

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32>



УДК 004.896, 621.865.8

Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботом различного масштаба и назначения. Часть 3. Экстремальная робототехника

А.М. Романов

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

В работе проводится обзор роботов различного масштаба и назначения. В ходе обзора анализируются применяемые аппаратные и программные решения и обобщаются наиболее распространённые 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 разным классам роботов. Целью работы является поиск общих подходов, применяемых в различных областях робототехники для построения на их основе единой методологии проектирования масштабируемых интеллектуальных систем управления роботом с заданным уровнем отказоустойчивости на унифицированной элементной базе. Данная часть посвящена экстремальной робототехнике и обобщению выводов по всему циклу работ. В работе отмечается возможность и необходимость развития единых подходов к созданию роботов различного масштаба и назначения. Отмечается, что в отличие от многих зарубежных стран, в Российской Федерации надо учитывать серьезные ограничения на элементную базу, которые не позволяют свободно проводить конверсию технологий между гражданской, военной и космической робототехникой. В связи с этим, предлагается провести анализ взаимозаменяемой российской и зарубежной элементной базы, выделить технические решения в области создания элементов систем управления и организации информационного обмена между ними, которые могли бы быть реализованы как на зарубежной, так и на отечественной элементной базе, и на их основе создать концептуальную модель масштабируемой интеллектуальной системы управления с заданным уровнем отказоустойчивости на унифицированной элементной базе.

Ключевые слова: робототехника, экстремальная робототехника, подводные роботы, космические роботы, военные роботы.

Для цитирования: Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Часть 3. Экстремальная робототехника. *Российский технологический журнал*. 2020;8(3):14-32. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32>

A review on control systems hardware and software for robots of various scale and purpose. Part 3. Extreme robotics

Aleksey M. Romanov

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

A review of robotic systems is carried out. 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 of 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 extreme robotics and the generalization of the conclusions for the whole review. The paper notes the possibility and necessity of developing common approaches to the creation of robots of various sizes and purposes. It is noted that, in contrast to many foreign countries, in the Russian Federation developers must consider the serious limitations on the electronics components, which do not allow for the free conversion of technologies between civilian, military and space robotics. In this regard, it is proposed to analyze the interchangeable Russian and foreign microelectronic components, to find technical solutions in the field of the control systems and communication between them, which could be implemented both in foreign and Russian microelectronics, and to create on their basis a conceptual model of scalable intelligent control system with a required level of fault tolerance. The model should be based on a unified set of components.

Keywords: robotics, extreme robotics, underwater robots, space robots, military robots.

For citation: Romanov A.M. A review on control systems hardware and software for robots of various scale and purpose. Part 3. Extreme robotics. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(3):14-32 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32>

Введение

Целью данного цикла работ 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.

На основе анализа широкого спектра работ [1–6], так и или иначе затрагивающих вопросы классификации в робототехнике, было выделено три наиболее крупных класса роботов по области применения: промышленная, сервисная и экстремальная робо-

техника. Данная часть посвящена обзору и анализу решений в области экстремальной робототехники, а также обобщению выводов по всему циклу работ.

Экстремальная робототехника

К экстремальной робототехнике относятся роботы, предназначенные для работ в опасных и вредных для человека условиях, а также в ситуациях, когда присутствие человека исключается. Данный класс роботов подразделяют на промышленную, космическую, подводную и военную робототехнику [2].

Подходы к построению роботов для работы в экстремальных условиях во многом повторяют те, что применяются в промышленной и сервисной робототехнике – модульность основных компонент, иерархичная структура системы управления и т. д. [2, 6, 5, 7]. Ключевым отличием являются существенно более высокие требования к элементной базе – её стойкости к внешним воздействиям, надежности, ремонтпригодности. В сервисной робототехнике часто вообще не рассматривают функционирование робота после поломки. Предполагается, что его можно отключить и дождаться, когда квалифицированный инженер проведет ремонт. В промышленных роботах в последние годы делается акцент на предсказание отказов, для того, чтобы заблаговременно переориентировать технологический процесс и планово провести профилактические работы. В экстремальной робототехнике, с одной стороны, вероятность отказа существенно выше за счёт воздействий агрессивной внешней среды, а с другой, как правило, отсутствует возможность провести какие-либо ремонтные работы до завершения миссии. Таким образом, робот должен продолжать свое функционирование даже в случае отказа части узлов. Это достигается за счёт использования специальной отказоустойчивой элементной базы [8], многократного резервирования наиболее важных узлов [9, 10], а также при помощи управляемой деградации [11, 12]. Под управляемой деградацией понимается набор технических решений, направленных на сохранение функциональности робота в случае выхода из строя отдельных его компонентов, сопровождаемое прогнозируемым ухудшением технических характеристик. Примером управляемой деградации является автоматический переход на бездатчиковые алгоритмы, управление электроприводом после отказа датчика положения или скорости. Рассмотрим эти подходы на примерах различных образцов экстремальной робототехники.

Промышленная экстремальная робототехника

Согласно [2] к промышленной экстремальной робототехнике относятся, в первую очередь, роботы для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и роботы, применяемые для выполнения штатных технологических операций в зонах опасных для человека, например, на предприятиях атомной и химической промышленности. Сегодня в России и за рубежом создано и эксплуатируется большое количество роботов данного класса [13–17], которые предназначены для проведения дозиметрического контроля, тушения пожаров, разбора завалов и т. д. (рис. 1).

Данная категория экстремальной робототехники по применяемым техническим решениям наиболее близка к сервисным роботам. Многие решения в течение длительного периода времени отрабатываются в научных лабораториях на базе сервис-



Рис. 1. Роботы, относящиеся к промышленной экстремальной робототехнике:
а) Quince; б) ЛУФ-60; в) МРК-27-МА-БАЭС.

ных роботов, в том числе, под управлением ROS [14, 18, 19], а после – с минимальными изменениями используются для создания роботов, предназначенных для работы в опасных условиях [15, 19].

Несмотря на то, что неблагоприятные условия внешней среды могут существенно влиять на работу компонентов системы управления (так в атомной промышленности радиационное облучение в рабочей зоне робота может достигать 10 рентген в секунду, а температура – 300 градусов [2]), в описанных в научной литературе роботах редко применяются специализированные схемы резервирования с целью повышения отказоустойчивости, характерные, например, для космической робототехники. Роботы промышленной экстремальной робототехники во многих случаях строятся на стандартной элементной базе, предназначенной для бытовых применений, включая встраиваемые компьютеры, микроконтроллеры, сети стандартов Ethernet и IEEE 802.11, общепромышленные камеры и датчики расстояний [13, 15, 20]. Для снижения воздействия неблагоприятных условий окружающей среды на эти компоненты их защищают от агрессивных внешних воздействий, термоизолируют и термостабилизируют, а также, в случаях дистанционного управления, выносят наиболее критически важные компоненты из робота в командный пункт, находящийся в безопасной зоне [13]. В ряде случаев, для обеспечения надежности создаваемого робота, разработчики проводят дополнительные исследования стойкости применяемых ими общепромышленных компонентов к внешним воздействиям, например, к радиации [15].

Отдельно стоит отметить роботы для ликвидации чрезвычайных ситуаций, созданные по заказу военных ведомств и стоящие на вооружении действующих армейских подразделений, как правило, инженерных войск. Такие роботы стоит относить к военной робототехнике, так как при их разработке и проектировании накладываются дополнительные требования, связанные с возможностью их эксплуатации в условиях боевых действий.

Космическая робототехника

Современная космическая робототехника представлена довольно широкой номенклатурой роботов различного типа и назначения (рис. 2): манипуляционных, мобильных, в том числе антропоморфных [21].

