

ГЛАВА 1. Теоретические основы функционального подхода к управлению интеллектуальными объектами

Развитие технологий открывает широкие возможности по решению новых задач в вопросах автоматизации и интеллектуализации технологических процессов и процессов управления. В рамках движения к четвёртой технологической революции (так называемая «Индустрия 4.0») [Bellandi et al., 2020] осуществляется развитие всевозможных «умных» систем и элементов инфраструктуры — умных дорог, умных домов, умных городов. Появление и всестороннее распространение таких умных элементов инфраструктуры предлагает использовать для автоматизации и интеллектуализации таких процессов новые принципы, выводящие объекты автоматизации на более высокие уровни эффективности и инновационности [Ансофф, 1989].

Вместе с тем, вопросы теоретического осмысления и практического применения новых технологий в автоматизации и интеллектуализации устоявшихся технологических и (или) производственных процессов рассматриваются мало. Многие исследователи при этом отмечают возникающие перед человечеством вызовы в связи с всё большим и большим внедрением отдельных технологий Индустрии 4.0 в бизнес, производство и жизнь [Kagermann et al., 2013; Lasi et al.; Jasperneite & Niggemann, 2012; Jay et al., 2013; Jay et al., 2014]. Такие вызовы касаются не только ряда сложно решаемых морально-этических проблем, но и разрыва в технологиях и их применении, когда при наличии уже апробированных технологий на практике внедряются устаревшие методы, либо новые методы и технологии применяются для «автоматизации старого беспорядка» [Hülsbömer, 2015]. Это происходит потому, что вопросы теоретического осмысления и практического применения новых технологий в автоматизации и интеллектуализации устоявшихся технологических и (или) производственных процессов рассматриваются мало. Часто при проектировании и разработке сложных социотехнических систем исповедуется принцип «если работает, то не надо трогать», а потому при проектировании используются «выстраданные опытом» подходы, а в практику внедряются морально и технологически устаревшие решения [Писаренко & Длигач, 2008].

Описанная ситуация касается, к примеру, автоматизации и интеллектуализации процессов жизнеобеспечения, технологических процессов и процессов управления интеллектуальными зданиями [Asadullah, 2016]. Несмотря на всестороннее развитие технологий и появление новых принципов, автоматизация таких процессов осуществляется на основе перевода части операций в составе технологического процесса на средства вычислительной техники или периферийную автоматику, при

этом кибернетический принцип новых задач, декларированный В. М. Глушковым [Глушков, 1982], практически не используется.

Однако на текущий момент вполне разработаны, апробированы в различных областях и успешно применяются для автоматизации и интеллектуализации разнообразных процессов следующие технологии [Загоруйко, 1999; Рассел & Норвиг, 2006; Таненбаум & Стеен, 2003; Kranenburg, 2008; Lee, 2010]:

1. Нейронные сети, машинное обучение и другие технологии искусственного интеллекта.
2. Распределённые вычисления и распределённые базы данных.
3. Одноранговые пиринговые сети, децентрализованные сети и «Интернет вещей».
4. Облачные, туманные вычисления и вычисления на стороне оконечного оборудования.

Представленный список не является полным и исчерпывающим, но при этом перечисленные технологии сегодня находятся на острие научных исследований, несмотря на то, что изучение некоторых из них началось десятилетия назад. Совмещение всех этих технологий для повышения эффективности процессов управления и принятия решений возможно в рамках так называемого функционального подхода, который основан на принципах функциональной парадигмы программирования, теории категорий и базового математического понятия функции [Душкин, 2006].

Исследование о ключевых технологиях, проведённое консалтинговой компанией PricewaterhouseCoopers [PwC, 2016], включает искусственный интеллект, Интернет вещей и децентрализованные вычисления в множество и восьми ключевых технологий для бизнеса, которые окажут существенное влияние на все аспекты и сферы жизни в самом ближайшем будущем. При этом, как указывается в отчёте, «Некоторые технологии дополняют друг друга и усиливают эффект от их использования, приводя к тому, что некоторые называют «Четвёртой промышленной революцией». Как отметили участники недавно проведённого PricewaterhouseCoopers обсуждения вопросов, связанных с развитием технологий, искусственный интеллект (развивающаяся технология) становится причиной совершенствования роботов (ещё одна развивающаяся технология), которые из заводских помещений переходят в отели и офисные кабинеты».

В настоящем диссертационном исследовании делается попытка совместить все перечисленные технологии в рамках функционального подхода, который описан на теоретическом уровне и приведена математическая модель процесса управления внутренней средой интеллектуального здания.

1.1. Краткий обзор и анализ литературы по вопросам интеллектуализации

Несмотря на то, что искусственный интеллект, как междисциплинарная область научных исследований, зародился в середине XX века [Люгер, 2005], вопросы применения методов искусственного интеллекта для повышения эффективности и качества процессов в экономике практически не рассматривались вплоть до самого

конца XX — начала XXI века. Старт процесса изучения интеллектуализации как использования методов и технологий искусственного интеллекта для автоматизации когнитивных задач и выстраивания сквозных автоматизированных бизнес-процессов на промышленных производствах, в управлении сложными техническими и социотехническими системами произошёл в начале 2000-х годов.

В первую очередь в литературе делается акцент на интеллектуализации управления. Действительно, управление, как базовый кибернетический процесс планирования деятельности регулятора, который воздействует на функцию преобразования входных параметров в выходные (при этом параметрами могут быть как информационные, так и материальные или энергетические потоки) [Эшби, 2006]. Действительно, как указывается в [Кельчевская, 2002], интеллектуализация управления должна внедряться в практику менеджмента организации в XXI веке, так как этот процесс представляет собой симбиоз двух ключевых понятий экономики XXI века — инноваций и интеллекта, синергетический эффект которых является залогом успешного развития промышленных предприятий.

В работе [Воронкова, 2017] отмечается, что интеллектуализация является главной особенностью четвёртой промышленной революции, которая разворачивается в мировой экономике в настоящее время [Байнёв, 2017]. Интеллектуализация подразумевает выполнение машинами уже и креативных (творческих, созидательных) функций человека, таких как исследование, анализ, прогнозирование, проектирование, конструирование и т. д. [Воронкова, 2017]. Вместе с тем, в отдельных работах (например, [Тынкачев & Бухнер]) под интеллектуализацией понимается узкий класс улучшений традиционных автоматизированных систем управления технологическими процессами, хотя и в этом случае предполагается, что интеллектуализация приведёт к повышению эффективности.

