сервоприводов и датчиков используются стандартные промышленные решения, а для их соединения с устройством управления тактического уровня активно применяются полевые шины [43–46]. В то же время относительно малое количество датчиков и исполнительных устройств мобильного робота в отдельных случаях позволяет подключать все компоненты непосредственно к промышленному компьютеру [47] или программируемому логическому контроллеру [48]. В отличие от манипуляционных, в мобильных промышленных роботах элементы системы управления располагаются непосредственно на самом роботе, однако размеры даже самых миниатюрных промышленных транспортных роботов [44] позволяют использовать элементную базу, аналогичную манипуляционным промышленным роботам.

Интеллектуальное и групповое управление в промышленной робототехнике

В течение двух последних десятилетий исследователи многократно демонстрировали возможность и эффективность внедрения интеллектуальных функций на всех уровнях систем управления промышленных роботов [17, 55–65]. Тем не менее, сегодня можно констатировать, что подавляющее большинство роботов, присутствующих на рынке, до сих пор используют каскадные линейные регуляторы на исполнительном уровне и аналитические методы решения кинематических задач на тактическом уровне. Это связано с тем, что за долгие годы развития промышленной робототехники были найдены удачные инженерные решения, которые в большинстве производственных задач позволяют получить требуемое качество управления без применения интеллектуальных систем. На сегодняшний день наиболее перспективными областями для применения интеллектуаль-

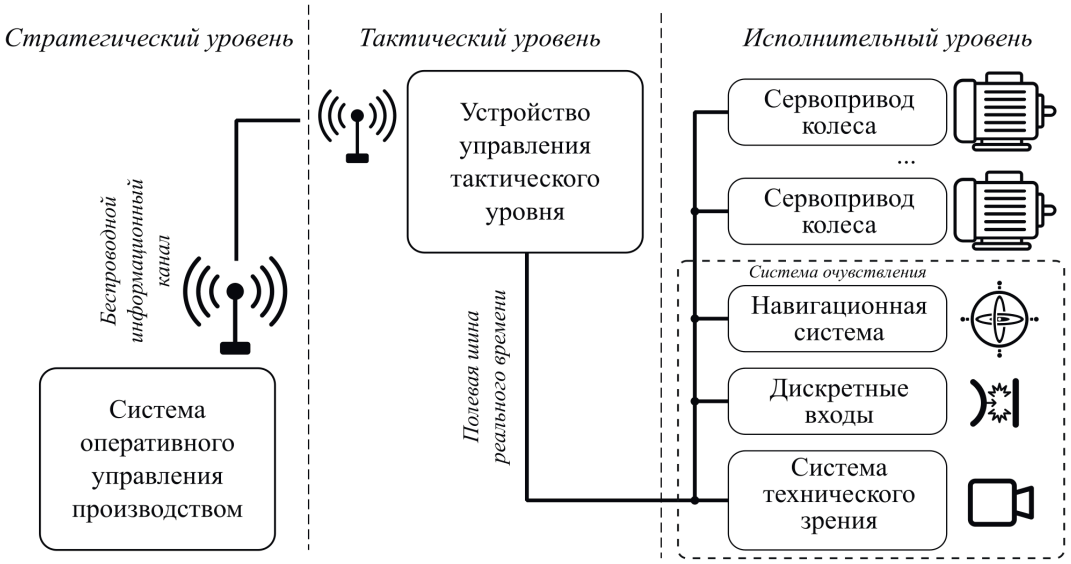

Рис. 5. Обобщенная структурная схема системы управления мобильного промышленного робота.

ных технологий в промышленных роботах являются системы человеко-машинного интерфейса и стратегический уровень управления роботом [55, 56, 66].