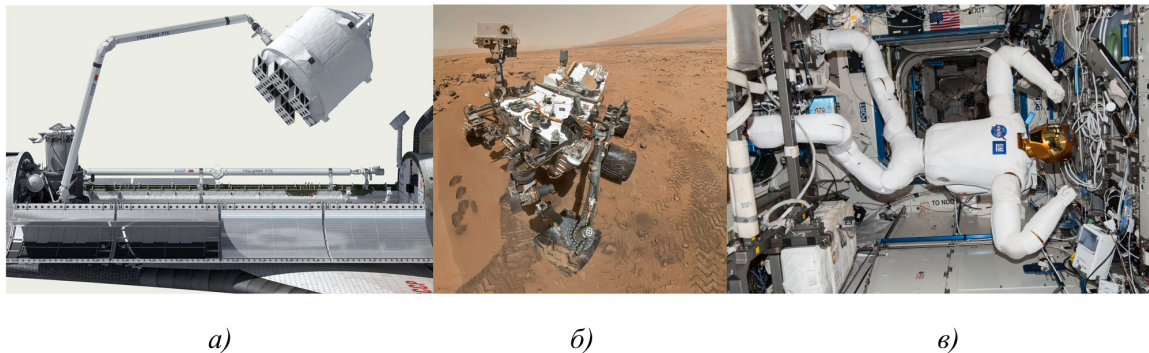


Рис. 2. Космические роботы: а) манипулятор Аист космического корабля Буран; б) мобильный робот-марсоход Curiosity; в) антропоморфный робот Robonaut.

Основными проблемами при создании космической техники являются широкий диапазон рабочих температур, постоянное воздействие космической радиации и тяжёлых заряженных частиц, жесткие ограничения на энергопотребление, массу и габариты, а также невозможность проводить какое-либо техническое обслуживание на большей части жизненного цикла изделия [22–24].

Существенное развитие программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) в последнее десятилетие сделало эти микросхемы основой элементной базы современных космических аппаратов, в том числе и роботов [24–34]. Главными предпосылками для этого стало:

1. Наличие на рынке относительно большого выбора радиационно-стойких микросхем ПЛИС.
2. Возможность заменить однотипными микросхемами ПЛИС широкую номенклатуру заказных сверхбольших интегральных схем (СБИС), обладающих разным функционалом.
3. Возможность отладки проекта на дешевых микросхемах для бытовых применений с последующим выпуском изделия на базе радиационно-стойкой отказоустойчивой версии ПЛИС без изменения исходных кодов.
4. Возможность удаленной реконфигурации аппаратно-программного обеспечения ПЛИС после старта миссии с целью увеличения функционала или исправления ошибок, допущенных в ходе проектирования (в случае применения многократно программируемых микросхем).

Обобщённая структура системы управления космического робота представлена на рис. 3.

Она представляет собой трехуровневую систему как минимум с двукратным резервом. Непосредственное взаимодействие с датчиками и исполнительными устройствами осуществляется при помощи ПЛИС. Расчет регуляторов может производиться как непосредственно на ПЛИС [24], так и на встраиваемых компьютерах, работающих под управлением операционной системы реального времени [33], которые также используются для решения задач тактического уровня. На стратегическом уровне может быть использован как встраиваемый компьютер, так и ПЛИС, для которых разработаны высокопроизводительные софт-процессорные ядра, например Leon 3 [35]. Также на ПЛИС могут быть реализованы супервычислители для ускорения наиболее трудоёмких операций, таких как обучение нейронных сетей [34].

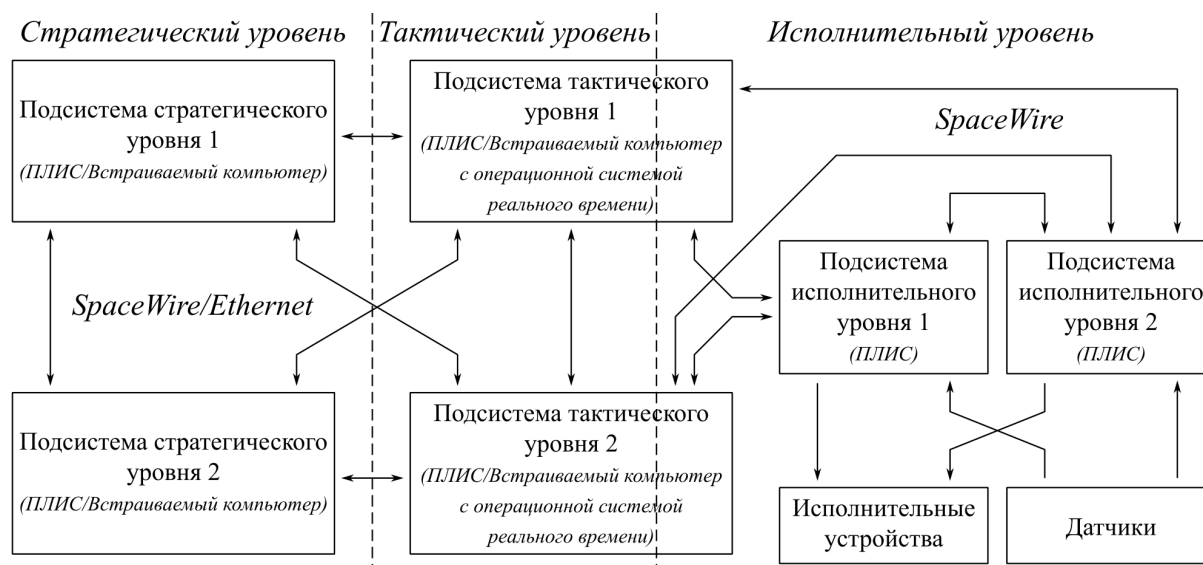


Рис. 3. Обобщенная структура системы управления космического робота.

Для связи между различными элементами систем управления в космической технике разработан и принят в качестве стандарта специализированный протокол SpaceWire [36], позволяющий передавать данные с пропускной способностью до 400 Мбит/с при расстоянии между узлами до 10 м. В то же время, в ряде космических роботов используются каналы информационного обмена, реализованные на базе Ethernet [33, 36, 37].

Несмотря на обилие работ, посвященных стандартизации и модульности в космической робототехнике, на сегодняшний день не существует общепринятого инструментария для создания аппаратно-программного обеспечения космических роботов. Многие проекты построены на оригинальном коде, который не предполагает расширение функционала за пределы, изначально определенные техническим заданием. Это связано как с высокими требованиями безопасности, предъявляемыми к аппаратно-программным решениям, используемым в космосе [37], так и с фактической невозможностью изменения функционала робота после его вывода в космическое пространство. В этом контексте интересным исключением является робот Robonaut 2, который, аналогично сервисным роботам, построен на базе операционной системы Ubuntu Linux и связке программных инструментариев ROS-OROCOS, но в то же время за счёт применения многократного резервирования и обширной внутренней диагностики, он соответствует всем требованиям по надежности и безопасности, что позволило успешно использовать его в течение нескольких лет в ходе миссии на международной космической станции [37].

Подводная робототехника

На сегодняшний день подводная робототехника представлена, в первую очередь, аппаратами научно-исследовательского и военного назначения. Последние в данном разделе рассматриваться не будут, так как по применяемым инженерным и технологическим решениям они ближе к военной робототехнике. Также стоит отметить, что подводные роботы, созданные для научно-исследовательских целей, активно используются при проведении поисково-спасательных операций и для организации под водой технического мониторинга в ходе строительных и ремонтных работ.

Современные подводные роботы (рис. 4) представлены в широком диапазоне размеров от малогабаритных субмарин весом в несколько килограмм [38, 39] до тяжелых аппаратов массой более 1 тонны [40]. Существуют роботы, как приводимые в движение гребными винтами, так и использующие для перемещения силу океанских течений (подводные глайдеры) [41].

Подводные роботы работают в среде непригодной и опасной для человека, но параметры этой среды существенно отличаются от аналогичных в космической и военной робототехнике. Так, под водой отсутствуют мощные источники ионизирующего излучения, температурный режим достаточно стабилен и позволяет использовать микроэлектронику, созданную для бытовых применений, отсутствует проблема отвода избыточного тепла от исполнительных органов и устройств управления. К тому же, массогабаритные ограничения в подводной робототехнике существенно ниже, чем у роботов других классов. Так, например, малогабаритными считаются роботы массой до 150 кг [40]. Это позволяет значительно проще решать проблему энергообеспечения, по сравнению с роботами наземного и воздушного базирования.