В ряде теоретических работ [Жебрун, 2007; Тимашова и др., 2017] интеллектуализация управления производственными и управленческими процессами рассматривается со скрупулёзной детальностью и существенной широтой представленного материала. В этих работах упор делается на применение методов искусственного интеллекта для повышения эффективности технологических, производственных и управленческих процессов. Так в работе [Жебрун, 2007] предлагается использование методов многоагентных систем и концепции роевого интеллекта для интеллектуализации, при этом упор также делается на реализацию системы управления роем агентов на базе гибридного подхода в области искусственного интеллекта. Работа [Тимашова и др., 2017] сосредоточена на использовании технологий символического подхода к искусственному интеллекту и методов обработки знаний.

Действительно, одной из больших технологий символического подхода в искусственном интеллекте является построение систем поддержки принятия решений вместе с экспертными системами в качестве ядра [Душкин, 2019с]. И этот вопрос также рассматривается исследователями в контексте интеллектуализации управления производством и бизнес-процессами. В качестве примеров можно привести работы [Юлдашева, 2017] и [Бутаев, 2008]. В статье [Юлдашева, 2017] резонно отмечается, что поддержка принятия решений должна быть основана, в том числе, и на результатах моделирования процессов и среды, что в полной мере соответствует

авторскому подходу к интеллектуализации в части активных и проактивных процессов в технических системах. Кроме того, в работе [Бутаев, 2008] даётся описание обобщённой архитектуры интеллектуализированной системы управления, а также утверждается, что интеллектуализация базируется на постоянном мониторинге результатов функционирования системы со сравнением плановых, прогнозных и фактических показателей и дальнейшей модификацией управленческих процессов так, чтобы приближать взаимные разницы значений этих показателей к нулю.

Остаётся отметить, что вопросы интеллектуализации в различных аспектах постепенно выходят в практическое русло. В качестве примеров можно привести несколько работ, в том числе и работ авторских коллективов, в которых одним из соавторов был автор настоящего диссертационного исследования. В частности, в работах [Духвалова и др., 2019] и [Боровой и др., 2019] интеллектуализация рассматривается в рамках процесса воспитания детей и оценки норм строительства соответственно. Работа [Мосеев, 2019] описывает реальные примеры интеллектуализации производства. Работа [Юсупов & Тимофеев, 2014] предлагает подход к интеллектуализации многоагентных робототехнических систем в области навигации. Наконец, работа [Донсков и др., 2018] описывает применение интеллектуализации в военной сфере. Эти примеры показывают, что интеллектуализация как следующий шаг после автоматизации плавно входит в реальное производство и управление.

В настоящее время сохраняется интерес к созданию и совершенствованию алгоритмов и моделей интеллектуализации процессов производства и управления. Это подтверждается приведённым кратким обзором литературы, посвящённой вопросам интеллектуального управления. Вместе с тем, несмотря на то что перечисленные работы в приведённом кратком обзоре литературы по теме интеллектуализации в целом дают общее понимание необходимости интеллектуализации производственных и управленческих процессов в разных отраслях промышленности и секторах экономики и государственного управления, вопросы интеллектуализации управления зданий и сооружений не рассматриваются. Более того, в литературе до сих пор отсутствует глубокая проработка вопросов интеллектуализации сложных технических и социотехнических систем разных классов. Настоящее диссертационное исследование призвано отчасти восполнить этот пробел.

Первоначально термин «интеллектуализация» был введён в психологии, где он означает психологический процесс, относимый к механизмам психологической защиты, заключающийся в бессознательной попытке абстрагироваться от своих чувств [Мак-Вильямс, 1998]. Используя этот вариант защиты, человек как бы переводит свои эмоции на абстрактный, интеллектуальный уровень, рассуждая о них как о неких теоретических понятиях, имеющих к нему некоторое отношение. Полноценное чувственное переживание при этом отсутствует. Эта форма защиты чрезвычайно эффективна, так как позволяет снижать зависимость собственного поведения от эмоций без полной потери информации об этих эмоциях. Поведение интеллектуализирующего человека в эмоционально насыщенной ситуации часто воспринимается как взрослое, зрелое, предсказуемое, и одобряется социумом. Это делает данную защиту довольно привлекательной для многих людей.

Вместе с тем развитие методов искусственного интеллекта и массированных их перенос в практическое русло для решения различных когнитивных задач в рамках технических систем программным или аппаратно-программным способом дало новое значение термину «интеллектуализация», а именно в качестве названия процесса повышения степени интеллектуальности технической или социо-технической системы. Сложно определить того, кто первым использовал этот термин в указанном значении, однако как показал вышеприведённый краткий обзор литературы многочисленные авторы научных работ и исследований свободно используют термин «интеллектуализация» для обозначения именно этого процесса.

В свете интереса настоящего диссертационного исследования имеет смысл рассмотреть значение термина *интеллектуализация*, данного в различных источниках, в трёх аспектах, а именно:

1. Интеллектуализация производства.
2. Интеллектуализация управления.
3. Интеллектуализация деятельности в целом.

В качестве метода исследования был выбран поиск по ключевым словам по наукометрическим базам РИНЦ и Истина МГУ. Было отобрано несколько источников, в которых даётся определение термину «интеллектуализация» как таковому. Таким источником оказалось совершенно небольшое количество (не более 10), поэтому для сравнения имеет смысл просто перечислить определение термина «интеллектуализация» с точки зрения различных авторов.