Задачи группового взаимодействия нескольких роботов, имеющих различные системы управления в промышленной робототехнике, в большинстве случаев решаются на этапе проектирования технологического процесса и соответствующих технологических программ. Так, для нескольких манипуляторов, работающих в одной рабочей области, при помощи специального программного обеспечения заранее создаются траектории, исключающие столкновение [67, 68]. Синхронизация роботов между собой чаще всего осуществляется при помощи дискретных входов/выходов, реже – при помощи обмена по цифровым информационным каналам. При этом моменты ожидания дискретного сигнала и способ реакции промышленного робота на него строго описываются в технологической программе. Для моделирования группового взаимодействия нескольких роботов ведущие производители роботов разрабатывают специализированные симуляторы, такие, как ABB RobotStudio [69]. Аналогично обстоит ситуация и в промышленной мобильной робототехнике, где задачи одновременного функционирования нескольких роботов на одной территории решаются за счет предварительного планирования траекторий [70].

Распределение заданий между роботами и выбор конкретных технологических программ даже в гибких промышленных производственных системах долгое время оставались строго детерминированными и централизованными и осуществлялись на основе глобального планирования. Однако с развитием концепции Индустрии 4.0 все большее распространение получают децентрализованные подходы, основанные на распределенном хранении информации о технологическом процессе и выборе конкретных управляющих программ непосредственно на самом робототехническом комплексе [50, 71, 72]. При этом робот может считывать необходимую информацию о требуемых операциях и текущей стадии производства продукта как из облачного хранилища данных, так и из меток системы радиочастотной идентификации (RFID), размещенных непосредственно на самом продукте.

Обеспечение отказоустойчивости в промышленной робототехнике

Обеспечение непрерывности производственного процесса является крайне важным для большинства роботизированных производств, особенно когда речь идет о массовом крупносерийном производстве. Выход из строя даже одного робота может приводить к простою всей линии и генерировать существенные убытки. В то же время отказоустойчивости в промышленной робототехнике уделяется очень мало внимания. Анализ коммерческих продуктов ведущих производителей, таких, как ABB [73], KUKA [74], FANUC [75], а также научных работ, посвященных созданию систем управления промышленных роботов [17, 25, 29–35, 37–40, 42–45, 47], показывает, что ни одна из рассмотренных систем управления не содержит дублирования компонентов или иных аппаратно-программных решений, направленных на обеспечение функционирования робота после отказа. Напротив, большинство систем управления в промышленной робототехнике осуществляют полную остановку робота в случае любого подозрения на нештатное функционирование любого из ее элементов. Причинами такого положения вещей является, с одной стороны, желание производителей и пользователей промышленных роботов избежать скрытого брака, а, с другой стороны, постоянная доступность роботов для технического обслуживания (в отличие, например, от космической робототехники). Последнее позволяет при помощи мер организационного характера заранее выводить роботов из производственного процесса на техническое обслуживание и вместо сохранения работоспособности после отказа работать над заблаговременным предотвращением неисправностей. В связи с этим главным направлением исследований в области промышленной робототехники, связанных с обеспечением отказоустойчивости, является интеллектуальное предсказание неисправностей [76–78], которое позволяет перейти от проведения регламентных работ по расписанию к их проведению по мере фактического износа оборудования и тем самым сократить время потенциального простоя оборудования.

Массогабаритные требования к системам управления промышленных роботов

Анализ систем управления промышленных манипуляционных роботов от ведущих производителей [73–75] показывает, что все они имеют достаточно существенные габаритные размеры. Как правило, один и тот же блок управления совместим с несколькими роботами различных типоразмеров. При этом для роботов малой грузоподъемности размер устройства управления может превышать габариты самого робота. Блоки управления промышленных манипуляционных роботов, как правило, размещаются вне рабочей зоны робота в шкафу управления или сами представляют собой отдельно стоящий шкаф управления. В таких условиях разработчики в первую очередь решают проблемы обеспечения необходимого охлаждения всех элементов управления и снижения себестоимости, в то время как жесткие требования на габаритные размеры системы управления фактически отсутствуют.

Для мобильной робототехники проблема габаритных размеров устройств управления должна стоять более остро, так как все компоненты системы управления должны располагаться на борту робота. Однако анализ работ по этой тематике [39, 43, 44, 47, 48, 70] показывает, что разработчики используют для создания систем управления мобильных

роботов стандартные компоненты промышленной автоматизации (программируемые логические контроллеры, промышленные компьютеры, сервоприводы и т. д.), не занимаясь серьезно оптимизацией массогабаритных размеров. Это обусловлено в первую очередь тем, что размеры промышленных роботов ограничены габаритами и массой перевозимых ими грузов, и даже для самых малых роботов, применяемых на производстве, они достаточны для размещения систем управления без использования специализированных миниатюрных аппаратных решений.

