

Математическое обоснование проведения «функционального переустройства» технических систем на примере интеллектуальных зданий

Р. В. Душкин¹, М. Г. Андронов²

¹ ООО «ВойсЛинк», г. Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Аннотация. В статье приводятся математические основы и обоснование переустройства технических систем на примере интеллектуальных зданий в рамках функционального подхода. Дается краткий обзор литературы по интеллектуализации процессов производства и управления, после чего описывается математическая модель интеллектуализации технической системы. Представленная математическая модель состоит из четырех процедур, последовательное применение которых переводит систему управления в разряд интеллектуальных систем. Кроме того, перечисляются классы технических систем, к которым применимы приведенные в статье принципы интеллектуализации. Актуальность представленной работы основана на необходимости перевода процессов управления в парадигму Индустрии 4.0 и применением методов искусственного интеллекта. Также актуальность работы обусловлена широким распространением процессов автоматизации и интеллектуализации управления техническими системами в различных отраслях современной экономики и, соответственно, необходимостью их изучения, моделирования. Новизна работы вытекает из совокупного рассмотрения технических систем в рамках функционального подхода и гибридной парадигмы построения искусственных интеллектуальных агентов на примере управления интеллектуальными зданиями. Статья будет интересна ученым и инженерам, работающим в области конструирования интеллектуальных зданий и систем класса «умный город».

Ключевые слова: интеллектуализация, управление, система управления, процесс управления, интеллектуальное здание, функциональный подход, сценарный подход, умный город.

DOI 10.14357/20718632200404

Введение

В данной работе под *интеллектуальным зданием* будет пониматься сложная социотехническая система, которая в свой состав включает широкий набор разнообразного оборудования специального назначения [1]. Кроме того, в состав интеллектуального здания как систему включаются материальные, энергетические и информационные потоки между подсистемами (как инженерными, так и подсистемами управления), технические регламенты и

организационные мероприятия по управлению и эксплуатации зданием и его подсистем, а также обслуживающий персонал [2].

Одной из важнейших особенностей объекта управления в интеллектуальных зданиях является существование *внутренней среды*, являющейся по своей природе недетерминированной [3]. К этой внутренней среде могут быть отнесены как физические и технологические параметры, которые измеряются при помощи специальных приборов или сенсоров, так и поведенческие аспекты жильцов, посетителей и персонала, которые так-

же могут быть измерены посредством специального оборудования. Всё это накладывает существенные требования как на всю систему управления интеллектуальным зданием, так и степень её интеллектуальности [4].

В рамках исследований, проводимых авторами, под *интеллектуализацией* понимается процесс повышения степени интеллектуальности технической системы [5]. При этом интеллектуальность технической системы определяется как наличие у неё двух свойств — автономности и адаптивности [6]. Исходя из этого, процесс интеллектуализации преобразует техническую систему по некоторой траектории развития в рамках её жизненного цикла от низкого уровня интеллектуальности к высокому. Таким образом, интеллектуализация представляет собой процесс эволюции технической системы из её текущего состояния в пространстве «Адаптивность — Автономность» в точку с наивысшими значениями степеней этих свойств [7].

Настоящее исследование носит теоретический характер и продолжает изучение аспектов интеллектуализации, начатое авторами в своих предыдущих работах (например, [7, 8]). Задачами настоящего исследования являются:

1. Разработать математическую модель интеллектуализации технической системы на примере интеллектуального здания, которая будет консистентна и совместима с моделью выбора и применения управляющих воздействий и моделью процесса управления интеллектуальным зданием и её реализация в интеллектуальном алгоритме управления инженерными системами здания, описанными в [9 и 10], соответственно.

2. Определить классы систем, к которым возможно применение процесса интеллектуализации, и дать исчерпывающие критерии отнесения класса систем к интеллектуализируемым системам.

Несмотря на то, что искусственный интеллект, как междисциплинарная область научных исследований, зародился в середине XX века [27], 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) [28]. Действительно, как указывается в [29], 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 [30] отмечается, что интеллектуализация является главной особенностью четвёртой промышленной революции, которая разворачивается в мировой экономике в настоящее время [31]. Интеллектуализация подразумевает выполнение машинами уже и креативных (творческих, созидательных) функций человека, таких как исследования, анализ, прогнозирование, проектирование, конструирование и т. д. [30]. Вместе с тем, в отдельных работах (например, [32]) 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 [33, 34] 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 повыше-

ния эффективности технологических, производственных и управленческих процессов. Так в работе [33] предлагается использование методов многоагентных систем и концепции роевого интеллекта для интеллектуализации, при этом упор также делается на реализацию системы управления роём агентов на базе гибридного подхода в области искусственного интеллекта. Работа [34] 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 [6]. И этот вопрос также рассматривается исследователями в контексте интеллектуализации управления производством и бизнес-процессами. В качестве примеров можно привести работы [35] и [36]. В статье [35] 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 [36] 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. Работа [37] описывает реальные примеры интеллектуализации производства. Работа [38] предлагает подход к интеллектуализации многоагентных робототехнических систем в области навигации. Наконец, работа [39] описывает применение интеллектуализации в военной сфере. Эти примеры показывают, что интеллектуализация как следующий шаг после автома-

тизации 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 обзоре 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. Данная работа призвана, отчасти, восполнить этот пробел.

Научная новизна исследования заключается в применении функционального подхода и отдельных инструментов математического аппарата (теории множеств) для осуществления функционального переустройства интеллектуальных зданий и управления их внутренней средой. При этом используется системный подход с применением упрощённой кибернетической «поточковой» схемы функционирования интеллектуального здания [11]. Кроме того, научная новизна также связана с обоснованием выводов о том, что использование функционального подхода при автоматизации технологических процессов в рамках перехода к Индустрии 4.0 [12] позволит достичь повышения эффективности управления технологическими процессами, снижения времени на локализацию и устранение аварийных ситуаций и эксплуатационных расходов.

Актуальность исследования основана на применении методологии функционального подхода, что открывает широкие возможности по решению новых задач в вопросах автоматизации и интеллектуализации технологических процессов и процессов управления. Кроме того, актуальность обусловлена широким распространением процессов автоматизации и интел-

лектуализации управления техническими системами в различных отраслях современной экономики и, соответственно, необходимостью их изучения, моделирования, в том числе на основе функционального подхода [13]. Актуальность и востребованность описанных в настоящей работе решений будет расти из-за повышения степени вовлечённости новых технологий управления и интеллектуализации в хозяйственную деятельность в рамках развития цифровой экономики. Более того:

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. Математическая модель интеллектуализации технической системы

В целях более глубокого понимания процесса интеллектуализации технической системы для последующего анализа возможности применения и реализации в виде готового фреймворка для использования в конкретных условиях и на конкретных объектах управления (например, в интеллектуальных зданиях) необходимо разработать математическую модель самого процесса интеллектуализации технической системы. Как было указано ранее, интеллектуализация — это

процесс повышения степени интеллектуальности технической системы [7].

В обобщённом понимании процесс интеллектуализации представляет собой процедуру перехода системы из одного состояния в другое, где степень интеллектуальности системы в целевом состоянии должна быть выше, чем в исходном. Фактически, с абстрактной точки зрения этот процесс представляет собой задачу поиска пути на графе в пространстве состояний технической системы [14]. Остаётся точно определить природу состояний системы, которые составляют то пространство поиска, в рамках которого осуществляется интеллектуализация.

