

# ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ПРОЦЕССАХ УПРАВЛЕНИЯ

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСОТЕХНИКИ

Получено: 20.11.2020    Статья доработана после рецензирования: 16.12.2020    Принято: 23.12.2020

УДК 004.942,004.896    JEL L74    DOI 10.26425/2658-3445-2020-3-4-13-25

### Мохов Андрей Игоревич

Д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Российская Федерация  
e-mail: andrey.i.mokhov55@gmail.com

### Душкин Роман Викторович

Директор по науке и технологиям, Агентство Искусственного Интеллекта, г. Москва, Российская Федерация  
ORCID: 0000-0003-4789-0736, e-mail: drv@aiagency.ru

### АННОТАЦИЯ

Представлена авторская позиция по вопросу развития и применения функционального подхода к вопросам проектирования и разработки интеллектуальных систем управления техническими объектами различной природы (киберфизическими системами) на основе принципов комплексотехники. Комплексотехника и функциональный подход могут быть, к примеру, совместно применены для управления такими сложными техническими объектами, как интеллектуальные здания, что в перспективе позволяет перевести их функционирование на более высокий уровень эффективности не только самого объекта управления, но и иерархии его надсистем – от муниципалитета и региона до государства в целом. Вместе с тем системный подход также может быть применен совместно с комплексотехникой, что позволяет, хотя бы частично, сгладить отдельные недостатки функционального подхода, проявляющиеся при его применении исключительно в рамках системотехники при рассмотрении аспектов управления киберфизическими системами с высокой степенью интеллектуальности на основе системного подхода.

Приемы и методы указанной совокупности комплексотехники, функционального и системного подходов наглядно показаны в предлагаемой статье при помощи инфографических моделей. Комплексотехника позволяет решить задачу перевода объекта управления в связанный интеллектуализированный комплекс управления, что, в свою очередь, повышает уровень его интеллектуальности. При этом авторами применяется междисциплинарный подход, так как именно он является наиболее действенным при рассмотрении сложных киберфизических систем. Комплексотехника изначально включает в себя междисциплинарный подход, что позволяет применять его к анализу и изучению киберфизических систем с последующим применением уже функционального подхода к решению вопросов интеллектуализации. По мнению авторов, это позволит выйти на новые рубежи в области создания «умных» систем управления технологическими и управленческими процессами в различных отраслях хозяйственной деятельности человека.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Автономность, адаптивность, интеллектуализация, интеллектуальная система, интеллектуальность, инфографические модели, искусственный интеллект, киберфизическая система, комплексотехника, междисциплинарный подход, системный подход, технологический процесс, управление, функциональный подход

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Мохов А.И., Душкин Р.В. Функциональный подход к интеллектуализации объектов на основе комплексотехники//E-Management. 2020. Т. 3. № 4. С. 13–25.

© Мохов А.И., Душкин Р.В., 2020.

Статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0. всемирная.



# INSTRUMENTAL AND MATHEMATICAL METHODS IN MANAGEMENT PROCESSES

## FUNCTIONAL APPROACH TO OBJECT INTELLECTUALIZATION BASED ON COMPLEX ENGINEERING

Received: 20.11.2020    Revised: 16.12.2020    Accepted: 23.12.2020

JEL L74    DOI 10.26425/2658-3445-2020-3-4-13-25

### Andrey I. Mokhov

Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia  
e-mail: andrey.i.mokhov55@gmail.com

### Roman. V. Dushkin

Director of Science and Technology, Artificial Intelligence Agency, Moscow, Russia  
ORCID: 0000-0003-4789-0736, e-mail: drv@aiagency.ru

### ABSTRACT

The article presents the authors' position on the development and application of a functional approach to the design and development of intelligent control systems for technical objects of various nature (cyberphysical systems) based on the principles of complex engineering. Complex engineering and a functional approach can, for example, be used together to manage such complex technical objects as intelligent buildings, which in the future allows us to transfer their functioning to a higher level of efficiency not only of the management object itself, but also of the hierarchy of its super – systems from the municipality and the region to the state as a whole. However, the system approach can also be applied in conjunction with complex engineering, which allows us, at least partially, to smooth out certain shortcomings of the functional approach, which are manifested when it is applied exclusively within the framework of system engineering when considering aspects of managing cyber-physical systems with a high degree of intelligence based on the system approach.

The authors clearly show the techniques and methods of this set of complex engineering, functional and system approaches in the proposed article using infographic models. Complex engineering allows you to solve the problem of transferring the control object to a connected intellectualized control complex, which, in turn, increases the level of its intelligence. At the same time, the authors use an interdisciplinary approach, since it is the most effective one when considering complex cyberphysical systems. Complex engineering initially includes an interdisciplinary approach, which allows us to apply it to the analysis and study of cyberphysical systems with the subsequent application of already a functional approach to solving problems of intellectualization. According to the authors, this will allow us to reach new frontiers in the field of creating “smart” systems for managing technological and managerial processes in various branches of human economic activity.

### KEYWORDS

Adaptability, artificial intelligence, autonomy, complex engineering, cyberphysical system, functional approach, infographic models, intellectualization, intelligence, intelligent system, interdisciplinary approach, management, system approach, technological process

### FOR CITATION

Mokhov A.I., Dushkin R.V. (2020) Functional approach to object intellectualization based on complex engineering. *E-Management*, vol. 3, no. 4, pp. 13–25. DOI 10.26425/2658-3445-2020-3-4-13-25

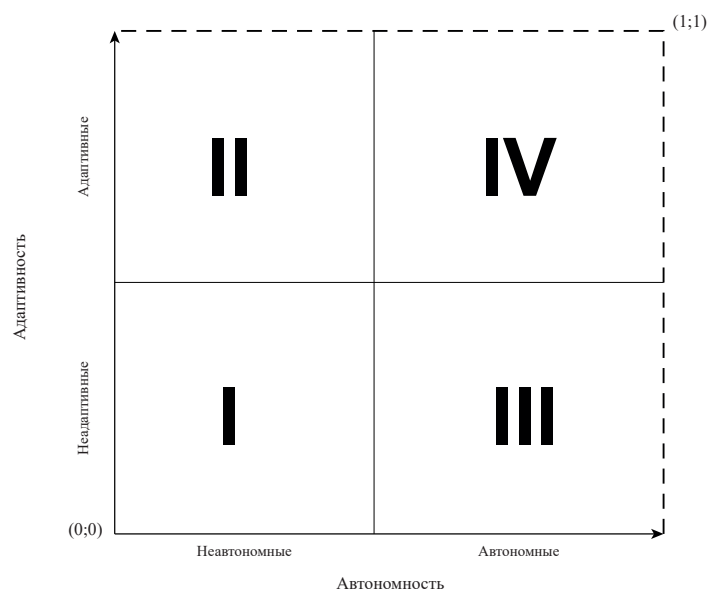
© Mokhov A.I., Dushkin R.V., 2020.