Основные тенденции в области создания систем управления промышленными роботами

Резюмируя проведенный анализ основных тенденций в области создания систем управления промышленными роботами, можно сделать следующие выводы:

а) Масштабирование в промышленной робототехнике достигается за счет использования модульного принципа построения систем управления и типорядов основных компонентов, совместимых между собой за счет унифицированных интерфейсов информационного обмена на основе полевых шин, а также единой операционной системы для промышленных вычислительных устройств одного производителя. Групповое взаимодействие нескольких промышленных роботов организуется в большинстве случаев за счет централизованного глобального планирования. В последнее время получают распространение децентрализованные подходы к распределению задач в промышленной робототехнике, но и они основаны на использовании заранее созданных и промоделированных управляющих программ, исключающих возможные коллизии при работе нескольких роботов в одной рабочей зоне.

б) Несмотря на обилие работ, интеллектуальные технологии в промышленной робототехнике находят применение, в первую очередь, на стратегическом уровне системы управления, который, как правило, исполняется вне режима реального времени, а в отдельных случаях вынесен из блока управления роботом в виде удаленного облачного сервиса.

в) Обеспечению высокой отказоустойчивости в промышленной робототехнике уделяется крайне мало внимания. Разработчики в первую очередь сосредоточены на заблаговременном предсказании неисправностей для планового вывода робота из эксплуатации, чем на сохранении его работоспособности в случае каких-либо сбоев.

г) Относительно большие габариты мобильных роботов и традиционное размещение блоков управлений манипуляционных роботов в отдельных стойках не предъявляет в промышленной робототехнике высоких требований к массогабаритным размерам применяемой элементной базы.

Список литературы / References:

1. Неретина Е.А., Бочкина О.Н. Управление проектами на основе SCRUM методологии. *Управление экономическими системами: электронный научный журнал.* 2017;4(98):31.

[Neretina E.A., Bochkina O.N. Project management based on SCRUM methodology. *Upravlenie ehkonomicheskimi sistemami: elektronnyi nauchnyi zhurnal* = Management of Economic Systems: Electronic Scientific Journal. 2017;4(98):31 (in Russ.).]

2. Schwaber K., Beedle M. Agile software development with Scrum. Upper Saddle River. New Jersey: Prentice Hall, 2002. V. 1. 158 p.

3. Чичагов А.В. Agile-модель НИОКР в области компьютерного моделирования систем цифровой обработки сигналов. *Вопросы инновационной экономики.* 2017;7(1):59-84. http://dx.doi.org/10.18334/vinec.7.1.37491

[Chichagov A.V. Agile R&D model in the computer simulation of DSP systems. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki* = Russian Journal of Innovation Economics. 2017;7(1):59-84 (in Russ.). http://dx.doi.org/10.18334/vinec.7.1.37491]

4. Семенов С.Г., Халифе К., Захарченко М.М. Усовершенствованный способ масштабирования гибкой методологии разработки программного обеспечения. *Сучасні інформаційні системи.* 2017;1(1):79-84. http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2017.1.15

[Semenov S., Khalifeh K., Zakharchenko M. Advanced method of scaling the flexible methodology of software development. *Suchasni informacijni sistemi* = Advanced Information Systems. 2017;1(1):79-84 (in Russ). http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2017.1.15]

5. Buffardi K., Robb C., Rahn D. Learning Agile with tech startup software engineering projects. *Proceedings of the 2017 ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education.* ACM, 2017:28-33. https://doi.org/10.1145/3059009.3059063

6. Schwaber K. Agile project management with Scrum. Microsoft press, 2004. 175 p. ISBN 073561993x

7. VersionOne Inc., 12th Annual State of Agile Report, 2018 – [Electronic resource]. URL: https://explore.versionone.com/state-of-agile/versionone-12th-annual-state-of-agile-report

8. Лопота А.В., Юревич Е.И. Этапы и перспективы развития модульного принципа построения робототехнических систем. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление.* 2013;(1(164)):98-103

[Lopota A.V., Yurevich E.I. Stages and development prospects of robotic systems design modular principle. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikacii Upravlenie* = St. Petersburg Polytechnic University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems. 2013;(1(164)):98-103 (in Russ.).]

9. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Основы проектирования интегрированных мехатронных модулей. *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2007;(3):2-5.

[Egorov O.D., Poduraev Yu.V. The bases of design of integrated mechatronical modules. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2007;(3):2-5 (in Russ.).]

10. Андреев В.П., Ким В.Л., Подураев Ю.В. Сетевые решения в архитектуре гетерогенных модульных мобильных роботов. *Робототехника и техническая кибернетика.* 2016;(3(12)):23-29.

[Andreev V.P., Kim V.L., Poduraev Yu.V. Network-based design of heterogeneous modular robotic systems. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* = Robotics and Technical Cybernetics. 2016;(3(12)):23-29 (in Russ.).]

11. Мартинов Г.М., Мартинова Л.И., Козак Н.В., Нежметдинов Р.А., Пушков Р.Л. Принципы построения распределенной системы ЧПУ технологическими машинами с использованием открытой модульной архитектуры. *Справочник. Инженерный журнал.* 2011;(12):44-50.

[Martinov G.M., Martinova L.I., Kozak N.V., Nezhmetdinov R.A., Poushkov R.L. Principles of building distributed CNC-system for technological machines using an open modular architecture. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal* = Handbook. An Engineering Journal with appendix. 2011;(12):44-50 (in Russ.).]

12. Егунов В.А., Потапов М.И. Модульная система управления мобильным роботом. *Материалы X юбилейной международной научно-практической конференции «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий» (ИНФО-2013).* М.: МИЭМ, НИУ ВШЭ. 2013;1:418-419.

[Egunov V.A., Potapov M.I. Modular control system of mobile robot. *Proceedings of the X Anniversary International Scientific and Practical Conference "Innovations Based on Information and Communication Technologies" (INFO-2013).* Moscow. 2013;1:418-419 (in Russ.).]

13. Павловский В.Е., Павловский В.В. Модульная микроконтроллерная система управления роботами РОБОКОН-1. *Препринты Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.* 2012;(86): 32 с. URL: https://keldysh.ru/papers/2012/prep2012_86.pdf

[Pavlovsky V.E., Pavlovsky V.V. Modular microcontroller robots control system ROBOCON-1. *Preprints of the M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS.* 2012;(86): 32 p. (in Russ.). URL: https://keldysh.ru/papers/2012/prep2012_86.pdf]

14. Yim M., Roufas K., Duff D. Modular reconfigurable robots in space applications. *Autonomous Robots.* 2003;14(2-3):225-237. https://doi.org/10.1023/A:1022287820808

15. Gwiazda A., Banas W., Sekala A., Foit K., Hryniewicz P., Kost G. Modular industrial robots as the tool of process automation in robotized manufacturing cells. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* IOP Publ., 2015;95(1):012104-1-6. https://doi.org/10.1088/1757-899X/95/1/012104

16. Ahmadzadeh H., Masehian E., Asadpour M. Modular robotic systems: Characteristics and applications. *J. Intel. & Robotic Systems.* 2016;81(3-4):317-357. https://doi.org/10.1007/s10846-015-0237-8

17. Макаров И.М., Лохин В.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. М.: Физматлит, 2001. 576 с. ISBN 5-9221-0162-5

[Makarov I.M., Lokhin V.M. Intelligent automatic control systems. Moscow: Fizmatlit Publ., 2001. 576 p. (in Russ.). ISBN 5-9221-0162-5]

18. Valavanis K.P., Saridis G.N. Intelligent robotic systems: Theory, design and applications. Springer Science & Business Media, 2012. 252 p. ISBN 1-461-36585-6