Поскольку интеллектуальность определена выше как наличие у технической системы свойств автономности и адаптивности, резонно представлять техническую систему точкой в двумерном пространстве, на осях которого располагаются различные степени автономности и адаптивности соответственно. Если нормировать это пространство интервалами $[0; 1]$ этих осей, то точка $(0; 0)$ будет соответствовать полностью неавтономной и неадаптивной системе (например, обычное здание без средств автоматизации), а точка $(1; 1)$, будет соответствовать полностью автономной и адаптивной системе (например, «умный дом», который может работать без внешних управляющих воздействий). Любая траектория от точки $(0; 0)$ до точки $(1; 1)$ определяет процесс перевода системы из крайнего неинтеллектуального состояния в крайнее интеллектуальное. Траектория может быть произвольной в рамках единичного квадрата, однако имеет смысл рассматривать только такие траектории, которые являются монотонными. Само собой разумеется, что для произвольной технической системы траектория может начинаться не в точке $(0; 0)$, так как система уже может обладать некоторой степенью интеллектуальности, равно как заканчиваться траектория также может не в точке $(1; 1)$, так как всегда имеет смысл оценивать целевое состояние с точки зрения достаточности и целесообразности.

На Рис. 1 показано пространство состояний для процесса интеллектуализации технической системы и варианты монотонных и немонотонных траекторий интеллектуализации.

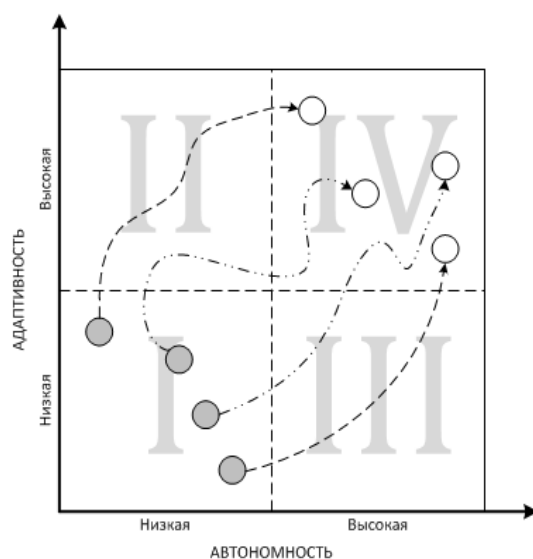


Рис. 1. Пространство состояний процесса интеллектуализации технической системы

Квадранты I — IV представляют собой четыре группы состояния систем в аспекте интеллектуальности. Представлено четыре примера траекторий интеллектуализации систем из первого квадранта (неинтеллектуальная система) в четвёртый квадрант (интеллектуальная система). Две траектории, обозначенные пунктирными линиями, являются монотонными в этом пространстве. Другие две траектории, обозначенные штрих-пунктирными линиями, являются немонотонными.

Таким образом, с математической точки зрения процесс интеллектуализации технической системы представляет собой функцию со следующей сигнатурой:

$$f: State \rightarrow State,$$

где *State* — это тип, описывающий состояние заданной системы в пространстве «Автономность — Адаптивность». Эта функция переводит систему из начального неинтеллектуального состояния (чаще всего, из квадранта I) в целевое интеллектуальное состояние (в квадранте IV). С теоретико-категориальной точки зрения эта функция может представлять собой композицию всех промежуточных функций, описывающих отдельные шаги перевода системы из состояния в состояние при её движении по траектории интеллектуализации [15].

В этом контексте особенный интерес представляет природа состояния технической системы, подвергающейся интеллектуализации, которое можно описать типом *State*. Для каждой технической системы или, по крайней мере, для каждого класса технических систем этот тип может представлять собой специальную структуру, через которую можно определить автономность и адаптивность системы. В

соответствии с работой [16] одним из возможных подходов к определению такой структуры может быть следующий.

Оба измерения пространства интеллектуализации разбиваются на дискретное множество значений, в результате чего получается два классификатора по шкалам «Автономность» и «Адаптивность». Авторский подход предполагает следующие классификаторы, указанные в Табл. 1.

К этой таблице необходимо несколько примечаний:

1. Автономность и ответственность — неразделимые понятия для технической системы. Другими словами, функционирование автономных технических систем должно регулироваться не только нормативно-техническими актами, но и нормативно-правовыми в части ответственности акторов системы, задействованных в таком функционировании. Если следовать этой логике, то повышение автономности должно происходить неразрывно с увеличением степени адекватности принятия решений. Кроме того, в областях, где от решений автономной системы зависит здоровье и жизнь человека — обязательно наличие возможности объяснения принятых решений [17].

Табл. 1. Дискретные классификаторы для шкал «Автономность» и «Адаптивность»

Автономность	Адаптивность
<ol style="list-style-type: none"> 1. Все решения системы «визируются» оператором. 2. Отдельные незначимые функции системы автономны. 3. Система автономна во всей зоне своей функциональности, кроме критических для безопасности функций и «области доверия». 4. Оператором подтверждаются только функции из «области доверия». 5. Полностью автономная система. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Адаптивность отсутствует, все алгоритмы и методы принятия решений жёстко прописаны в системе. 2. Актуализация знаний осуществляется дедуктивным способом во время технического обслуживания системы. 3. Дедуктивный метод обучения может применяться без остановки функционирования системы. 4. Модель принятия решений в системе может быть индуктивно дообучена в специальном режиме функционирования. 5. Система самостоятельно и непрерывно обучается в процессе своего функционирования.

2. Дедуктивный метод — это эксплицитное построение базы знаний, в то время как индуктивное обучение основывается на использовании методов машинного обучения, в основном нейросетевого подхода и глубокого обучения [18]. Однако, технические системы, обладающие высокой степенью адаптивности (4 или 5) могут применять формализованные знания, которые были получены во время взаимодействия со средой, которые в дальнейшем могут быть смоделированы на языке представления знаний посредством методов автоматического построения баз знаний.

3. Количество категорий обеих представленных шкал выбрано произвольно. Вопрос этого выбора, скорее, лежит в плоскости удобства расчётов, а не какой-либо обоснованной методики. В принципе, для этих целей можно выбрать любое количество дискретных значений для каждой шкалы, и для двух шкал количество выбранных значений даже может не совпадать. Главное — чёткие критерии дифференциации каждой дискретной категории в рамках одной шкалы. Тем не менее, этот вопрос, возможно, ещё требуется внимательно исследовать, однако это выходит за рамки настоящей работы.

Таким образом, при помощи представленных классификаторов каждая из шкал двухмерного пространства интеллектуализации разделяется на пять дискретных категорий. Для полного пространства интеллектуализации получается 25 дискретных категорий, в каждой из

которых может находиться конкретная техническая система. И самое главное, эти категории составлены таким образом, что не зависят от конкретной природы и конкретного класса рассматриваемой технической системы.