- В соответствии с [Тынкачев & Бухнер] *интеллектуализация производства* — это «неотъемлемый атрибут движения по пути прогресса. Даже обычные дома стали наделять интеллектуальными функциями». Это довольно скупое описательное определение, не имеющее серьёзной научной ценности, но дающее некоторое понимание того, что сегодня интеллектуализация производства является признаком инновационного развития.
- В работе [Кузьмин, 2009] дано следующее определение: *интеллектуализация* — это интеллектуальный инструмент развития экономики, основанной на знаниях, обеспечивающий конкурентное преимущество за счёт роста организационного интеллекта. Здесь тоже идёт речь об интеллектуализации производства для непрерывного развития экономической системы. Опять же, в работе показано, что интеллектуализация может стать драйвером модернизации экономики, перевода её на инновационный путь развития. При этом акцент делается на некоторый «организационный интеллект», под которым, судя по контексту, подразумевается совокупность интеллектуальных способностей организационного обеспечения социотехнической системы, подвергаемой интеллектуализации. Приведённое определение также сложно считать операционным, поскольку оно очевидно дескриптивно и, более того, спекулятивно. Тем не менее, отдельные аспекты процесса интеллектуализации производства оно раскрывает.
- Работа [Воронкова, 2017] даёт следующее понимание процесса интеллектуализации. Интеллектуализация подразумевает выполнение машинами уже и креативных (творческих, созидательных) функций человека, таких как исследования, анализ, прогнозирование, проектирование, конструирование и т. д. Это остенсивное определение уже переводит процесс интеллектуализации в

область новых технологий и в частности искусственного интеллекта, так как именно модели и методы искусственного интеллекта позволяют решать «креативные» задачи, основанные на когнитивных процессах человеческой деятельности. Вместе с тем, это определение опять довольно скупое и не даёт инструментальных средств для разработки моделей интеллектуализации существующих производственных систем.

- Интеллектуализация управления в соответствии с определением, данным в работе [Кельчевская, 2002], представляет собой новую концепцию управленческого процесса, которая предусматривает в качестве условий эффективного стратегического управления предприятием необходимость применения интеллектуальных инструментов управления, носящих ярко выраженный инновационный характер и направленных на достижение устойчивых долговременных конкурентных преимуществ, а также активное внедрение этих инструментов в систему оперативного и, что более важно, стратегического менеджмента, предъявление предприятиям, руководителям и рядовым работникам высоких требований, что, несомненно, обусловит необходимость коренного изменения самой системы образования, образовательных стандартов, предъявляемых рынком труда. Как видно, упор в этой работе и, соответственно, определении сделан на организационную составляющую системы управления с необходимостью повышения квалификации персонала. Несмотря на то, что организационный аспект социотехнической системы является её важным компонентом, интеллектуализация должна затрагивать не только его, но и технический аспект, то есть приведённое определение является неполным. Тем не менее, оно важно для целей построения инновационной экономики.
- В работе [Бережнов, 2017] даётся определение, основанное на использовании знаний. В соответствии с этой работой, интеллектуализация предприятия — это ориентация его деятельности на приобретение, создание и использование знаний с целью их преобразования в новые товары, услуги или бизнес-модели. Как видно, это определение не затрагивает технические системы как таковые, то есть они могут быть инструментами обработки знаний. Упор делается на знаниях как существенном компоненте человеческого интеллекта и, соответственно, важной части технологий искусственного интеллекта. Это важное декларативное определение, которое можно положить в основу выработки операционного определения для практических нужд.
- Автор работы [Дозорцев, 2006] пишет: «Термин «интеллектуализация» в оригинале означает защитный механизм, проявляющийся в чрезмерном преувеличении рассудочных компонентов за счёт эмоциональных и чувственных составляющих анализа. В технике под интеллектуализацией, по-видимому, понимают процесс привнесения составляющих интеллекта в систему управления, с чем вполне можно согласиться, если удастся понять, как эти составляющие проявляются в работе систем. Другими словами, ключевыми являются не сами переносимые структуры интеллекта, а механизмы их продуктивного функционирования в системе управления». Действительно, из этого рассуждения можно сделать вывод о том, что интеллектуализация процессов управления должна сопровождаться изменением механизмов управления и, как следствие, изменением процессов, выполняемых объектов управления. Это важно для дальнейших рассуждений в рамках настоящего диссертационного исследования.

- В работе [Чечкин & Пирогов, 2009] интеллектуализация технической системы рассматривается в аспекте обеспечения её безопасности. Действительно, по словам авторов этой работы, основной подход к обеспечению информационно-системной безопасности сложной системы — это интеллектуализация такой системы, то есть оснащение системы элементами интеллекта, создание у неё специального информационно-программного окружения, обеспечивающего безопасность поведения этой системы в рамках её метасистемы на протяжении всего её жизненного цикла. Эта позиция должна быть освещена, однако она слабо коррелирует с темой и предметом настоящего диссертационного исследования. Тем не менее, отдельные аспекты этого определения стоит принять во внимание.
- По словам экономиста Б. В. Салихова [Салихов, 2014], интеллектуализация современной экономики — это объективно-императивный процесс формирования и развития гуманистических основ хозяйственной деятельности. Вероятно, это определение имеет определённый смысл в рамках экономической теории, но для технических аспектов работы сложных технических и социотехнических систем стоит взять указание на то, что интеллектуализация таких систем является процессом объективным и необходимо последовательным. Фактически, объективное развитие человеческой цивилизации императивно потребует на каком-то этапе интеллектуализации деятельности и управления. Вместе с тем, в этой работе отсутствуют какие-либо чёткие и точные указания на то, как осуществляется интеллектуализация этих процессов.
- Наконец, в работе [Мохов и др., 2015] даётся следующее определение: «Интеллектуализация — это отбор, накопление, хранение и потребление государственных и частных информационных ресурсов, осуществление и защита интеллектуальных прав физических и юридических лиц, интегрирование и комплексирование информационных систем для создания и обеспечения услугами организаций и граждан». Это определение довольно расширительное и может использоваться как каркас для конкретизации на определённые виды деятельности. В частности, в рамках настоящего диссертационного исследования это определение процесса интеллектуализации будет использоваться при рассмотрении возможностей по построению комплекса систем управления зданием на основе интеграции инженерных систем здания.

Представленные определения термина «интеллектуализация», взятые из различных научных источников, показывают широкое разнообразие понимаемых под этим термином смыслов. Другими словами, отсутствует единообразное понимание, сложившееся на основе практического применения методов и технологий повышения интеллектуальности технических систем. Представленные определения основаны на теоретическом осмыслении авторами процесса интеллектуализации, его целей, задач и предназначения. Вместе с тем, для перевода теоретических изысканий в практическое русло требуется дать операционное определение термину, на основании которого строить математическую модель процесса.

В настоящем диссертационном исследовании делается попытка дать такое операционное определение термину «интеллектуализация» и, более того, построить на нём описание процесса перевода технических систем в интеллектуальное состояние с математической, технологической и инженерной точек зрения.