Основными проблемами подводной робототехники являются навигация, связь и герметизация исполнительных устройств. Поглощение водой электромагнитных и световых волн не позволяет использовать традиционные решения для определения пространственного положения робота, применяемые в других областях робототехники. А высокие давления, которые приходится выдерживать глубоководным аппаратам, требуют применения специальных технологий для создания исполнительных устройств. В то же время данные проблемы напрямую не влияют на структуру системы управления, применяемые в ней вычислительные устройства и средства информационного обмена. С этой точки зрения подводные роботы наибольшим образом похожи на сервисные. Устройства управления стратегического и тактического уровня в них выполняются на основе встраиваемых компьютеров под управлением операционных систем Linux и QNX, к которым подключаются подсистемы исполнительного уровня [39, 40]. Для связи между различными уровнями системы управления, так же, как в сервисной робототехнике, используется широкий спектр интерфейсов и протоколов от полевых шин на основе CAN и Ethernet до RS-232. Неоднократно случая использования ROS при создании подводных роботов. Данный программный инструмент используется как для реализации рабочего

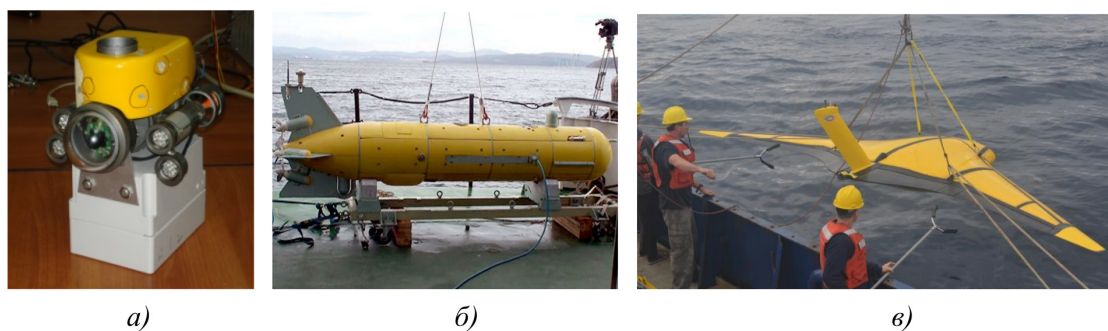


Рис. 4. Подводные роботы: а) малогабаритный автономный робот на базе телеуправляемой подводной лодки Гном; б) автономный необитаемый подводный аппарат Пилигрим; в) автономный подводный глайдер ZRay.

места оператора, так и непосредственно на самом автономном роботе [43–45]. Также часть разработчиков использует элементную базу любительских радиомоделей [46, 47], а проект ArduPilot даже имеет отдельный дистрибутив, предназначенный специально для подводной робототехники [48].

Интересно, что проблемам отказоустойчивости в подводных роботах уделяется существенно меньше внимания, чем в других областях экстремальной робототехники. С одной стороны, это связано с отсутствием агрессивных воздействий среды непосредственно на элементную базу, а с другой – с относительно низкой стоимостью производства, что свойственно, в первую очередь, малоразмерным аппаратам. Иными словами, вероятность потерять робота из-за отказа достаточно мала, а стоимость повышения надежности его системы управления сравнима с изготовлением нового робота. В тех же работах, которые посвящены проблемам обеспечения отказоустойчивости автоматических необитаемых подводных аппаратов, основной акцент делается на диагностику отказов и дальнейшую управляемую деградацию системы управления для безопасного завершения миссии и возвращения робота на поверхность [49].

Военная робототехника

Военная робототехника является, вероятно, самым активно развивающимся направлением экстремальной робототехники. Современная классификация охватывает все сферы военного применения роботов (рис. 5): на суше, в воздухе, на воде и под водой, разделяя их по целевому назначению на ударные, обеспечивающие, специального назначения и многофункциональные [1]. Аналогично космическим, военные роботы должны успешно функционировать в условиях широкого диапазона температур и под воздействием ионизирующего излучения, и в дополнение к этому, в условиях активного огневого и радиоэлектронного противодействия со стороны противника. В то же время, в отличие от космической, в военной робототехнике ремонт и модернизация оборудования на всем протяжении жизненного цикла не только возможны, но и являются необходимым условием обеспечения превосходства над потенциальным противником [1, 50–52].

Так же, как и для космической робототехники, в военных роботах используется специальная элементная база и специализированные технологии монтажа элементов системы управления. Важно отметить, что в подавляющем большинстве случаев для

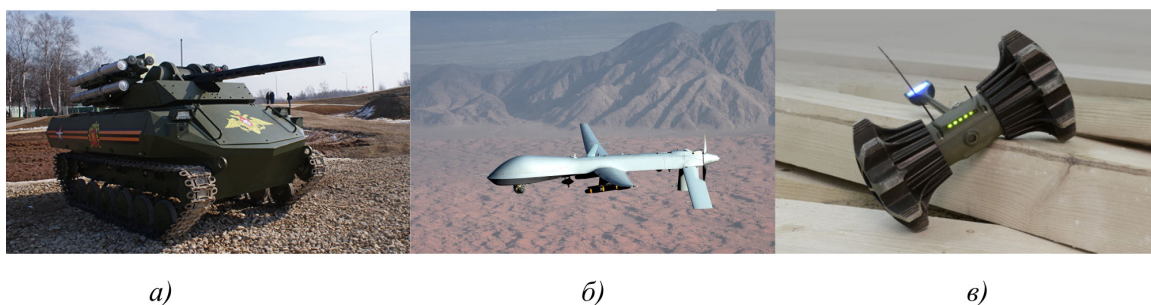


Рис. 5. Военные роботы: а) ударный наземный робот Уран-9;
 б) ударный беспилотный летательный аппарат Predator;
 в) малоразмерный разведывательный робот ЮЛА-Н.

военных роботов действует строгое ограничение на использование компонентов исключительно отечественного производства, что выражается для разработчика в существенном сокращении номенклатуры доступных изделий.

Точные данные о применяемых алгоритмах и аппаратно-программном обеспечении, находящихся в стадии опытной эксплуатации и принятых на вооружение военных роботов, как правило, являются секретной информацией и в России, и за рубежом. Тем не менее, по данным из открытых источников [1, 2, 7, 52–57], можно судить, что с точностью до используемой элементной базы в военной робототехнике используются те же подходы, что и в космической: иерархические системы управления с резервированием, активное применение ПЛИС и базовых матричных кристаллов (БМК), часто заменяющих их в отечественном аппаратном обеспечении. Основным отличием является более широкое использование изначально гражданских интерфейсов связи, таких как CAN, Ethernet, IEEE 802.11.

На сегодняшний день нет достоверной информации о применении ROS в военной технике, однако рядом исследователей ведутся работы в этой области, а концепция построения специальной военной версии ROS Military, по аналогии с ROS Industrial, неоднократно обсуждалась на международных конференциях в 2018 г. [37, 58, 59]. Очевидной мотивацией для работ в этом направлении является желание разработчиков обеспечить более быструю конверсию наиболее современных решений между гражданской сервисной и военной робототехникой.

Интеллектуальное и групповое управление в экстремальной робототехнике

На первых этапах развития экстремальной робототехники она была представлена исключительно телеуправляемыми роботами [2]. Это было обусловлено сложностью и недетерминированностью той среды, в которой работам данного класса необходимо функционировать. Однако с развитием технологий интеллектуального управления фокус разработчиков сместился в сторону полуавтономных и полностью автономных аппаратов [1, 7, 37, 46, 51, 55]. Это позволило преодолеть проблемы, в первую очередь, связанные с обеспечением надежности канала связи и низких транспортных задержек в нем. На сегодняшний день режим телеуправления до сих пор присутствует в большинстве роботов, относящихся к экстремальной робототехнике, однако для многих из них он уже не является основным. Текущим этапом развития данного класса роботов является переход от управления отдельными автономными роботами в режиме целеполагания к построению на их основе многоагентных систем, которые будут обладать большей живучестью и смогут функционировать на большей площади, чем отдельные роботы [60–62].