Математическая модель интеллектуализации технической системы состоит из следующих компонентов:

$$M = \langle P_1, P_2, P_3, P_4 \rangle,$$

где:

1. P_1 — Процедура оценки текущего состояния технической системы. Результатом применения этой процедуры является описание текущего состояния оцениваемой системы в терминах автономности и адаптивности — расположение системы в двухмерном пространстве интеллектуальности.

2. P_2 — Процедура выбора целевого интеллектуального состояния технической системы. Результатом выполнения этой процедуры является новое состояние оцениваемой системе в том же пространстве интеллектуальности.

3. P_3 — Процедура построения траектории интеллектуализации. Эта процедура должна выполняться по результатам технико-экономического (ТЭО) и финансово-экономического обоснований (ФЭО) перевода технической системы из текущего в целевое состояние. Траектория не обязательно должна проходить по промежуточным состояниям между текущим и целевым, она может представлять собой «скачок» сразу из текущего в целе-

вое состояние, сколько бы промежуточных между ними ни было. Это как раз вопрос проведения указанных обоснований.

4. P_4 — Процедура осуществления интеллектуализации. Эта процедура уже представляет собой обычное планирование и осуществление запланированных действий по движению технической системы по разработанной процедуре в пространстве интеллектуальности.

Процедуры P_1 и P_2 осуществляются по классификаторам, приведённым для свойств автономности и адаптивности в Табл. 1. Обычно оценка системы по этим классификаторам не представляет сложности, равно как и обозначить целевое состояние тоже возможно. А вот процедура P_3 наиболее интересна, так как должна быть основана на детальной проработке технико-экономического и финансово-экономического обоснований, что само по себе является отдельным проектом по исследованию осуществимости такого преобразования системы из текущего состояния в целевое. Процедура P_4 реализует проект интеллектуализации технической системы и может выполняться по имеющимся стандартам выполнения проектных работ. Таким образом, процедура P_3 требует наибольшего внимания в настоящей работе.

При рассмотрении процедуры P_3 , фактически, речь идёт о поиске оптимального пути на графе состояний технической системы [19]. Если рассмотреть все возможные пути из начального состояния в целевое, причём как через промежуточные состояния, так и напрямую — во всех возможных комбинациях перехода, и именно здесь необходимо ограничение о монотонности траектории — то задача сводится к поиску оптимального пути на графе из одной вершины в другую. При этом на рёбрах графа указываются стоимости перехода из одного состояния технической системы в другое, и эта стоимость должна представлять собой совокупные затраты как финансов, так и времени изменения технической системы. Задача по поиску такого оптимального пути является решённой и может быть реализована на основе любого известного алгоритма поиска на графах, так как граф для пространства интеллектуализации размером 5×5 является небольшим.

Другое дело, что количество возможных вариантов путей из текущего в целевое состояние даже с учётом требования монотонности является довольно большим. И главная проблема в связи с этим заключается в том, что стоимость перехода неаддитивна, то есть если из состояния S_0 в состояние S_G можно перейти через промежуточное состояние S_i , то стоимость перехода $S_0 \rightarrow S_G$ не равна сумме стоимостей переходов $S_0 \rightarrow S_i$ и $S_i \rightarrow S_G$, а в общем случае никак не связана с ними. Предполагается, что даже отношения предпорядка с выполнением неравенства треугольника на этих переходах построить в общем случае нельзя. Из этого следует, что технико-экономические и финансово-экономические оценки стоимости переходов становятся слишком громоздкими, и само выполнение таких оценок может свести на нет всю выгоду от поиска эффективного пути в графе переходом в пространстве интеллектуализации.

Для этих целей и упрощения расчётов можно воспользоваться следующей эвристикой. На Рис. 2. показаны группы состояний в пространстве интеллектуализации размером 5×5 . В первом квадранте выделены состояния самого низкого уровня интеллектуальности. В четвёртом квадранте выделены состояния самого высокого уровня интеллектуализации. Эвристика заключается в следующих двух правилах:

1. Если начальное состояние S_0 находится в зоне самого низкого уровня интеллектуальности, а целевое состояние S_G находится в зоне самого высокого уровня интеллектуальности, то необходимо найти одно оптимальное промежуточное состояние S_i такое, что выполняемая в два этапа интеллектуализация будет стоить наименьшее количество ресурсов, в противном случае процесс интеллектуализации выполняется в один этап.

2. Если начальное состояние S_0 лежит на главной диагонали, то переход в целевое состояние S_G в соответствии с правилом 1 осуществляется так, что промежуточное состояние S_i , если оно необходимо, также лежит на главной диагонали или в клетке, непосредственно примыкающей к ней, в противном случае переход осуществляется через одно из состояний квадрантов II или III, в зависимости от того, какой квадрант ближе к начальному состоянию.

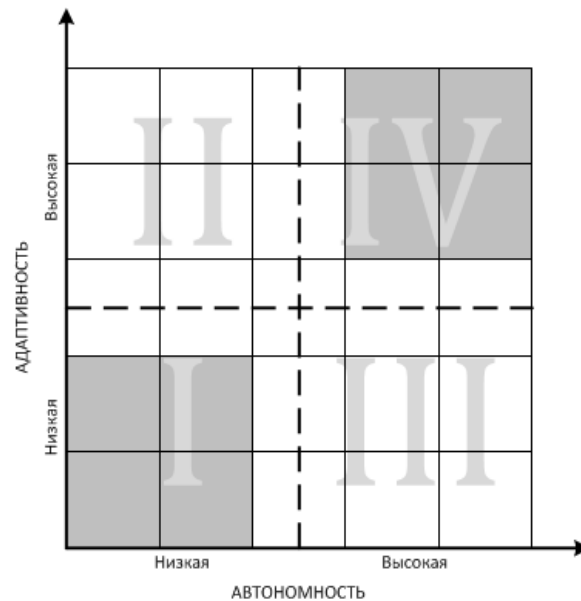


Рис. 2. Пространство состояний процесса интеллектуализации технической системы

В квадрантах I и IV выделены зоны самой низкой и самой высокой степени интеллектуальности соответственно

Осталось отметить, что для некоторых случаев интеллектуализации отдельных типов технических систем необходимо построение более детального пространства интеллектуализации, в том числе более высокой размерности. В работе [20] можно выявить дополнительные оси для проведения интеллектуализации, а именно [16]:

1. Интерпретация получаемых данных «на лету».
2. Диагностика своего состояния.
3. Мониторинг состояния объекта управления.
4. Моделирование и прогнозирование будущих состояний объекта управления и своего собственного.
5. Планирование реакции на будущие состояния.
6. Самообучение и обучение с учителем.
7. Управление в различных режимах.
8. Поддержка принятия решений в экстренных случаях.

Однако детальное рассмотрение этих метасвойств интеллектуальных технических систем выходит за рамки настоящего исследования. Заинтересованный читатель может обратиться к источнику [16] для получения исчерпывающей информации по этому вопросу.

2. Классы систем, к которым возможно применение процесса интеллектуализации

Представленная математическая модель интеллектуализации технической системы вряд ли является общеприменимой. В связи с этим желательно ограничить множество классов технических систем, к которым возможно применение процесса интеллектуализации. В этом разделе будет предпринята попытка сделать это.