1.2. Основные направления в применении функционального подхода к управлению интеллектуальными объектами

Под интеллектуальностью искусственной (технической) системы понимается наличие у такой системы двух важных свойств. Во-первых, это возможность адаптации к изменяющимся условиям жизнедеятельности или 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 & Андронов, 2019b].

С другой стороны, под интеллектуализацией понимается процесс повышения степени интеллектуальности технической системы [Душкин, 2019b]. 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 дискретное или даже 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).

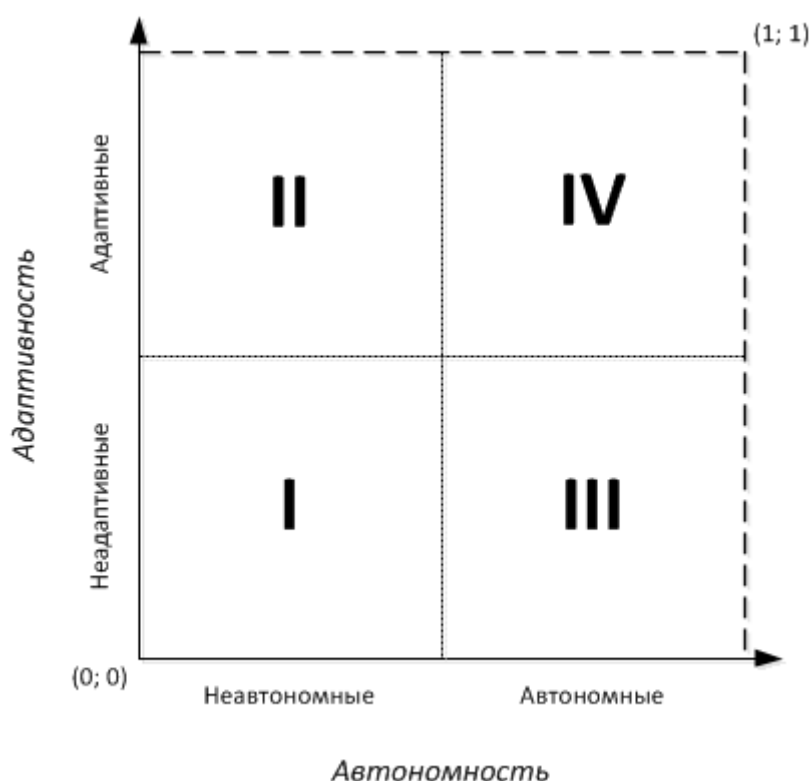


Рис. 1. Квадранты для классификации технических систем по адаптивности и автономности для выявления степени интеллектуальности систем

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 преднастроен на выполнение заданной последовательности действий (низкая адаптивность) и в принципе не предназначен для продуцирования каких-либо решений (отсутствие автономности) [Harada, 2020].
- 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) [Senoo et al., 2014].
- III. *Система поддержки принятия решений в заданной проблемной области* — такая система обычно уже преднастроена под определённые ситуации и добавление новой ситуации требует существенной доработки системы (низкая адаптивность), при этом система сама готовит решения и объясняет их (высокая автономность) [Zeebaree & Aqel, 2019].
- 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) [Душкин, 2019].

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).

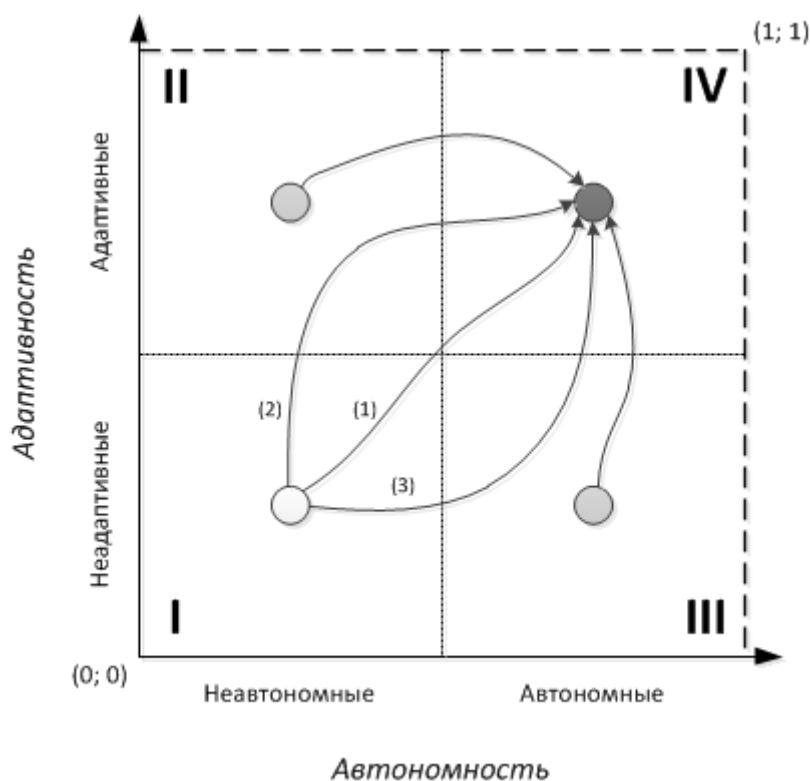


Рис. 2. Возможные траектории интеллектуализации технических систем

Традиционной методологией научного познания, применяемой для работы с техническими системами, является системный подход [Щедровицкий, 1981]. Этот методологический инструмент 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 [Елфимов, 2009]. 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 мало кого интересует.

Функциональный подход разработан в рамках декларативного программирования и основан на понятии математической функции [Guy & Mauny, 1998]. 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; O'Sullivan et al., 2008; Lipovača, 2011].

Математическая функция представляет собой «чёрный ящик» с множеством входов и множеством выходов. Чёрный ящик реализует некоторое вычисление, то есть преобразование входных значений в выходные (рис. 3). Функции обладают двумя

важными свойствами — *детерминированностью* и *чистотой*. Детерминированность означает, что результат вычислений функции зависит только от значений входных параметров. Чистота означает, что функция только возвращает значение, не выполняя никаких побочных эффектов [Душкин, 2006; Душкин, 2008]. 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.