This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



При изучении киберфизических систем важно рассматривать такое их свойство, как интеллектуальность. Авторский подход предполагает, что киберфизическая система обладает интеллектуальностью тогда, когда у этой системы есть два важных свойства. Во-первых, это автономная работа системы в своем окружении, то есть наличие функциональности по самостоятельному принятию решений в рамках своей компетенции. Во-вторых, это наличие адаптивности к постоянно изменяющимся параметрам среды, в которой киберфизическая система функционирует. Соответственно, чем выше уровни адаптивности и автономности киберфизической системы, тем выше полагается ее интеллектуальность [Душкин, 2019а].

Вместе с тем интеллектуализация – это процесс перевода киберфизической системы с низкого уровня интеллектуальности на высокий [Rajani, 2011; Domingos, 2018; Stork, 2007]. Поскольку ранее было определено, что интеллектуальность представляет собой совокупность двух более простых свойств, то интеллектуализация может рассматриваться как некоторого рода траектория перехода системы из низкого интеллектуального состояния в более высокое, при этом такой переход осуществляется во время жизненного цикла рассматриваемой системы. При этом пространство состояний, по которому осуществляется движение, является двумерным. Можно рассмотреть две шкалы, которые классифицируют киберфизические системы по степеням их автономности и адаптивности. В этом случае траектория движения системы проходит по дискретному двумерному пространству и каждая точка в нем соответствует классу эквивалентности киберфизических систем, имеющих одинаковые значения степеней адаптивности и автономности и, как следствие, интеллектуальности. Само дискретное пространство интеллектуальности может рассматриваться от точки (0; 0) – абсолютно неавтономная и неадаптивная киберфизическая система, до точки (1; 1) – полностью автономная и адаптивная киберфизическая система (рис. 1).



Источник: [Душкин, 2019а] / Source: [Dushkin, 2019a]

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

Figure 1. Quadrants for the classification of technical systems by adaptability and autonomy to identify the degree of intelligence of systems

Для иллюстрации можно привести типовые примеры киберфизических систем, расположенных в различных квадрантах двумерного пространства интеллектуальности таких систем.

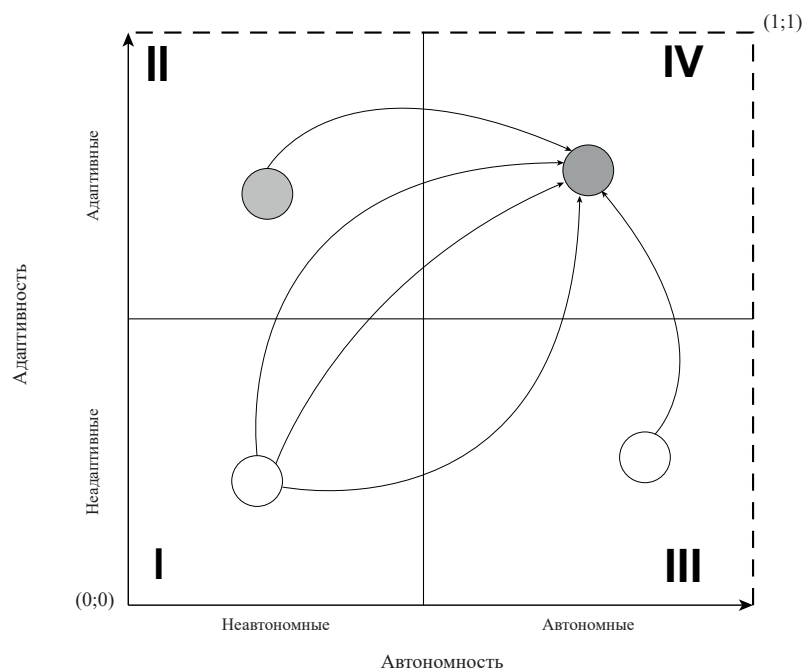
1. Роботизированный плоттер (графопостроитель) – при использовании специализированных графопостроителей при отрисовке чертежей в векторных форматах обычно такие графопостроители выполняют заданную последовательность штрихов (низкий уровень адаптивности), а сам по себе этот робот не предназначен для принятия каких-либо самостоятельных решений (полное отсутствие автономности).

2. Высокоавтоматизированное транспортное средство (степень автономности 3 и 4) – эта киберфизическая система «на лету» строит модель незнакомого пространства, если попадает в него, что позволяет ей успешно функционировать даже в таких средах, которые она не наблюдала в процессе своего обучения (высокий уровень адаптивности). При этом такое транспортное средство применяется только для реализации одной функции – перемещения пассажира или груза из начальной в конечную точку маршрута (низкий уровень автономности) [Luck & Roberson, 2017].

3. Динамическая экспертная система – системы подобного класса уже наполнены определенными знаниями под свои проблемные области, что требует существенной переделки системы или ее базы знаний при возникновении новых ситуаций (низкий уровень адаптивности), однако при этом подобного рода система самостоятельно подготавливает решения в рамках процесса поддержки принятия решений, а также может объяснить их в случае необходимости (высокий уровень автономности) [Stefanuk, 2000].

4. Интеллектуальный ассистент преподавателя – это интеллектуальная система для планирования занятий, ответа на рутинные вопросы студентов, проверки заданий и выполнения другой педагогической деятельности, которая непрерывно обучается в процессе своего функционирования и общения с конечными пользователями (высокий уровень адаптивности). При этом интеллектуальный ассистент может самостоятельно выполнять разнообразные сценарии взаимодействия с конечными пользователями, причем в рамках этого взаимодействия система вполне вольна самостоятельно выбирать тот или иной вариант действий, в том числе и на основе предыдущих предпочтений конкретного пользователя (высокий уровень автономности) [Душкин, 2019с].

Все это позволяет сказать, что процесс интеллектуализации является эволюцией киберфизической системы из ее настоящего состояния в двумерном пространстве «Адаптивность – Автономность» в точку, которая находится как можно ближе к максимально возможному уровню интеллектуальности, то есть (1; 1). При этом надо отметить, что из квадрантов II и III эта эволюция может быть реализована напрямую, а из базового квадранта I траектория интеллектуализации может идти по трем различным вариантам (рис. 2).



Источник: [Душкин, 2019а] / Source: [Dushkin, 2019a]

**Рис. 2.** Возможные траектории интеллектуализации технических систем  
Figure 2. Possible trajectories of intellectualization of technical systems

В рамках декларативного программирования определен так называемый функциональный подход, базирующийся на математическом понятии функции. Функциональный подход напрямую используется

в функциональном программировании, которое для представления алгоритмов оперирует функциями, в качестве своих базовых примитивов. Такое представление позволяет изучать вычисления как функции и их последовательные вызовы, при этом, в свою очередь, каждая функция вполне может быть определена как через вызовы других функций (в том числе и рекурсивно через вызов самой себя), так и при помощи активизации некоторого базового набора «атомарных действий» [Field, 1988].