По мнению авторов, следующие классы технических систем вполне могут быть подвергнуты процессу интеллектуализации, как описано в предыдущем разделе:

1. *Программное обеспечение автономных устройств.* Для многих автономных устройств — в первую очередь робототехнических, но также и для различного периферийного оборудования, входящего в состав автоматизированных систем управления, интеллектуализации может быть подвергнуто встроенное программное обеспечение. Тем самым после этого такое оборудование действительно может считаться «умным» («smart») [21]. Важной частью интеллектуализации комплексных интегрированных автоматизированных систем управления является интеллектуализация встроенного

программного обеспечения периферийного оборудования.

2. *Автоматизированные системы управления (АСУ)*. Этот класс технических систем интересен тем, что их создание в целом представляет собой устоявшийся стандартизированный процесс, и на текущий момент различных АСУ уже существует огромное множество во всех областях человеческой деятельности — от автоматизации технологических процессов на предприятиях различных отраслей промышленности до АСУ различных высокоуровневых процессов в таких сферах жизни, как образование, здравоохранение и др. Опыт подсказывает, что подавляющий объём АСУ находится в первом квадранте пространства интеллектуализации, поэтому для технических систем этого класса имеются самые широкие возможности по интеллектуализации для перевода их в новую реальность Индустрии 4.0 [22].

3. *Системы поддержки принятия решений (СППР), включая экспертные системы (ЭС)*. Несмотря на то, что сами по себе СППР и ЭС являются информационными системами, изначально разработанными в рамках исследований по искусственному интеллекту [23], их также можно подвергнуть процессу интеллектуализации. Вместе с тем чаще всего системы этого класса находятся в квадранте II в силу нормативных ограничений возможностей по их использованию.

4. *Автоматизированные информационно-управляющие системы (АИУС)*. Этот класс систем, являющийся подклассом АСУ, представляет собой системы для сбора, хранения и обработки информации в рамках какой-то определённой проблемной области и на основании этого выработки управленческих воздействий на свой объект управления в этой проблемной области [24]. К АИУС можно отнести следующие подклассы технических систем (не исключая иные):

a. *Системы управления зданиями*. Комплексная интегрированная система, управляющая всеми аспектами жизнеобеспечения и безопасности зданий и сооружений. В наиболее часто используемой форме представляет собой взаимосвязанный комплекс АСУ ТП ин-

женерных систем здания, интегрированный по принципу «точка — точка» (или в редких случаях при помощи интеграционной платформы) с подсистемой генерации отчётности. Речи об использовании предиктивного режима работы для предотвращения нештатных и аварийных ситуаций в инженерных системах здания не идёт, поэтому в этом подклассе систем есть широкие возможности по интеллектуализации.

b. *Энергетические системы*. Энергетические АИУС предназначаются для оптимизации распределения электроэнергии по потребителям в зависимости от различных факторов географической, технологической, экономической, социальной и даже политической природы. Вместе с тем, интеллектуальное управление энергопотоками в таких системах практически не используется ни на каком из уровней мониторинга и управления. Таким образом, применение методов интеллектуализации энергетических систем вполне оправдано.

c. *Транспортные системы*. В области транспорта также имеются развитые автоматизированные информационно-управляющие системы, которые предназначаются для повышения эффективности и безопасности транспортировки пассажиров и грузов. Однако такие системы также не используют предиктивную аналитику для организации проактивного режима управления. Более того, практически отсутствует интермодальная организация перевозок при помощи инструментов АИУС. Так что в области транспорта с внедрением транспортных моделей и перехода к проактивному управлению также возможна интеллектуализация управления.

d. *Системы управления муниципалитетами*. Для управления деятельностью муниципалитетами в большинстве случаев используются довольно простые учётные информационные системы, которые даже трудно отнести к классу АИУС. Тем не менее, в составе таких систем вполне

возможно использование как модели объекта управления для использования предиктивного режима управления, так и применения всех методов повышения интеллектуализации для построения «умных городов».

- е. *Системы управления отраслями промышленности и отдельными сферами жизни.* Также как и для управления муниципалитетами (населёнными пунктами) для отдельных сфер жизни могут использоваться свои АИУС. Особенно управляющие системы этого класса широко используются в силовых министерствах и ведомствах, однако постепенно все сферы жизни получают свои отраслевые АИУС для полноценного управления. Вместе с тем, как обычно, такие отраслевые АИУС чаще всего используются для запоздалого сбора отчётности с подведомственных объектов управления, так что ни о каком интеллектуальном управлении речи не идёт. Само собой разумеется, здесь есть самые широкие возможности по интеллектуализации, особенно в таких сферах жизни, как образование и здравоохранение, где методы искусственного интеллекта применяются всё шире и глубже.
- ф. *Системы класса «Электронное государство».* Учитывая тренд последних лет в области построения глобальных АИУС для управления деятельностью государств в целом и в применении парадигмы GaaS («государство как платформа») [25], особый интерес вызывает интеллектуализация таких АИУС, так как с ними приходится взаимодействовать, фактически, каждому гражданину такого государства. Само собой разумеется, что чем выше степень интеллектуальности Электронного государства, тем удобнее с ним работать гражданам и другим акторам, так и тем эффективнее оно само работает. Исследователям и разработчикам, работающим в этой области, необходимо самым внимательным образом использовать новые высокие технологии при разработки АИУС этого субкласса.

Интеллектуализация технических систем перечисленных классов, равно как и добавление в этот список новых классов, должна рассматриваться в каждом конкретном случае отдельно в рамках детального обследования и изучения всех возможностей и вариантов.

Авторами осуществлена апробация представленного подхода в рамках интеллектуализации транспортной системы муниципалитета при построении интеллектуальной транспортной системы для повышения безопасности дорожного движения и качества предоставляемых транспортных услуг. Реализованная интеллектуальная транспортная система внедрена в нескольких городах России и имеет уровень интеллектуальности 0.4875 (для ИТС Москвы) в соответствии с [16]. Для отдельных ИТС, развёрнутых на пилотных объектах управления в таких городах, как Ульяновск, Томск, Тверь, Новосибирск и нескольких других уровень интеллектуальности варьируется от 0.5 до 0.7. Здесь под параметром «уровень интеллектуальности» понимается агрегированная характеристика, включающая в себя взвешенные при помощи описанной в работе [16] методики значения по шкалам «Автономность» и «Адаптивность», а также ещё несколько вспомогательных значений. Полученные данные демонстрируют, что подход в целом работает и может быть перенесён на технические системы других классов, в частности на интеллектуальные здания.

Учитывая основное направление исследований в этой статье, имеет смысл заострить своё внимание на системах управления интеллектуальными зданиями и на процессе их интеллектуализации. Если рассмотреть комплексную АИУС здания, то она представляет собой набор инженерных АСУ ТП, редко интегрированных друг с другом на базе единой интеграционной платформы с использованием парадигмы сервисно-ориентированной архитектуры (SOA). Каждая из инженерных АСУ ТП управляет (в части мониторинга, диспетчеризации и контроля) одной из инженерных систем здания. Для принятия решений в случаях нештатных ситуаций используются наборы правил, чаще всего основанные на нормативно-технической базе, лежащей в фундаменте построения таких АСУ ТП и управляемых ими процессов.