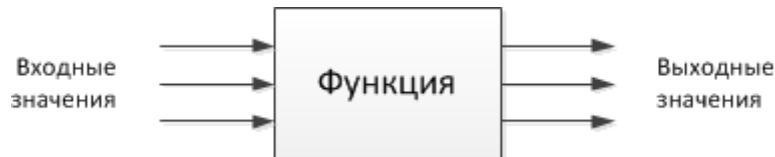


Рис. 3. Функция как чёрный ящик с входами и выходами

Такие свойства функций позволяют организовывать вычисления в виде создания 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 [Hristov & Krsteva, 2018]. Это, в свою очередь, позволяет избежать многих проблем, возникающих в рамках параллельных или конкурентных вычислений, основанных на обычной вычислительной модели [Воеводин & Воеводин, 2002].

Другой важной особенностью чистого функционального подхода является то, что функции можно рассматривать с точки зрения математики, в которой разработано большое количество методов для анализа функций [Колмогоров & Фомин, 1972]. Так, к примеру, в рамках функционального подхода в программировании имеется возможность оптимизации программ на уровне исходного кода [Касперски, 2003]. Также можно анализировать программы, описывающие вычислительные процессы, состоящие из функций и их вызовов, на предмет корректности определений, оптимальности задействования вычислительных ресурсов, возможности распараллеливания вычислений и т. д. [O'Sullivan et al., 2008]. Это позволяет уменьшить стоимость эксплуатации систем, реализованных в рамках функционального подхода, так как ошибки часто можно быстро локализовать до конкретной функции, которую можно оперативно обследовать и исправить. В случае системы, которая должна функционировать непрерывно, локализованную проблему и функцию, где она проявляется, можно быстро заменить на корректную, пустив поток технологического процесса по обходному пути [Душкин, 2008b].

Вместе с тем рассмотрение вопросов автоматизации технологических процессов раскрывает важную роль различных устройств ввода-вывода [Bolton, 2015]. 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.

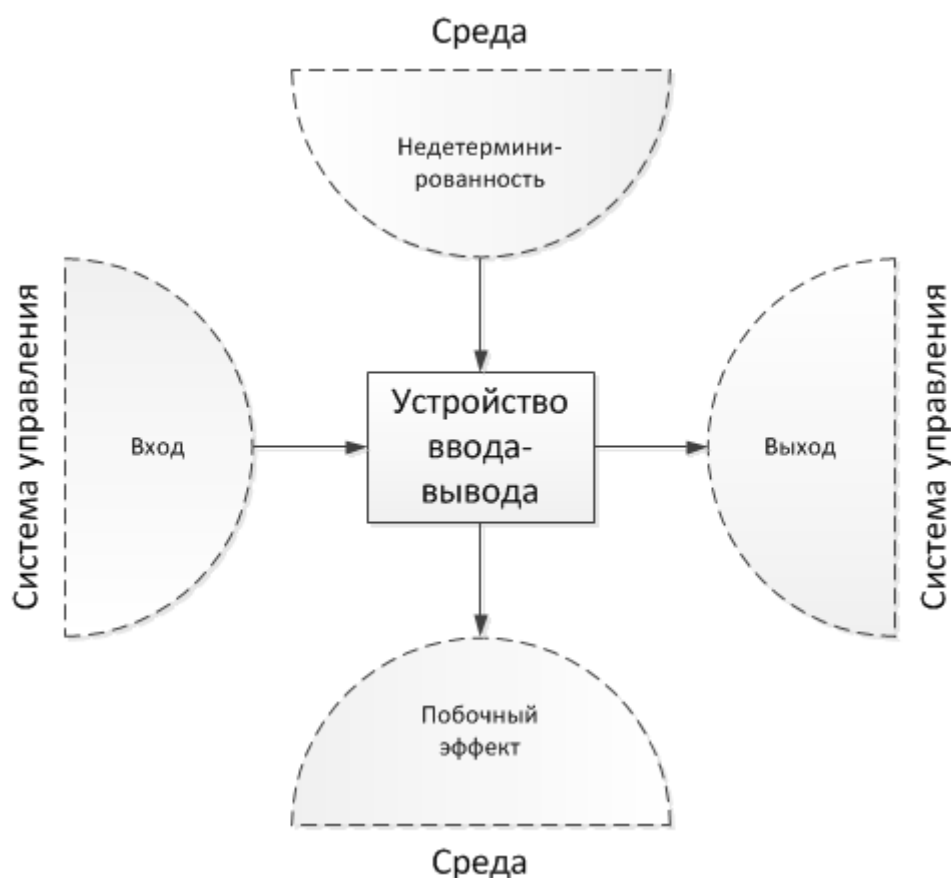


Рис. 4. Взаимодействие устройства ввода-вывода в рамках системы управления со средой

Итак, проблема заключается в том, что любое устройство ввода-вывода, является недетерминированным по своей природе, а также часто использует в своей работе побочные эффекты. В принципе, любая операция ввода недетерминирована, а любая операция вывода представляет собой побочный эффект [Lipovača, 2011]. В рамках функционального подхода эта проблема решается при помощи теоретико-категориального понятия монады [Levent, 2002], в которую «упаковывается» нечистый исходный код и которая, таким образом, скрывает, инкапсулируя недетерминированность и нечистоту, все проблемные зоны исходного программного кода и, как следствие, технологических процессов. Тем самым, монады возвращают в системы с использованием ввода-вывода возможность полноценного применения функционального подхода со всеми его положительными качествами [Душкин, 2006].

Естественным методом описания технологических процессов могут являться диаграммы потоков данных [Gane & Sarson, 1977], на которых указываются элементы системы управления технологическим процессом, между которыми по тем или иным регламентам осуществляется передача потоков информации, материальных ресурсов или управленческих воздействий. Вместе с тем, авторами предложена собственная нотация для инфографического моделирования технологических процессов [Душкин & Андронов 2019с].

Однако 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 [Мохов & Душкин, 2018].

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 [Душкин, 2019b]. 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.

Комплексотехника — это научно-практическое направление в исследовании возможностей объединения систем с противоположными целями функционирования [Комаров и др., 2012]. 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 [Мохов и др., 2019].

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. Это позволит выйти на новые рубежи в области создания «умных» систем управления технологическими и управленческими процессами в различных отраслях хозяйственной деятельности человека.

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 [Душкин, 2009]. 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») [Юнг, 1995]. 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 [Шумский, 2020].

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 [Бир, 1963]. 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 [Цурков, 1981]. При этом, конечно, необходимо отметить, что эти методы также могут применяться и в рамках объектного подхода как проявление в нём отдельных особенностей функционального стиля.

