

Обеспечение масштабирования и заданного уровня отказоустойчивости систем управления роботов

Романов А.М.

«МИРЭА - Российский технологический университет»,

проспект Вернадского, 78, Москва, 119454, Россия

e-mail: romanov@mirea.ru

Статья поступила 29.03.2020

Аннотация

В работе рассматривается вопрос обеспечения масштабирования и заданного уровня отказоустойчивости систем управления роботов. На основе анализа существующих подходов в робототехнике предлагается набор методов для обеспечения требуемого уровня отказоустойчивости, а также основанная на них модель масштабирования системы управления, которая позволяет использовать единые принципы построения для роботов различного масштаба и назначения. Создание и масштабирование роботов согласно данной модели позволяет максимально использовать все ранее полученные заделы, ускоряя создание новых продуктов на рынке и их модернизацию в будущем. Также она существенно упрощает конверсию между различными областями робототехники: промышленной, мобильной, аэрокосмической и т. д. По ходу описания концептуальной модели формулируют дальнейшие направления исследований, необходимые для её реализации. Предложенная концепция полностью отвечает идеологии Индустрии 4.0, когда на первом плане выходят не возможности крупносерийного, пусть и

кастомизированного производства, а специализация каждого изделия при сохранении малого времени выхода продукта на рынок.

Ключевые слова: робототехника, отказоустойчивость, масштабирование, элементная база, система управления.

Введение

Как показал обзор систем управления роботов и робототехнических комплексов [1, 2] ключевым путем решения проблем масштабирования, а в отдельных случаях и повышения отказоустойчивости, на сегодняшний день является повсеместное внедрение модульных принципов как на уровне аппаратного, так и программного обеспечения. Под модулями аппаратного обеспечения при этом понимаются как отдельные печатные платы, так и законченные устройства, которые берут на себя выполнение определенного функционала: обработку датчиков, реализацию сетевых интерфейсов, управление двигателем определенного типа и т. д. Из этих модулей, как из своеобразного конструктора строятся системы управления для конкретных роботов и робототехнических комплексов. Такой подход полностью соотносится с изготовлением кастомизированных продуктов на основе массово выпускаемых типовых составляющих, доминирующей на сегодняшний день формой промышленного производства [3, 4]. Единожды спроектированные под широкий класс задач модули могут быть массово изготовлены, поставлены на склад и в дальнейшем использованы при создании различных роботов. Однако у данного подхода есть ряд недостатков:

1. Созданные под абстрактную, «среднюю по отрасли» задачу, данные модули оказываются заведомо избыточными для одних задач и недостаточно совершенными для других. Это может выражаться как в недостатке функционала, так и в завышенных значениях массогабаритных размеров, стоимости и т. д.

2. Каждый набор модулей создается под определенную отрасль, учитывая её стандарты, типовые эксплуатационные условия, применяемые интерфейсы. Это делает модули созданные, например, для промышленной робототехники не совместимым с модулями космических роботов. Использование модуля, как минимального кванта деления системы, приводит к полной зависимости его аппаратных, программных и алгоритмических решений друг от друга. Это существенно усложняет конверсию технологий между отраслями промышленности и заставляет разработчиков повторно воплощать «с нуля» решения, которые в смежной области используются в течении длительного времени.

3. Модульность программного обеспечения распространяется на сегодняшний день по сути только на верхние (стратегический и тактический) уровни управления, в то время как программное обеспечение исполнительного уровня создается в подавляющем большинстве случаев в жесткой привязке к конкретному аппаратному обеспечению.

4. При постоянно сокращающемся размере современных микроэлектронных компонентов габариты соединительных разъемов остаются практически без изменений. В дополнение к этому, надежность каждого разъемного соединения существенно ниже аналогичного проводного. Это приводит к укрупнению модулей

как с точки зрения функционала, так и с точки зрения их габаритных размеров. Тем самым уменьшается и вариативность изменения набора модулей робота, и минимальные размеры робота, который целесообразно строить на модульном принципе.

В то же время получившие в последние годы широкое развитие технологии Индустрии 4.0 в будущем приведут к тому, что стоимость индивидуально изготовленного персонализированного под нужды заказчика продукта не будет отличаться от произведенного на базе серийно выпускаемых модулей [3]. В этот момент в робототехнике потеряет всякий смысл разработка модульных комплектов, ориентированных на широкий класс текущих и будущих задач. На первый план выйдет необходимость сокращения времени разработки новых роботов, оптимизированных под конкретный функционал. Для её решения потребуется максимальное использование всех имеющихся технических заделов, полученных в ранее выполненных проектах, и возможность их быстрой адаптации для новых задач. По сути речь идет о дальнейшем развитии принципа модульности, в котором под модулем будет пониматься не законченный блок аппаратно-программного обеспечения, обладающего унифицированными стыками, а результат интеллектуальной деятельности. Он представляет из себя параметризованное механическое, схмотехническое или программно-алгоритмическое решение, которое может быть объединено с другими аналогичными модулями на основе стандартизированных методик проектирования.

Такой подход позволит обеспечить простоту конверсии технологии между

роботами из различных областей применения: промышленных, сервисных и т. д. Позволит легко быстро адаптировать к применению на беспилотных летательных аппаратах решения апробированные на наземных мобильных или манипуляционных роботах и наоборот. Для обеспечения перехода к масштабированию и повышению отказоустойчивости роботов за счет повторного использования всех результатов интеллектуальной деятельности, а не просто за счет построения их на основе унифицированных модулей необходимо разработать концептуальную модель обеспечения масштабирования и обеспечения заданного уровня отказоустойчивости. Этой задаче посвящена данная работы.