С точки зрения классической математики функция рассматривается как «черный ящик», у которого имеется множество входов с одной стороны и множество выходов с другой (рис. 3). Внутри этого «черного ящика» осуществляется определенный вычислительный процесс, который и преобразует входные значения в выходные. Математические функции имеют две важнейших характеристики, позволяющие изучать их в качестве вычислительных примитивов – чистота и детерминированность. [O’Sullivan, 2008]. Под чистотой понимается тот факт, что функция только выполняет вычисление и возвращает его результат в качестве своего значения, при этом никаких побочных эффектов не осуществляется. Детерминированность, в свою очередь, заставляет результат вычислений зависеть исключительно от входных значений. Эти два свойства функций в рамках функционального подхода обозначают, что функция использует в своей работе только ту память, которая выделена исключительно для нее, при этом она ничего не получает из сторонней памяти (детерминированность) и ничего никуда лишнего не записывает (чистота).

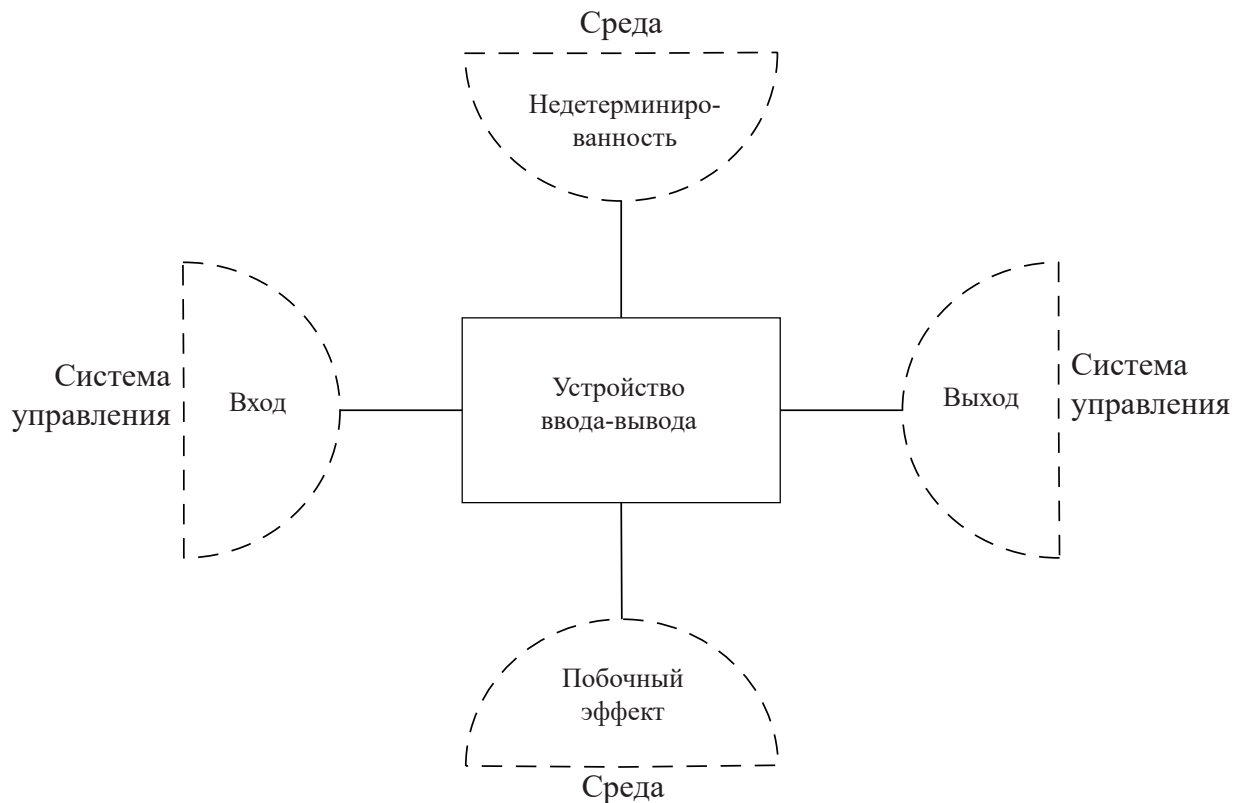


Источник: [Душкин, 2019a] / Source: [Dushkin, 2019a]

**Рис. 3.** Функция как «черный ящик» с входами и выходами  
Figure 3. Function as a “black box” with inputs and outputs

Именно это позволяет осуществлять функциональные вычисления посредством реализации взаимосвязанных цепочек исполнения функций (в том числе в конкурентном режиме). Функции заканчивают свои вычисления и передают полученные результаты далее в рамках таких вычислительных цепочек. Важной особенностью является то, что эти вычислительные цепочки могут быть реализованы в параллельном режиме: если множество функций не зависит друг от друга, то все функции множества могут быть безопасно и эффективно вычислены параллельно друг другу, поскольку детерминированностью и чистотой гарантируется, что ни одна из функций не повлияет на память, относящуюся к другой функции [Душкин, 2019b]. И в свою очередь, все это исключает многочисленные проблемные вопросы, которые неизбежно возникают при применении параллельных или конкурентных вычислений, запущенных в традиционной модели вычислений [Blelloch, 2004].

Однако рассмотрение технологических процессов и их автоматизации показывает важнейшее значение разнообразных устройств ввода-вывода – датчиков и исполнительных устройств [Душкин, 2018]. Эти устройства применяются для взаимодействия киберфизической системы со своим окружением, а это в свою очередь предполагает, что в таких устройствах нарушаются требования чистоты и детерминированности. Недетерминированность всегда проявляется при осуществлении ввода данных из окружения системы, при этом исполнительные устройства, осуществляющие вывод информации в окружение, нарушают принцип чистоты. Другими словами, применение устройств ввода-вывода для информационного обмена киберфизической системы со своим окружением при реализации технологического процесса не отвечает базовым требованиям функционального подхода. Описанная ситуация при использовании датчиков и исполнительных механизмов в качестве устройств ввода-вывода, осуществляющих информационный обмен с окружением киберфизической системы схематично показана на рисунке 4.



Источник: [Душкин, 2019а] / Source: [Dushkin, 2019a]

**Рис. 4.** Взаимодействие устройства ввода-вывода в рамках системы управления со средой  
Figure 4. Interaction of the input-output device within the control system with the environment

Под комплексотехникой авторы понимают научно-практическое направление при изучении вопросов объединения киберфизических систем с противоположными целями в единый комплекс функционирования [Мохов, 2015]. При этом для устойчивого функционирования подобного объединения важным является согласование режимов обмена функциональностью (функциональным ресурсом) каждой из киберфизических систем в сформированном комплексе. Функциональный ресурс, участвующий в обмене между киберфизическими системами при их взаимодействии, является для дальнейшего функционирования принимающей системы необходимым, а для функционирования передающей системы – ненужным или даже вредным.