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 [Волкова & Козлов, 2004]. 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 [Душкин, 2019b]:

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 рассматриваться не с точки зрения её предназначения в рамках своей надсистемы и функциональных характеристик для пользователя и потребителя, а как ценностная сущность сама по себе [Мелёхин, 2013]. 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 (например, автоматизированная система управления дорожным движением на федеральной автомобильной трассе М9), либо вовсе отключается и демонтируется.

Выполнение перечисленных пяти 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. 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.

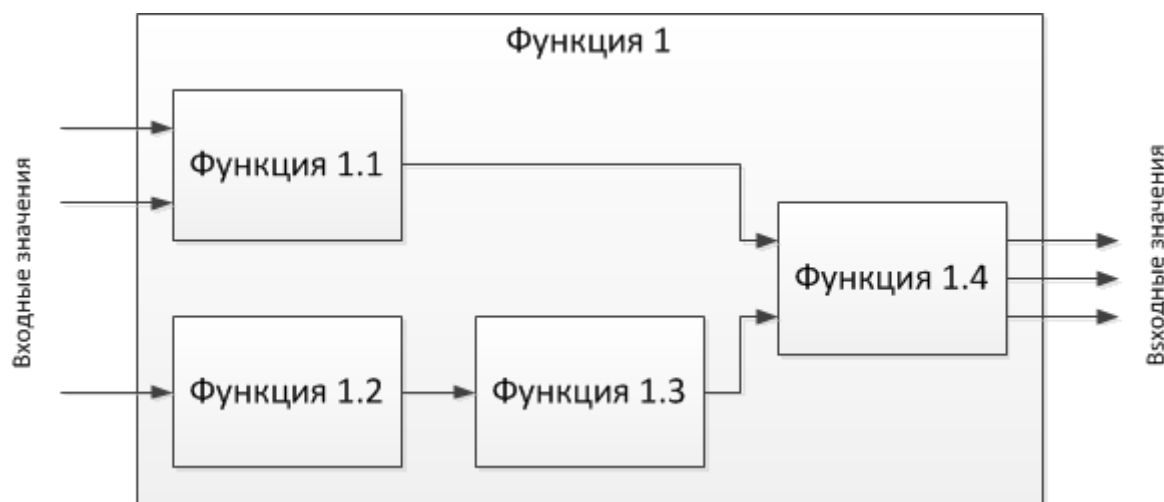


Рис. 5. Один уровень декомпозиции «Функции 1»

Представленная диаграмма подсказывает, что между функциями имеется два вида отношений:

1. *Включение*. Функция 1 определена через вызовы четырёх функций более низкого уровня декомпозиции.

2. *Передача результата.* Функция 1.1 передаёт результат своих вычислений в Функцию 1.4 в качестве первого параметра.

Диаграмма потоков данных технологического процесса может быть изоморфно отображена на диаграмму вызова функций. Каждое устройство ввода и вывода, каждая технологическая операция, из которых состоит технологический процесс, представляет собой функцию. И для инкапсуляции недетерминированности и побочных эффектов используется монада *State* [Душкин, 2006; Lipoваča, 2011; Филд & Харрисон, 1993], которая скрывает от разработчика системы и её пользователей сквозную передачу состояния о среде, в которой функционирует система, предоставляя всю мощь функционального подхода для разработки и эксплуатации.

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. 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.

1.3. Подходы к моделированию функций интеллектуальных объектов

Для целей реализации определённых в предыдущем разделе принципов автоматизации важным этапом является моделирование функционирования интеллектуальных объектов до того, как приступить к их проектированию, а, тем более, реализации. Ведь моделирование — это процесс полноценной или частичной (неточной) замены изучаемого явления или объекта при помощи некоторого условного образа или при помощи другого объекта, называемого «моделью» [Tolk, 2015]. В этом случае исследование свойств явления или объекта проводится на основании анализа модели, что позволяет более глубоко проникнуть в суть предназначения моделируемого объекта, а также прогнозировать и, как следствие, планировать развитие явления или объекта в динамике.

Общая (абстрактная) схема автоматизированной системы управления может быть представлена диаграммой, показанной на следующем рисунке [Шилейко & Шилейко, 1977]:



Рис. 6. 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 & Андронов, 2019b]:



Рис. 7. 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. Задействие сенсоров необходимо для очищения внутренней информации, которая так же, как и любая другая, может быть зашумлена.



Рис. 8. 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» [Thacher, 1977; Hofstadter, 1981]. 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, 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. 9. Процесс решения задачи интеллектуализации заданной системы

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; Gourish et al., 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 [Ицкович, 2008].
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, 2018].

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 управления) на адаптивное управления на полной улично-дорожной сети населённого пункта. Последнее означает, 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 решения об адаптивном изменении режимов функционирования периферийного оборудования, находящегося под её контролем [Андреева и др., 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 [Batty et al., 2012].

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

Обычно анализ и синтез кибернетических систем рассматривается в рамках системного подхода [Комаров и др., 2012]. Явление, процесс или объект рассматриваются в качестве сложной системы, обычно киберфизической природы. При этом такая система активно взаимодействует со средой, в которой она функционирует, обмениваясь с ней информацией и управляющими воздействиями. Интеллектуальное здание в этом аспекте также может быть рассмотрено с позиции системного подхода, при этом в рамках настоящей работы имеет смысл ограничить

среду только внутренними параметрами здания. Дополнительно в целях изучения взаимодействия интеллектуального здания со своей внутренней средой имеет смысл применять функциональный подход [Душкин, 2018а], в рамках которого важным инструментарием является так называемый *функциональный дизайн*.

В рамках промышленной разработки программного обеспечения имеется подход, основанный на шаблонах проектирования [Гамма и др., 2014]. Одним из основных шаблонов проектирования является шаблон «функциональный дизайн», главной задачей которого является инкапсуляция однородных функций в рамках одной сущности (класса, объекта, модуля) для обеспечения сильной связности внутри таких сущностей и низкой степени зацепления между модулями. Утверждается [Laplante & Laplante, 2007], что слабое зацепление между модулями является признаком хорошо структурированной и хорошо спроектированной системы, и, когда оно комбинируется с сильной связностью, это соответствует общим показателям хорошего проекта и высокой степени сопровождаемости. То же самое можно вывести и из общих принципов функционального программирования, когда функции, реализующие определённые виды деятельности или вычислительные паттерны, должны быть максимально автономны, обладать свойством чистоты и отсутствием побочных эффектов [Душкин, 2006].