19. Lai R., Lin W., Wu Y. Review of research on the key technologies, application fields and development trends of intelligent robots. In: *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robotics and Applications.* Springer, Cham, 2018, pp. 449-458. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97589-4_38

20. Aguiar R.L., Gomes D., Barraca J.P., Lau N. Cloud thinking as an intelligent infrastructure for mobile robotics. *Wireless Personal Commun.* 2014;76(2):231-244. https://doi.org/10.1007/s11277-014-1687-1

21. Kehoe B., Patil S., Abbeel P., Goldberg K. A survey of research on cloud robotics and automation. *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering.* 2015;12(2):398-409. https://doi.org/10.1109/TASE.2014.2376492

22. Bordoloi P., Shahira S., Ramesh A., Thomas B. Nanorobotic wonders: A revolutionary era in periodontics. *Indian Journal of Multidisciplinary Dentistry.* 2018;8(2):101-105. https://doi.org/10.4103/ijmd.ijmd_29_18

23. Mohseni P., Nagarajan K., Ziaie B., Crary S.B. Robotics at the Interface of microsystems technology and biology: Biobotics. In: *Proceedings of the Russian-Academy-Workshop on Robotics and Automation.* Moscow, November 1999. P. 78-82.

24. Донченко А.А., Хрипунов С.В., Чиров Д.С. [и др.] Робототехнические средства, комплексы и системы военного назначения. Основные положения. Классификация. Методические рекомендации. М.: ФГБУ «ГНИИЦ РТ» МО РФ, 2015. 34 с.

[Donchenko A.A., Hripunov S.V., Chirov D.S. [et al.] Robotic equipment, complexes and military systems. The main provisions. Classification. Guidelines. Moscow: “GNIICR” RF MO (Main Research and Testing Center for Robotics of the Ministry of Defense of the Russian Federation), 2014. 34 p. (in Russ.).]

25. Юревич Е.И. Основы робототехники, 4-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2018. 293 с.

[Yurevich E.I. Basics of Robotics, 4th ed. Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 2018. 293 p. (in Russ.).]

26. Zielinska T.T. History of service robots and new trends. In: Novel Design and Applications of Robotics Technologies. IGI Global, 2019:158-187. https://doi.org/10.4018/978-1-5225-5276-5.ch006

27. Kumar V., Bekey G., Zheng Y. Industrial, personal and service robots. In: Assessment of International Research and Development in Robotics. Ed. G. Bekey. World Technology Evaluation Center, Lancaster, 2006. P. 41-48. http://www.wtec.org/robotics/report/05-Industrial.pdf

28. Лопота В.А., Юревич Е.И. Экстремальная робототехника и мехатроника. Принципы и перспективы развития. *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2007;4:37-42.

[Lopota V.A., Yurevich E.I. Extreme robotics and mechatronics. Principles and perspectives of development. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2007;4:37-42 (in Russ.).]

29. Gattringer H., Riepl R., Neubauer M. Optimizing industrial robots for accurate high-speed applications. *Journal of Industrial Engineering.* 2013; Volume 2013, Article ID 625638, 12 p. http://dx.doi.org/10.1155/2013/625638

30. Industrial robotics: Programming, simulation and applications. Ed. Kin-Huat Low. Singapore: Nanyang Technological University, 2006. 383 p. http://dx.doi.org/10.5772/40. ISBN 3-86611-286-6

31. Романов А.М., Кистанова В.А. Система управления манипуляционного робота PUMA-560 на базе современной промышленной электроники. *Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации: Сб. трудов XXIII Междунар. науч.-техн. семинара.* Алушта, 14–20 сентября 2014 г. М.: ИКД Зерцало-М, 2014. С. 59. ISBN 978-5-94373-299-7

[Romanov A.M., Kistanova V.A. PUMA-560 control system based on modern industrial electronics. In: *Modern Technologies in Control, Automation and Information Processing Problems: Proceedings of the XXIII International Scientific and Technical Seminar.* Alushta, September 14–20, 2014. Moscow: Zertsalo-M Publ., 2014. P. 59 (in Russ.). ISBN 978-5-94373-299-7]