Обеспечение заданного уровня отказоустойчивости систем управления

Существует множество методов оценки, как требуемого уровня отказоустойчивости системы управления, так и фактического уровня, которому она соответствует в данный момент. С точки зрения промышленной и сервисной робототехники уровень отказоустойчивости жестко регламентируется в первую очередь для функций аварийного отключения. Методы оценки отказоустойчивости для них приводятся в стандартах МЭК ГОСТ Р 61508 [<http://trudymai.ru/published.php?ID=53191> 5] и IEC 62061 [6]. Сходным образом производится оценка вероятности отказа и дальнейшее обеспечение бесперебойного функционирования медицинской техники [7], к которой в том числе относятся медицинские сервисные роботы. Наибольшее внимание отказоустойчивости уделяется в экстремальной робототехнике. Свои стандарты и апробированные методы расчета есть в авиационной [8, <http://trudymai.ru/published.php?ID=57729>

9, 10], космической [11-13], военной [13-15] отраслях, которые определяют минимально допустимый уровень отказоустойчивости для каждого производимого устройства, в том числе и роботов. Свои требования к отказоустойчивости элементов систем управления и методы их анализа есть для атомной промышленности [16-18] и других опасных производств [19]. Каждая из упомянутых методик и стандартов создавалась на основе многолетнего опыта, полученного в конкретной предметной области. Внесение в них каких-либо изменений требует не только существенной научной проработки, но и огромной административной работы. В результате даже наличие отдельных трудов, посвященных формулированию общих подходов к обеспечению отказоустойчивости в робототехнике (например, [20]), не привело к созданию единых методик, признанных во всех областях применения роботов. Однако, на практике это и не требуется. Любой проект системы управления роботом может быть оценен с использованием существующих методов и, на основе сравнения с целевыми значениями, может быть сделан вывод о его недостаточной или избыточной отказоустойчивости.

В то же время на основе анализа подходов, применяемых в отдельных областях робототехники можно сделать общие выводы об требованиях к элементной базе, необходимых для оценки и управления уровнем отказоустойчивости. Так, практика создания отказоустойчивых систем управления для промышленных производств согласно требованиям [<http://trudymai.ru/published.php?ID=53191>

5, 6] показывает необходимость ограничения номенклатуры применяемых

компонентов аппаратного обеспечения, так как определение ключевых параметров, влияющих на надежность, проходит для каждого из них индивидуально и часто требует длительных исследований. Например, согласно [http://trudymai.ru/published.php?ID=53191

5] для оценки параметров надежности, полученных по результатам полевых испытаний (критерий «proven-in-use»), такие испытания должны проводиться не менее чем на 10 разных объектах в течении не менее чем 100000 часов и как минимум в течении 1 календарного года. При этом любое изменение компонента или выпуск следующей версии, как правило, приводит к необходимости повторного анализа его надежности. Что же касается программного обеспечения, то его верификация на предмет соответствия требованиям по отказоустойчивости, предъявляемым в целевой области применения, сейчас практически повсеместно проводится автоматически на основе использования стандартизированных компиляторов и наборов тестов. В то же время для анализа программного обеспечения систем исполнительного уровня могут требоваться точные модели функционирования цифровых вычислительных устройств, исполняющих код, что также ограничивает допустимую к применению элементную базу.

Вне зависимости от используемого метода и целевой отрасли применения работа оценка надежности его системы управления, как правило, направлена на выявление ключевых элементов, чей уровень отказоустойчивости недостаточен. И лишь в случаях глубокой оптимизации себестоимости изготовления рыночного продукта, целесообразным может быть использование результатов анализа

надежности для удешевления элементов, чья отказоустойчивость оказалось избыточной. Поэтому и меры по изменению уровня отказоустойчивости в первую очередь направлены на её повышение. При этом для повышения отказоустойчивости применяется ограниченный набор методов, а именно:

1. Использование специализированной элементной базы, обладающей известными параметрами надежности в целевых условиях работы.

Многokратное функциональное резервирование компонентов

[<http://trudymai.ru/published.php?ID=105741>

2. 23].
3. Многokратное резервирование каналов информационного обмена.
4. Использование различных методов реализации одного и того же функционала на устройствах, входящих в одну группу резерва.

Применение методов превентивной, в том числе интеллектуальной, диагностики и последующей управляемой деградации [<http://trudymai.ru/published.php?ID=29687>

5. 24].

Возможность реализации всех этих методов повышения отказоустойчивости необходимо предусмотреть при создании концептуальной модели масштабируемой интеллектуальной системы управления с заданным уровнем отказоустойчивости на унифицированной элементной базе.

Обеспечение масштабируемости систем управления

В научно-технической литературе различают два типа

[<http://trudymai.ru/published.php?ID=29688>

25] масштабирования: вертикальное и горизонтальное. Под вертикальным масштабированием понимается улучшение свойств системы за счёт замены её отдельных составляющих без изменения остальных компонентов. Горизонтальное масштабирование же предполагает улучшение свойств системы за счёт добавления новых компонентов в систему без изменения уже имеющихся.

Как упоминалось выше, традиционно масштабируемость в робототехнике основывалась на модульности, где под модулем понимается законченное аппаратно-программное устройство с заданными габаритами и функционалом. Новая парадигма, предлагаемая в данной работе, предполагает более глубокую декомпозицию как роботов, так и их систем управления. Это подразумевает и несколько иной подход к вопросам масштабирования, при котором задачей ставится не только и не столько улучшение функционала конкретного продукта (например, добавление к мобильному роботу дополнительного манипулятора), а создание нового более масштабного продукта с максимальным использованием всех заделов, полученных на более простых ранее выпущенных изделиях. Для этого в работе предлагается использовать новую концепцию построения систем управления. Р

Рассмотрим данную концепцию на примере модели последовательного масштабирования от минимальной конфигурации, требующей минимум аппаратного обеспечения и потенциально имеющей минимальные габаритные размеры, до максимальной, позволяющей на основе ранее разработанных элементов создавать сложнейшие робототехнические комплексы (рис. 1-5).