Само собой разумеется, что шаблон проектирования «функциональный дизайн» можно применять в рамках кибернетического и системного подходов при реализации проектов киберфизических систем. Более того, часто именно этот подход применяется проектировщиками и инженерами бессознательно, так как он является интуитивно оптимальным и понятным для осмысления. Функциональный дизайн делает процесс проектирования сложных технических систем проще, что также позволяет осуществлять декомпозицию самого процесса проектирования. Системотехника (как «системный синтез») также поощряет использование этого шаблона проектирования.

Таким образом, функциональный дизайн в отношении структурирования среды интеллектуального здания может представлять собой главный метод и инструмент в рамках функционального [Душкин, 2018а], системного и кибернетического подходов при осуществлении системного синтеза интеллектуальных зданий. Вопрос лишь осложняется тем, что при функционировании киберфизических систем в реальном мире практически невозможно избежать недетерминированности и побочных эффектов. Особенно это касается использования сенсоров, которые и создают недетерминированное поведение, и исполнительных устройств, которые применяют побочные эффекты на среду системы. Однако этот вопрос также решаем в рамках функционального подхода с использованием специального математического аппарата на основе теории категорий [Маклейн, 2004] — инкапсуляция недетерминированности и побочных эффектов в монаду *State* (или иную подобную со схожими свойствами скрытой передачи хранимой информации) для сокрытия этих нежелательных явлений от чистой функциональной парадигмы. Другими словами, при помощи специальных методов положительные стороны функционального дизайна можно перенести на процессы проектирования и функционирования киберфизических систем, в том числе интеллектуальных зданий, что позволит значительно повысить эффективность обоих процессов.

Новизна предлагаемого подхода основана на слиянии и взаимном усилении нескольких методик проектирования — системотехники, кибернетического и функционального подхода в рамках единого шаблона функционального дизайна, который применяется уже к киберфизическим системам, а не только к программным сущностям. Более того, использование функционального дизайна при проектировании и эксплуатации интеллектуальных зданий имеет высокую степень научной новизны.

Актуальность представленного научного исследования заключается в следующих факторах:

1. Продолжающаяся цифровизация экономики требует внедрения новых высоких технологий на объектах базового уровня во всех сферах жизни, в том числе и в управлении и эксплуатации зданий и сооружений.
2. Всестороннее развитие и внедрение интернета вещей также позволяет говорить о том, что многие базовые процессы управления в сложных технических системах будут подвергаться перестройке и, как следствие, должны проектироваться в рамках правильного подхода к дизайну.
3. Такие технологии, как искусственный интеллект, вычисления на краю и децентрализованные сети связи, развитие и внедрение которых происходит во все сферы жизни, также потребуют современной методологии проектирования, обеспечивающей целостный подход к системотехнике и комплексотехнике сложных киберфизических систем.

Таким образом, сложившееся положение вещей в сфере интеллектуализации управления эксплуатацией зданий и сооружений подчёркивает острую актуальность настоящей научной работы.

1.4. Закономерности в сценариях управления функционированием интеллектуальных зданий

Развитие и взаимное проникновение современных высоких технологий позволяет утверждать, что в вопросах построения интеллектуальных систем управления зданиями и сооружениями можно подняться на новый уровень. Автором с соавторами уже были рассмотрены некоторые аспекты интеллектуализации управления и реализации интеллектуализированных автоматизированных систем управления, реализующих сквозной технологический процесс в интеллектуальных зданиях [Душкин, 2018; Душкин, 2019b; Душкин и Родионов, 2019; Душкин и Андронов, 2019].

Современное интеллектуальное здание представляет собой киберфизическую систему [Sanfelice, 2016], в которой возможно использование парадигмы распределённых и краевых вычислений на оконечных устройствах инженерных систем здания, и при этом они как могут находиться под централизованным управлением, так и формировать децентрализованную вычислительную сеть [Sarkar & Misra, 2016]. При этом само по себе интеллектуальное здание должно функционировать как единая комплексная система, в которой так или иначе реализуются сценарии различного типа реагирования на изменения параметров внутренней среды [Душкин и Андронов, 2019]. Выполнение таких сценариев может быть основано на различных подходах, одним из

которых является интеллектуальный алгоритм создания управляющих воздействий на инженерные системы интеллектуальных зданий.

Под внутренней средой здания, в том числе и интеллектуального, будет пониматься набор значений множества параметров, характеризующих текущее состояние жизненно важных для безопасности и комфорта посетителей факторов [Душкин и Родионов, 2019] (например, качество и температура воздуха, освещённость, отсутствие посторонних и потенциально вредоносных субъектов и объектов в пределах рассматриваемых помещений и прилегающих территорий) [Pašek & Sojková, 2018]. Кроме этого, к внутренней среде здания также могут быть отнесены транспортные потоки посетителей и транспортных средств [Žáček & Janosek, 2017].

Интеллектуальность алгоритма заключается в его способности адаптироваться к изменению условий функционирования. Фактически, речь идёт о применении отдельных методов машинного обучения как традиционного индуктивного типа, так и дедуктивного типа в рамках гибридной парадигмы построения интеллектуальных систем управления [Душкин, 2019b]. Интеллектуальный алгоритм создания управляющих воздействий должен не только распознавать неизвестные ранее паттерны динамики изменения параметров внутренней среды здания, но и запоминать в базе знаний системы управления новые сценарии реагирования на такие паттерны. Именно такая адаптивность позволяет назвать алгоритм интеллектуальным.

Интеллектуализация управления зданием подразумевает, в том числе, наличие непрерывного цикла реактивного и проактивного реагирования на изменение различных параметров внутренней среды и их наборов [Душкин, 2018a]. Реактивное реагирование на изменение параметров внутренней среды основано на обычном кибернетическом цикле управления, когда объектом управления являются выбранные параметры, значения которых необходимо держать в рамках гомеостатического интервала [Beer, 1981]. Проактивный цикл управления основан на предиктивной аналитике поведения внутренней среды интеллектуального здания, которая базируется на взаимодействии динамических моделей самого здания, внутренней и внешней среды [Душкин, 2018]. Как реактивное, так и проактивное управления направлено на изменение различных параметров внутренней среды так, чтобы обеспечивать оптимальный режим функционирования здания, его инженерных систем, а также предоставлять его жителям и посетителям наиболее комфортную среду обитания и труда. Этот процесс можно назвать *структурированием* внутренней среды интеллектуального здания.