В экстремальной робототехнике на сегодняшний день присутствует множество задач, требующих применения искусственного интеллекта и группового управления. Отработка необходимых алгоритмов уже активно ведется на базе сервисных роботов, однако для их внедрения в роботы, функционирующие в экстремальных условиях, потребуются дополнительные исследования, связанные с обеспечением требуемого уровня надежности, и адаптация ранее созданного аппаратного и программного обеспечения под специфическую элементную базу.

Основные тенденции в области создания систем управления для экстремальной робототехники

а) Масштабирование в экспериментальной робототехнике достигается, в первую очередь, за счет модульного построения роботов. В то же время, за исключением космической техники, отсутствует строгая стандартизация интерфейсов информационного обмена, что ограничивает применения модулей, разработанных в рамках одного проекта, в других роботах. Также в экстремальной робототехнике отсутствуют единые подходы к созданию программного обеспечения. Однако, высокая заинтересованность разработчиков в конверсии алгоритмических и программных решений, апробированных ранее на сервисных роботах, создает предпосылки к использованию ROS, что уже подтверждается первыми удачными внедрениями.

б) Потребность в алгоритмах интеллектуального управления в экстремальной робототехнике крайне высока, поскольку только они могут обеспечить высокую автономность функционирования в неопределенной среде и позволить роботу выполнять задачу при отсутствии или нестабильном канале связи. В настоящее время отработка таких алгоритмов управления, как правило, проводится на сервисных роботах, а после они уже адаптируются для реализации в той или иной области экстремальной робототехники.

в) Среди всех классов роботов наибольшее внимание отказоустойчивости уделяется именно в экстремальной робототехнике. Она достигается за счёт применения специализированной элементной базы, многократного резервирования всех компонент системы управления, а также за счёт внедрения внутренней диагностики и управляемой деградации.

г) В тех областях экстремальной робототехники, где требуется минимизация массогабаритных размеров, активно используются микросхемы ПЛИС, которые позволяют реализовать на базе одного элемента микроэлектроники несколько микропроцессорных систем со всей необходимой периферией. В остальных случаях применяются решения на базе встраиваемых компьютеров, аналогично сервисной робототехнике.

Выводы

Из проведенного обзора следует, что, несмотря на различия в областях применения и требования, предъявляемые к оборудованию систем управления роботов разных классов, в целом, они строятся на схожих принципах (рис. 6), что допускает возможность создания единой методологии их проектирования.

Каждый класс роботов, с точки зрения применяемых технологий, обладает сильными сторонами, которые при разработке единых подходов к проектированию необходимо не только сохранить, но и по мере возможности распространить на другие классы.

Сильной стороной промышленной робототехники являются системы управления исполнительного уровня, полевые шины реального времени для подключения исполнительных устройств и датчиков к системам управления тактического уровня, а также алгоритмическое обеспечение для решения задач кинематики и динамики манипуляционных роботов. Вместе они обеспечивают прецизионную точность и повторяемость выполнения операции в сочетании с высокой динамикой, которые, как правило, не встречаются в роботах других классов, а также высокую степень взаимозаменяемости оборудования, в том числе выпускаемого разными производителями.

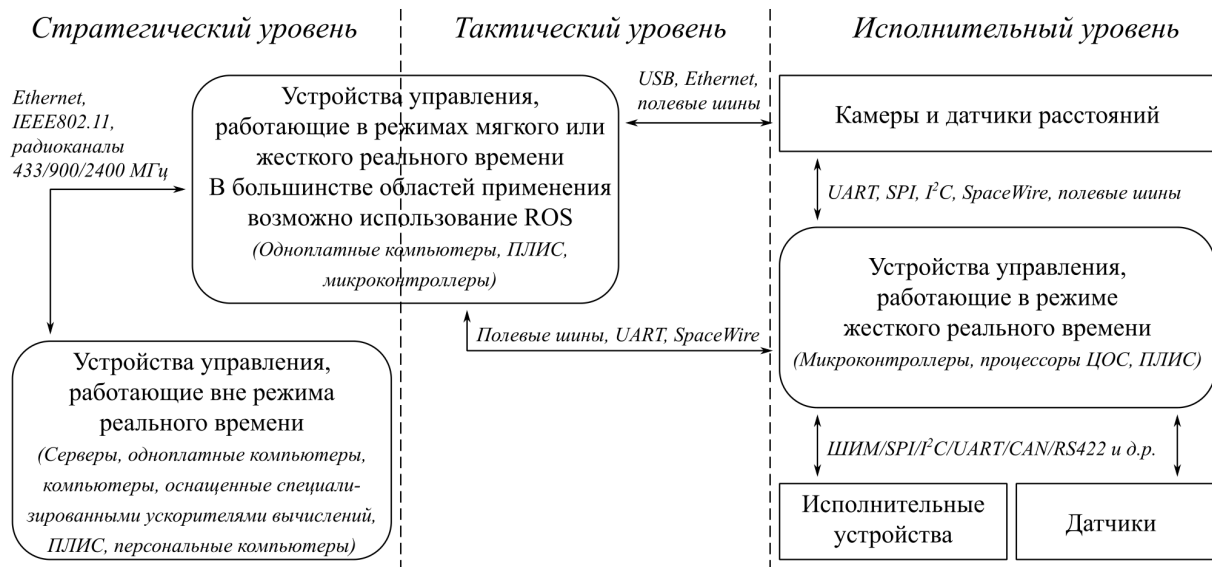


Рис. 6. Обобщенная структура системы управления робота, сформированная по результатам анализа.

Безусловно, сильнейшей стороной сервисной робототехники является программный инструментарий ROS и созданные на его базе программно-алгоритмические решения для систем управления тактического и стратегического уровня. На сегодняшний день они позволяют в кратчайшие сроки реализовывать новые поведенческие функции роботов, в том числе с использованием интеллектуальных алгоритмов.

Основное технологическое преимущество роботов, относящихся к экстремальной робототехнике, заключается в решениях для обеспечения надежности и отказоустойчивости в условиях неблагоприятных воздействий агрессивной среды функционирования.

Современные высокие темпы промышленного развития приводят к существенному сокращению сроков разработки новых роботов и делают актуальным не только максимальное использование ранее созданных заделов, но и конверсию технологий между различными классами робототехнических систем. Наибольший прогресс в этой области связан с распространением алгоритмического и программного обеспечения на базе ROS. В первую очередь, речь идет о промышленной робототехнике (проект ROS Industrial), но также можно отметить и первые опыты успешного применения ROS в космической технике. Однако эти результаты касаются, в первую очередь, систем управления тактического и стратегического уровня, которые не требуют работы в условиях жесткого реального времени и реализуются в виде программного обеспечения, абстрагированного от конкретного устройства управления при помощи операционной системы Linux. Создание же систем исполнительного уровня до сих пор развивается отдельно для каждого класса роботов. Причиной этого являются как определенные исторические предпосылки и консерватизм, свойственный, например, промышленной робототехнике, так и существенно более высокая зависимость исполнительных подсистем от применяемой элементной базы.

Первой проблемой при создании систем управления исполнительного уровня является широкий спектр применяемых интерфейсов для работы с первичными преобразо-

вателями датчиков и исполнительных устройств: I²C, SPI, UART, SSI, BISS, ШИМ, ЧИМ и др. При этом один проект может требовать 1 SPI и 3 UART интерфейса, а другой – не менее чем 5 независимых интерфейсов SPI. При использовании процессоров цифровой обработки сигналов (ЦОС) и микроконтроллеров, которые являются наиболее популярной основой для систем исполнительного уровня, набор периферии жестко зафиксирован, что привязывает разработчика к конкретным сериям и моделям микросхем.

Второй проблемой являются высокие требования к режиму реального времени на исполнительном уровне в сочетании с несколькими независимыми контурами управления и обработки сигналов, которые должны исполняться параллельно (например, расчет регуляторов и обработка наблюдателя синусно-косинусного датчика). Стандартным решением является использование операционных систем реального времени, но оно требует наличия избыточных вычислительных мощностей, поэтому многие разработчики создают, так называемые «*bare metal*» решения, вообще не предполагающие использования операционной системы. Такой подход делает крайне затратным не только переход на микроконтроллеры и процессоры ЦОС других серий, но часто затрудняет и переход между микросхемами одной серии.