Минимальной возможной аппаратной конфигурацией системы управления в

рамках предлагаемой концептуальной модели является Система-на-Кристалле (СнК), выполненная с использованием одной микросхемы (рис. 1, а). Все уровни системы управления в этом случае реализуются на базе одного вычислительного устройства. Такая архитектура целесообразна для малоразмерных, а также наиболее бюджетных роботов, когда каждый дополнительный компонент существенно влияет на себестоимость всего продукта. Вертикальное масштабирование минимальной конфигурации осуществляется при помощи замены СнК на более продвинутой в техническом плане микросхеме (рис. 1, б), обладающую большим количеством входов/выходов, большей производительностью и т. д. В случае реализации СнК на базе ПЛИС вертикальное масштабирование может осуществляться вообще без изменения исходных кодов аппаратных ядер исходной конфигурации. Примечательно то, что возможна даже замена исходной ПЛИС на микросхему другого производителя, однако только в том случае, если все примитивы, необходимые для синтеза используемых ядер аппаратно-программного обеспечения системы управления были доступны для обоих микросхем. Это делает актуальным выявление состава таких примитивов, в том числе для микросхем отечественного и зарубежного производства, а также формирования соответствующих методик проектирования на их основе.

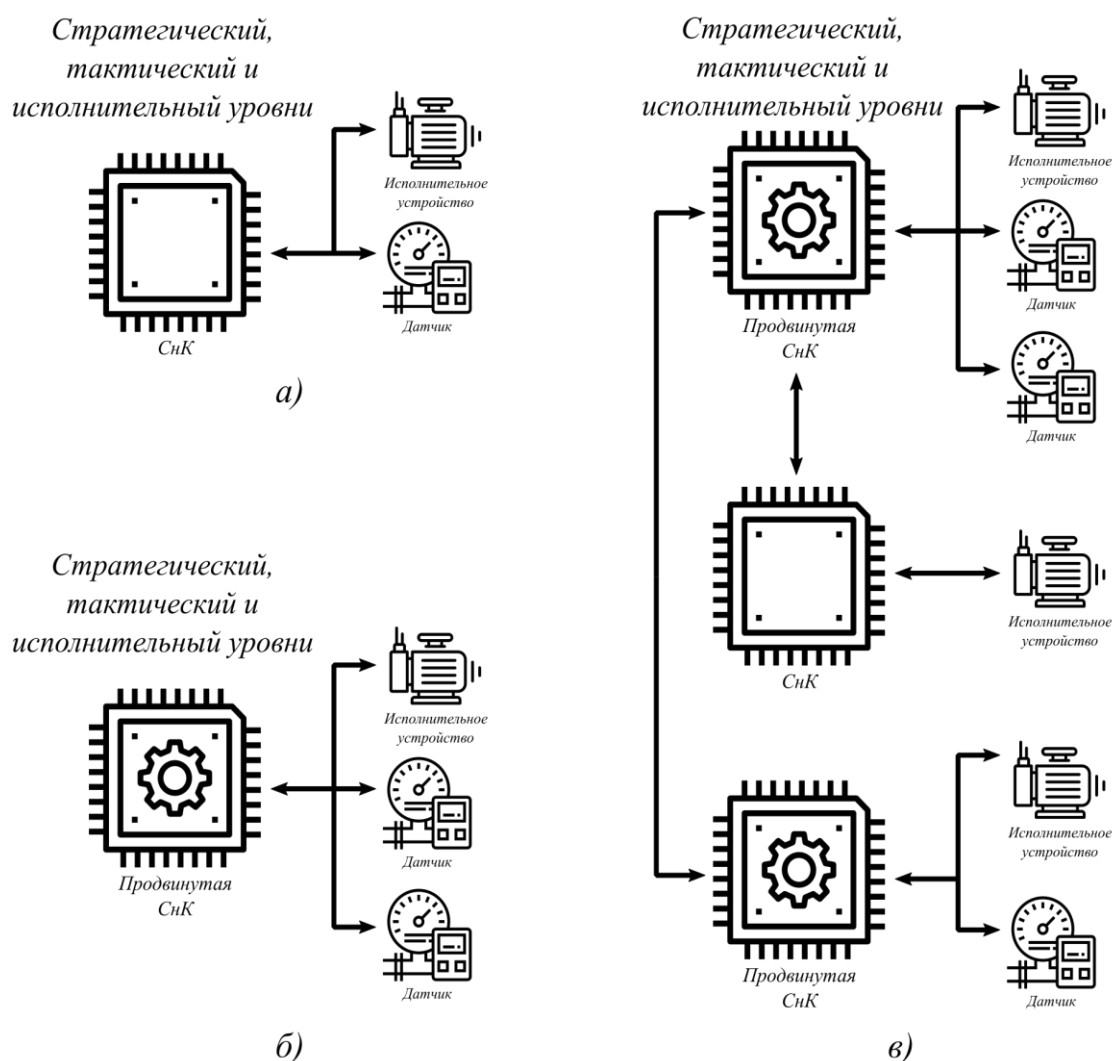


Рис. 1. Модель масштабирования систем управления. а) минимально возможная аппаратная конфигурация на базе 1 СнК; б) вертикальное масштабирование минимально возможной аппаратной конфигурации; в) горизонтальное масштабирование минимально возможной аппаратной конфигурации.

Горизонтальное масштабирование в предложенной модели осуществляется за счет объединения нескольких устройств управления на базе СнК в общую систему (рис. 1, в) при помощи полевых шин реального времени, например Ethernet POWERLINK [22]. Требования временного детерминизма каналов связи для всех вариантов минимальной аппаратной конфигурации (рис. 1) обусловлено необходимостью обеспечения согласованного движения приводов робота, в

условиях когда подсистема исполнительного уровня распределена между несколькими СнК.

Вместе с усложнением робототехнического комплекса происходит усложнение его алгоритмов тактического и стратегического уровня, что делает целесообразным выделение для их исполнения отдельного устройства (рис. 2). Мотивацией этому служат кардинально разные требования, предъявляемые алгоритмами управления стратегического, тактического и исполнительного уровня к аппаратному обеспечению.