В соответствии с работой [8] интеллектуализация системы управления здания должна начинаться с использования функционального подхода к построению комплексной системы управления. В контексте интеллектуального здания это означает, что все АСУ ТП, которые находятся либо в изолированном состоянии, либо интегрированы с некоторыми своими смежными системами по принципу «точка — точка», должны вводиться в единый контур управления на базе архитектуры SOA, при этом взаимодействие между системами, в том числе и с создаваемой интеллектуальной подсистемой управления, должно осуществляться при помощи открытых интерфейсов так, что каждая отдельная инженерная АСУ ТП рассматривается как набор чистых и детерминированных функций. Это позволит замкнуть работу всех систем на единую точку принятия решений без необходимости вмешательства во внутреннее устройство каждой системы.

Осталось пояснить, как для такого комплексного контура управления в функциональном стиле проводить процедуру функционального переустройства по той модели, которая описана в предыдущем разделе. Для этого можно воспользоваться следующими процедурами:

1. P_1 : Для каждой инженерной АСУ ТП и других систем, которые используются в эксплуатации и управлении зданием необходимо оценить уровень интеллектуальности соответствующей системы на основе двух классификаторов, представленных в Табл. 1. Результат должен быть представлен в виде списка инженерных АСУ ТП с приписанными к ним уровнями интеллектуальности в виде местоположения каждой АСУ ТП в двумерном пространстве интеллектуализации. Общий уровень интеллектуализации для всей системы находится как центр масс для всех точек, соответствующих каждой инженерной АСУ ТП, которая подверглась этой процедуре.

2. P_2 : В качестве целевого состояния интеллектуализированной комплексной системы управления зданием необходимо выбрать:

- по шкале «Автономность» значение 4 или 5,
 - по шкале «Адаптивность» значение от 3 до 5,
- в зависимости от конкретных показателей назначения и требований к конкретному зданию в

части построения интеллектуальной интегрированной автоматизированной системы управления. По практическому опыту авторов указанного подпространства $[4,5] \times [3,5]$ пространства интеллектуализации вполне достаточно для построения эффективного контура управления всеми инженерными системами, который будет работать в проактивном режиме.

3. P_3 : Для проведения этой процедуры достаточно воспользоваться тем алгоритмом, который описан в разделе 1 после проведения ТЭО и (или) ФЭО.

4. P_4 : Опять же, эта процедура представляет собой традиционное планирование и выполнение работ по модернизации автоматизированной системы управления, что включает в себя все необходимые этапы от разработки концептуального замысла и проектирования до внедрения интеллектуализированной системы в промышленную эксплуатацию.

Важной особенностью является то, что в процессе функционального переустройства интеллектуального здания фактически все имеющиеся АСУ ТП инженерных систем здания замыкаются в единый контур управления, при этом над всеми системами в качестве «супервайзера» становится проактивная подсистема управления в соответствии с принципами, описанными в [10]. Такой интеллектуализированный контур управления можно представить диаграммой, показанной на Рис. 3.

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 [8], когда каждая инженерная система воспринимается как «чистая детерминированная функция» без побочных эффектов, и на этом основании общая система управления интел-

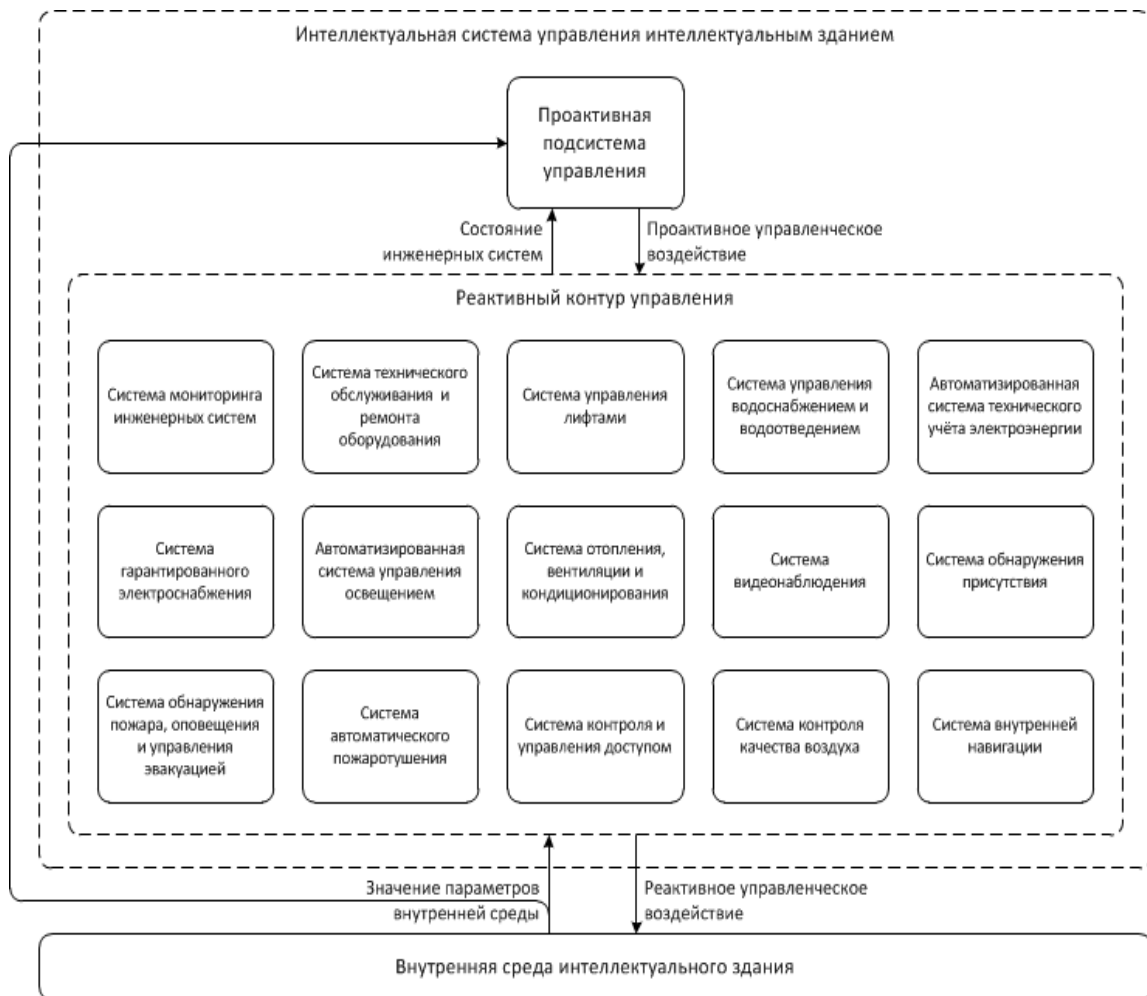


Рис. 3. Общий вид архитектуры после функционального переустройства интеллектуализированной системы управления интеллектуального здания

лектуальным зданием получает важные свойства, позволяющие использовать для её перепроектирования математические методы для анализа функций.