Третья проблема связана с тем, что даже при использовании единой системы команд микроконтроллеры разных производителей имеют свои особенности работы, как вычислительного ядра, так и периферии (интерфейсов, таймеров, прерываний). В результате, даже при использовании функционально близких процессоров с одинаковой системой команд (например, STM STM32F103 и Миландр К1986BE92QI) запуск проекта, созданного для одной микросхемы, на другой требует частичной переработки программного кода.

В случае создания миниатюрных роботов, в которых все уровни системы управления вынужденно реализуются на базе одного вычислительного устройства, дополнительно встает одна из двух проблем: либо реализация алгоритмов интеллектуального управления на микроконтроллерах или процессорах ЦОС, либо реализация алгоритмов управления исполнительного уровня в режиме жесткого реального времени на встраиваемом компьютере под управлением ROS.

Существует два основных подхода к обеспечению конверсии решений между различными областями робототехники. Первый заключается в использовании единых интерфейсов связи между исполнительным и тактическим уровнем. Теоретически он позволяет обеспечить взаимозаменяемость модулей, сделанных для роботов разных классов. На практике же сервопривод, разработанный для космического робота, оказывается неоправданно дорог из-за своей сверхнадежности для сервисной робототехники, а привод сервисного робота недостаточно надежен для применения в условиях космоса. Второй подход состоит в том, чтобы при реализации программного кода весь специализированный функционал, учитывающий архитектурные особенности конкретного процессора, выделять в виде отдельных функций, которые будут заменены при переходе на другую модель и семейство микросхем. Однако это требует от разработчика глубокого понимания как используемой архитектуры, так и того, какие её части являются стандартизированными, а какие различаются от производителя к производителю. И даже при удачной реализации такого слоя абстракции от аппаратного обеспечения, разработчику все равно

приходится, для использования кода на каждом новом микроконтроллере или процессоре ЦОС, описывать функции работы с оборудованием заново, что выражается в существенных дополнительных трудозатратах.

За рубежом ведутся работы, посвященные унифицированным подходам к созданию аппаратно-программного обеспечения роботов, которые позволили бы обеспечить независимость от применяемой элементной базы и упростили конверсию технологий между роботами различных классов [63], однако уже сейчас понятно, что предлагаемые решения окажутся неподходящими для российских реалий. Так, в России в данный момент в военной и космической робототехнике практически обязательным условием является использование исключительно отечественных компонент. В то же время для коммерческих и промышленных роботов ключевой характеристикой является цена, по которой российская микроэлектроника на сегодня не может конкурировать с зарубежными аналогами. Это создает еще большее разделение с точки зрения технологических решений между роботами различных классов и, в том числе, затрудняет создание предприятиями оборонно-промышленного комплекса конкурентоспособной гражданской продукции, провозглашенное в качестве одной из целей Президентом Российской Федерации в своем Послании к Федеральному собранию в 2019 г. [64].

В связи с этим, следующими шагами по разработке общей методологии создания систем управления роботами различных классов должны стать:

1. Анализ взаимозаменяемой российской и зарубежной элементной базы.
2. Поиск возможных технических решений в области создания элементов систем управления и организации информационного обмена между ними, которые могли бы быть реализованы как на зарубежной, так и на отечественной элементной базе.
3. Создание на базе таких компонентов и решений концептуальной модели масштабируемой интеллектуальной системы управления с заданным уровнем отказоустойчивости на унифицированной элементной базе.

Литература:

1. Хрипунов С.В., Донченко А.А., Чиров Д.С., Винокурова Ю.С., Климов Р.С. и др. Робототехнические средства, комплексы и системы военного назначения. Основные положения. Классификация. Методические Рекомендации. М: ГНИИ ЦР МО РФ, 2015. 34 с.
2. Юревич Е.И. Основы робототехники, 4 изд. БХВ-Петербург, 2018. 304 с. ISBN 978-5-9775-3851-0
3. 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>
4. Kumar V., Bekey G., Zheng Y. Industrial, personal and service robots. G. Bekey (Ed.). Assessment of international research and development in robotics. World Technology Evaluation Center, Lancaster, 2006; P. 41-48. <http://www.wtec.org/robotics/report/05-Industrial.pdf>
5. 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.
6. Лопота В.А., Юревич Е.И. Экстремальная робототехника и мехатроника. Принципы и перспективы развития. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2007;4:37-42.
7. Лохин В.М., Романов М.П., Трипольский П.Э. Повышение эффективности разработки роботов специального назначения на основе стандартизации и унификации аппаратных и программных средств интеллектуальных бортовых систем управления. *Вестник МГТУ МИРЭА*. 2014;1:99-105.
8. Furano G., Jansen R., Menicucci A. Review of radiation hard electronics activities at European Space Agency. *JINST*. 2013;8(02): C02007. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/8/02/C02007>
9. Yin S., Xiao B., Ding S.X., Zhou D. et al. A review on recent development of spacecraft attitude fault tolerant control system. *IEEE T. Ind. Electron.* 2016;63(5):3311-3320. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2530789>

10. Crestani D., Godary-Dejean K., Lapiere L. Enhancing fault tolerance of autonomous mobile robots. *Robot. Auton. Syst.* 2015;68:140-155. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.12.015>
11. Joshi S.D., Talange D.B. Fault Tolerant Control for a Fractional Order AUV System. *International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEEO)* 2016;5(2):1-24. <https://doi.org/10.4018/IJEEO.2016040101>
12. Ашарина И.В. и др. Проблемы создания живучих сетевых систем управления группировками космических аппаратов. *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии.* 2017;1:325-332.
13. Tadokoro S. (Ed.). Rescue robotics: DDT project on robots and systems for urban search and rescue. Springer Science & Business Media, 2009. 192 p.
14. Nagatani K., Kiribayashi S., Okada Y., Tadokoro S. et al. Redesign of rescue mobile robot Quince. In: 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. 2011. P. 13-18. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2011.6106794>
15. Nagatani K., Nagatani K., Okada Y., Otake K., Yoshida K., Tadokoro S., Nishimura T., Yoshida T. Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots. *J. Field Robot.* 2013;30(1):44-63. <https://doi.org/10.1002/rob.21439>
16. Цариченко С.Г. Экстремальная робототехника в МЧС России – задачи и перспективы. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza.* 2012;28:97-105.
17. Цариченко С.Г., Савин М.В., Мозговой А.П., Николаева Е.Ю. Опыт 8-летней деятельности по созданию робототехники. *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы.* 2013;1(4):146-150.
18. Kruijff G.-J.M., Pirri F., Gianni M., Papadakis P. et al. Rescue robots at earthquake-hit Mirandola, Italy: A field report. In: 2012 IEEE international symposium on safety, security, and rescue robotics (SSRR). *IEEE.* 2012;1-8. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2012.6523866>
19. Манько С.В., Диане С.А.К., Лохин В.М., Новосельский А.К. Групповое управление роботами в задачах разбора завалов и демонтажа объектов атомной отрасли. *Экстремальная робототехника.* 2017;1(1):302-311.
20. Вазаев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В., Цариченко С.Г. Комплексированная СТЗ в системе управления пожарного робота. *Известия Южного федерального университета. Технические науки.* 2017;1(186):121-132. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2017-1-121132>
21. Yoshida K., Wilcox B., Hirzinger G., Lampariello R. Space robotics. In: Springer Handbook of Robotics. B. Siciliano, O. Khatib (Eds.). Springer, Cham, 2016. P. 1423-1462. https://hdl.handle.net/10.1007/978-3-319-32552-1_55
22. Yim M., Roufas K., Duff D., Zhang Y. Modular reconfigurable robots in space applications. *Auton. Robot.* 2003;14(2-3):225-237. <https://doi.org/10.1023/A:1022287820808>
23. Полесский С.Н., Жаднов В.В., Артюхова М.А., Прохоров В.Ф. Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры космических аппаратов при проектировании. *Компоненты и технологии.* 2010;9:93-98.
24. Ivchenko V., Krug P., Matyukhina T., Pavelyev S. Mars-500 Program Space-Based Mobile Robot “Turist”. *Appl. Mech. Mater.* 2015;789-790:742-746. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.789-790.742>
25. Katz D.S., Some R.R. NASA advances robotic space exploration. *Computer.* 2003;36(1):52-61. <https://doi.org/10.1109/MC.2003.1160056>
26. Ratter D. FPGAs on mars. *Xcell J.* 2004;50: 8-11.
27. Hirzinger G., Brunner B., Landzettel K. et al. Space robotics – DLR's telerobotic concepts, lightweight arms and articulated hands. *Auton. Robots.* 2003;14(2-3):127-145. <https://doi.org/10.1023/A:1022275518082>
28. Morris K. FPGAs in space. *FPGA and Programmable Logic J.* 2004;4(5).
29. Jörg S., Nickl V., Nothhelfer A., Bahls T. et al. The computing and communication architecture of the DLR hand arm system. In: 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2011. P. 1055-1062. <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6094860>
30. Lentaris G., Stamoulas I., Diamantopoulos D., Maragos K. et al. SPARTAN/SEXTANT/COMPASS: advancing space rover vision via reconfigurable platforms. In: Proc. Applied Reconfigurable Computing – 11th International Symposium. Springer, Cham, 2015. P. 475-486. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16214-0_44
31. Montealegre N., Merodio L., Fernández A., Armbruster P. et al. In-flight reconfigurable FPGA-based space systems. In: 2015 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS). *IEEE.* 2015. P. 1-8. <https://doi.org/10.1109/AHS.2015.7231177>
32. Lentaris G., Stamoulas J., Soudris D., Lourakis M. et al. HW/SW codesign and FPGA acceleration of visual odometry algorithms for rover navigation on Mars. *IEEE T. Circ. Syst. Vid.* 2016;26(8):1563-1577. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2015.2452781>
33. Jörg S., Tully J., Albu-Schäffer A. The hardware abstraction layer – supporting control design by tackling the complexity of humanoid robot hardware. In: Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2014. P. 6427-6433. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907808>
34. Gankidi P.R., Thangavelautham J. FPGA architecture for deep learning and its application to planetary robotics. In: Proc. 2017 IEEE Aerospace Conference. 2017. P. 1-9. <https://doi.org/10.1109/AERO.2017.7943929>
35. Wirthlin M.J., Keller A.M., Draper J.T. et al. SEU mitigation and validation of the LEON3 soft processor using triple modular redundancy for space processing. In: Proc. 2016 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. 2016. P. 205-214. <https://doi.org/10.1145/2847263.2847278>
36. Notebaert O., Montano G., Planche T. et al. Towards SpaceWire-2: Space robotics needs: SpaceWire missions and applications, long paper. In: Proc. 2016 International SpaceWire Conference (SpaceWire). *IEEE,* 2016. P. 1-9. <https://doi.org/10.1109/SpaceWire.2016.7771614>