Каждая инженерная система интеллектуального здания обычно представляет собой простой управленческий контур, основанный на непрерывном мониторинге обратной связи от объекта управления (полноценный обзор таких систем и реализуемых ими сценариев можно найти в работе [Душкин и Родионов, 2019]). Фактически, это означает использование только реактивного режима управления без возможности использовать адаптивность «на лету» в процессе эксплуатации здания. Именно поэтому в общем контуре управления интеллектуальным зданием должна быть проактивная подсистема управления, реализующая адаптивный режим при помощи применения управляющих воздействий на сами инженерные системы.

На рис. 10 схематично показано применение проактивной подсистемой управления интеллектуальным зданием управляющих воздействий на инженерные системы, входящие в реактивный управленческий контур.

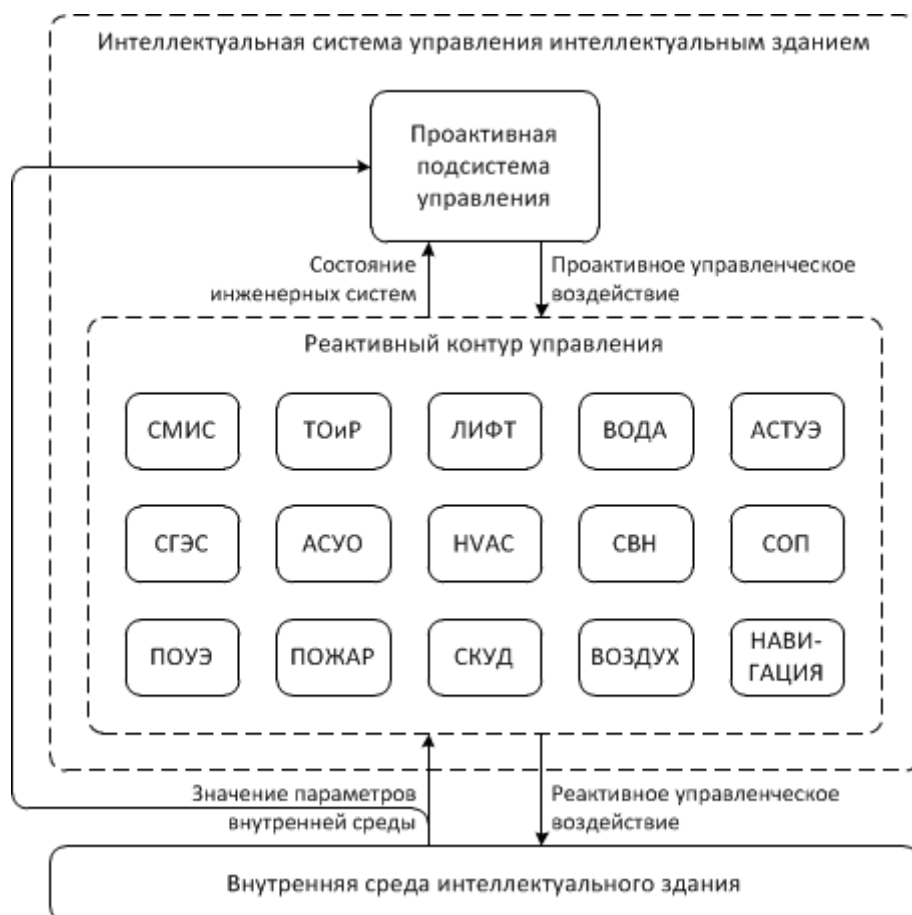


Рис. 10. Схема управляющих воздействий на инженерные системы интеллектуального здания

Обозначения на схеме: СМИС — система мониторинга инженерных систем; ТОиР — система технического обслуживания и ремонта оборудования; ЛИФТ — система управления лифтами; ВОДА — система управления водоснабжением и водоотведением; АСТУЭ — автоматизированная система технического учёта электроэнергии; СГЭС — система гарантированного электроснабжения; АСУО — автоматизированная система управления освещением; HVAC — система отопления, вентиляции и кондиционирования; СВН — система видеонаблюдения; СОП — система обнаружения присутствия; ПОУЭ — система обнаружения пожара, оповещения и управления эвакуацией; ПОЖАР — система автоматического пожаротушения; СКУД — система контроля и управления доступом; ВОЗДУХ — система контроля качества воздуха; НАВИГАЦИЯ — система внутренней навигации.

На представленной схеме показаны информационные потоки от внутренней среды интеллектуального здания в реактивную и проактивную подсистемы управления. В этих потоках передаётся информация о значениях параметров внутренней среды, за которыми осуществляется мониторинг для принятия решения об осуществлении воздействия на среду. также от реактивной в проактивную подсистему управления передаётся состояние всех инженерных систем, входящих в реактивный

контур управления. Это необходимо для того, чтобы в проактивной подсистеме управления осуществлять моделирование поведения всей системы для выбора оптимального решения.

Для того чтобы облегчить представленную диаграмму, на ней указаны информационные потоки между внутренней средой интеллектуального здания, инженерными системами и проактивной подсистемой управления только в общем виде. В действительности такие потоки проходят через каждую инженерную систему, и в самом информационном потоке передаются данные о значениях параметров внутренней среды и управленческие воздействия на среду — для каждой инженерной системы свой набор показателей и управленческих воздействий. Самое важное в этом вопросе — организовать передачу информации в функциональном стиле [Душкин, 2018], когда каждая инженерная система воспринимается как «чистая детерминированная функция» без побочных эффектов, и на этом основании общая система управления интеллектуальным зданием получает важные свойства, позволяющие использовать для её перепроектирования математические методы для анализа функций.

Если в процессе такого моделирования внутри проактивной подсистемы управления возникнет необходимость осуществить управленческое воздействие, то оно выдаётся в одну или несколько инженерных систем здания, которые после этого воздействуют на заданные параметры внутренней среды. Если же такой необходимости не возникает, то реактивный контур управления самостоятельно осуществляет воздействие на внутреннюю среду с целью поддержания её гомеостаза.