Взгляд на описанную выше проблему со стороны комплексотехники позволяет частично компенсировать недостатки функционального подхода, обнаруживающиеся при использовании его исключительно в рамках системотехники и системного рассмотрения вопросов управления сложными техническими системами с высокой степенью интеллектуальности [Мохов, 2005]. По мнению авторов, это позволит выйти на новые рубежи в области создания «умных» систем управления технологическими и управленческими процессами в различных отраслях хозяйственной деятельности человека.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

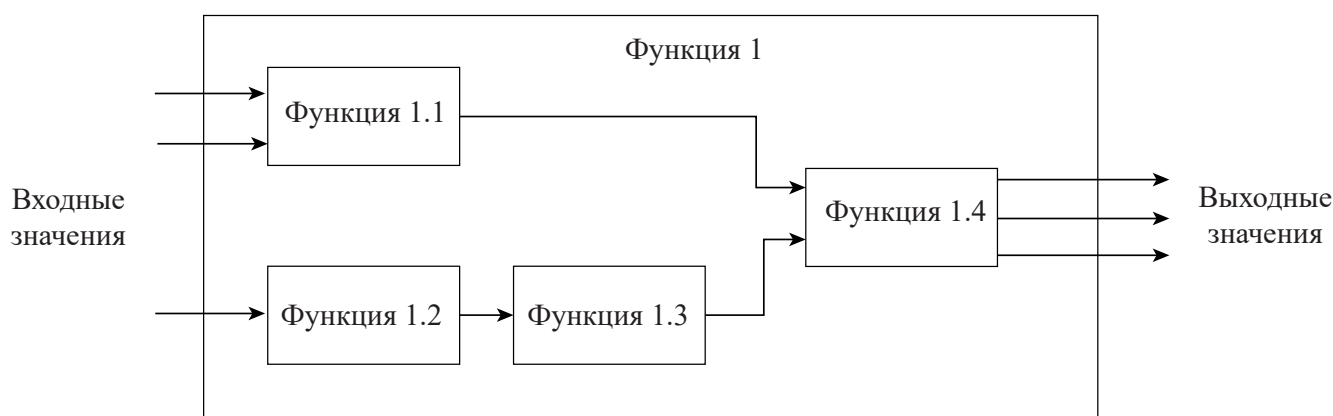
Фактически теория управления определяет сущность функционального подхода как изучение цели и потребностей киберфизической системы сквозь призму набора функциональности, которую требуется реализовать для движения к цели и ее достижения и (или) удовлетворения перечисленных потребностей. При перечислении указанного набора функций в рамках целостной функциональности киберфизической системы реализуется один (или более) субъект выполнения специфицированных функций. В результате этой процедуры выбирается конкретный функциональный субъект, работа которого требует минимального объема совокупных затрат как в рамках отдельных исполнительных актов, так и в течение полного жизненного цикла киберфизической системы, если рассматривать это на единицу получаемого полезного эффекта.

Рассмотрение исключительно технических систем искусственной природы и произвольной сложности позволяет сделать функциональный подход более простым и редуцировать его до процедур анализа существующей и синтеза обновленной функциональной структуры заданной киберфизической системы. Эти процедуры требуют рассмотрения комплексного набора функциональности киберфизической системы с последующим формированием соответствующей этому набору функциональной структуры. Далее процедура реинжиниринга функциональности киберфизической системы в совокупности со всеми ее укрупненными подсистемами и отдельными элементами (в случае необходимости) представляет собой проектирование функциональной структуры системы в рамках следующей последовательности действий [Мухин, Малинин, 2003]:

- составление древовидной структуры полной функциональности системы;
- разбиение древовидной структуры функциональности системы до уровня атомарных функций;
- разработка для изучаемой системы модели функциональной структуры;
- разработка для системы дополнительных морфологических моделей;
- осуществление многокритериальной оценки и выбор на основе ее результатов оптимального варианта функциональной структуры системы.

Реализация представленных этапов процесса анализа и синтеза создает для изучаемой киберфизической системы ее функциональное описание. На верхнем уровне абстракции такое описание выглядит как набор функциональности киберфизической системы, при этом функции из этого набора даже могут быть не связаны друг с другом. Но на первом уровне декомпозиции функциональности постепенно начинают выявляться связи между отдельными функциями и их группами, а сами функции при этом начинают соотноситься с подсистемами и элементами системы. В конечном итоге вся анализируемая и (или) проектируемая киберфизическая система получает определенный функциональный смысл [Marca, McGowan, 1987]. Вместе с тем на каждом уровне декомпозиции любая функция из набора функциональности реализует отдельный аспект или нюанс предназначения киберфизической системы в надсистеме и представляет собой некоторое состояние или действие, осуществление которого система реализует с учетом заданных ограничений и условий своего окружения.

По итогам описанной декомпозиции проявляется конкретизированная функциональная иерархия, общая абстрактная структура которой поясняется посредством инфографической схемы, представленной на рисунке 5.



Источник: [Душкин, 2019a] / Source: [Dushkin, 2019a]

**Рис. 5.** Один уровень декомпозиции «Функции 1»  
 Figure 5. One level of decomposition of "Function 1"

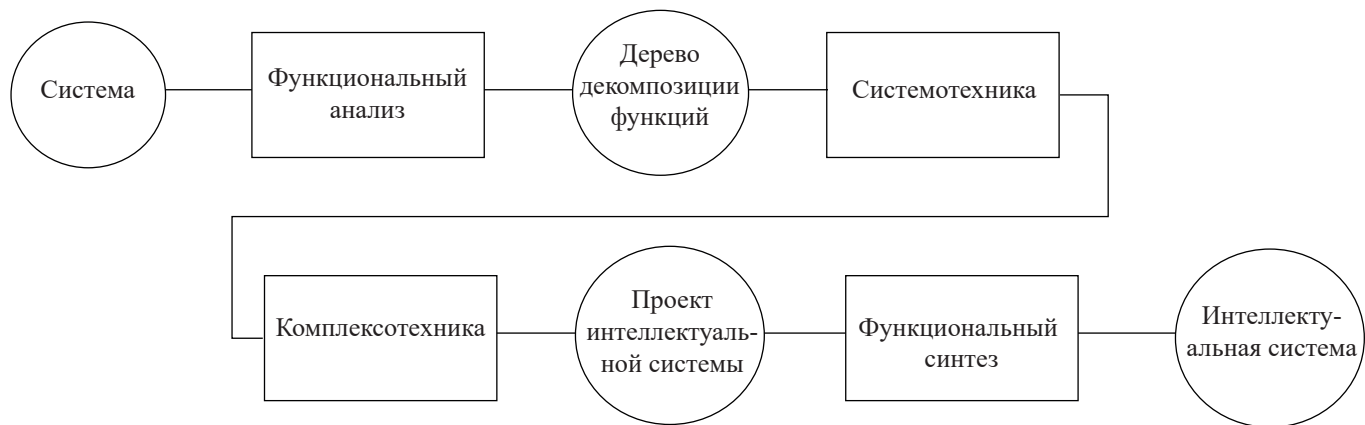
Эта схема иллюстрирует, что между функциями в рамках функционального подхода существует два класса отношений [Field, 1988]:

- включение. Пример на представленной схеме показывает, что функция определяется через запуск вызовов четырех других функций, лежащих на более низком слое декомпозиции;
- передача результата. Если рассматривать низший слой декомпозиции на представленной схеме, то на нем функция 1.1 осуществляет передачу результатов своего вычислительного процесса в функцию 1.4, которая получает их в своем первом параметре.

