

**Мохов Андрей Игоревич**, Совет по экологическому строительству, Россия, г. Москва, доктор технических наук, профессор, член Правления, e-mail: anmokhov@mail.ru

**Душкин Роман Викторович**, ООО «ВойсЛинк», Россия, г. Москва, эксперт, e-mail: roman.dushkin@gmail.com

## Функциональный подход к интеллектуализации объектов на основе комплексотехники

---

**Аннотация.** В статье рассматривается дальнейшее развитие функционального подхода к построению интеллектуальных систем управления различными объектами и процессами на основе комплексотехники. Такое развитие позволяет одновременно получить все выгоды различных парадигм рассмотрения процессов управления и интеллектуализации, а также эмерджентно проявить новые свойства общего подхода для повышения степени управляемости и эффективности эксплуатации объектов управления. Применение функционального подхода в совокупности с комплексотехникой в вопросах управления такими объектами, как интеллектуальные здания, позволяет перевести эксплуатацию таких зданий на более высокий уровень доступности сервисов, устойчивости, экологичности и всестороннего развития не только самого объекта управления, но и иерархии его надсистем — муниципалитета, региона, государства.

**Ключевые слова:** интеллектуализация, инфографические модели, комплексотехника, системный подход, функциональный подход, функциональный след.

### Introduction (Введение)

Развивающиеся технологии предоставляют широчайшие возможности для решения вопросов автоматизации и повышения степени интеллектуализации управления технологическими процессами [Душкин, 2018a]. При движении к четвёртой технологической революции, которая выражается в переходе к так называемой «Индустрии 4.0», происходит всестороннее развитие всевозможных «умных» систем и элементов инфраструктуры — умных зданий, умных дорог, умных городов и даже умных регионов и умных государств [Душкин, 2018b]. Появление и распространение подобных элементов инфраструктуры предполагает использование для автоматизации новые принципы, выводящие объекты автоматизации на более высокие уровни эффективности и инновационности.

При этом некоторые учёные и исследователи заостряют внимание на возникающих перед человеческой цивилизацией новых вызовах из-за всё большего и большего соприкосновения отдельных технологий, входящих в множество технологий Индустрии 4.0, с бизнесом, производством, экономикой и даже самой жизнью каждого отдельного человека [Kagermann, 2013]. Эти вызовы и риски основаны не только на ряде достаточно сложно решаемых или нерешаемых вовсе морально-этических проблем, но и имеющегося в настоящее время разрыва в научно обоснованных и теоретически осмысленных технологиях и их применении. При наличии уже полностью апробированных в лабораторных условиях технологий вместе с тем в практическом русле остаётся использование устаревших методов, либо новые

и инновационные методы и технологии используются для «автоматизации старого беспорядка» [Глушков, 1982].

Такая плачевная ситуация основана на том, что теоретическое осмысление и практическое применение новых технологий при автоматизации и, тем более, интеллектуализации устоявшихся процессов (процессов управления, деловых и рабочих процессов, технологических процессов) не рассматриваются в должном объёме. Зачастую при проектировании и имплементации сложных социотехнических систем и комплексов применяется подход, при котором работающие старые методы не меняются, несмотря на наличие новых задач и новых методов их решения (принцип новых задач при автоматизации, провозглашённый В. М. Глушковым). Поэтому при формировании первичного видения и проектировании применяются «выстраданные опытом» подходы, а на практике внедряются морально и технологически устаревшие решения.

Под интеллектуальностью искусственной (технической) системы понимается наличие у такой системы двух важных свойств. Во-первых, это возможность адаптации к изменяющимся условиям внешней среды при эксплуатации или изменяющимся условиям самой эксплуатации. Во-вторых, это высокая степень автономности её работы, в том числе и в части функциональности по принятию самостоятельных решений. Чем выше степень автономности и адаптивности искусственной системы, тем выше её интеллектуальность [Душкин, 2018с].

С другой стороны, под интеллектуализацией понимается процесс повышения степени интеллектуальности технической системы [Мохов, 1996]. Исходя из того, что интеллектуальность является составной характеристикой из двух более простых свойств, интеллектуализация представляет собой траекторию развития системы в рамках своего жизненного цикла от низкого уровня к высокому по двумерному пространству состояний.

Если рассмотреть относительные шкалы для описания и классификации технических систем по степеням их адаптивности и автономности, то можно представить непрерывное двумерное пространство, в котором каждая точка может соответствовать определённой технической системе с заданными степенями адаптивности и автономности от точки (0, 0) — полностью неадаптивная и неавтономная система до точки (1, 1) — совершенно адаптивная и автономная система (рис. 1).

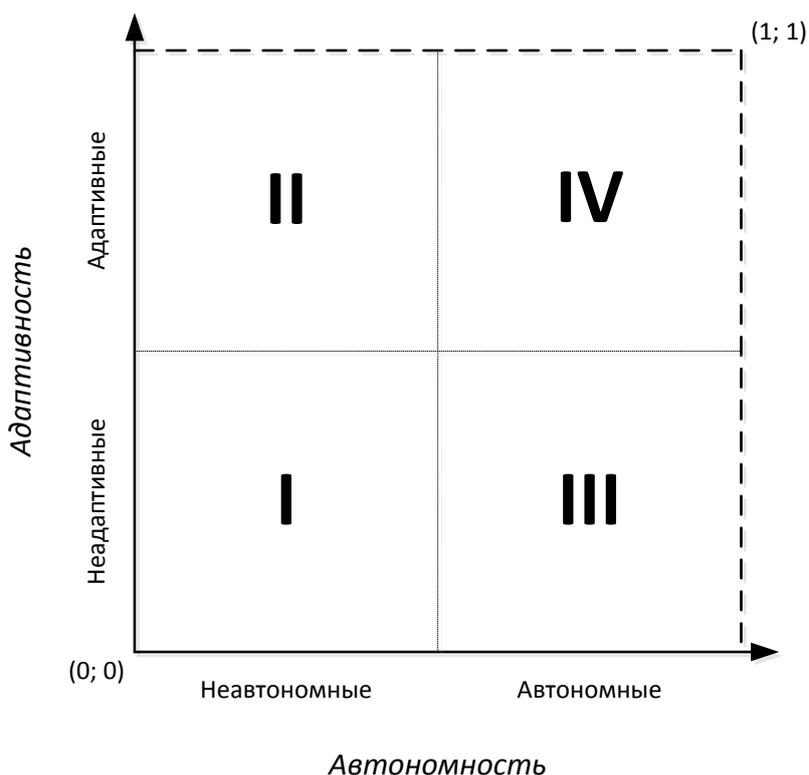


Рис. 1. Квадранты для классификации технических систем по адаптивности и автономности для выявления степени интеллектуальности систем

В качестве типовых примеров систем, которые находятся в квадрантах двумерного классификатора интеллектуальности систем, можно привести следующие:

- I. *Робот-манипулятор на промышленном производстве* — обычно такой робот предназначен на выполнение заданной последовательности действий (низкая адаптивность) и в принципе не предназначен для продуцирования каких-либо решений (отсутствие автономности).
- II. *Робот-пылесос* — этот робот при попадании в незнакомое окружение обследует новое пространство и строит его модель для дальнейшего использования в своей работе (высокая адаптивность), но при этом выполняет только одну функцию уборки помещения с запуском по команде владельца или по триггеру в календаре (низкая автономность).
- III. *Система поддержки принятия решений в заданной проблемной области* — такая система обычно уже предназначена под определённые ситуации и добавление новой ситуации требует существенной доработки системы (низкая адаптивность), при этом система сама готовит решения и объясняет их (высокая автономность).
- IV. *Персональный помощник* — система для планирования, напоминания, выполнения рутинных действий, которая постоянно обучается во взаимодействии со своим пользователем (высокая адаптивность) и при этом может самостоятельно запускать различные сценарии общения со своим пользователем и в рамках такого общения самостоятельно делать выбор в пользу того или иного варианта решения на основе прошлых предпочтений пользователя (высокая автономность).