Методы масштабирования подсистемы исполнительного уровня в этом случае остаются неизменными (рис. 1, б,в). Для связи между устройствами управления тактического и исполнительного уровня потребуется интерфейс, в роли которого может также выступить промышленная полевая шина реального времени.

Вертикальное масштабирование (рис. 2) на тактическом и стратегическом уровне будет заключаться в первую очередь в увеличении вычислительных ресурсов устройства управления, так как конкретные датчики и исполнительные устройства в выбранной парадигме абстрагируются от устройств управления тактического уровня при помощи СнК и интерфейсов на базе полевых шин.

Горизонтальное масштабирование (рис. 3) помимо увеличения вычислительных ресурсов дает сразу несколько дополнительных возможностей, а именно повышение отказоустойчивости за счёт резервирования устройств управления тактического и стратегического уровня, а также объединения нескольких систем управления отдельных роботов в единый робототехнический комплекс.

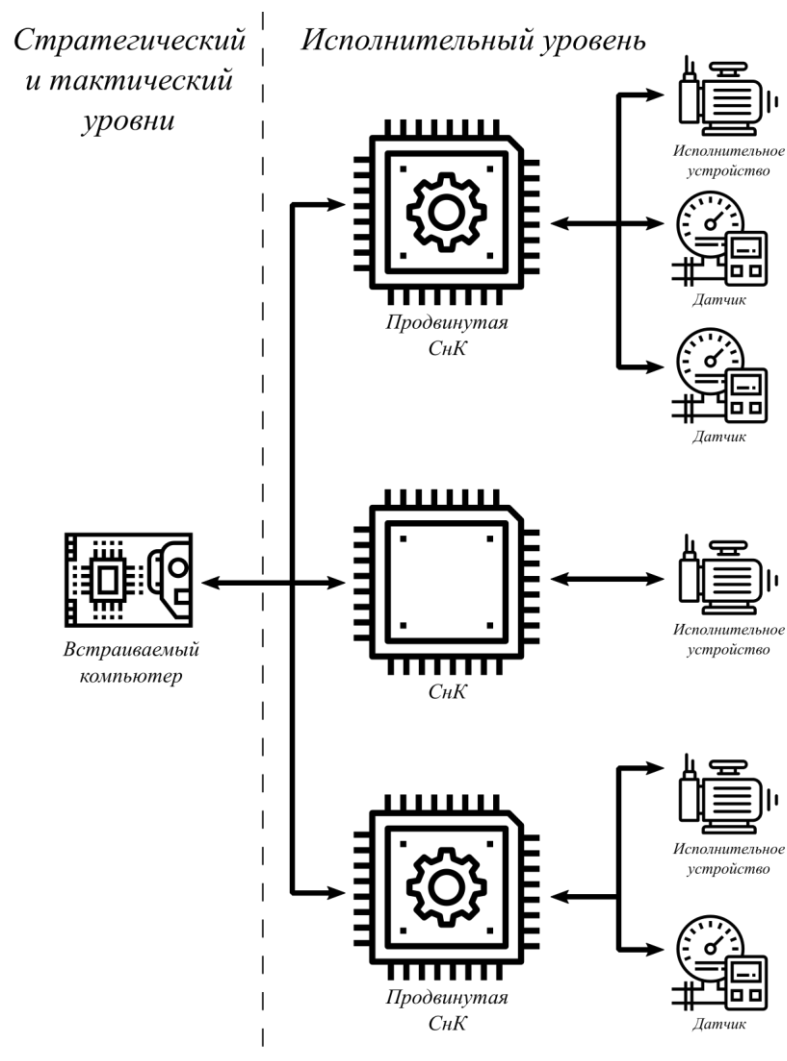


Рис. 2. Модель масштабирования систем управления. Конфигурация с выделенным устройством управления тактического уровня.

В последнем случае удобным с точки зрения практической реализации является формирование алгоритмами стратегического уровня, исполняемыми на одном устройстве управления команд для тактического уровня каждого из роботов.

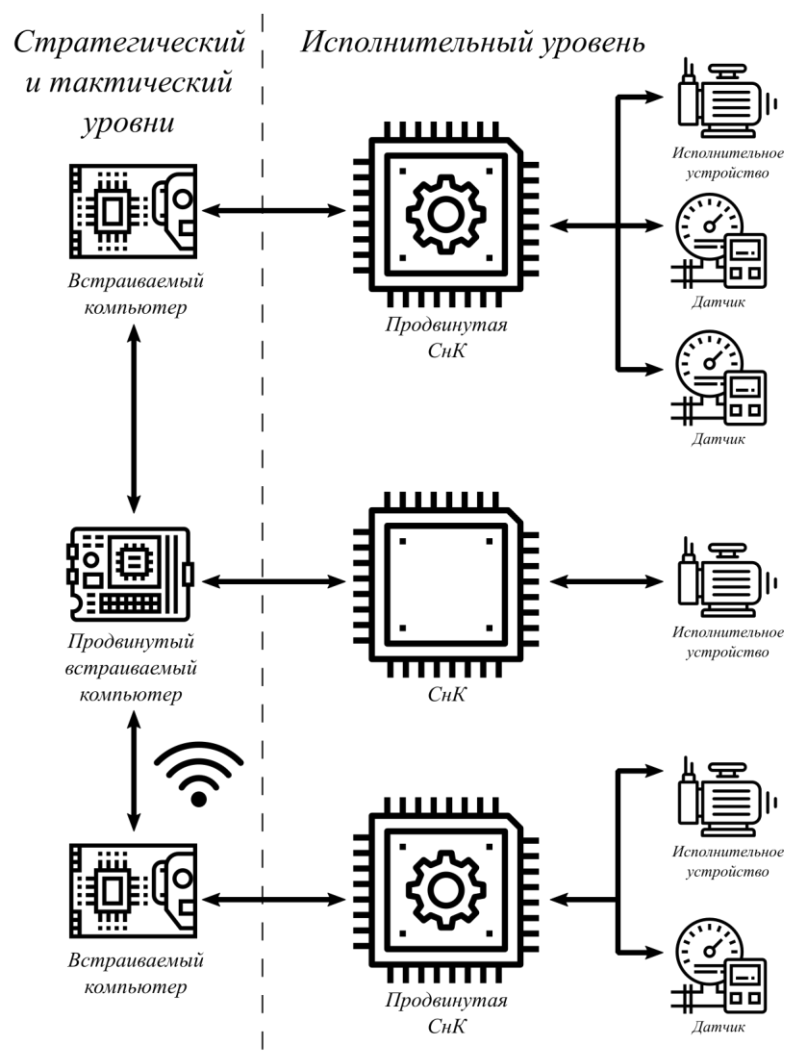


Рис. 3. Модель масштабирования систем управления. Горизонтальное масштабирование базовой конфигурации с выделенным устройством управления тактического уровня (значком беспроводной связи обозначает её востребованность, а не обязательность применения).