В итоге при проектировании киберфизических систем функциональный подход базируется на тезисе о том, что фокус внимания должен быть направлен на предназначение системы, ее цели, задачи и выполняемые для их решения функции. При этом объекты (подсистемы и (или) элементы системы) или их абстракции должны приниматься во внимание только в качестве вспомогательного аспекта системы – субстрата выполнения функций [Field, 1988]. Это, в свою очередь, позволяет предположить, что при использовании функционального подхода любая проектируемая для дальнейшей эксплуатации киберфизическая система должна реализовывать конкретный набор полезных функций и специфическое множество действий.

Например, при осуществлении автоматизации некоторой деятельности необходимо брать во внимание предназначение и цели автоматизируемой деятельности. Кроме того, во внимание необходимо принимать предназначение автоматизированной системы, ее функциональные зависимости от смежных и внешних систем, взаимосвязь со своей надсистемой и окружением, в котором она эксплуатируется. Кроме того, все это предполагает оптимальное распределение функциональности между средствами автоматизации и человеком, поскольку сущность автоматизации заключается в перекладывании выполнения сложных, рутинных или опасных для человека операций на комплекс средств автоматизации.

Таким образом, задача интеллектуализации киберфизических (в том числе сложных технических и социотехнических) систем последовательно базируется на применении отдельных методов функционального анализа, системотехники, комплексотехники и функционального синтеза. На инфографической схеме, представленной на рисунке 6, проиллюстрирована процедура решения задачи интеллектуализации киберфизической системы.



Источник: [Душкин, 2019a] / Source: [Dushkin, 2019a]

**Рис. 6.** Процесс решения задачи интеллектуализации заданной системы  
Figure 6. The process of solving the problem of intellectualization of a given system

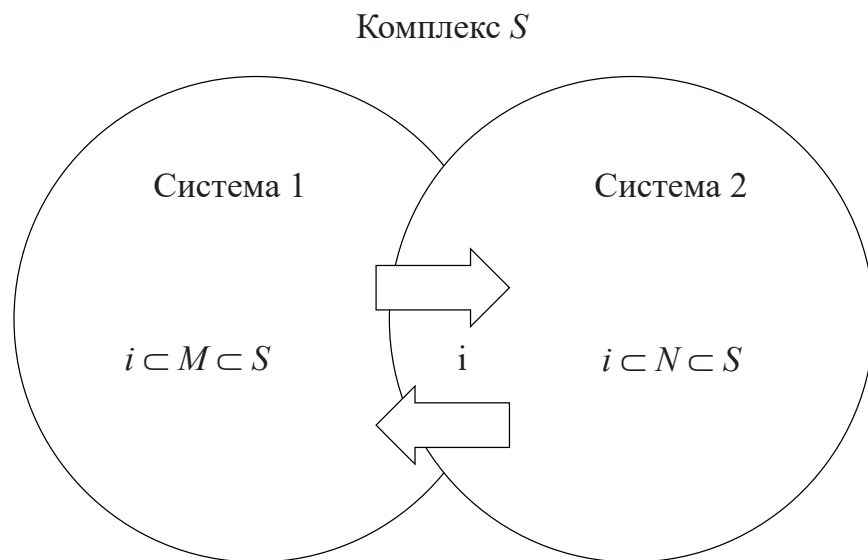
## РЕЗУЛЬТАТЫ

Процесс взаимодействия двух киберфизических систем внутри определенного технического комплекса  $S$  может быть описан при помощи множества взаимных информационных влияний двух рассматриваемых систем. При этом необходимо отметить, что все имеющиеся информационные влияния  $i$  входят в набор реализуемой функциональности или одной киберфизической системы, или же обеих систем одновременно, однако, для всего комплекса  $S$  такая функциональность представляется объединенной [Мохов, 1997]. Описанная ситуация поясняется посредством инфографической схемы, представленной на рисунке 7.

Важно отметить, что на рисунке 7 показано взаимодействие систем в комплексе при их частичном пересечении. Это дает возможность говорить об их сильном взаимодействии, по сравнению со случаем, если бы системы не пересекались. В последнем случае при отсутствии пересечения предполагается, что Система 1 находится по отношению к Системе 2 на значительном «расстоянии», позволяющем не учитывать размеры, и другие конструктивно-структурные особенности этой системы. И в этом случае Система 1



и Система 2 представляют собой точки, о функциональной структуре которых можно только догадываться. В комплексотехнике такое взаимодействие определяется как «дистанция незаинтересованного наблюдения», и этот вариант взаимодействия далее не рассматривается с точки зрения интеллектуализации.

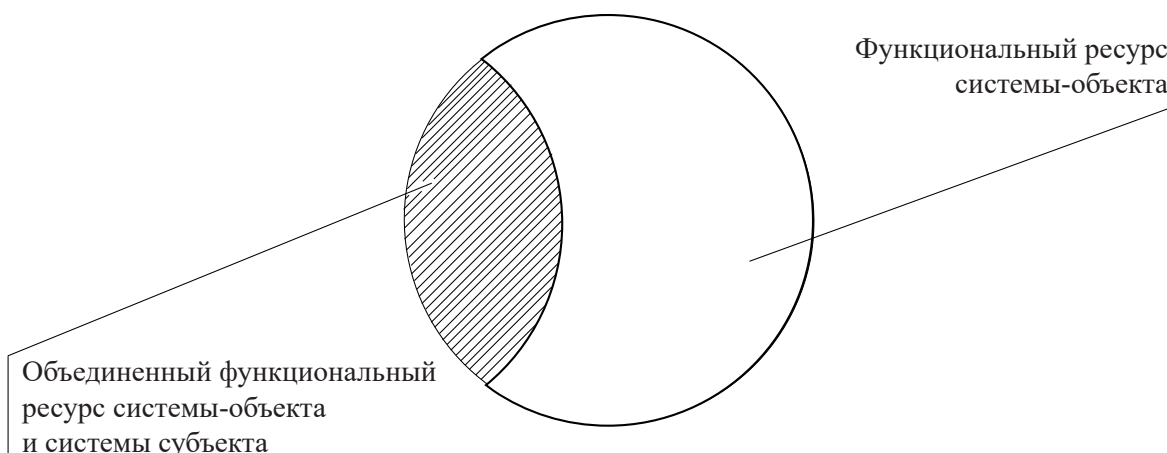


Составлено авторами по материалам исследования / *Compiled by the authors on the materials of the study*