Таким образом, интеллектуализация представляет собой процесс перевода (эволюции) технической системы из её текущего положения в пространстве «Адаптивность — Автономность» в четвёртый квадрант как можно ближе к точке (1; 1). Из квадрантов II и III такой переход может быть осуществлён непосредственно, в то время как из квадранта I может существовать три возможных траектории интеллектуализации системы (рис. 2).

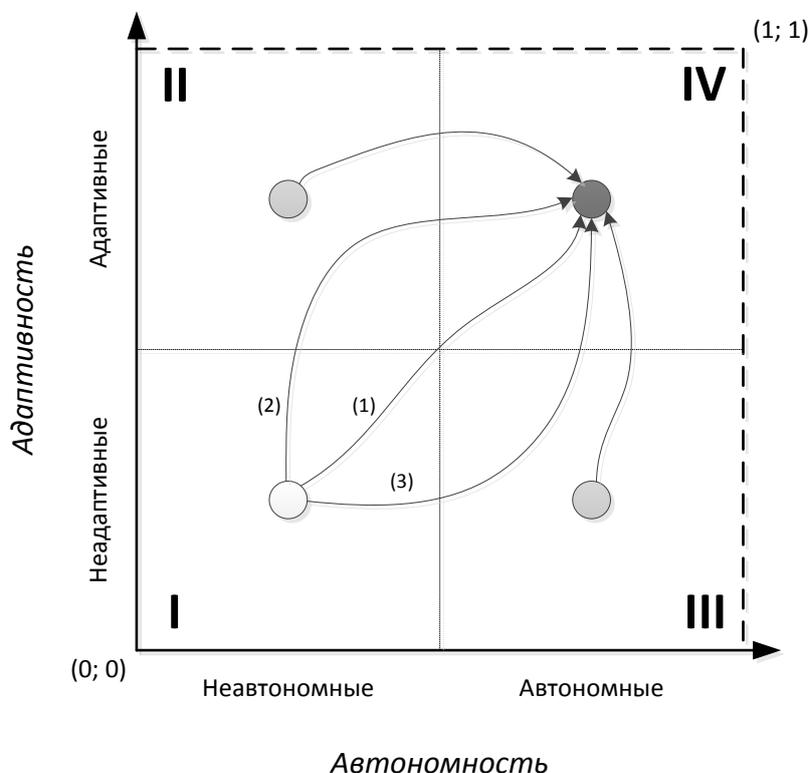


Рис. 2. Возможные траектории интеллектуализации технических систем

Традиционной методологией научного познания, применяемой для работы с техническими системами, является системный подход [Садовский, 1980]. Этот методоло-

гический инструментарий предлагает широкие возможности по анализу и синтезу сложных систем практически любой природы. Вместе с тем, несмотря на кажущуюся универсальность, системный подход обладает существенным недостатком — системы рассматриваются в качестве взаимосвязанного набора элементов, под которыми часто понимаются некоторые объекты в отрыве от общего предназначения системы, её эмерджентно возникающих функций и их взаимосвязи с функциональностью каждого элемента. В итоге зачастую на практике получаются перекосы, когда при проектировании сложной технической системы она рассматривается в качестве некоторого набора объектов, общая и интегральная функциональность которых никого не интересует.

Функциональный подход разработан в рамках декларативного программирования и основан на понятии математической функции. Функциональное программирование оперирует функциями, как базовыми примитивами для описания алгоритмов. Это позволяет рассматривать вычислительные процессы в качестве последовательности вызовов функций, каждая из которых может выражаться через атомарные действия и вызов других функций, в том числе и самих себя при организации рекурсивных вызовов [Душкин, 2006].

Математическая функция представляет собой «чёрный ящик» с множеством входов и множеством выходов (рис. 3). Чёрный ящик реализует некоторое вычисление, то есть преобразование входных значений в выходные. Функции обладают двумя важными свойствами — детерминированностью и чистотой. Детерминированность обозначает, что результат вычислений функции зависит только от значений входных параметров. Чистота обозначает, что функция только возвращает значение, не выполняя никаких побочных эффектов. Фактически, свойства детерминированности и чистоты подразумевают, что функция работает только с выделенной для её работы памятью, ничего не получая из внешней памяти и ничего не записывая в неё.

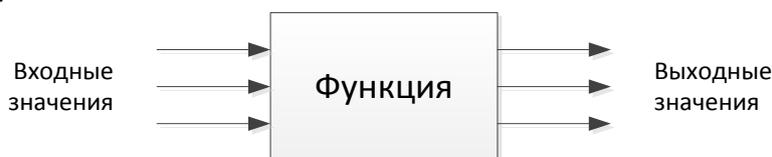


Рис. 3. Функция как чёрный ящик с входами и выходами

Такие свойства функций позволяют организовывать вычисления в виде организации цепочек выполнения функций, когда одни, закончив свои вычисления, передают результаты следующим. Главная особенность состоит в том, что такие цепочки могут вычисляться параллельно — если функции не зависят друг от друга, то они могут безопасно быть вычислены в параллельном режиме, так как ни одна из них гарантированно не повлияет на память, используемую другой [Душкин, 2008a]. Это, в свою очередь, позволяет избежать многих проблем, возникающих в рамках параллельных или конкурентных вычислений, основанных на обычной вычислительной модели [Blelloch].

Вместе с тем рассмотрение вопросов автоматизации технологических процессов раскрывает важную роль различных устройств ввода-вывода [Душкин, 2018b]. К устройствам ввода обычно относятся разного рода датчики, в то время как устройства вывода — это обычно исполнительные устройства. Эти типы устройств предназначены для непосредственного взаимодействия со средой, а это означает, что в них нарушаются свойства детерминированности и чистоты. Ввод информации из среды всегда связан с недетерминированностью, а вывод информации в среду — это побочный эффект. Таким образом, использование устройств взаимодействия со средой в процессе выполнения технологического процесса нарушает базовые принципы функционального подхода. На рис. 4 схематично представлена описанная ситуация использования устройств ввода-вывода, взаимодействующих со средой, в системах управления.

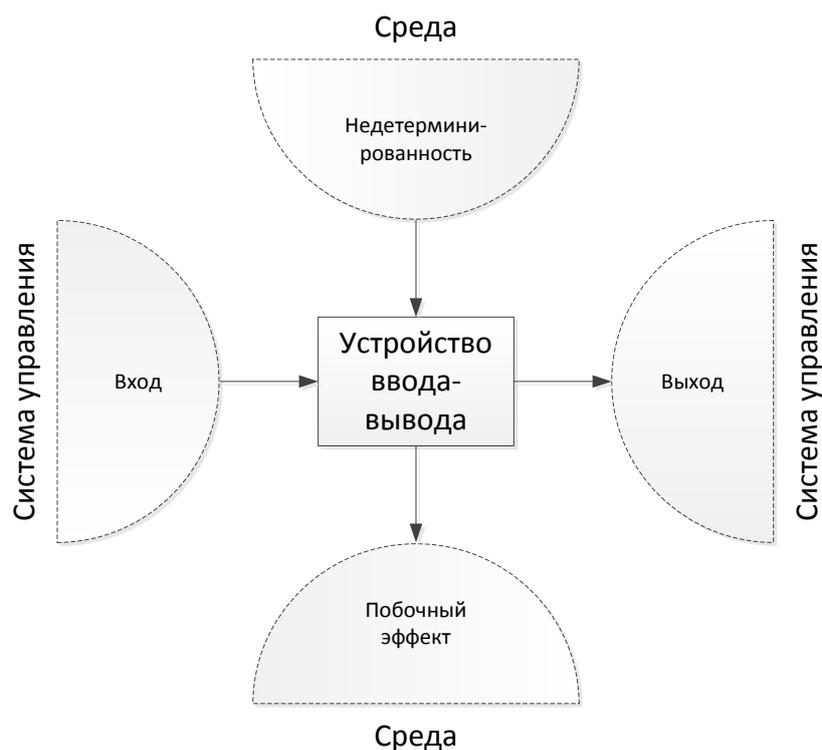


Рис. 4. Взаимодействие устройства ввода-вывода в рамках системы управления со средой

Вместе с тем, функциональный подход имеет ряд ограничений и недостатков. В частности, не учитывается взаимное влияние функций различных подсистем и элементов друг на друга и на смежные элементы. При проектировании и реализации могут создаваться подсистемы в рамках одной системы управления, которые обладают антагонистичной функциональностью, и функции в её составе могут быть не разнесены ни в пространстве, ни во времени, что приводит к конфликтам.