Требования к организации связи между устройствами управления тактического уровня в этом случае несколько отличаются от тех, что применяются к передачи данных на исполнительном уровне и между тактическим и исполнительным уровнями. С одной стороны, не требуется высокий уровень детерминизма информационного обмена, так как уставки для исполнительного уровня формируются на каждом устройстве управления тактического уровня

отдельно. С другой стороны, для организации согласованного движения всех приводов требуется точная синхронизация всех подсистем тактического уровня между собой.

В общем случае функционал синхронизации при помощи каналов связи является более мягким требованием, чем обеспечение обмена данными в режиме реального времени. В то же время необходимость объединения нескольких роботов между собой, особенно в мобильной робототехнике, делает необходимым поддержку беспроводных каналов связи, организации синхронизации при помощи которых, в отличие от проводных соединений сопряжена со множеством технических сложностей [26].

Дальнейшее масштабирование системы управления связано выделением отдельного аппаратного обеспечения для подсистемы стратегического уровня (рис. 4). Наиболее сложные алгоритмы стратегического уровня сегодня строятся на базе технологий интеллектуального управления [27, 28]. Они предполагают работу с большими объемами данных и требуют огромного количества вычислительных ресурсов [29-31]. В то же время, как упоминалось ранее, часть задач тактического уровня требует обеспечения режима реального времени, что приводит к использованию настроек операционной системы, предполагающих разрешение компромисса в пользу временного детерминизма исполнения задач, а не максимальной производительности.

При выделении стратегического уровня в отдельное устройство для его связи с устройствами управления тактического уровня можно использовать любой, в том

числе беспроводной интерфейс, обладающий достаточной пропускной способностью, что существенно упрощается компоновку робота, а, в отдельных случаях, позволяет вообще вынести устройство управления стратегического уровня на отдельный сервер, не связанный с роботом. Последнее может иметь положительный эффект с точки зрения уменьшения массогабаритных размеров робота, упрощения задачи обеспечения его температурного режима и т. д. Предельным случаем такого подхода является полный перенос стратегического уровня системы управления в «облако» [29, 30].