37. Badger J., Gooding D., Ensley K., Hambuchen K., Thackston A. ROS in space: A case study on robonaut 2. In: Robot Operating System (ROS), A. Koubaa (Ed.). Springer, Cham, 2016. P. 343-373. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26054-9_13
38. Розман Б.Я., Римский-Корсаков Н.А. Телеуправляемые подводные аппараты ИО РАН. IX Международная научно-техническая конференция. "Современные методы и средства океанологических исследований". Материалы конференции. М.: Изд-во РАН Института Океанологии. Часть 1, 2005 С. 46-56. URL: <http://hdl.handle.net/123456789/2829>
39. Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Романов А.М. Универсальная бортовая система управления роботами различных типов базирования и назначения (реализация принципов унификации и импортозамещения). *Вестник МГТУ МИРЭА*. 2015;1(3):230-248.
40. Ваулин Ю.В., Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Павин А.М. Реконфигурируемая система управления и навигации для многофункциональных подводных роботов. *Подводные исследования и робототехника*. 2017;1(23):4-13.
41. Кожемякин И.В., Рождественский К.В., Рыжов В.А., Смольников А.В., Татаренко Е.И. Подводные глайдеры: вчера, сегодня, завтра. Часть 2. *Морской вестник*. 2013;2(46):98-101.
42. DeMarco K., West M.E., Collins T.R. An implementation of ROS on the Yellowfin autonomous underwater vehicle (AUV). In: OCEANS'11 MTS/IEEE KONA. 2011. 7 p. <https://doi.org/10.23919/OCEANS.2011.6107001>
43. Smith R.N., Py F., Rajan K., Sukhatme G.S. Adaptive path planning for tracking ocean fronts with an autonomous underwater vehicle. In: Experimental Robotics, M.A. Hsieh, O. Khatib, V. Kumar (Eds.). Springer, 2016. P. 761-775. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23778-7>
44. Lawrance N.R.J., Somers T., Jones D., Mccammon S. et al. Ocean deployment and testing of a semi-autonomous underwater vehicle. In: OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. IEEE, 2016. 6 p. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761276>
45. Sukvichai K., Wongsuwan K., Kaewnark N., Wisanuve P. Implementation of visual odometry estimation for underwater robot on ROS by using RaspberryPi 2. In: Proc. 2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC). IEEE, 2016. 4 p. <https://doi.org/10.1109/ELINFOCOM.2016.7563010>
46. Chalkiadakis V., Papandroulakis N., Livanos G., Moirgiorgou K. et al. Designing a small-sized autonomous underwater vehicle architecture for regular periodic fish-cage net inspection. In: Proc. 2017 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST). IEEE, 2017. 6 p. <https://doi.org/10.1109/IST.2017.8261525>
47. Centelles D., Soriano A., Marin R., Sanz P.J. Arquitectura para teleoperación inalámbrica con realimentación visual de ROVs basados en ArduSub. Actas de las XXXIX Jornadas de Automática, Badajoz, 5-7 de Septiembre de 2018. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497565.0408>
48. ArduSub GitBook [Электронный ресурс]: режим доступа — свободный (дата обращения: 27.02.2019), URL: <https://www.ardusub.com/>
49. Antonelli G. Dynamic Control of 6-DOF AUVs and Fault Detection/Tolerance Strategies. In: Underwater Robots. Springer Tracts in Advanced Robotics, V. 123. Springer, Cham, 2018. P. 111-173. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77899-0_3
50. Springer P.J. Military robots and drones: a reference handbook. Santa Barbara, CA: ABC-CLIO, 2013. 297 p. ISBN 9781-59884-732-1.
51. Рубцов И. В. Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2013;3(140):14-21.
52. Кудряшов В.Б., Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В. Проблемы роботизации ВВТ в части наземной составляющей. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2014;3(152):42-57.
53. Yamauchi B.M. PackBot: a versatile platform for military robotics. In: Proc. SPIE - International Society for Optics and Photonics, 2004. V. 5422. Unmanned ground vehicle technology VI. P. 228-238. <https://doi.org/10.1117/12.538328>
54. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Ивлев А.А., Юрин А.Д. Перспективы и реалии применения интеллектуальных технологий управления и обработки информации при создании образцов вооружения и военной техники нового поколения. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2009;3:16-23.
55. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Александрова Р.И. Развитие технологии интеллектуального управления для создания перспективных образцов ВВТ на базе новых средств комплексной автоматизации проектирования. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2013;3(140):7-14.
56. Романов А.М., Слащев Б.В. Реализация Калмановской фильтрации на базе ПЛИС. Актуальные вопросы развития систем и средств военно-космической обороны. Сборник трудов V научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, Москва, 25-27 сентября 2014 г., под общ. ред. Н.Э. Ненартовича. М.: ОАО «ГСКБ «Алмаз-Антей», 2014. С. 402-407.
57. Родионов В.В., Филиппов С.И., Варабин Д.А. Унифицированная система управления робототехническими комплексами. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2018;1(195):128-140.
58. Towler J., Bries M. ROS Military: Progress and Promise. In: Proc. 2018 Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS), 2018. 10 p. URL: <https://events.esd.org/wp-content/uploads/2018/08/ROS-Military-Progress-and-Promise.pdf>