**Рис. 7.** Взаимодействие систем в комплексе  
 Figure 7. Interaction between systems in the complex

Для простоты дальнейших рассуждений примем, что Система 1 – это система управления или «система-субъект», а Система 2 – объект управления или «система-объект». В этом случае взаимодействие между ними в рамках комплекса проявляется как управленческие воздействия и обратная связь [Нариньяни, 2004]. На рисунке 7 показана «рафинированная» инфографическая схема для более наглядной демонстрации этого тезиса. На практике фактически и система-субъект, и система-объект обычно пересекаются своими множествами функциональности  $M$  и  $N$ . И в этом случае область пересечения является объединенным функциональным ресурсом обеих систем или рассматриваемой в новом аспекте комплексной Системы 2. Эта ситуация показана на рисунке 8.

### Комплексная система 2



Составлено авторами по материалам исследования / *Compiled by the authors on the materials of the study*

**Рис. 8.** Объединенный функциональный ресурс системы-субъекта и системы-объекта  
 Figure 8. Combined functional resource of the subject system and the object system

Часть функций от Системы 1 (на рисунке 8 показана штриховкой) – «функциональный след», «документированный» отпечаток Системы 1 на Системе 2. Определение того, сколько и каких функций «перешло» от Системы 1 к Системе 2 – задача на сегодня еще не решенная. Пока возможна только качественная оценка, которую можно попытаться провести в нескольких вариантах.

1. В Системе 2 в результате взаимодействия возникли функции, которые ей не свойственны, но соответствующие (принадлежавшие) Системе 1.

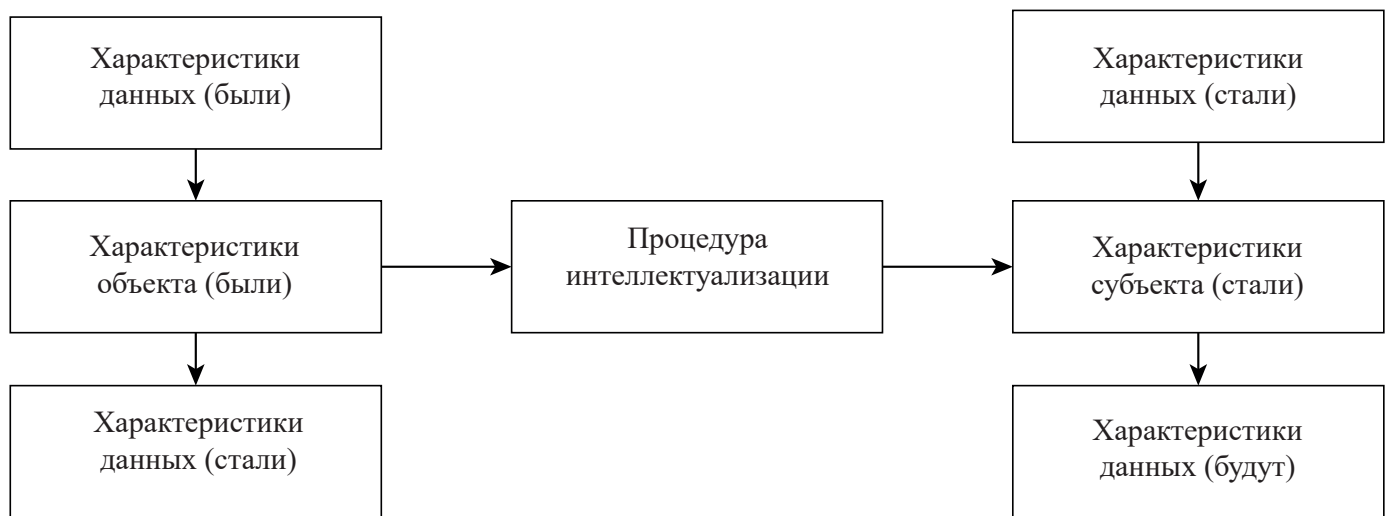
2. Во взаимодействии систем важным является не то, субъектом или объектом являются системы, а рост функционального ресурса системы-получателя, оцениваемого как «интеллект», определяющийся в этом случае по отношению к присоединяемой системе содержанием в свойствах системы функциональных возможностей для удовлетворения потребностей присоединяемой системы в освоении таких возможностей для использования в собственных целях.

3. Интеллект может сохраняться в системе в двух видах: виде деятельности (данные) и следах деятельности (тексты документов).

4. Передатчиком (субъектом) считается Система 1, от которой был передан требуемый функциональный ресурс, а приемником (объектом) – Система 2, принявшая функциональный ресурс.

При этом здесь для простоты рассуждений рассматривается Система 2, но на самом деле, при взаимодействии двух систем в комплексе функции переносятся и на Систему 1, то есть след взаимодействия имеет место и в системе-субъекте.

Одной из задач комплексотехники, таким образом, становится интеллектуализация объекта управления в связанный интеллектуализированный комплекс управления. Инфографическая модель этого процесса может быть описана так, как показано на рисунке 9.



Составлено авторами по материалам исследования / *Compiled by the authors on the materials of the study*

**Рис. 9.** Инфографическая модель процесса интеллектуализации с точки зрения комплексотехники  
Figure 9. Infographic model of the intellectualization process from the point of view of complex engineering

Здесь под характеристиками данных имеется в виду набор метаинформации об используемых для контроля и управления объектов данных, на основе которых осуществляются управленческие воздействия. Перед применением процедуры интеллектуализации управление осуществляется от имеющегося архива данных и текущих характеристик объекта управления к текущим значениям характеристик данных. Представленная схема является реактивным управлением, даже несмотря на то, что оно использует данные для своей реализации.

В рамках системы-субъекта, подвергшейся интеллектуализации, управление также реализуется на основе данных. Но при этом можно применять проактивный режим управления с реализацией предиктивной модели объекта управления для прогноза развития ситуации и дальнейшего повышения уровня адекватности модели посредством сопоставления полученного факта с ранее выдвинутым прогнозом. Предиктивная

модель объекта управления предлагает рассматривать значения свойств данных на будущих сегментах траектории развития системы, на которых она окажется после применения управленческого воздействия.

Приведенные на рисунке 9 графические компоненты могут быть сгруппированы в несколько пересекающихся друг с другом групп, каждая из которых соответствует имеющимся парадигмам или подходам к рассмотрению технических или киберфизических систем. В частности, предлагается следующее деление.