32. Kraus W., Schmidt V., Rajendra P., Pott A. System identification and cable force control for a cable-driven parallel robot with industrial servo drives. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).* IEEE, 2014, pp. 5921-5926. http://dx.doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907731

33. Cao X., Zhao Y., Yang Z., Wang J., Jia P. An open industrial robot based on SERCOS. In: *Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation* (Cat. No. 02EX527). IEEE, 2002;2:1466-1470. https://doi.org/10.1109/WCICA.2002.1020827

34. Luo S., Zhu S. Open architecture multi-axis motion control system for industrial robot based on can bus. In: *Proceedings of the International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence (ACAI 2012)*. 2012, pp. 1471-1475. http://dx.doi.org/10.1049/cp.2012.1259

35. Шаповалов А. А., Курмашев А. Д. Контурная система согласованного управления промышленным роботом // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроник*и. 2012;(1(25)):245-250.

[Shapovalov A.A., Kurmashev A.D. Contouring system of coordinated control of an industrial robot. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioehlektroniki* = Proceedings of the Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics. 2012;(1(25)):245-250 (in Russ.).]

36. Wang K., Zhang C., Xu X., Ji S., Yang L. A CNC system based on real-time Ethernet and Windows NT. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013;65(9-12):1383-1395. https://doi.org/10.1007/s00170-012-4264-3

37. Романов А.М. Универсальная модульная многопроцессорная система управления манипуляционного робота. *Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации. Труды XVI Междунар. науч.-техн. семинара.* Алушта, сентябрь 2007 г. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. С. 164.

[Romanov A.M. Universal modular multiprocessor control system for robot manipulator. In: *Modern Technologies in Control, Automation and Information Processing Problems: Proceedings of the XVI International Scientific and Technical Seminar.* Alushta, September, 2007. Tula: TulGU (Tula State University) Publ., 2007. P. 164 (in Russ.).]

38. Salt J., Valera Á., Cuenca Á., Ibañez A. Industrial robot multirate control with the VxWorks real-time operating system. *IFAC Proceedings Volumes.* 2000;33(6):17-21. http://dx.doi.org/10.1016/S1474-6670(17)35441-1

39. Scheurer C., Fiore M.D., Sharma S., Natale C. Industrial implementation of a multi-task redundancy resolution at velocity level for highly redundant mobile manipulators. In: *Proceedings of 47st International Symposium on Robotics (ISR 2016)*. 2016, pp. 1-9.

40. Heilala J. Open real-time robotics control-PC hardware, Windows/VxWorks operating systems and communication. 2001. URL: http://aut-pc29.hut.fi/kurssit/as-116-140/sem_s01/heilala.pdf.

41. Huayun L., Jinsong Y.K.W. Open-architecture CNC system based on RTLinux [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique. 2001. V. 7.

42. Aroca R.V., Tavares D.M., Caurin G. Scara robot controller using real time linux. In: *2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics.* 2007, pp. 1-6. https://doi.org/10.1109/AIM.2007.4412544

43. Armesto L., Torres J. C., Tornero J. Hardware architectures for mobile robots. In: *IFAC Proceedings Volumes*. 2003;36(17):375-380. http://dx.doi.org/10.1016/S1474-6670(17)33423-7

44. Kucsera P. Industrial component-based sample mobile robot system. *Acta Polytechnica Hungarica.* 2007;4(4):69-81.

45. Delgado R., Kim S-Y., You B-J., Choi B-W. An EtherCAT-based real-time motion control system in mobile robot application. In: *2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*. 2016, pp. 710-715. https://doi.org/10.1109/URAI.2016.7734098

46. Nunes U., Fonseca A., Almeida L., Araújo R. Fieldbuses in real-time control of autonomous vehicles. ROBOTICA, *Special Issue on Cost Effective Automation.* 2003:22(Part 4).

47. Wang J., Chen T- Z., Liu C.-Y., Ye S.-G. Design of automatic guided vehicles based on computer control. *Adv. Materials Res.* 2012;569:776-780. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.569.776

48. Saffar S., Jafar F. A., Jamaludin Z. Development of PLC based navigation system for mobile robot. *J. Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC).* 2016;8(2):29-33.