Следствием этого ограничения функционального подхода является то, что процесс интеллектуализации, выполняемый в рамках функционального подхода, практически невозможно осуществить напрямую из квадранта I в квадрант IV, и требуется промежуточное состояние технической системы в квадранте II или III. Это происходит из-за необходимости постепенного решения возникающих функциональных противоречий путём перевода ряда функций в новый режим работы — автономный или адаптивный. Решить эту проблему может позволить комплексотехника [Мохов, 2011].

Комплексотехника — это научно-практическое направление в исследовании возможностей объединения систем с противоположными целями функционирования. Для устойчивого функционирования такого объединения характерным является согласованный режим обмена функциональным ресурсом каждой из систем в сформированном объединении. При этом функциональный ресурс, которым обмениваются системы при взаимодействии, является для принимающей стороны необходимым для её дальнейшего функционирования, а для передающей стороны — ненужным (или даже мешающим) для её функционирования.

Взгляд на описанную выше проблему со стороны комплексотехники позволяет частично компенсировать те недостатки функционального подхода, которые обнаруживаются при использовании его исключительно в рамках системотехники и системного рассмотрения вопросов управления сложными техническими системами с высокой степенью интеллектуальности [Котельников, 1989]. По мнению авторов это позволит выйти на новые рубежи в области создания «умных» систем управления технологическими и управленческими процессами в различных отраслях хозяйственной деятельности человека.

## Materials and Methods (Материалы и методы)

С точки зрения научного мировоззрения вряд ли можно опровергнуть или подтвердить закономерность, заключающуюся в том, что какие-то особенности мышления и разума, отличающиеся у разных людей, как-то связаны с двумя типами или подходами к описанию сложных систем — объектным и функциональным. Эти особенности мышления с давних времён приводили к попыткам разработать способы классификации и типизации характеров человека по каким-либо шкалам (в качестве простейшего примера часто приводят шкалу «интровертность — экстравертность») [Душкин, 2009]. Хотя, скорее всего, причины, приведшие к возникновению двух подходов к описанию сложных систем, находятся в каком-то ином аспекте, нежели приведённый пример шкалы, вопрос этот всё ещё ждёт своего внимательного исследователя.

Тем не менее, и объектный, и функциональный способ описания сложных систем были известны и применялись с давних времён, так что сейчас уже вряд ли можно узнать, какой способ был разработан первым. Дробление системы на компоненты, как особенность объектного подхода, можно было бы рассматривать в качестве естественного способа выражения способа описания объективной реальности человеком при её познании. Это связано, в первую очередь, с тем, что человеческий мозг настроен на классификацию, обобщение и поиск закономерностей в структуре познаваемых объектов.

Вместе с тем невозможно утверждать, что функциональный способ описания систем не был известен до появления таких наук, как кибернетика, теория вычислений и теория информации в том или ином виде. Декомпозиция задачи на подзадачи и выражение ещё нерешённых проблем через уже решённые — эти методы решения задач были известны с давних времён, и именно они составляют сущность функционального подхода. При этом, конечно, необходимо отметить, что эти методы также могут применяться и в рамках объектного подхода как проявление в нём отдельных особенностей функционального стиля. Именно функциональный подход к интеллектуализации объектов и является предметом рассмотрения настоящей статьи.

Имеет смысл рассмотреть различные варианты применения функционального подхода к управлению в целом и отдельными классами объектов управления, которые приняты в России и за рубежом.

В целом сущностью функционального подхода в рамках теории управления является рассмотрение цели и потребностей через призму множества функций, которые необходимо выполнить для достижения цели или удовлетворения потребностей. При специфицировании этого множества функций реализуется один или несколько субъектов для исполнения этих функций, после чего выбирается такой функциональный субъект, для работы которого требуется минимальное количество совокупных затрат в течение всего жизненного цикла объекта управления на единицу полезного эффекта.

Если рассматривать только искусственные технические системы произвольной сложности, то функциональный подход можно упростить до анализа и синтеза функциональной структуры системы. Для этого осуществляется рассмотрение комплекса функций системы и формирование соответствующей функциональной структуры. Процесс проектирования или совершенствования технической системы, отдельных её подсистем и элементов представляет собой моделирование функциональной структуры в следующей последовательности [Мухин, 2003]:

1. Формирование «дерева» функций системы;
2. Декомпозиция «дерева» функций системы до уровня набора базовых функций;
3. Формирование модели функциональной структуры системы;
4. Формирование морфологических моделей системы;
5. Многокритериальная оценка и выбор предпочтительных вариантов функциональной структуры системы.

Отдельные исследователи отмечают, что пренебрежение вышеописанным планом функционального анализа ведёт к своеобразному перекосу, когда система начинает рассмат-

риваться не с точки зрения её предназначения в рамках своей надсистемы и функциональных характеристик для пользователя и потребителя, а как ценностная сущность сама по себе [Душкин, 2018b]. Система становится как бы набором объектов, обладающих самостоятельной ценностью, что для технических и даже киберфизических систем является скорее «нонсенсом, возведённым в норму». В качестве примеров проявления такой порочной практики можно привести закупку и установку периферийного оборудования какой-либо автоматизированной системы управления (например, автоматизированной системы управления дорожным движением или автоматизированной системой управления умным домом), которое при эксплуатации не имеет ни социального, ни экономического эффекта. В конечном итоге всё такое периферийное оборудование либо переводится в режим сниженной функциональности (например, светофор в жёлтом мигании), либо консервируется, либо вовсе отключается и демонтируется.

Выполнение перечисленных шагов формирует так называемое функциональное описание системы. На самом верхнем уровне это описание представляет собой перечень функций системы, которые могут быть даже не связаны между собой. Однако на первом же уровне декомпозиции начинают появляться связи между функциями, сами функции привязываются к подсистемам и элементам, и вся проектируемая или анализируемая техническая система наполняется функциональным смыслом [Магса, 1987]. При этом на каждом уровне каждая функция отражает предназначение или отдельный аспект такого предназначения системы в своей надсистеме и представляет собой отображение рабочего действия, выполнение которого возлагается на систему при заданных требованиях, условиях и ограничениях.

В результате такой декомпозиции появляется специфическая иерархия функций, общую структуру которой можно пояснить при помощи следующей абстрактной диаграммы, показанной на рис. 5.

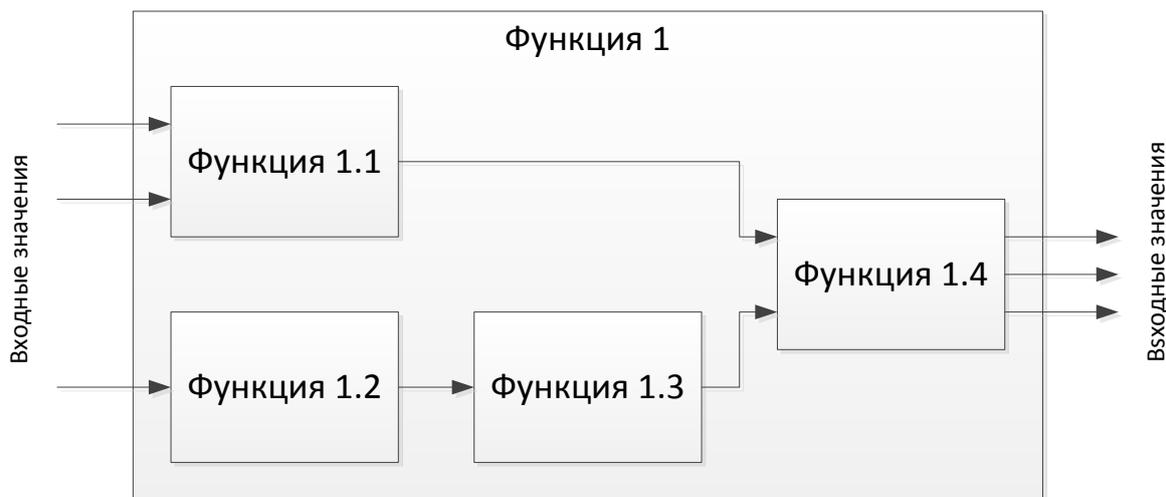


Рис. 5. Один уровень декомпозиции «Функции 1»

Представленная диаграмма подсказывает, что между функциями имеется два вида отношений [Душкин, 2006]:

1. *Включение*. Например, функция 1 определена через вызовы четырёх функций более низкого уровня декомпозиции.
2. *Передача результата*. Например, функция 1.1 передаёт результат своих вычислений в Функцию 1.4 в качестве первого параметра.