Заключение

Таким образом, показано, что построенную математическую модель «функционального переустройства» технических систем на примере интеллектуальных зданий можно использовать для интеллектуализации систем самых обширных классов. Этот подход позволит вывести разработку и (или) модернизацию автоматизированных и информационных систем на новый уровень, делая такие системы более эффективными в решении интеллектуальных и когнитивных задач. В свою очередь, это позволит

повысить общую эффективность выполнения процессов, в которых задействованы такие технические системы.

В результате выполненной работы решены следующие задачи:

1. Разработана математическая модель интеллектуализации технической системы на примере интеллектуального здания.

2. Определены и перечислены классы систем, к которым возможно применение процесса интеллектуализации.

3. Кроме того, даны основания для описания общей математической модели управления интеллектуальным зданием на основе функционального и сценарного подходов. Само описание такой модели приведено в работе [26], и поэтому заинтересованный читатель отсылается к ней.

Также в работе показано, что представленный метод может быть применён к различным классам технических систем, при этом путём конкретизации процедур, входящих в состав метода, сам метод можно конкретизировать до достаточного уровня так, чтобы он был непосредственно применим к технической системе заданного класса. Это открывает широкие возможности по применению описанного метода в широких областях для интеллектуализации процессов и систем управления.

Литература

1. Chauhan D., Kaur G. Green Smart Buildings for Smart Cities. In: P. Tomar, G. Kaur (Ed.), *Green and Smart Technologies for Smart Cities*. New York: CRC Press, 2019. doi: 10.1201/9780429454837-3
2. Pašek J., Sojková V. Facility management of smart buildings // *International Review of Applied Sciences and Engineering*. 2018. Vol. 9. P. 181-187. doi: 10.1556/1848.2018.9.2.15
3. Huang H. Habitable Inner Environment. In: *Fujian's Tulou*. Singapore: Springer, 2020. P. 213-226. doi: 10.1007/978-981-13-7928-4_9
4. Singh R., Gehlot A., Singh B., Choudhury S. Building Automation System. In: *Arduino Meets Matlab: Interfacing, Programs and Simulink*, 2018. P.118-126. doi: 10.2174/9781681087276118010018
5. Ayson R. Strategic theory as an intellectual system. In: B. Wilkinson, J. Gow (Ed.), *The Art of Creating Power: Freedman on Strategy*. Oxford: Oxford University Press, 2018. doi: 10.1093/oso/9780190851163.003.0002
6. Душкин Р. В. Искусственный интеллект. М.: ДМК-Пресс, 2019. 280 с.
7. Душкин Р. В. Интеллектуализация управления техническими системами в рамках функционального подхода // *Программные системы и вычислительные методы*. 2019. № 2. С. 43-57.
8. Душкин Р. В. Особенности функционального подхода в управлении внутренней средой интеллектуальных зданий // *Прикладная информатика*. 2018. Т. 13, № 6 (78). С. 20-31.
9. Душкин Р. В., Родионов И. В. Анализ сценариев изменения среды интеллектуального здания // *Электронные информационные системы*. 2019. № 2 (21). С. 61-72.
10. Душкин Р. В., Андронов М. Г. Интеллектуальный алгоритм создания управляющих воздействий на инженерные системы интеллектуальных зданий. // *Программные системы и вычислительные методы*. (препринт). URL: http://author.nbpublish.com/ppsvm/preprint_31041.html (дата обращения: 14.06.2020)
11. Maayne A. A Cybernetic Approach to Systems Modelling. In: J. Rose (Ed.), *Current Topics in Cybernetics and Systems*. Berlin: Springer, 1978. P. 333-334. doi: 10.1007/978-3-642-93104-8_211
12. Hirsch-Kreinsen H. Industrie 4.0. In: Blättel-Mink B., Schulz-Schaeffer I., Windeler A. (Ed.) *Handbuch Innovationsforschung*. Wiesbaden: Springer VS, 2020. P. 1-16. doi: 10.1007/978-3-658-17671-6_53-1
13. Saveliev Y., Savelieva N. Automation of industrial processes and everyday life. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 663. doi: 10.1088/1757-899X/663/1/012068
14. Backhouse R. An Analysis of Repeated Graph Search. In: G. Hutton (Ed.), *Mathematics of Program Construction*. Basel: Springer Nature Switzerland AG, 2019. P. 298-329. doi: 10.1007/978-3-030-33636-3_11
15. Posur S. *Methods of constructive category theory*. 2019.
16. Методика оценки степени интеллектуальности технических и социотехнических систем / А. И. Мохов, Р. В. Душкин, М. Г. Андронов, В. П. Мальцев // *Цифровая экономика*. 2019. № 3(7). С 24-33.
17. Zanni-Merk C. On the Need of an Explainable Artificial Intelligence. In: Borzemski L., Świątek J., Wilimowska Z. (Ed.) *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 40th Anniversary International Conference on Information Systems Architecture and Technology – ISAT 2019*. Cham: Springer, 2020. Vol. 1050. P.3-3. doi: 10.1007/978-3-030-30440-9_1
18. Wagner G. Deductive Knowledge Systems. In: *Foundations of Knowledge Systems. The Kluwer International Series on Advances in Database System*. Boston: Springer, 1998. Vol 13. P. 237-254. doi: 10.1007/978-1-4615-5723-4_15
19. Tao Y., Li Y., Li G. Interactive Graph Search // *The 2019 International Conference*. 2019. P. 1393-1410. doi: 10.1145/3299869.3319885
20. Джарратано Дж., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование / Пер. с англ. К. Птицыной. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1152 с.
21. Kockmann N., Bittorf L., Krieger W., Reichmann F., Schmalenberg M., Soboll S. Smart Equipment — A Perspective Paper // *Chemie Ingenieur Technik*. 2018. Vol. 90(5). doi: 10.1002/cite.201800020
22. Industry 4.0 / Lasi H., Kemper H.-G., Fettke P., Feld T., Hoffmann M. // *Business & Information Systems Engineering*. 2014. Vol. 4 (6). P. 239-242. doi: 10.1007/s12599-014-0334-4
23. Heady H., Child R. *Rangeland Ecology and Management*. New York: Avalon Publishing, 2019. doi: 10.4324/9780429497841-35
24. About development of automation control systems / Myshlyayev L. P., Wenger K. G., Ivushkin K. A., Makarov V. N. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. doi: 10.1088/1757-899X/354/1/012001
25. Государство как платформа: Люди и технологии. Монография / под ред. М. С. Шклярук. М.: РАНХиГС, 2019. 111 с.
26. Душкин Р. В. Теоретико-множественная модель функционального подхода к интеллектуализации процессов управления зданиями и сооружениями // *Программные продукты и системы*. 2019. № 2 (32). С. 306-312.
27. Люгер Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем = Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem

- Solving / Под ред. Н. Н. Куссуль. — 4-е изд. — М.: Вильямс, 2005. — 864 с. — ISBN 5-8459-0437-4.
28. Эшби У. Р. Введение в кибернетику = An introduction to cybernetics / У. Росс Эшби; пер. с англ. Д. Г. Лахути; под ред. В. А. Успенского; с предисл. А. Н. Колмогорова. — 3-е изд., стер. — М: URSS, 2006 (М: ООО Ленанд). — 432 с.: ил., табл.; ISBN 5-484-00506-X.
 29. Кельчевская Н. Р. Интеллектуализация управления как основа эффективного развития предприятия. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. 146 с.
 30. Воронкова А. В. Интеллектуализация производства как технологический базис модернизации промышленного комплекса // Сборник научных статей студентов, магистрантов, аспирантов. Вып. 18 / сост. С. В. Анцух; под общ. ред. В. Г. Шадурского. — Минск: Четыре четверти, 2017. — 242 с.
 31. Байнёв В. Ф. Четвертая промышленная революция как глобальный инновационный проект / В. Ф. Байнёв // Наука и инновации. — Минск, 2017. — №3. — С. 38-41.
 32. Тынкачев А. Р., Бухнер А. В. Интеллектуализация производства — путь к эффективности // https://sensorika.ru/upload/file/statja_asutp.pdf (проверено 23.08.2020).
 33. Жебрун Н. Н. Интеллектуализация управления бизнес-процессами // Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, 2007. — 112 с.
 34. Тимашова Л. А., Лещенко В. А., Морозова А. И., Таран Л. Ю. Интеллектуализация систем управления производством // Вісник Національного технічного університету «ХПІ», 2017, № 50 (1271). — с. 143-158.
 35. Юлдашева М. Т. Некоторые вопросы интеллектуализации принятия управленческих решений // Молодой учёный. — 2017. — № 3 (137). — С. 187-189. — URL: <https://moluch.ru/archive/137/38420/>.
 36. Бутаев Ш. Интеллектуализация процессов принятия решений в информационных системах управления // Infocom.uz, 2008. — <https://clck.ru/QUP9R> (проверено 23.08.2020).
 37. Мосеев В. Интеллектуализация производства: реальные примеры // IoT.ru, 2019. — <https://clck.ru/QUPXd> (accessed 23.08.2020).
 38. Юсупов Р. М., Тимофеев А. В. Интеллектуализация процессов управления и навигации робототехнических систем // Экстремальная робототехника, № 1(1)б 2014. — СПб: Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики. — с. 16-21.
 39. Донсков Ю. Е., Храмов В. Ю., Беседин Н. П. Интеллектуализация процессов управления РЭБ как один из основных путей повышения ее эффективности // Военная мысль, № 2, 2018. — с. 50-54.

Душкин Роман Викторович. ООО «ВойсЛинк», г. Москва, Россия. Заместитель генерального директора по Интеллектуальным транспортным системам и АПК «Безопасный город». Количество печатных работ: 136 (в т.ч. 2 монографии). Область научных интересов: искусственный интеллект. E-mail: roman.dushkin@gmail.com

Андронов Михаил Григорьевич. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия. Студент. Количество печатных работ: 8. Область научных интересов: искусственный интеллект. E-mail: mihandronov@gmail.com

Mathematical Justification for «Functional Conversion» of Technical Systems Using the Example of Intelligent Buildings

R. V. Dushkin¹, M. G. Andronov¹¹

¹VoiceLink LLC, Moscow, Russia

¹¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. The article provides the mathematical foundations and justification for the reorganization of technical systems on the example of intelligent buildings within the framework of the functional approach. A brief review of the literature on the intellectualization of production and management processes is given, after which a mathematical model of the intellectualization of a technical system is described. The presented mathematical model consists of four procedures, the sequential application of which transfers the control system to the category of intelligent systems. In addition, the classes of technical systems are listed to which the principles of intellectualization given in the article are applicable. The relevance of the presented work is based on the need to transfer management processes to the Industry 4.0 paradigm and the use of artificial intelligence methods. Also, the relevance of the work is due to the widespread use of automation and intellectualization processes in the management of technical systems in various sectors of the modern economy and, accordingly, the need for their study and modeling. The novelty of the work stems from the combined consideration of technical systems within the framework of the functional approach and the hybrid paradigm of constructing artifi-

cial intelligent agents using the example of intelligent building management. The article will be of interest to scientists and engineers working in the field of designing intelligent buildings and systems of the «smart city» class.

Keywords: intellectualization, control, control system, control process, intellectual building, functional approach, scenario based approach, smart city.

DOI 10.14357/20718632200404

References

1. Chauhan D., Kaur G. Green Smart Buildings for Smart Cities. In: P. Tomar, G. Kaur (Ed.), *Green and Smart Technologies for Smart Cities*. New York: CRC Press, 2019. doi: 10.1201/9780429454837-3
2. Pašek J., Sojková V. Facility management of smart buildings // *International Review of Applied Sciences and Engineering*. 2018. Vol. 9. P. 181-187. doi: 10.1556/1848.2018.9.2.15
3. Huang H. Habitable Inner Environment. In: *Fujian's Tulou*. Singapore: Springer, 2020. P. 213-226. doi: 10.1007/978-981-13-7928-4_9
4. Singh R., Gehlot A., Singh B., Choudhury S. Building Automation System. In: *Arduino Meets Matlab: Interfacing, Programs and Simulink*, 2018. P.118-126. doi: 10.2174/9781681087276118010018
5. Ayson R. Strategic theory as an intellectual system. In: B. Wilkinson, J. Gow (Ed.), *The Art of Creating Power: Freedman on Strategy*. Oxford: Oxford University Press, 2018. doi: 10.1093/oso/9780190851163.003.0002
6. Dushkin R.V. 2019. *Iskusstvennyj intellekt [Artificial intelligence]*. Moscow: DMK Press. 280 p.
7. Dushkin R. V. 2019. *Intellektualizaciya upravleniya tekhnicheskimi sistemami v ramkah funkcional'nogo podhoda [Intellectualization of the management of technical systems as part of a functional approach]. Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody [Software systems and computational methods]* 2:43-57.
8. Dushkin R.V. 2018. *Osobennosti funkcional'nogo podhoda v upravlenii vnutrennej sredoj intellektual'nyh zdaniy [Features of a functional approach in the management of the internal environment of intelligent buildings]. Prikladnaya informatika [Applied Informatics]* 6 (78):20-31.
9. Dushkin R.V., Rodionov I. V. 2019. *Analiz scenariy izmeneniya sredy intellektual'nogo zdaniya [Analysis of scenarios for changing the environment of an intelligent building]. Elektronnye informacionnye sistemy [Electronic Information Systems]*. 2(21):61-72.
10. Dushkin R. V., Andronov M. G. 2020. *Intellektual'nyj algoritm sozdaniya upravlyayushchih vozdeystvij na inzhenernye sistemy intellektual'nyh zdaniy [Intelligent algorithm for creating control actions on engineering systems of intelligent buildings]. Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody [Software systems and computational methods]* (In Russian, unpubl.). Available at: http://author.nbpublish.com/ppsvm/preprint_31041.html (Accessed: June 14, 2020).
11. Mayne A. A Cybernetic Approach to Systems Modelling. In: J. Rose (Ed.), *Current Topics in Cybernetics and Systems*. Berlin: Springer, 1978. P. 333-334. doi: 10.1007/978-3-642-93104-8_211.
12. Hirsch-Kreinsen H. Industrie 4.0. In: Blätzel-Mink B., Schulz-Schaeffer I., Windeler A. (Ed.) *Handbuch Innovationsforschung*. Wiesbaden: Springer VS, 2020. P. 1-16. doi: 10.1007/978-3-658-17671-6_53-1
13. Saveliev Y., Savelieva N. Automation of industrial processes and everyday life. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 663. doi: 10.1088/1757-899X/663/1/012068.
14. Backhouse R. An Analysis of Repeated Graph Search. In: G. Hutton (Ed.), *Mathematics of Program Construction*. Basel: Springer Nature Switzerland AG, 2019. P. 298-329. doi: 10.1007/978-3-030-33636-3_11.
15. Posur S. *Methods of constructive category theory*. 2019.
16. Mokhov A. I., Dushkin R.V., Andronov M.G., Maltsev V.P. 2019. *Metodika ocenki stepeni intellektual'nosti tekhnicheskikh i sociotekhnicheskikh sistem [Methodology for assessing the degree of intelligence of technical and sociotechnical systems]. Cifrovaya ekonomika [Digital economy]*. 3(7):24-33.
17. Zanni-Merk C. On the Need of an Explainable Artificial Intelligence. In: Borzemski L., Świątek J., Wilimowska Z. (Ed.) *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 40th Anniversary International Conference on Information Systems Architecture and Technology – ISAT 2019*. Cham: Springer, 2020. Vol. 1050. P.3-3. doi: 10.1007/978-3-030-30440-9_1
18. Wagner G. *Deductive Knowledge Systems*. In: *Foundations of Knowledge Systems. The Kluwer International Series on Advances in Database System*. Boston: Springer, 1998. Vol. 13. P. 237-254. doi: 10.1007/978-1-4615-5723-4_15.
19. Tao Y., Li Y., Li G. *Interactive Graph Search // The 2019 International Conference*. 2019. P. 1393-1410. doi: 10.1145/3299869.3319885.
20. Giarratano J., Riley G. *Expert Systems: 1981. Principles and Programming*. Boston: PWS-Kent Publishing Company.
21. Kockmann N., Bittorf L., Krieger W., Reichmann F., Schmalenberg M., Soboll S. *Smart Equipment — A Perspective Paper // Chemie Ingenieur Technik*. 2018. Vol. 90(5). doi: 10.1002/cite.201800020.
22. *Industry 4.0 / Lasi H., Kemper H.-G., Fettke P., Feld T., Hoffmann M. // Business & Information Systems Engineering*. 2014. Vol. 4 (6). P. 239-242. doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
23. Heady H., Child R. *Rangeland Ecology and Management*. New York: Avalon Publishing, 2019. doi: 10.4324/9780429497841-35.
24. *About development of automation control systems / Myshlyaev L. P., Wenger K. G., Ivushkin K. A., Makarov*