49. Wang X.V., Wang L., Alkhdur A.-M.-A., Givehchi M. Ubiquitous manufacturing system based on Cloud: A robotics application. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* 2017;45:116-125. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.01.007

50. Романов М.П., Романов А.М., Каширская Е.Н., Холопов В.А., Харченко А.И. Новая архитектура исполнительного уровня для систем управления дискретным машиностроительным производством. *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2017;18(1):64-72. https://doi.org/10.17587/mau.18.64-72

[Romanov M.P., Romanov A.M., Kashirskaya E.N., Kholopov V.A., Kharchenko A.I. A novel architecture for the executive-level control systems for a discrete machinery production. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2017;18(1):64-72 (in Russ.). https://doi.org/10.17587/mau.18.64-72]

51. Campos J. G., Miguez L. R. Standard process monitoring and traceability programming in collaborative CAD/CAM/CNC manufacturing scenarios. *Computers in Industry.* 2011;62(3):311-322. http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2010.09.003

52. Zaera M., Esteve M., Palau C.E., Guerri J.C., Martinez F.J., de Cordoba P.F. Real-time scheduling and guidance of mobile robots on factory floors using Monte Carlo methods under windows NT. In: *ETFA 2001. 8th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation.* Proceedings (Cat. No. 01TH8597). 2001, pp. 67-74. https://doi.org/10.1109/ETFA.2001.996355

53. Cardarelli E., Sabattini L., Digani V., Secchi C. Interacting with a multi AGV system. In: *2015 IEEE*

International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP). 2015, pp. 263-267. https://doi.org/10.1109/ICCP.2015.7312641

54. Chen X., Lin W., Liu J., Guan L., Zheng Y., Gao F. Electromagnetic guided factory intelligent AGV. In: *2016 3rd International Conference on Mechatronics and Information Technology.* 2016. https://dx.doi.org/10.2991/icmit-16.2016.36

55. Pedersen M.R., Nalpantidis L., Andersen R.S., Schou C. Robot skills for manufacturing: From concept to industrial deployment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* 2016;37:282-291. http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2015.04.002

56. Fanti M.P., Mangini A.M., Pedroncelli G., Ukovich W. A decentralized control strategy for the coordination of AGV systems. *Control Engineering Practice.* 2018;70:86-97. http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.10.001

57. Каляев И.А., Лохин В.М., Макаров И.М., Манько С.В. Интеллектуальные роботы: учебное пособие для вузов / Под общ. ред. Е.И. Юревича. М.: Машиностроение, 2007. 360 с. ISBN 5-217-03339-8

[Kalyaev I.A., Lokhin V.M., Makarov I.V., Man'ko S.V. Intellectual robots. Ed. by E.I. Yurevich. Moscow: Machinostroenie Publ., 2007. 360 p. (in Russ.). ISBN 5-217-03339-8]

58. Романов М.П. Нечеткий регулятор исполнительной подсистемы робота "ROBAS-SCARA". *Вестник МГТУ МИРЭА*. 2015;(3-1):41-59.

[Romanov M.P. Fuzzy controller of the robot subsystem "ROBAS-SCARA". *Vestnik MGTU MIREA* = Herald of MSTU MIREA. 2015;(3-1):41-59 (in Russ.).]

59. Tarn T.J., Bejczy A.K., Xi N. Intelligent motion planning and control for robot arms. *IFAC Proceedings Volumes.* 1993;26(2):677-680. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-58021-5_17

60. Kiguchi K., Fukuda T. Intelligent position/force controller for industrial robot manipulators-application of fuzzy neural networks. *IEEE Trans. on Industrial Electronics.* 1997;44(6):753-761. https://doi.org/10.1109/41.649935

61. De Silva C.W. Intelligent control: Fuzzy logic applications. CRC press, 2018. 368 p. ISBN 9780203750513.

62. Sahoo B., Parhi D.R., Priyadarshi B.K. Analysis of path planning of humanoid robots using neural network methods and study of possible use of other AI techniques. In: *Emerging Trends in Engineering, Science and Manufacturing (ETESM-2018).* IGIT, Sarang, India, 2018. 16 p.