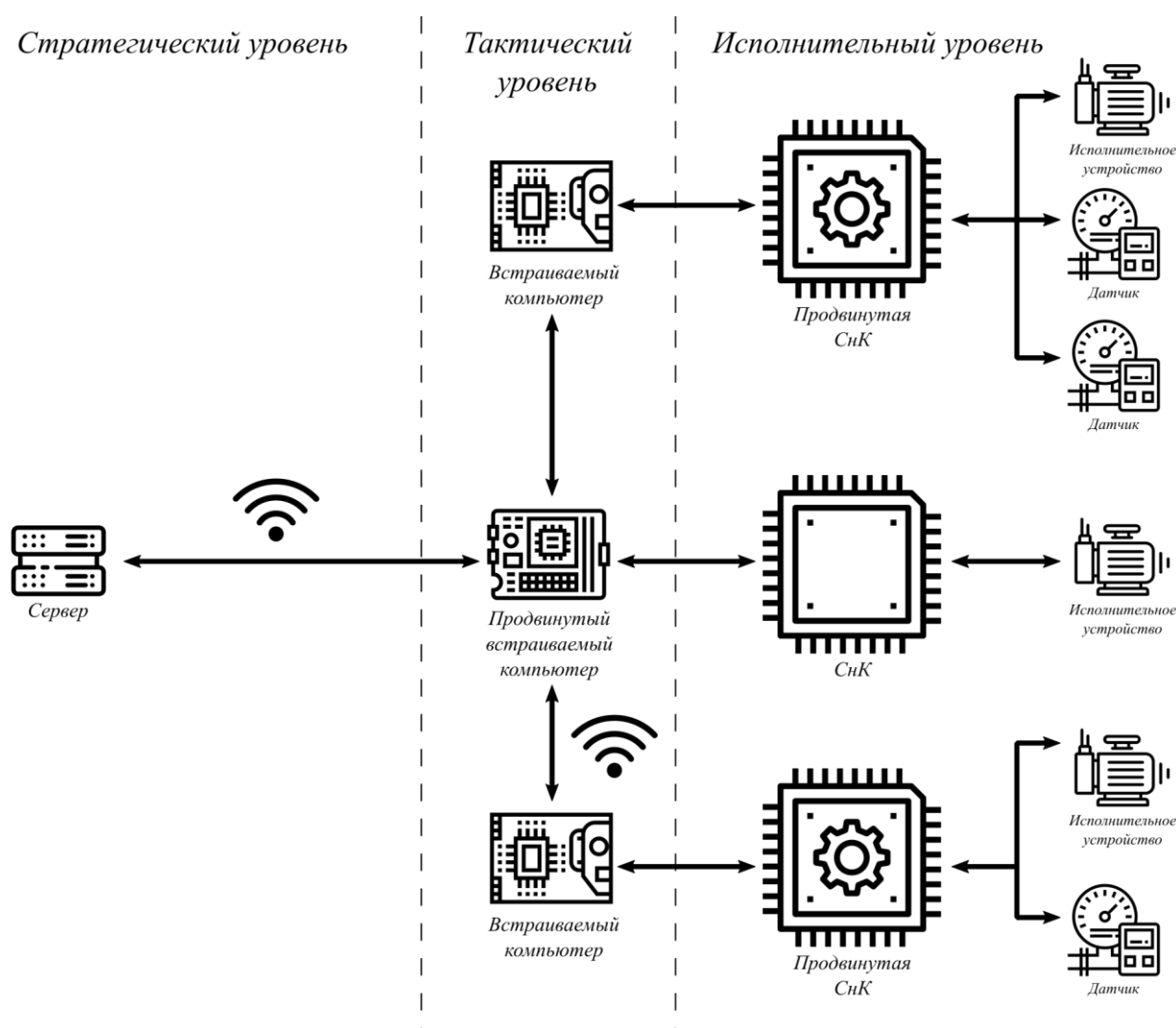


Рис. 4. Модель масштабирования систем управления. Конфигурации с выделенными устройствами управления тактического и стратегического уровня.

Поскольку подсистема стратегического управления роботом не осуществляет непосредственного управления исполнительными устройствами и не требует работы в режиме реального времени, она может рассматриваться как обычная информационная система по обработке больших данных, для которых в данный момент существует большое количество готовых решений как для вертикального, так и для горизонтального масштабирования. При помощи вертикального масштабирования, как и для тактического уровня, можно добиться повышения вычислительных ресурсов и сокращения времени обработки данных. По сути оно заключается в замене сервера информационной системы стратегического уровня на технически более продвинутый.

Горизонтальное масштабирование подсистемы стратегического уровня может происходить сразу по нескольким сценариям. Наиболее просто и прозрачно горизонтальное масштабирование происходит в случае размещения подсистемы стратегического управления в «облаке». Данный подход давно отработан в области высоконагруженных сетевых информационных систем [32]. Он обеспечивает практически неограниченные возможности по наращиванию производительности, вплоть до применения суперкомпьютеров. К тому же он позволяет использовать одну облачную систему стратегического уровня для координации десятков роботов, объединяя их в один робототехнический комплекс [33]. Ключевым ограничением на этом пути является пропускная способность каналов связи между роботами и серверами «облака», осуществляющими расчёт интеллектуальных алгоритмов, однако как прогнозируют многие исследователи, эта проблема будет решена с

внедрением технологий связи пятого поколения (5G) [34-36].

Другим возможным направлением горизонтального масштабирования систем стратегического уровня является увеличение количество серверов, расположенных непосредственно робота или робототехнического комплекса. Оно может выполняться как для увеличения вычислительных ресурсов, так и с точки зрения повышения отказоустойчивости. Главным достоинством по сравнению с облачными решениями является высокая автономность и независимость от канала связи до «облака». В предлагаемой модели (рис. 5) допускаются оба варианта решения, включая гибридные решения, когда наиболее важные функции автономного управления располагаются на борту, а вспомогательные реализуются на облачных вычислителях.

Связь между серверами стратегического уровня предъявляет в основном требования к пропускной способности, что позволяет организовать её при помощи широкого спектра разнообразных проводных и беспроводных технологий.

Также следует выделить случай, когда единая интеллектуальная система стратегического уровня реализуется на базе нескольких автономных роботов. В этом случае встает вопрос о том, на каком из роботов должна размещаться общая база знаний. Естественным образом значимость с точки зрения отказоустойчивости и доступности по каналам связи такого робота существенно возрастает.

Перспективным решением является применение технологии распределенных реестров [37-39], которая позволяет вести распределенную базу знаний на отдельных роботах без необходимости в постоянном канале связи с каждым из них,

и в то же время обеспечивает с высоким уровнем защиты от компрометации данных в случае кибератак [38].