59. Ernst N. A., Kazman R., Bianco P. Towards rapid composition with confidence in robotics software. In: Proc. 1st International Workshop on Robotics Software Engineering. ACM, 2018. P. 44-47. <https://doi.org/10.1145/3196558.3196567>
60. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Оманов М.П., Крюченков Е.Н., Кучерский Р.В., Диане С.А. Мультиагентные робототехнические системы: примеры и перспективы применения. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2012;2:22-32.
61. Корчак В.Ю., Лапшов В.С., Рубцов И.В. Перспективы развития наземных робототехнических комплексов военного и специального назначения. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2015;10(171):83-95.
62. Павин А.М., Инзарцев А.В., Елисеенко Г.Д. Реконфигурируемая распределенная система для группового управления АНПА. *Технические проблемы освоения Мирового океана*. 2017;7:263-269.
63. Mayoral V., Hernández A., Kojcev R., Muguruza I., Zam I. The shift in the robotics paradigm—The Hardware Robot Operating System (H-ROS); an infrastructure to create interoperable robot components. In: 2017 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS). IEEE, 2017. P. 229-236. <https://doi.org/10.1109/AHS.2017.8046383>
64. Путин В.В. Послание Президента Федеральному Собранию, 2019 [Электронный ресурс]: режим доступа — свободный (дата обращения: 14.03.2019), URL: <http://kremlin.ru/events/president/transcripts/copy/59863>

References:

1. Khripunov S. V., Donchenko A. A., Chirov D. S., Vinokurova Yu. S., Klimov R. S. et al. *Robototekhnicheskie sredstva, komplekсы i sistemy voennogo naznacheniya. Osnovnye polozeniya. Klassifikatsiya. Metodicheskie Rekomendatsii* (Robotic equipment, complexes and military systems. The main provisions. Classification. Guidelines). Moscow: GNII CR MO RF; 2015. 34 p. (in Russ.).
2. Yurevich E. I. *Osnovy robototekhniki* (Robotics Basics), 4th ed. BHV-Peterburg; 2018. 304 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9775-3851-0
3. 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>
4. Kumar V., Bekey G., Zheng Y. Industrial, personal and service robots. G. Bekey (Ed.). Assessment of international research and development in robotics. World Technology Evaluation Center, Lancaster, 2006; P. 41-48. <http://www.wtec.org/robotics/report/05-Industrial.pdf>
5. Lopota A. V., Yurevich E. I. Stages and development prospects of robotic systems design modular principle. *Nauchno tekhnicheskie vedomosti Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie = St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*. 2013;1(164):98-103 (in Russ.).
6. 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.).
7. Lokhin V. M., Romanov M. P., Tripolsky P. E. Increase of efficiency of special robots development on the basis standardization and unification on intelligent control systems hardware and software. *Vestnik MGTU MIREA = Herald of MSTU MIREA*. 2014;1:99-105 (in Russ.).
8. Furano G., Jansen R., Menicucci A. Review of radiation hard electronics activities at European Space Agency. *JINST*. 2013;8(02): C02007. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/8/02/C02007>
9. Yin S., Xiao B., Ding S. X., Zhou D. et al. A review on recent development of spacecraft attitude fault tolerant control system. *IEEE T. Ind. Electron.* 2016;63(5):3311-3320. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2530789>
10. Crestani D., Godary-Dejean K., Lapiere L. Enhancing fault tolerance of autonomous mobile robots. *Robot. Auton. Syst.* 2015;68:140-155. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.12.015>
11. Joshi S. D., Talange D. B. Fault Tolerant Control for a Fractional Order AUV System. *International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEEO)* 2016;5(2):1-24. <https://doi.org/10.4018/IJEEO.2016040101>
12. Asharina I. V. et al. Problems of creating robust network-centric control systems for spacecraft groupings. *Innovacionnye, informacionnye i kommunikacionnye tekhnologii = Innovative, information and communication technologies*. 2017;1:325-332 (in Russ.).
13. Tadokoro S. (Ed.). *Rescue robotics: DDT project on robots and systems for urban search and rescue*. Springer Science & Business Media; 2009. 192 p.
14. Nagatani K., Kiribayashi S., Okada Y., Tadokoro S. et al. Redesign of rescue mobile robot Quince. In: 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. 2011. P. 13-18. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2011.6106794>
15. Nagatani K., Nagatani K., Okada Y., Otake K., Yoshida K., Tadokoro S., Nishimura T., Yoshida T. Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots. *J. Field Robot.* 2013;30(1):44-63. <https://doi.org/10.1002/rob.21439>
16. Tsarichenko S. Extreme Robotics in the Russian Emergencies Ministry - Challenges and Prospects. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza = Safety & Fire Technique*. 2012;28:97-105 (in Russ.).

17. Tsarichenko S.G., Savin M.V., Mozgovoi A.P., Nikolaeva E.Yu. Experience of 8 years of activity in the creation of robotics. *Pozharnaya bezopasnost: problemy i perspektivy = Fire safety: problems and prospects*. 2013;1(4):97-105 (in Russ.).
18. Kruijff G.-J.M., Pirri F., Gianni M., Papadakis P. et al. Rescue robots at earthquake-hit Mirandola, Italy: A field report. In: 2012 IEEE international symposium on safety, security, and rescue robotics (SSRR). *IEEE*. 2012;1-8. <https://doi.org/10.1109/SSRR.2012.6523866>
19. Manko S.V., Diane S.A.K., Lokhin V.M., Novoselsky A.K. Group control of robots for debris removal and construction disassembly in the atomic industry. *Ekstremalnaya robototekhnika = Extreme Robotics*. 2017;1(1):302-311 (in Russ.).
20. Vazaev A.V., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Tsarichenko S.G. Combined computer vision system in firefighting robot control system. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2017;1(186):121-132 (in Russ.). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2017-1-121132>
21. Yoshida K., Wilcox B., Hirzinger G., Lampariello R. Space robotics. In: Springer Handbook of Robotics. B. Siciliano, O. Khatib (Eds.). Springer, Cham, 2016. P. 1423-1462. https://hdl.handle.net/10.1007/978-3-319-32552-1_55
22. Yim M., Roufas K., Duff D., Zhang Y. Modular reconfigurable robots in space applications. *Auton. Robot.* 2003;14(2-3):225-237. <https://doi.org/10.1023/A:1022287820808>
23. Polesskii S.N., Zhadnov V.V., Artyukhova M.A., Prokhorov V.F. Ensuring the radiation resistance of spacecraft equipment in the design. *Komponenty i tekhnologii = Components & technologies*. 2010;9:93-98 (in Russ.).
24. Ivchenko V., Krug P., Matyukhina T., Pavelyev S. Mars-500 Program Space-Based Mobile Robot "Turist". *Appl. Mech. Mater.* 2015;789-790:742-746. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.789-790.742>
25. Katz D.S., Some R.R. NASA advances robotic space exploration. *Computer*. 2003;36(1):52-61. <https://doi.org/10.1109/MC.2003.1160056>
26. Ratter D. FPGAs on mars. *Xcell J.* 2004;50:8-11.
27. Hirzinger G., Brunner B., Landzettel K. et al. Space robotics – DLR's telerobotic concepts, lightweight arms and articulated hands. *Auton. Robots*. 2003;14(2-3):127-145. <https://doi.org/10.1023/A:1022275518082>
28. Morris K. FPGAs in space. *FPGA and Programmable Logic J.* 2004;4(5).
29. Jörg S., Nickl V., Nothhelfer A., Bahls T. et al. The computing and communication architecture of the DLR hand arm system. In: 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2011. P. 1055-1062. <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6094860>
30. Lentar G., Stamoulias I., Diamantopoulos D., Maragos K. et al. SPARTAN/SEXTANT/COMPASS: advancing space rover vision via reconfigurable platforms. In: Proc. Applied Reconfigurable Computing – 11th International Symposium. Springer, Cham, 2015. P. 475-486. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16214-0_44
31. Montealegre N., Merodio L., Fernández A., Armbruster P. et al. In-flight reconfigurable FPGA-based space systems. In: 2015 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS). IEEE. 2015. P. 1-8. <https://doi.org/10.1109/AHS.2015.7231177>
32. Lentar G., Stamoulias J., Soudris D., Lourakis M. et al. HW/SW codesign and FPGA acceleration of visual odometry algorithms for rover navigation on Mars. *IEEE T. Circ. Syst. Vid.* 2016;26(8):1563-1577. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2015.2452781>
33. Jörg S., Tully J., Albu-Schäffer A. The hardware abstraction layer – supporting control design by tackling the complexity of humanoid robot hardware. In: Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2014. P. 6427-6433. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907808>
34. Gankidi P.R., Thangavelautham J. FPGA architecture for deep learning and its application to planetary robotics. In: Proc. 2017 IEEE Aerospace Conference. 2017. P. 1-9. <https://doi.org/10.1109/AERO.2017.7943929>
35. Wirthlin M.J., Keller A.M., Draper J.T. et al. SEU mitigation and validation of the LEON3 soft processor using triple modular redundancy for space processing. In: Proc. 2016 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable Gate Arrays. 2016. P. 205-214. <https://doi.org/10.1145/2847263.2847278>
36. Notebaert O., Montano G., Planche T. et al. Towards SpaceWire-2: Space robotics needs: SpaceWire missions and applications, long paper. In: Proc. 2016 International SpaceWire Conference (SpaceWire). IEEE, 2016. P. 1-9. <https://doi.org/10.1109/SpaceWire.2016.7771614>
37. Badger J., Gooding D., Ensley K., Hambuchen K., Thackston A. ROS in space: A case study on robonaut 2. In: Robot Operating System (ROS), A. Koubaa (Ed.). Springer, Cham, 2016. P. 343-373. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26054-9_13
38. Rozman B.Ya., Rimskii-Korsakov N.A. Remote control underwater vehicles IO RAS. In: Proc. IX International Scientific and Technical Conference. "Modern methods and means of oceanological research." Moscow: RAS Institute of Oceanology Publishing house; 2005. P. 46-56 (in Russ.). URL: <http://hdl.handle.net/123456789/2829>
39. Lokhin V.M., Manko S.V., Romanov M.P., Romanov A.M. The universal on-board control system for robots of various type of development and purpose (implementation of the principles of unification and import substitution). *Vestnik MGTU MIREA = Herald of MSTU MIREA*. 2015;1(3):230-248 (in Russ.).
40. Vaulin Yu.V., Inzartsev A.V., Lvov O.Yu., Matvienko Yu.V., Pavin A.M. The configurable navigation and control system for multifunction underwater robots. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika = Underwater research and robotics*. 2017;1(23):4-13 (in Russ.).
41. Kozhemyakin I.V., Rozhdestvensky K.V., Ryzhov V.A., Smolnikov A.V., Tatarenko E.I. Underwater Gliders: yesterday, today, tomorrow. Part 2. *Morskoi vestnik*. 2013;2(46):98-101 (in Russ.).