Таким образом, функциональный подход при проектировании технических систем основывается на предположении о том, что внимание проектировщика должно быть сконцентрировано на задачах и выполняемых для их решения функциях, а не на объектах или абстракциях, как существующих, так и планируемых к реализации [Душкин, 2006]. Функциональный подход предполагает, что любая техническая система, которая проектируется для дальнейшего внедрения и эксплуатации, должна выполнять какие-либо полезные действия и предоставлять полезные функции. Если, к примеру, осуществляется автоматизация

какой-либо деятельности, то требуется понимать смысл и цель этой деятельности, предназначение системы и её функциональную взаимосвязь со смежными системами, своей надсистемой и средой, в которой она функционирует. При этом необходимо оптимально распределить функции между человеком и комплексом средств автоматизации, так как сам смысл автоматизации состоит в том, чтобы рутинные, сложные или опасные для человека действия выполняли средства автоматизации.

Учитывая перечисленное выше, при рассмотрении некоторой заданной технической или киберфизической системы для её интеллектуализации необходимо осуществить следующие шаги:

1. *Функциональный анализ.* Необходимо построить как можно более полную модель функционирования системы с декомпозицией функций и распределением их по подсистемам и элементам. Это позволит распределить имеющиеся функции по сенсорам, исполнительным устройствам и реактивной подсистеме управления.
2. *Проектирование на основе системотехники.* По заданному целевому состоянию системы и её предназначения в рамках её надсистемы необходимо спроектировать оптимальную структуру с учётом выявленной на предыдущем шаге функциональности. При этом в процессе проектирования какие-то функции могут быть изменены или исключены, а какие-то введены в состав системы. На этом шаге необходимо построить проактивную подсистему управления с дополнительными элементами, осуществляющими интеграцию информации с сенсоров, трансляцию управленческих воздействий и взаимодействие с реактивной подсистемой управления.
3. *Дополнение проекта на основе комплексотехники.* При рассмотрении системы в комплексе с её окружением, а в особенности с надсистемой и внешней организационной системой управления (если таковая существует и используется), необходимо рассмотреть дополнительную функциональность изучаемой системы так, чтобы новые функции имели определённую ценность на более высоких уровнях применения. Это позволит вывести процесс повышения эффективности и оптимальности на более высокий уровень рассмотрения и не допустит проявления ситуаций, когда интеллектуализация системы и повышения эффективности её функционирования в частности приводит к снижению эффективности в целом, в рамках комплекса систем.
4. *Функциональный синтез.* В итоге вся оптимизированная функциональность интеллектуализированной системы собирается вновь и выстраивается в виде функциональных схем взаимодействия системы с её окружением, которое включает надсистему, все смежные системы и окружающую среду. Результатом процесса должна стать система с повышенными уровнями автономности функционирования и адаптивности к изменениям внешних условий деятельности.

Другими словами, решение задачи интеллектуализации сложных технических (и социотехнических), а также киберфизических систем основано на использовании методов функционального анализа, системотехники, комплексотехники и функционального синтеза. Процесс решения задачи интеллектуализации можно проиллюстрировать при помощи диаграммы, показанной на рис. 9.

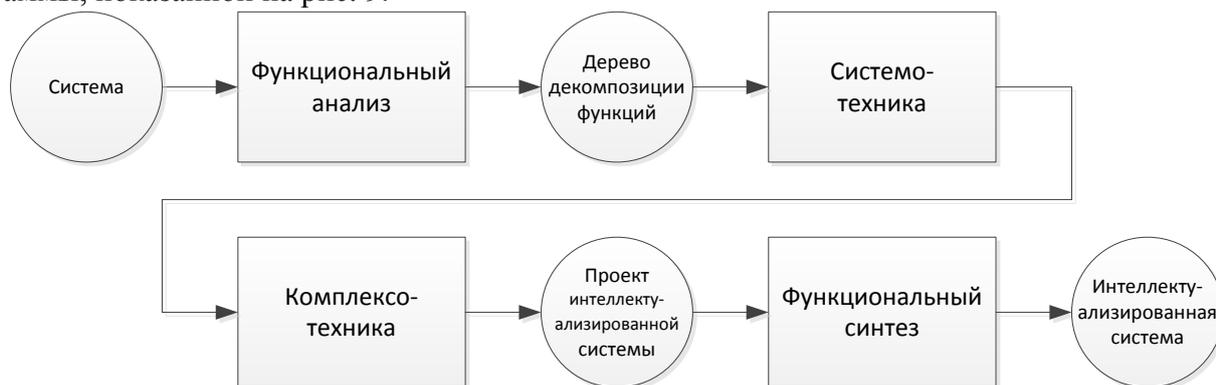


Рис. 6. Процесс решения задачи интеллектуализации заданной системы

## Results (Результаты)

Общая (абстрактная) схема автоматизированной системы управления может быть представлена диаграммой, показанной на следующем рисунке [Эшби, 1959]:



Рис. 7. Общая схема автоматизированной системы управления

Фактически, эта схема в другом аспекте показывает то же самое, что изображено на рис. 4, но при этом со средой теперь взаимодействует некоторая система управления. Сенсоры, сама система управления и исполнительные устройства — всё это можно воспринимать как некоторые функции, через которые осуществляются реактивные воздействия на среду. Вместе с тем, это именно реактивная схема управления, в которую требуется внести изменения для повышения степени интеллектуальности.

Интеллектуализация представленной схемы управления заключается в наращивании дополнительного контура принятия решений, работа которого основана на двух дополнительных возможностях — машинном обучении и логическом выводе. Расширенная (интеллектуализированная) схема управления показана на следующем рисунке [Душкин, 2018с].



Рис. 8. Общая схема интеллектуальной системы управления

Как видно, единая система управления разбита на две подсистемы:

1. *Реактивная подсистема управления* — фактически, реализует традиционную схему управления, когда сигналы с сенсоров обрабатываются системой управления и по ним

осуществляется формирование управленческих воздействий на среду (объект управления) через исполнительные устройства.

2. *Проактивная подсистема управления* — добавляет дополнительный промежуточный уровень, который позволяет осуществлять обучение системы, построение прогноза на основе моделирования среды и своего поведения в ней, построение плана действий и сравнение факта с прогнозом и планом для осуществления обучения (адаптации) системы к изменяющимся условиям внешней среды.

Эти подсистемы связаны друг с другом при помощи передачи фокуса управления. Когда проактивная подсистема создаёт новый паттерн поведения системы в изменившихся условиях, и среда «устоялась», контур управленческого воздействия спускается в реактивную систему, происходит автоматизация реакции, так как, фактически, для неизменяющихся условий деятельности обучение и проактивное поведение не требуется, а потому реактивная реакция будет работать быстрее. Если же в процессе «рефлекторного» действия реактивной системы обнаруживается изменения в среде или объекте управления, то реактивная система эскалирует фокус внимания на проактивную для обработки изменившихся условий и выработки новых правил и паттернов поведения.