- V. N. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. doi: 10.1088/1757-899X/354/1/012001.
25. Shklyaruk M. 2019. Gosudarstvo kak platforma: Lyudi i tekhnologii. Monografiya [State as a platform: People and technology. Monograph]. Moscow: RANEPa. 111 p.
26. Dushkin R.V. 2019. Teoretiko-mnozhestvennaya model' funktsional'nogo podhoda k intellektualizatsii processov upravleniya zdaniyami i sooruzheniyami [A set-theoretic model of a functional approach to the intellectualization of buildings and structures management processes]. Programmnye produkty i sistemy [Software Products and Systems] 2(32):306-312.
27. Luger J. F. Iskusstvenny intellekt: strategii i metody resheniya slozhnykh problem = Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving / Ed. N. N. Kussul. — 4th iss. — Moscow: Wilyams, 2005. — 864 p. — ISBN 5-8459-0437-4.
28. Ashby W. R. Vvedeniye v kibernetiku = An introduction to cybernetics / W. Ross Ashby; transl. from Eng. D. G. Lakhuti; ed. V. A. Uspensky; with intro. A. N. Kolmogorov. — 3rd issue. — Moscow: URSS, 2006. — 432 p. — ISBN 5-484-00506-X.
29. Kelchevskaya N. R. Intellektualizatsiya upravleniya kak osnova effektivnogo razvitiya predpriyatiya [The intellectualization of management as a basis for effective development of enterprise. Yekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2002. 146 p.
30. Voronkova A. V. Intellektualizatsiya proizvodstva kak tekhnologicheskiiy basis modernizatsiyi promyshlennogo kompleksa [The manufacture intellectualization as a technological basis for industry modernization]. — Collection of scientific articles of students, undergraduates, postgraduates. Issue 18 / comp. S. V. Antsukh; under total. ed. V.G.Shadursky. — Minsk: Four quarters, 2017. — 242 p.
31. Baynev V. F. Chetyvortaya industrialnaya revolyutsiya kak globalny innovatsionny process [The fourth industrial revolution as a global innovation project] // Science and innovations. — Minsk, 2017. — No. 3. — P. 38-41.
32. Tynkachev A. R., Buchner A. V. Intellektualizatsiya proizvodstva — put' k effektivnosti [Industry intellectualization is the road to effectiveness] // https://sensorika.ru/upload/file/statja_asutp.pdf (accessed 23.08.2020).
33. Zhebrun N. N. Intellektualizatsiya upravleniya biznes-processami predpriyatiya [The management intellectualization of enterprise business-processes] // PhD thesis, 2007. — 112 p.
34. Timashova L. A., Leschenko V. A., Morozova A. I., Taran L. Yu. Intellektualizatsiya sistem upravleniya proizvodstvom [The intellectualization of the MES systems] // Visnik Natsionalnogo Tekhnichnogo Universitetu «HPI» [The Bulletin of National Technical University «HPI»], 2017, № 50 (1271). — pp. 143-158.
35. Yuldasheva M. T. Nekotorye voprosy intellektualizatsiyi prinyatiya upravlencheskikh resheniy [Some questions of intellectualization of management decision making] // Molodoy uchony [The Young Scientist], № 3 (137), 2017. — P. 187-189.
36. Butayev Sh. Intellektualizatsiya processov prinyatiya resheniy v informatsionnykh sistemakh upravleniya [The Intellectualization of Decision-Making Processes in Information Management Systems] // Infocom.uz, 2008. — <https://clck.ru/QUP9R> (accessed 23.08.2020).
37. Moseyev V. Intellektualizatsiya proizvodstva: realnye primery [Intellectualization of production: real examples] // IoT.ru, 2019. — <https://clck.ru/QUPXd> (accessed 23.08.2020).
38. Yusupov R. M., Timofeev A. V. Intellektualizatsiya protsessov upravleniya i navigatsii robototekhnicheskikh sistem [Intellectualization of control and navigation processes of robotic systems] // Ekstremalnaya robototekhnika [Extreme robotics], № 1(1), 2014. SPb: CNIOKIRTK. — p. 16-21.
39. Donskov Yu. Ye., Khramov V. Yu., Besedin N. P. Intellektualizatsiya protsessov upravleniya REB kak odin iz osnovnykh putey povysheniya yeyo effektivnosti [Intellectualization of electronic warfare management processes as one of the main ways to increase its efficiency] // Voyennaya mysl [Military thought], № 26 2018. — p. 50-54.

Dushkin R.V. VoiceLink LLC, 4a Milashenkova str., Moscow, 127322, Russia, e-mail: roman.dushkin@gmail.com

Andronov M.G. Student, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: mihandronov@gmail.com