63. Yen V.T., Nan W.Y., Cuong P.V., Quynh N.X., Thich V.H. Robust adaptive sliding mode control for industrial robot manipulator using fuzzy wavelet neural networks. *Int. J. Control., Automation and Systems.* 2017;15(6):2930-2941. https://doi.org/10.1007/s12555-016-0371-5

64. Simão M., Neto P., Gibaru O. Natural control of an industrial robot using hand gesture recognition with neural networks. In: *IECON 2016 – 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.* IEEE, 2016, pp. 5322-5327. https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793333

65. Varagul J., Ito T. Simulation of detecting function object for AGV using computer vision with neural network. *Procedia Computer Science.* 2016;96:159-168. https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.08.122

66. Oliff H., Liu Y., Kumar M., Williams M. A framework of integrating knowledge of human factors to facilitate HMI and collaboration in intelligent manufacturing. *Procedia CIRP.* 2018;72(1):135-140. http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.047

67. Gan Y., Dai X., Li D. Off-line programming techniques for multirobot cooperation system. *Int. J. Advanced Robotic Systems.* 2013;10(7):282-299. http://dx.doi.org/10.5772/56506

68. Евгенев Г.Б., Крюков С.С., Частухин А.В. Обрабатывающие робототехнологические комплексы в машиностроении. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение.* 2017;(5(686)):60-71. http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2017-5-60-71

[Evgenev G.B., Kryukov S.S., Chastukhin A.V. Machining robot-technological complexes in mechanical engineering. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie* = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 2017;(5(686)):60-71 (in Russ.). http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2017-5-60-71]

69. Connolly C. Technology and applications of ABB RobotStudio. *Industrial Robot: An International Journal.* 2009;36(6):540-545. http://dx.doi.org/10.1108/01439910910994605

70. Schneier M., Bostelman R. Literature review of mobile robots for manufacturing. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2015. 17 p. http://dx.doi.org/10.6028/NIST.IR.8022

71. Pěchouček M., Mařík V. Industrial deployment of multi-agent technologies: Review and selected case studies. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems.* 2008;17(3):397-431. http://dx.doi.org/10.1007/s10458-008-9050-0

72. Wang S., Wan J., Zhang D., Li D. Towards smart factory for industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer Networks.* 2016;101:158-168. http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.017

73. ABB, Robotics Controllers – [Electronic resource]: access mode – free (accessed date: 09/16/2019). URL:

https://new.abb.com/products/robotics/controllers

74. KUKA AG, Robot controllers – [Electronic resource]: access mode – free (accessed date: September 16, 2019). URL:https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/robot-controllers

75. FANUC, Robot Controllers – [Electronic resource]: access mode – free (accessed date: September 16, 2019). URL: https://www.fanucamerica.com/products/robots/controllers/other-fanuc-robot-controllers

76. Vogl G.W., Weiss B.A., Helu M. A review of diagnostic and prognostic capabilities and best practices for manufacturing. *J. Intel. Manufact.* 2019;30(1):79-95. https://doi.org/10.1007/s10845-016-1228-8

77. Weiss B. A., Klinger A. S. Identification of industrial robot arm work cell use cases and a test bed to promote monitoring, diagnostic, and prognostic technologies. *Proceedings of the 2017 Annual Conference of the Prognostics and Health Management (PHM) Society.* 2018, pp.1-9.

78. Jaber A.A., Bicker R. Development of a condition monitoring algorithm for industrial robots based on artificial intelligence and signal processing techniques. *Int. J. Electrical & Computer Engineering.* 2018;8(2):996-1009. https://doi.org/10.11591/ijece.v8i2.pp996-1009

Об авторе:

Романов Алексей Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры биокибернетических систем и технологий Института кибернетика ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78).

About the author:

Aleksey M. Romanov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Chair of Biocybernetics Systems and Technologies, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).