Цикл управления в рамках такой интеллектуализированной системы управления теперь заключается в последовательном выполнении следующих шагов:

1. Сбор входной информации со всех сенсоров, которые осуществляют мониторинг различных параметров объекта управления и среды, в которой функционирует система. Каждый тип сенсора в этом случае является отдельной индивидуальной *модальностью восприятия* системы.
2. Сенсоры очищают входную информацию от шумов и осуществляют первый выбор пути дальнейшей обработки. Если входная информация с сенсоров соответствует каким-либо автоматическим *паттернам поведения* системы, то фокус управления передаётся в реактивную подсистему, которая выбирает конкретный паттерн и исполняет его. Однако если в процессе реагировать по реактивному сценарию система обнаруживает, что что-то пошло не так, осуществляется эскалация на проактивную подсистему управления, как было описано ранее.
3. Если входная информация не имеет автоматической реакции для своей обработки, то осуществляется интеграция всех модальностей восприятия системы в единый блок описания объекта управления и среды. На выходе этого модуля появляется целостная картина восприятия, которая передаётся в проактивную подсистему управления.
4. Проактивная подсистема управления принимает решение на основе имеющихся у неё динамических моделей себя самой, объекта управления и среды. Здесь должны использоваться методы машинного обучения и нисходящей парадигмы искусственного интеллекта. На выходе проактивной подсистемы управления появляется управленческое воздействие, которое записывается в реактивную подсистему в качестве нового правила, а также направляется на исполнение.
5. Для исполнения управленческое воздействие переводится на язык конкретных исполнительных устройств, которые взаимодействуют с объектом управления и средой. Исполнительные устройства выполняют команду. Цикл работы завершается.

Вместе с тем в описанной схеме отсутствует важный компонент интеллектуальности — циклы контроля своего собственного состояния от каждого элемента интеллектуальной системы управления. Добавление таких циклов осуществляется через сенсоры — в наборе модальностей восприятия появляются внутренние модальности. Задействование сенсоров необходимо для очищения внутренней информации, которая так же, как и любая другая, может быть зашумлена.

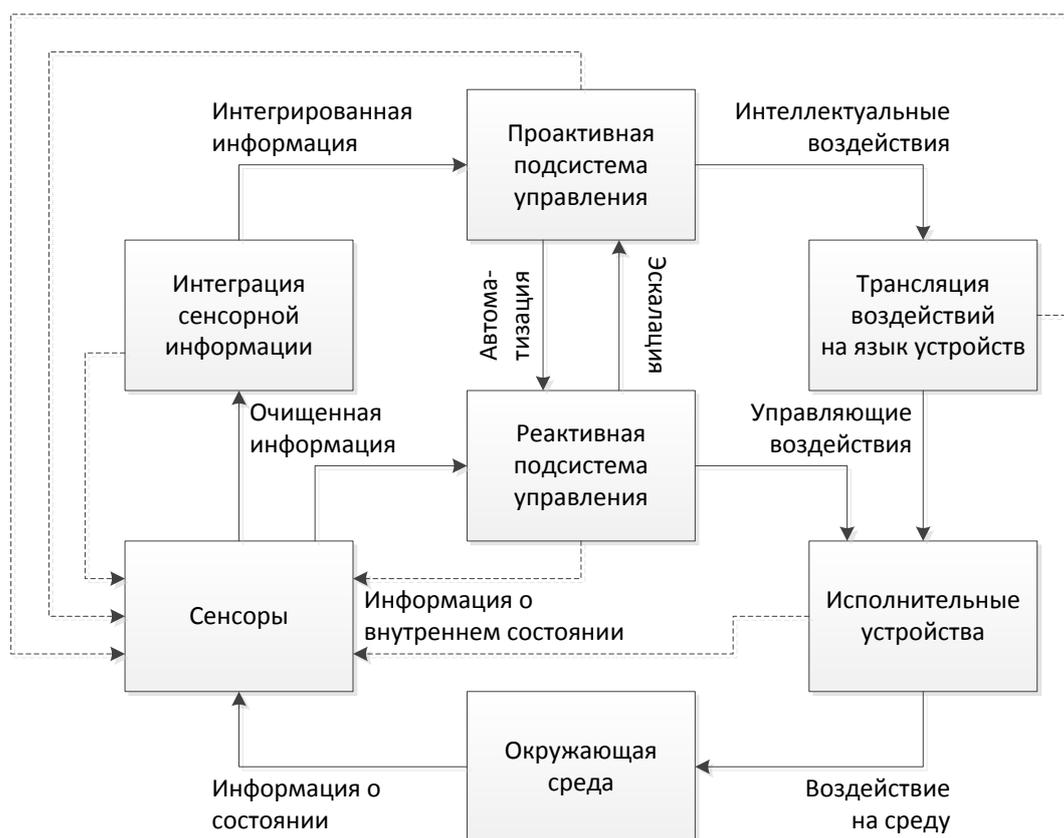


Рис. 9. Дополнение общей схемы интеллектуальной системы управления контурами самоконтроля

Интерес вызывает то, что система именно с такой архитектурой при переходе через определённый порог сложности может считаться разумной. Действительно, в соответствии с определением, данным нейрофизиологом Е. Р. Джоном, сознание — это «процесс, в ходе которого информация о множественных индивидуальных модальностях восприятия и ощущения сводится в единое многоплановое представление о состоянии системы и её окружения и интегрируется с информацией о воспоминаниях и потребностях организма, порождая эмоциональные реакции и программы поведения, способствующие приспособлению организма к его окружению» [Хофштадтер, 2003]. Представленная на рис. 8 кибернетическая схема на довольно высоком уровне абстракции описывает то, как функционирует нервная система человека и высших животных. Ведь «разумность» в этом смысле определяется как адекватное реагирование не только на стимулы внешней среды, но и на внутренние состояния, что также включает в себя постоянный мониторинг состояния собственной подсистемы управления, что называется «саморефлексией», которая и приводит к осознанию.

Таким образом, показано, что интеллектуализация системы управления — это процесс, который может быть осуществлён в рамках комплексотехники, но при этом аппарата системотехники не хватает. Это связано ещё и с тем, что в процессе функционирования системы в сложной среде и при её взаимодействии с различными агентами возникают системные противоречия и другие так называемые НЕ-факторы, обработка которых зачастую затруднена [Душкин, 2011]. Вместе с тем именно в рамках комплексотехники такая обработка вполне возможна.

Если рассмотреть процесс взаимодействия двух систем друг с другом в рамках некоторой комплексной среды  $S$ , то такое взаимодействие можно описать множеством информационных воздействий двух систем друг на друга, при этом каждое такое информационное воздействие  $i$  входит во множество допустимой функциональности либо одной системы из двух, либо обеих сразу, но для комплекса  $S$  функциональность получается объединённой. Этот тезис можно пояснить при помощи диаграммы, показанной на рис. 10 [Мохов, 2018].

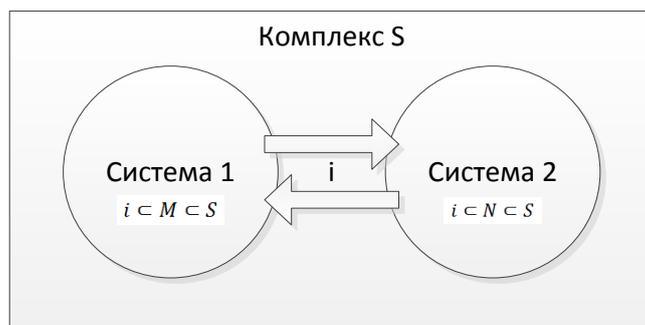


Рис. 10. Взаимодействие систем в комплексе

Для простоты дальнейших рассуждений считается, что Система 1 — это система управления или «система-субъект», а Система 2 — это объект управления или «система-объект». В этом случае взаимодействие между ними в рамках комплекса проявляется как управленческие воздействия и обратная связь. Показанная на рис. 10 диаграмма является «рафинированной» для более наглядного отображения. На практике система-субъект и система-объект часто пересекаются своими множествами функциональности  $M$  и  $N$ . И в этом случае область пересечения является объединённым функциональным ресурсом обеих систем или всего комплекса вместе взятого. Эта ситуация показана на рис. 11.