1. Технические технологии традиционного характера используют реактивную схему воздействия на объекты управления.

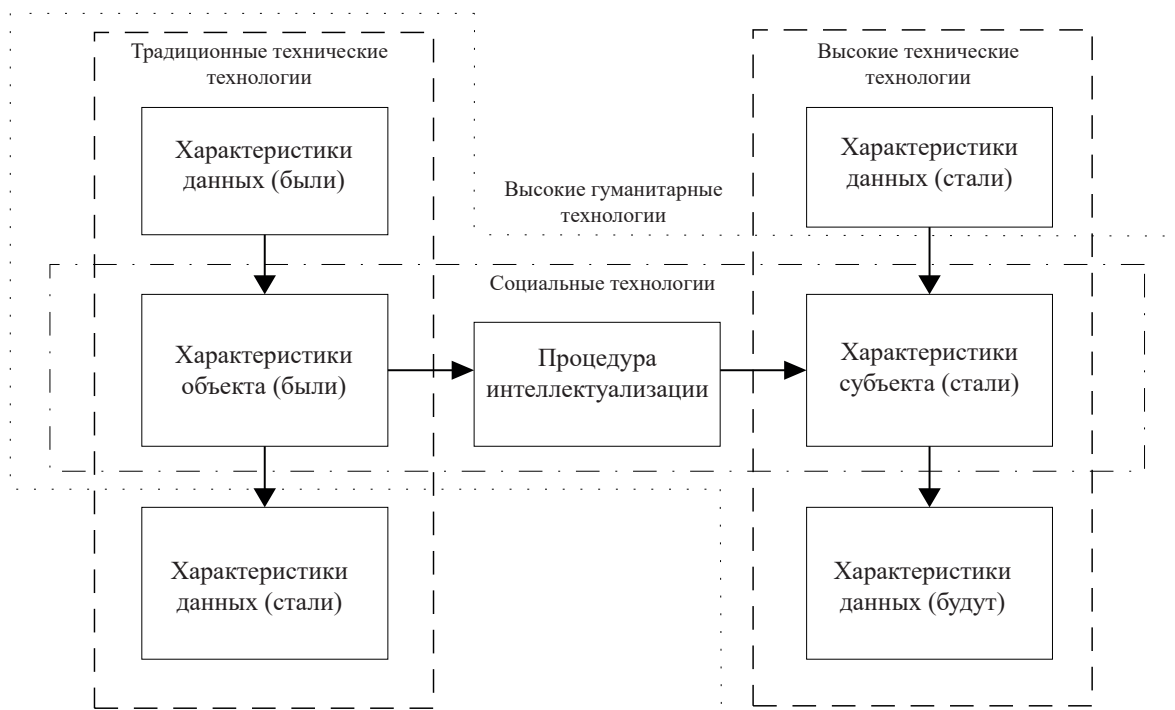
2. В свою очередь, новые технические технологии применяют проактивную схему воздействия на объекты управления.

3. Социальные технологии, в свою очередь, в качестве своего предмета изучения предполагают интеллектуализацию как некоторого рода процедуру, так как в ее рамках требуется принимать во внимание существование как человека, так и социума как носителей интеллектуальных функций.

4. Высокие гуманитарные технологии включают в себя и социальные технологии, то есть саму процедуру интеллектуализации киберфизической системы, а также применяют процесс моделирования в рамках проактивной схемы управления, так как система-субъект, подвергшаяся интеллектуализации, обязана брать во внимание потребности и интересы человека, потребляющего услуги и сервисы этой системы. Высокие гуманитарные технологии отличаются от социальных технологий отсутствием нормирования не только организационных технологий в их составе, но и технологий технических, включающих материальный продукт на «входе» и «выходе». Перевод из высоких гуманитарных технологий в социальные технологии осуществляется введением нормирования и использования в образовательной деятельности.

Это предлагаемое деление показано на рисунке 10.

### Комплексотехника



Составлено авторами по материалам исследования / Compiled by the authors on the materials of the study

**Рис. 10.** Инфографическая модель процесса интеллектуализации с выделением базовых дисциплин  
 Figure 10. Infographic model of the process of intellectualization with the allocation of basic disciplines

Все это показывает, что при рассмотрении сложных киберфизических систем наиболее действенным и интересным видится именно междисциплинарный подход, который комплексотехника включает в себя «по умолчанию». Далее к анализу и изучению таких киберфизических систем подключается последующее применение функционального и системного подходов к их интеллектуализации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в настоящей работе результаты позволяют сказать о том, что применение функционального подхода для повышения уровня интеллектуальности систем управления и автоматизации технологических процессов в рамках технологического транзита к так называемой Индустрии 4.0 позволит добиться интересных эффектов, в числе которых можно упомянуть:

- увеличение уровня устойчивости объектов управления и их внутренней среды;
- увеличение степени эффективности реактивной, активной и проактивной схем управления технологическими процессами;
- уменьшение необходимого времени на обнаружение внештатных и аварийных ситуаций, а также их исправление и возврат объектов и систем управления в режим штатного функционирования;
- уменьшение уровня требуемых расходов как на функционирование самой системы управления, так и на эксплуатацию всего управляемого комплекса объектов управления в целом.

Более того, с точки зрения эксплуатации комплексных киберфизических систем при проведении процесса их интеллектуализации в рамках описанного функционального, системного и комплексотехнического подходов перечисленные ниже показатели эффективности также могут быть достигнуты:

- снижение уровня воздействия и даже исключение тренда на «старение рабочей силы» при помощи всестороннего применения интернета вещей и использования в совокупности с ним при управлении функционального подхода. Это значит, что интеллектуализированные киберфизические системы вполне возможно будет использовать для реализации опыта, навыков и экспертизы уходящих работников;
- постепенное повышение уровня интеграции внутренней среды объектов управления в связанный интернет вещей, основанное на использовании этапности перехода и точечных изменениях при реализации функционального подхода;
- увеличение времени безотказной работы комплексов киберфизических систем с повышением их производительности, что вполне можно измерить по результатам внедрения, на основе использования функционального подхода при реализации управления на базе совместимости с уже имеющимися так называемыми унаследованными решениями;
- получение беспрецедентного уровня мониторинга и контроля технологических операций на базе функционального подхода и внедрения технологий интернета вещей, что дает возможность быстро изменять устаревшие или неэффективные процедуры и процессы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Душкин Р.В.* (2018). Особенности функционального подхода к управлению внутренней средой интеллектуальных зданий // Прикладная информатика. Т. 13. № 6 (78). С. 20–31.
- Душкин Р.В.* (2019а). Интеллектуализация управления техническими системами в рамках функционального подхода // Программные системы и вычислительные методы. № 2. С. 43–57. DOI: 10.7256/2454-0714.2019.2.29192.
- Душкин Р.В.* (2019б). Искусственный интеллект. М.: ДМК-Пресс. 280 с.
- Душкин Р.В.* (2019с). Развитие методов адаптивного обучения при помощи использования интеллектуальных агентов // Искусственный интеллект и принятие решений. № 1. С. 87–96.
- Мохов А.И.* (1997). Методы и модели обработки документов в строительных САПР: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.13.12. М., 1997. 31 с.
- Мохов А.И.* (2005). Инфографическое моделирование возведения и переустройства интеллектуальных многоэтажных зданий // Переустройство. Организационно-антропотехническая надежность строительства: монография / под ред. В.О. Чулкова. М.: СвР-АРГУС. С.105–128.
- Мохов А.И.* (2015). Моделирование исследований в естественных науках на основе комплексотехники // Вестник РА-ЕН. Т. 15. № 1. С. 25–30. Мухин В.И., Малинин В.С. (2003). Исследование систем управления: учебник для вузов. М.: Издательство «Экзамен». 384 с.
- Нариньяни А.С.* (2004). НЕ-факторы: краткое введение // Новости искусственного интеллекта. № 2. С. 52–63.
- Blelloch G.E., Maggs B.M.* (2004). Parallel algorithms. USA: School of Computer Science, Carnegie Mellon University. 64 p.
- Domingos P.* (2018). Our digital doubles: AI will serve our species, not control it // Scientific American. V. 319. No. 3. Pp. 88–93.
- Field A.J., Harrison P.G.* (1988). Functional programming. Addison-Wesley. 616 p.

- Luck B.D., Roberson G. (2017). Autonomous and unmanned vehicles // *Engineering and Technology for Sustainable World*. V. 24. No. 6. Pp. 10–11.
- Marca D., McGowan C. (1987). *Structured analysis and design technique*. McGraw-Hill. 7 p.
- O’Sullivan B., Stewart D., Goerzen J. (2008). *Real World Haskell*. USA, UK: O’Reilly Media. 710 p.
- Rajani S. (2011). Artificial Intelligence – man or machine // *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*. V. 4. No. 1. Pp. 173–176.
- Stefanuk V. (2000). Dynamic expert systems // *Kybernetes*. V. 29. No. 5-6. Pp. 702–709. DOI: 10.1108/03684920010333134.
- Stork E. (2007). *Logistik im Büro. 7 überarbeitete und erweiterte Auflage* [Логистика в офисе. 7-е пересмотренное и расширенное издание]. Beltz Verlag, Weinheim und Basel. 132 p. ISBN 978-3-407-36452-4.

## REFERENCES

- Blelloch G.E. and Maggs B.M. (2004), *Parallel algorithms*, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, USA.
- Domingos P. (2018), Our digital doubles: AI will serve our species, not control it, *Scientific American*, vol. 319, no. 3, pp. 88–93.
- Dushkin R.V. (2018), “Features of the functional approach to the management of the internal environment of intelligent buildings” [“Osobennosti funktsional’nogo podkhoda v upravlenii vnutrennei sredoi intellektual’nykh zdanii”], *Applied Informatics [Prikladnaya informatika]*, vol. 13, no. 6 (78), pp. 20–31. (In Russian).
- Dushkin R.V. (2019a), “Intellectualization of management of technical systems within the framework of the functional approach” [“Intellektualizatsiya upravleniya tekhnicheskimi sistemami v ramkakh funktsional’nogo podkhoda”], *Software Systems and Computational Methods [Programmnyye sistemy i vychislitel’nye metody]*, no. 2, pp. 43–57. DOI: 10.7256 / 2454-0714.2019.2.29192. (In Russian).
- Dushkin R.V. (2019b), *Artificial Intelligence [Iskusstvennyi intellekt]*. DMK-Press, Moscow, Russia. ISBN 978-5-97060-787-9. (In Russian).
- Dushkin R.V. (2019c), “Development of methods of adaptive learning through the use of intelligent agents” [“Razvitie metodov adaptivnogo obucheniya pri pomoshchi ispol’zovaniya intellektual’nykh agentov”], *Artificial Intelligence and decision making [Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii]*, no. 1, pp. 87–96. (In Russian).
- Field A.J. and Harrison P.G. (1988), *Functional programming*, Addison-Wesley. ISBN 9-780-20119249-0.
- Luck B.D. and Roberson G. (2017), “Autonomous and unmanned vehicles”, *Engineering and Technology for Sustainable World*, vol. 24, no. 6, pp. 10–11.
- Marca D. and McGowan C. (1987), *Structured analysis and design technique*, McGraw-Hill. ISBN 0-07-040235-3.
- Mokhov A.I. (1997), *Methods and models of document processing in construction CAD systems [Metody i modeli obrabotki dokumentov v stroitel’nykh SAPR]*: Aftoref. diss. ... d-ra. ekon. nauk, Moscow, Russia, 31 p.
- Mokhov A.I. (2005), “Infographic modeling of construction and reconstruction of intelligent multi-storey buildings” [“Infograficheskoe modelirovanie vozvedeniya i pereustroistva intellektual’nykh mnogoetazhnykh zdanii”], *Re-device. Organizational and anthropotechnical reliability of construction: monograph [Pereustroistvo. Organizatsionno-antropotekhnicheskaya nadezhnost’ stroitel’stva: monografiya]*, ed. V.O. Chulkov, SvR-ARGUS, Moscow, Russia, pp. 105–128. (In Russian).
- Mokhov A.I. (2015) “Modeling of research in natural sciences based on complex engineering” [“Modelirovanie issledovaniy v estestvennykh naukakh na osnove kompleksotekhniki”], *Bulletin of the Russian Academy of Sciences [Vestnik RAEN]*, no. 1, pp. 25–30.
- Mukhin V.I. and Malinin V.S. (2003), *Management systems research: textbook for universities [Issledovanie system upravleniya: uchebnyk dlya vuzov]*, Izdatel’stvo “Ekzamen”, Moscow, Russia. (In Russian).
- Narin`yani A.S. (2004), “Non-factors: a brief introduction” [“NE-factory: kratkoe vvedenie”], *Novosti iskusstvennogo intellekta*, no. 2, pp. 52–63. (In Russian).
- O’Sullivan B., Stewart D. and Goerzen J. (2008), *Real World Haskell*, O’Reilly Media, USA, UK.
- Rajani S. (2011), Artificial Intelligence – man or machine, *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*, vol. 4, no. 1, pp. 173–176.
- Stefanuk V. (2000), “Dynamic expert systems”, *Kybernetes*, vol. 29, no. 5-6, pp. 702–709. DOI: 10.1108/03684920010333134.
- Stork E. (2007), *Logistics in office. Revised and extended edition 7 [Logistik im Büro. 7. überarbeitete und erweiterte Auflage]*, Beltz Verlag, Weinheim und Basel, Deutschland, Schweiz. 132 p. ISBN 978-3-407-36452-4.