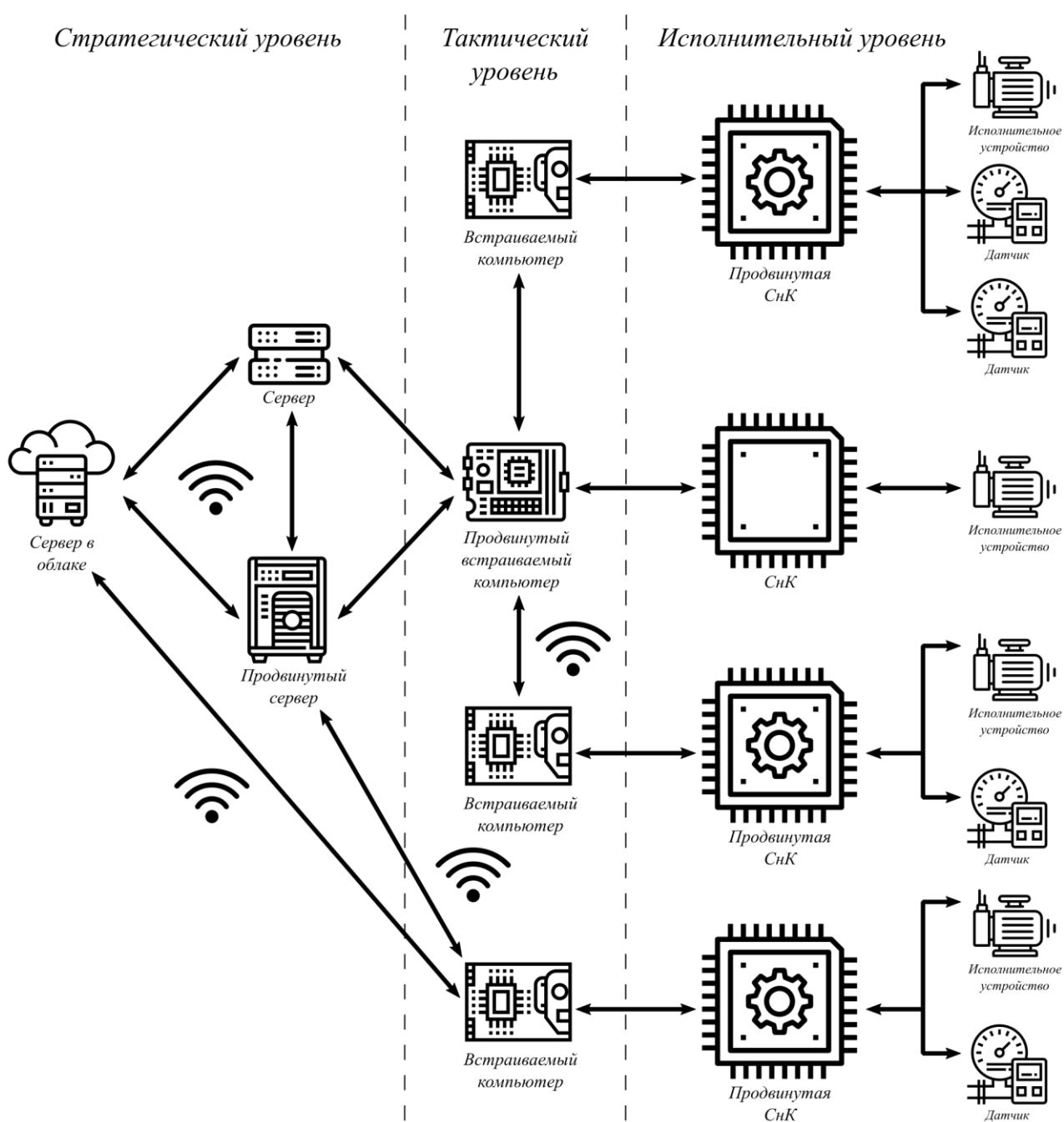


Рис. 5. Модель масштабирования систем управления. Максимальная конфигурация, включающая выделенные устройства для каждого уровня системы управления.

Решая вопросы масштабирования системы управления, отдельно стоит рассмотреть возможность использования свободных ресурсов на устройствах

управления более низких уровней для увеличения производительности подсистем более высокого уровня. В рамках предложенной модели, где исполнительный уровень реализуется на базе реконфигурируемых СнК, перспективным направлением исследований выглядит поиск методов агрегации свободных вычислительных мощностей систем управления на базе ПЛИС, так как в большинстве реальных проектов на ПЛИС всегда остаются неиспользованные логические ресурсы [40]. Преимуществом такого метода масштабирования будет то, что он не потребует использования никакого дополнительного оборудования.

Заключение

В работе предложен набор методов для обеспечения требуемого уровня отказоустойчивости, а также основанная на них модель масштабирования системы управления, которая позволяет использовать единые принципы построения для роботов различного масштаба и назначения. Создание и масштабирование роботов согласно данной модели позволяет максимально использовать все ранее созданные заделы, тем самым ускорив создание новых продуктов на рынке и их модернизацию в будущем. Также она существенно упрощает конверсию между различными областями робототехники: промышленной, мобильной, аэрокосмической и т. д. Концепция, заложенная при создании данной модели, полностью отвечает идеологии Индустрии 4.0, когда на первый план выходят не возможности крупносерийного, пусть и кастомизированного производства, а возможность специализации каждого изделия при сохранении малого времени выхода продукта на рынок.

Библиографический список

1. Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Ч. 1. Промышленная робототехника // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 5. С. 30 - 46.
2. Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения современных систем управления робототехнических комплексов различного масштаба и назначения. Ч. 2. Сервисная робототехника // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 6. С. 68 - 86.
3. Wang Y. et al. Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production // Advances in Manufacturing, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 311 - 320. DOI: [10.1007/s40436-017-0204-7](https://doi.org/10.1007/s40436-017-0204-7)
4. Михайлова Э.А., Камакина О.В., Ефимова П.Е. Прогнозирование себестоимости приспособлений на предприятии авиационной промышленности на основе эконометрических моделей // Труды МАИ. 2014. № 77. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=53191>
5. Функциональная безопасность электрических/электронных/программируемых электронных систем безопасности. ГОСТ Р МЭК 61508. – М.: Стандартинформ, 2010 – 204 с.
6. International Electrotechnical Commission et al. IEC 62061, Safety of machinery- Functional safety of safety-related electrical, electronic and programmable electronic control systems // IEC Standards Online, 2005.

7. Hegde V. Reliability in the medical device industry. Handbook of Performability Engineering, Springer, London, 2008, pp. 997 - 1009.
8. Обухов Ю.В., Попов А.С., Орлов А.С., Котова А.О. Применение имитационного моделирования для оценки безопасности полётов // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57729>
9. Гурьянов А.В. и др. Алгоритм классификации учитываемых и неучитываемых отказов при оценке показателей надежности изделий авионики // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 1-2. С. 341 - 345.
10. Юрков Н.К., Трусов В.А., Лысенко А.В. Методы обеспечения надежности бортовых радиоэлектронных систем авионики и ракетно-космической техники на этапе проектирования // XIII Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения»: Сборник трудов (3 -6 октября 2016). – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2016, С. 134 - 138.
11. Qin J. et al. Reliability analysis of avionics in the commercial aerospace industry // Journal of the Reliability Analysis Center, 2005. С. 1 - 6.
12. McLeish J. et al. SAE J3168: A Joint Aerospace-Automotive Recommended Practice for Reliability Physics Analysis of Electrical, Electronic and Electromechanical Components, SAE Technical Paper № 2019-01-1252, 2019, DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-01-1252>
13. Cavallaro J., Walker I. A survey of NASA and military standards on fault tolerance and

reliability applied to robotics // Conference on Intelligent Robots in Factory, Field, Space and Service, 1994, 1211 p. <https://doi.org/10.2514/6.1994-1211>

14. Сизова К.Г., Скоробогатов П.К., Прыгунов М.О. Применение методов анализа надежности и риска при обеспечении, прогнозировании и оценке радиационной стойкости РЭА // Безопасность информационных технологий. 2018. Т. 25. № 1. С. 52 - 64.