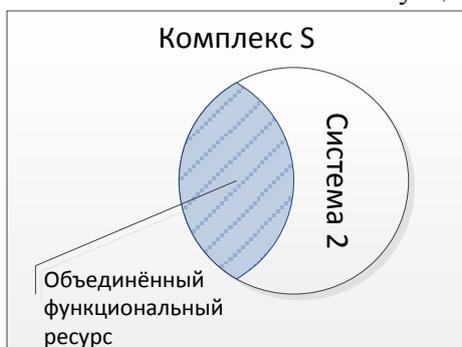


Рис. 11. Объединённый функциональный ресурс системы-субъекта и системы-объекта

Одной из задач комплексотехники, таким образом, становится интеллектуализация объекта управления в связанный интеллектуализированный комплекс управления. Инфографическая модель этого процесса может быть описана так, как показано на рис. 12.



Рис. 12. Инфографическая модель процесса интеллектуализации с точки зрения комплексотехники

Здесь под характеристиками данных имеется в виду набор мета-информации об используемых для контроля и управления объектом данных, на основе чего осуществляются управленческие воздействия. До осуществления процедуры интеллектуализации управ-

ление осуществляется от имеющегося архива данных и текущих характеристик объекта управления к текущим характеристикам данных. Это схема реактивного управления, даже несмотря на то, что оно основано на данных.

После осуществления перехода к интеллектуализированной системе-субъекту управление осуществляется также на основе данных, однако с использованием предиктивной модели можно осуществлять проактивное управление на основе прогноза с дальнейшим повышением степени адекватности модели при помощи сопоставления факта с прогнозом. Предиктивная модель рассматривает значения характеристик данных в будущем, какими они станут в результате осуществления управленческого воздействия.

Приведённые на рис. 12 графические компоненты могут быть сгруппированы в несколько пересекающихся друг с другом групп, каждая из которых соответствует имеющимся парадигмам или подходам к рассмотрению технических или киберфизических систем. В частности, предлагается следующее деление:

1. Традиционные технические технологии рассматривают реактивное управления объектом.
2. Новые технические технологии рассматривают проактивное управление объектом.
3. Социальные технологии изучают процесс интеллектуализации, так как в рамках этого процесса необходимо принимать во внимание наличие человека и социума как носителя интеллекта.
4. Гуманитарные технологии охватывают социальные, то есть процедуру интеллектуализации, и функцию моделирования в рамках проактивного управления, так как интеллектуализированная система-субъект должна принимать во внимание интересы и потребности человека, потребляющего услуги и сервисы этой системы.

Это предлагаемое деление показано на рис. 13.

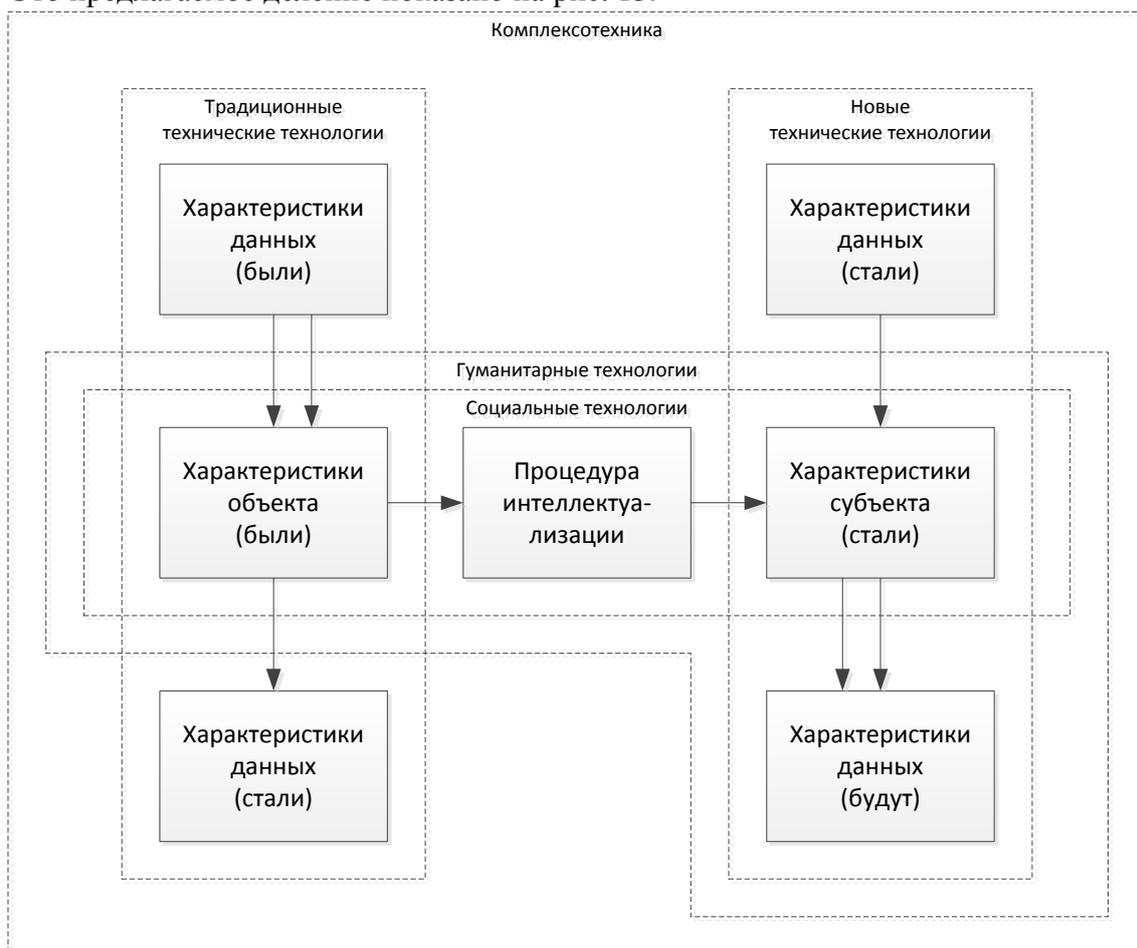


Рис. 13. Инфографическая модель процесса интеллектуализации с выделением базовых дисциплин

Всё это показывает, что при рассмотрении сложных киберфизических систем наиболее действенным будет междисциплинарный подход, который изначально включает в себя ком-

плексотехника, к их анализу и изучению с последующим применением функционального подхода к интеллектуализации.

## Discussion (Обсуждение)

Можно привести несколько примеров применения описанного подхода в различных практических областях:

1. *Интеллектуализация дистанционного образовательного процесса.* Традиционный дистанционный образовательный процесс для массового слушателя (МООС-курсы) основан на самостоятельном изучении курсантом учебных материалов и, возможно, редкое общение с сокурсниками и ассистентами преподавателя на специальных форумах. При этом анализ вопросов на форумах показывает, что в подавляющем большинстве случаев задаются типовые вопросы о курсе или по теме курса. Повышение степени интеллектуализации в этом случае основано на использовании системы (интеллектуального агента) для автоматической выдачи ответов на естественном языке на запросы курсантов в персонифицированном режиме с автоматизированным обучением интеллектуального агента ответам на вопросы, которых ранее не было в истории его взаимодействия с курсантами [Душкин, 2019].
2. *Автоматизация технологических процессов.* Практически любой автоматизированный технологический процесс можно уложить в описанную схему, так как всякий процесс укладывается в шаблон, показанный на рис. 6. Осуществление интеллектуализации основано на внесении в систему управления технологическим процессом модели объекта управления, среды функционирования и самой системы управления для прогнозирования и планирования управленческих воздействий с последующим самообучением или обучением в автоматизированном режиме на основе сравнения прогноза, плана и факта [Душкин, 2008b].
3. *Интеллектуализация управления внутренней средой «умного» здания.* Системы управления зданиями и сооружениями содержат большое количество различных датчиков для мониторинга состояния внутренней среды с целью контроля гомеостаза выделенных параметров, входящих во множество важнейших параметров жизнедеятельности здания. Наличие реактивной подсистемы управления позволяет должным образом реагировать на риски и угрозы, которые были известны и выявлены на этапе проектирования инженерных систем здания, однако такая система не справится с неучтёнными угрозами. Введение в контур управления проактивной подсистемы управления позволяет системе обучаться в процессе эксплуатации и правильным образом реагировать на возникающие в среде флуктуации параметров, нарушающих гомеостаз. При помощи подключения интеллектуализированных зданий к единой базе знаний возможно осуществлять обучение систем управления каждого конкретного здания и сооружения на основе «опыта» других зданий [Душкин, 2018b].
4. *Интеллектуализация управления дорожным движением.* Автоматизированные системы управления дорожным движением фактически реализуют единственную главную функцию диспетчеризации транспортных потоков, упорядочивая их во времени и пространстве для обеспечения транспортной безопасности. Переход к интеллектуальным транспортным системам осуществляется при помощи перевода режима управления с традиционного программного (включающего календарное управление) на адаптивное управления на полной улично-дорожной сети населённого пункта. Последнее обозначает, что прямые и косвенные управленческие воздействия на транспортные потоки (например, путём изменения длительности фаз светофорных циклов на конкурирующих направлениях) адаптивно изменяются в зависимости от считанных параметров транспортных потоков и прогнозов, данных транспортной моделью с учётом развития дорожной и метеорологической обстановки. Система самостоятельно (автономно) принимает реше-

ния об адаптивном изменении режимов функционирования периферийного оборудования, находящегося под её контролем [Андреева, 2017].

5. *Построение социотехнических систем класса «Умный город»*. Обычно под системами класса «Умный город» понимаются интегрированные друг с другом автоматизированные и информационные системы, выполняющие функции мониторинга базовых параметров городского хозяйства на уровне эксплуатации, что включает в себя мониторинг и управление энергетическим хозяйством, жилищно-коммунальным хозяйством в части поставки ресурсов и удаления отходов, транспортом и отдельными аспектами общественной безопасности (видеонаблюдение, тревожные кнопки, мониторинг состояния искусственных систем). Вместе с тем, интеллектуализация управления городским хозяйством должна подразумевать заключение в единый контур автоматического и автоматизированного управления всех сфер жизни города от базовых до высших уровней персональных и общественных потребностей. Это включает в себя как перечисленные выше аспекты в их интеллектуализированном понимании, так и такие сферы, как образование, здравоохранение, наука, культура, физкультура и спорт и все прочие функции города, включая функции муниципального управления. Само собой разумеется, что интеллектуализация управления всеми аспектами жизнедеятельности умного города должна осуществляться с учётом необходимости повышения степени автономности принятия решений и адаптивности к изменениям во внутренней и внешней среде города [Душкин, 2018d].

Подобные примеры можно привести из любой области человеческой деятельности, где возможна автоматизация выполняемых процессов при помощи технических или киберфизических систем.

Особый интерес вызывает пример № 3, так как любой житель непосредственно сталкивается с автоматизацией процессов эксплуатации жилья, которые происходят в настоящее время в связи с тенденциями движения к цифровой экономике, развитием методов искусственного интеллекта и интернета вещей. В этом случае вполне возможна компенсация недостатков системного подхода к интеллектуализации технических и инженерных систем здания, реализуемая за счёт возможностей функционального подхода, который позволит сформировать из умного дома именно интеллектуальное здание.

Под внутренней средой интеллектуального здания понимается всё множество объектов управления и их состояний, которые связаны с отдельными автоматизированными подсистемами, входящими в состав интеллектуальной системы управления зданием [Мохов, 2018]. Интеллектуальная система управления зданием при помощи датчиков получает из его внутренней среды информацию о состоянии, принимает решение и воздействует на среду при помощи своих исполнительных устройств.

В свою очередь, система управления состоит из большого количества автоматизированных и информационных подсистем, некоторые из которых имеют датчики и (или) исполнительные устройства, а другие являются чисто информационными, преобразующими информацию для подготовки и принятия решений по управлению внутренней средой интеллектуального здания. Общая классификация подсистем выглядит следующим образом [Душкин, 2017]:

- Единая интеграционная платформа;
- Система управления ресурсами;
- Система мониторинга инженерных систем;
- Система технического обслуживания и ремонта оборудования;
- Система технического и коммерческого учёта электроэнергии;
- Система управления лифтами;
- Система определения присутствия;
- Система управления освещением;
- Система управления водоснабжением и водоотведением;
- Система управления кондиционированием;

- Комплексная система безопасности;
- Другие возможные системы.

Под сценарием понимается последовательность условий и шагов, которые выполняются интеллектуальной системой управления зданием для реагирования на возникающие во внутренней среде события и активации процессов для достижения установленных целей управления. Сценарии могут быть классифицированы на три больших группы:

1. *Сценарии фиксации состояния* — во внутренней среде происходит какое-либо событие, информация о котором через датчики передаётся в систему управления, где информация «принимается к сведению». Никакой ответной реакции системы управления не осуществляется. Например, к такому сценарию относится сценарий мониторинга состояния инженерных систем интеллектуального здания.
2. *Реактивные сценарии* — опять же во внутренней среде происходит некоторое событие, которое передаётся в систему управления. Система управления интеллектуальным зданием принимает решение о том, какую реакцию на случившееся событие необходимо передать во внутреннюю среду. И, собственно, эта реакция направляется через исполнительные устройства. Это обычный сценарий работы любой кибернетической системы. Например, к такому сценарию относится сценарий включения оповещения о пожаре и эвакуации при детектировании задымления.
3. *Проактивные сценарии* — интеллектуальная система управления сама решает на основании своих внутренних стимулов о необходимости влияния на внутреннюю среду здания, после чего посредством исполнительных устройств такое влияние оказывается. Например, к такому типу сценариев относится предварительное включение отопления к приходу посетителей для того, чтобы сделать помещения комфортными для пребывания.

Сценарии могут быть классифицированы и по другим характеристикам. Несколько ортогональных систем классификации сценариев позволяют более чётко рассматривать каждый сценарий при его автоматизации и реализации, что повышает качество работы систем и средств автоматизации при работе в режиме эксплуатации.

Разработка интеллектуального алгоритма управления внутренней средой интеллектуального здания основана на перечисленных ранее общих принципах функционального подхода и типологии сценариев изменения внутренней среды. С учётом всего вышеперечисленного алгоритм управления внутренней средой интеллектуального здания состоит из следующих укрупнённых шагов:

1. Приём значения параметра (сигнала) внутренней среды интеллектуального здания с датчика или возбуждение внутреннего триггера для запуска проактивного сценария.
2. Предварительная обработка сигнала на окончном оборудовании (фильтрация).
3. Инкапсуляция отфильтрованного сигнала и передача инкапсулированного значения в систему управления.
4. Запись полученного значения параметра внутренней среды в историю значений с отметкой времени получения.
5. Выбор сценария для обработки полученного отфильтрованного сигнала или триггера.
6. Выполнение шагов выбранного сценария.
7. Постобработка результатов выбранного сценария, включая изменение знаний в базе знаний и адаптацию сценариев.
8. Направление результатов выполнения сценария на исполнительные устройства и во внешние системы.

Необходимо отметить, что сценарии должны быть сформулированы на специальном языке исполнения сценариев, который должен быть реализован в качестве проблемно-ориентированного языка [Ward, 1994]. В этом случае универсальный решатель выступает в качестве функции высшего порядка, дополнительно реализуя отдельные подходы и идиомы в рамках функциональной парадигмы программирования.

## Conclusion (Заключение)

Всё перечисленное позволяет говорить о том, что использование функционального подхода при автоматизации технологических процессов и интеллектуализации управления в рамках перехода к Индустрии 4.0 позволит достичь важных эффектов, к которым относятся:

1. Повышение эффективности управления технологическими процессами.
2. Повышение степени устойчивости внутренней среды объектов управления.
3. Снижение времени на локализацию и устранение аварийных ситуаций в объектах управления и системах управления.
4. Снижение расходов на эксплуатацию как самой системы управления, так и всего управляемого комплекса в целом.