42. DeMarco K., West M.E., Collins T.R. An implementation of ROS on the Yellowfin autonomous underwater vehicle (AUV). In: Proc. OCEANS'11 MTS/IEEE KONA. 2011. 7 p. <https://doi.org/10.23919/OCEANS.2011.6107001>
43. Smith R.N., Py F., Rajan K., Sukhatme G.S. Adaptive path planning for tracking ocean fronts with an autonomous underwater vehicle. In: Experimental Robotics, M.A. Hsieh, O. Khatib, V. Kumar (Eds.). Springer; 2016. P. 761-775. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23778-7>
44. Lawrance N.R.J., Somers T., Jones D., Mccammon S. et al. Ocean deployment and testing of a semi-autonomous underwater vehicle. In: Proc. OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. IEEE; 2016. 6 p. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761276>
45. Sukvichai K., Wongsuwan K., Kaewnark N., Wisanuve P. Implementation of visual odometry estimation for underwater robot on ROS by using RaspberryPi 2. In: Proc. 2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC). IEEE; 2016. 4 p. <https://doi.org/10.1109/ELINFOCOM.2016.7563010>
46. Chalkiadakis V., Papandroulakis N., Livanos G., Moirogiorgou K. et al. Designing a small-sized autonomous underwater vehicle architecture for regular periodic fish-cage net inspection. In: Proc. 2017 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST). IEEE; 2017. 6 p. <https://doi.org/10.1109/IST.2017.8261525>
47. Centelles D., Soriano A., Marin R., Sanz P.J. Arquitectura para teleoperación inalámbrica con realimentación visual de ROVs basados en ArduSub. Actas de las XXXIX Jornadas de Automática, Badajoz, 5-7 de Septiembre de 2018. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497565.0408>
48. ArduSub GitBook [Electronic resource], URL:<https://www.ardusub.com/>
49. Antonelli G. Dynamic Control of 6-DOF AUVs and Fault Detection/Tolerance Strategies. In: Underwater Robots. Springer Tracts in Advanced Robotics, V. 123. Springer, Cham, 2018. P. 111-173. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77899-0_3
50. Springer P.J. Military robots and drones: a reference handbook. Santa Barbara, CA: ABC-CLIO, 2013. 297 p. ISBN 9781-59884-732-1.
51. Rubtsov I.V. Current situation and perspective of development for ground military and special robotics. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences.* 2013;3(140):14-21 (in Russ.).
52. Kudryashov V.B., Lapshov V.S., Noskov V.P., Rubcov I.V. Problems of robotization for military ground technics. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences.* 2014;3(152):42-57 (in Russ.).
53. Yamauchi B.M. PackBot: a versatile platform for military robotics. In: Proc. SPIE - International Society for Optics and Photonics, 2004. V. 5422. Unmanned ground vehicle technology VI. P. 228-238. <https://doi.org/10.1117/12.538328>
54. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manjko S.V., Romanov M.P., Ivlev A.A., Yurin A.D. Perspectives and Realities of Used Intellectual Technologies of Control and Information Processing for Creation of Equipment Models and War Technics of Modern Generation. *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie = Mechatronics, automation, control.* 2009;3:16-23 (in Russ.).
55. Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S.V., Romanov M.P., Aleksandrova R.I. Development of intelligent control technology for creation of autonomous objects on the basis of complex automation design. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences.* 2013;3(140):7-14 (in Russ.).
56. Romanov A.M., Slaschov B.V. FPGA-based implementation of Kalman filtering. In: Proc. Vth Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists "Actual issues of the development of systems and means of military space defense". Moscow, September 25-27, 2014. P. 402-407 (in Russ.).
57. Rodionov V.V., Filippov S.I., Varabin D.A. Unified robotics control system. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences.* 2018;1(195):128-140 (in Russ.).
58. Towler J., Bries M. ROS Military: Progress and Promise. In: Proc. 2018 Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS), 2018. 10 p. URL: <https://events.esd.org/wp-content/uploads/2018/08/ROS-Military-Progress-and-Promise.pdf>
59. Ernst N. A., Kazman R., Bianco P. Towards rapid composition with confidence in robotics software. In: Proc. 1st International Workshop on Robotics Software Engineering. ACM, 2018. P. 44-47. <https://doi.org/10.1145/3196558.3196567>
60. Makarov I.M., Lohin V.M., Manko S.V., Romanov M.P., Kryuchonkov E.N., Kucherskiy R.V., Diane S.A. Multi-agent robotic systems: Application Examples and Prospects. *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie = Mechatronics, automation, control.* 2012;2: 22-32 (in Russ.).
61. Korchak V.Yu., Lapshov V.S., Rubtsov I.V. Perspective of development for military and special ground robots. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences.* 2015.;10(171):83-95 (in Russ.).
62. Pavin A.M., Inzartsev A.V., Eliseenko G.D. A reconfigurable distributed system for Autonomous Unmanned Underwater Vehicle group management. *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana = Technical problems of the development of the oceans.* 2017;7:263-269 (in Russ.).

63. Mayoral V., Hernández A., Kojcev R., Muguruza I., Zam I. The shift in the robotics paradigm—The Hardware Robot Operating System (H-ROS); an infrastructure to create interoperable robot components. In: 2017 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS). IEEE, 2017. P. 229-236. <https://doi.org/10.1109/AHS.2017.8046383>

64. Putin V.V. Message of the President to the Federal Assembly, 2019 [Electronic resource]: URL: <http://kremlin.ru/events/president/transcripts/copy/59863> (in Russ.).

Об авторе:

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

About the author:

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