15. Алчинов В.И., Сидоров А.И., Чистова Г.К. Надёжность технических систем военного назначения. – Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. Т. 1. – 324 с.

16. Khobare S.K. et al. Reliability analysis of microcomputer circuit modules and computer based control systems important to safety of nuclear power plants // Reliability Engineering & System Safety, 1998, vol. 59, no. 2, pp. 253 - 258.

17. Жарко Е.Ф. Оценка качества программного обеспечения систем, важных для безопасности АЭС // Информационные технологии и вычислительные системы. 2011. № 3. С. 38 - 44.

18. Lakner A.A., Anderson R.T. Reliability Engineering for Nuclear and Other High Technology Systems (1985): A practical guide, CRC Press, 2017, 440 p.

19. Walker I.D., Cavallaro J.R. Failure mode analysis for a hazardous waste clean-up manipulator // Reliability Engineering & System Safety, 1996, vol. 53, no. 3, pp. 277 - 290.

20. Dhillon B.S. Robot reliability and safety, Springer Science & Business Media, 2012, 254 p.

21. Gracie E., Hayek A., Börsök J. Evaluation of FPGA design tools for safety systems

with on-chip redundancy referring to the standard IEC 61508 // 2017 2nd International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS), IEEE, 2017, pp. 386 - 390. DOI: [10.1109/ICSRS.2017.8272853](https://doi.org/10.1109/ICSRS.2017.8272853)

22. Романов А.М. Новая архитектура подчиненных устройств Ethernet POWERLINK на базе программируемых логических интегральных схем // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105741>

23. Заведеев А.И. Построение системы управления ориентацией космического аппарата повышенной отказоустойчивости // Труды МАИ. 2012. № 54. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29687>

24. Заведеев А.И., Ковалёв А.Ю. Диагностика состояния и принципы повышения отказоустойчивости бортовой системы управления космического аппарата // Труды МАИ. 2012. № 54, URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29688>

25. Гребенюк В.М. О проблемах определения возможностей масштабирования сложных систем // Наукоедение. 2013. № 3 (16). URL: <https://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-3-13-technics>

26. Mahmood A. et al. Clock synchronization over IEEE 802.11—A survey of methodologies and protocols // IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, vol. 13, no. 2, pp. 907 - 922. DOI: [10.1109/TII.2016.2629669](https://doi.org/10.1109/TII.2016.2629669)

27. Wang W., Siau K. Artificial Intelligence, Machine Learning, Automation, Robotics, Future of Work and Future of Humanity: A Review and Research Agenda // Journal of Database Management (JDM), 2019, vol. 30, no. 1, pp. 61 - 79. DOI: [10.4018/JDM.2019010104](https://doi.org/10.4018/JDM.2019010104)

28. Pierson H.A., Gashler M.S. Deep learning in robotics: a review of recent research // *Advanced Robotics*, 2017, vol. 31, no. 16, pp. 821 - 835. DOI:[10.1080/01691864.2017.1365009](https://doi.org/10.1080/01691864.2017.1365009)
29. Wan J. et al. Cloud robotics: Current status and open issues // *IEEE Access*, 2016, vol. 4, pp. 2797 - 2807. DOI: [10.1109/ACCESS.2016.2574979](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2574979)
30. Duggan L. et al. A rapid deployment big data computing platform for cloud robotics // *International Journal of Computer Networks and Communications*, 2017, pp. 9, no. 6. pp. 77 - 88. DOI: [10.5121/ijcnc.2017.9606](https://doi.org/10.5121/ijcnc.2017.9606)
31. Bianchi R.A.C. et al. Heuristically accelerated reinforcement learning by means of case-based reasoning and transfer learning // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2018, vol. 91, no. 2, pp. 301 - 312.
32. Shahapure N.H., Jayarekha P. Virtual machine migration based load balancing for resource management and scalability in cloud environment // *International Journal of Information Technology*, 2018, pp. 1 - 12. DOI: [10.1007/s41870-018-0216-y](https://doi.org/10.1007/s41870-018-0216-y)
33. Chen W. et al. A study of robotic cooperation in cloud robotics: Architecture and challenges // *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 36662 - 36682. DOI:[10.1109/ACCESS.2018.2852295](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2852295)
34. Bogue R. Cloud robotics: a review of technologies, developments and applications // *Journal Industrial Robot*, 2017, vol. 44, no. 1, pp. 1 - 5. DOI: [10.1108/IR-10-2016-0265](https://doi.org/10.1108/IR-10-2016-0265)
35. Gupta R. et al. Tactile internet and its applications in 5G era: A comprehensive review // *International Journal of Communication Systems*, 2019, vol. 32, no. 14. DOI: [10.1002/dac.3981](https://doi.org/10.1002/dac.3981)

36. Sanchez D. O. M. Corporate Social Responsibility Challenges and Risks of Industry 4.0 technologies: A review // Smart SysTech 2019; European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies, VDE, 2019, pp. 1 - 8.
37. Dorigo M. et al. Blockchain Technology for Robot Swarms: A Shared Knowledge and Reputation Management System for Collective Estimation // Swarm Intelligence: 11th International Conference, ANTS 2018, Rome, Italy, October 29–31, 2018, Proceedings, Springer, 2018, vol. 11172, pp. 425.
38. Ferrer E.C. The blockchain: a new framework for robotic swarm systems // Proceedings of the Future Technologies Conference, Springer, Cham, 2018, C. 1037 - 1058. DOI:[10.1007/978-3-030-02683-7_77](https://doi.org/10.1007/978-3-030-02683-7_77)
39. Nguyen T.T., Hatua A., Sung A.H. Blockchain Approach to Solve Collective Decision Making Problems for Swarm Robotics // International Congress on Blockchain and Applications, Springer, Cham, 2019, pp. 118 - 125. DOI: [10.1007/978-3-030-23813-1_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23813-1_15)
40. Maxfield C. The design warrior's guide to FPGAs: devices, tools and flows, Elsevier, 2004, 542 p.