Кроме того, с эксплуатационной точки зрения при проведении процессов интеллектуализации технических систем в рамках комплексотехнического и функционального подходов могут быть достигнуты следующие показатели:

1. Функциональный подход и внедрение технологий интернета вещей даёт беспрецедентный уровень мониторинга технологических операций, что позволяет быстро менять неэффективные или устаревшие процессы.
2. Функциональный подход при управлении вполне совместим с уже имеющимися решениями, но при этом даёт возможность увеличить время безотказной работы и повысить производительность. Более того — результаты внедрения можно измерить.
3. Для различных подсистем комплекса управления можно использовать этапность перехода и точечные изменения при приведении к функциональному подходу, что позволит постепенно интегрировать внутреннюю среду объекта управления в единый интернет вещей.
4. Интернет вещей, используемый при управлении в совокупности с функциональным подходом, нивелирует или даже исключает тренд «взросления» рабочей силы, поэтому интеллектуализированные решения можно будет применять для возмещения опыта уходящих работников.

В качестве рабочих выводов настоящей работы можно перечислить следующие:

1. В настоящее время имеются три модели комплексотехники для описания реальных объектов: комплексные системы, нагруженные системы, комплексная среда объединения систем.
2. При комплексном подходе (в рамках комплексотехники) моделирование технической системы осуществляется совместно с организационной системой.
3. Разрыв между гуманитарными и техническими науками связан с несогласованностью режимов интеллектуализации объектов и субъектов в процессе их взаимодействия.
4. Переход к пятому поколению автоматике позволит согласовать режимы научно-технического прогресса и организационно-деятельностного развития.
5. Искусственный интеллект в высокотехнологических сферах — это уже реальность, если сфера техническая.

Вместе с тем функциональный подход также позволяет развивать потребительские технологии, выводя уровень предоставляемого клиентам сервиса на новый уровень.

Однако для получения более конкретных значений для перечисленных эффектов, а также для измерения степеней эффективности управления, устойчивости развития и уровня снижения расходов на эксплуатацию объектов управления, что может стать достигнутым при внедрении функционального подхода в управление, требуется проведение более детальной апробации и дополнительных исследований.

Представление результата деятельности по интеллектуализации систем и объектов управления в виде вкладов в рост возможностей их функционирования и фиксации в форме «функциональных следов» позволяет сформировать функциональный дизайн внутренней среды объекта управления.

Предполагается, что дальнейшие исследования в описанном направлении позволят масштабировать полученные результаты на комплексы систем управления уровня муници-

палитета, населённого пункта, региона и даже всего государства. В свою очередь это масштабирование может привести к увеличению степени устойчивости, жизнеспособности и развития всех перечисленных сложных социотехнических систем, и, как следствие, снизит нагрузку на экологию, социальные и технические аспекты жизни общества.

## Recommendations (Рекомендации)

С учётом выводов заключения авторы могут дать следующие рекомендации по развитию темы настоящей статьи:

1. Описанный подход к интеллектуализации может быть развит в полноценную методологию интеллектуализации систем управления с учётом особенностей различных типов и классов объектов управления.
2. Возможно рассмотреть применение методологии интеллектуализации не только к техническим и искусственным системам, но и к системам иной искусственной природы — организационным, социальным и другим.
3. Найденные закономерности в интеллектуализации взаимодействующих систем позволят разработать и подготовить к применению методику «функционально-стоимостного синтеза» объектов управления.

## References (Литература)

1. Blleloch G. E.; Maggs B. M. Parallel Algorithms. — USA: School of Computer Science, Carnegie Mellon University.
2. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J., eds., 2013: Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group.
3. Marca D., McGowan C. Structured Analysis and Design Technique. — McGraw-Hill, 1987. — ISBN 0-07-040235-3.
4. Ward M. Language Oriented Programming. — Computer Science Department, Science Labs, 1994.
5. Андреева Е. А., Белкова Е. В., Душкин Р. В., Жарков А. Д., Курочкин Е. А., Левин Н. В., Морозов В. П. Тематический обзор Ассоциации Транспортных Инженеров: системы адаптивного управления дорожным движением и дорожные контроллеры. Вып. № 2/2017. — СПб.: ООО «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2017. — 48 с.
6. Глушков В. М. Основы безбумажной информатики. — М.: Наука, 1982. — 552 с.
7. Душкин Р. В. Функциональное программирование на языке Haskell. — М.: ДМК Пресс, 2006. — 608 с. — ISBN 5-94074-335-8.
8. Душкин Р. В. (2008a) Справочник по языку Haskell. — М.: ДМК-Пресс, 2008. — 544 стр., ил. — ISBN 5-94074-410-9.
9. Душкин Р. В., Коптев А. П. (2008b) Автоматизация деловых процессов при помощи Единого комплекса автоматизированных систем управления предприятием. В кн.: Сборник тезисов докладов I международной научно-практической конференции «ИНТЕХ-МЕТ-2008». 9 — 10 сентября 2008 года. — СПб.: СПГИ, 2008. — стр. 33-34.
10. Душкин Р. В. Функции и функциональный подход // Научно-практический журнал «Практика функционального программирования», Выпуск 1, Июль 2009. — стр. 17-28. — ISSN 2075-8456.
11. Душкин Р. В. Методы получения, представления и обработки знаний с НЕ-факторами. — 2011. — 115 стр., ил.
12. Душкин Р. В., Жарков А. Д., Иванов Д. А. От безопасного к умному городу — Нижний Новгород: ИТ Форум 2020. «Развитие цифрового государства. Создание систем весогабаритного контроля, интеллектуальных транспортных систем». — 12-14 апреля 2017 года.

13. Душкин Р. В. (2018a) Интеллектуализация управления автомобильными дорогами // Дорожная держава, № 83, август 2018.
14. Душкин Р. В. (2018b) Особенности функционального подхода в управлении внутренней средой интеллектуальных зданий // Прикладная информатика, Том 13, № 6 (78), 2018. — с. 20-31. — ISSN 1993-8314.
15. Душкин Р. В. (2018c) Почему за гибридными ИИ-системами будущее // Экономические стратегии, № 6 (156), 2018. — с. 84-93. — ISSN 1680-094X.
16. Душкин Р. В. Место ИТС в инфраструктуре Умного города // Мир дорог, № 110, август 2018.
17. Душкин Р. В. Развитие методов персонифицированного обучения при помощи использования интеллектуальных агентов. — В процессе публикации, план на 2019 г.
18. Котельников С. И. Формирование макетных систем обработки документации в условиях автоматизации проектирования: автореферат диссертации кандидата технических наук: 05.13.12 / Московский инж.-строит. ин-т им. В. В. Куйбышева. — Москва, 1989. — 16 с.
19. Мохов А. И. Методы и модели систем обработки документированных данных // В кн. «Махаллинские ансамбли». — М.: Центр, 1996. — С. 85-121.
20. Мохов А. И. Отличие в подходе системотехники и комплексотехники к созданию технических систем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2011, № 1 (т. 7). — С. 41-44.
21. Мохов А. И., Душкин Р. В. Концепция умного дома // Что такое «зелёный дом». — Совет по экологическому развитию в России, 28 сентября 2018.
22. Мухин В. И., Малинин В. С. Исследование систем управления: Учебник для вузов. — М: Издательство «Экзамен», 2003. — 384 с.
23. Садовский В. Н. Системный подход и общая теория систем: статус, основные проблемы и перспективы развития. — М.: Наука, 1980.
24. Хофштадтер Д. Р., Деннет Д. К. Глаз разума. — Самара: Бахрах-М, 2003. — 133 с. — ISBN 5-94648-023-5.
25. Эшби У. Р. Введение в кибернетику. — М.: Изд. иностр. лит., 1959. — 432 с.