

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 004.9

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СТАТУСНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ¹

Статья поступила в редакцию 18.04.2021, в окончательной версии 25.04.2021.

Вешнева Ирина Владимировна, Саратовский национальный исследовательский университет им. Н.Г. Чернышевского, Российская Федерация, г. Саратов, 410012, ул. Астраханская, 83, доктор технических наук, профессор, ORCID 0000-0002-3908-370X, e-mail: veshnevaiv@gmail.ru
Большаков Александр Афанасьевич, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, доктор технических наук, профессор, ORCID 0000-0001-7966-718X, e-mail: aabolshakov57@gmail.ru

Для разработки комплексных математических моделей цифровых двойников социально-экономических систем предлагается применить математический аппарат так называемых статусных функций. Сформулирована соответствующая постановка задачи построения новых математических моделей для оценки состояния социально-экономических систем. Показано, что процесс интеграции цифровых двойников в классическую систему управления традиционно связан с реализацией функций наблюдения, анализа и управления. Описаны тенденции формирования цифровых двойников для использования в социально-экономических структурах. Предложена обобщенная схема математического моделирования на основе использования эффективных численных методов и комплекса проблемно-ориентированных программ для оценки коммуникаций в интегрированной среде кибер-физических систем на базе статусных функций. Рассмотрен пример реализации этапа предложенной концепции, связанного с построением комплекса проблемно-ориентированных программ.

Ключевые слова: математические модели, цифровые двойники, социально-экономические структуры, статусные функции, кибер-физические системы

CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS BASED ON STATUS FUNCTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS OF SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS

The article was received by the editorial board on 18.04.2021, in the final version – 25.04.2021.

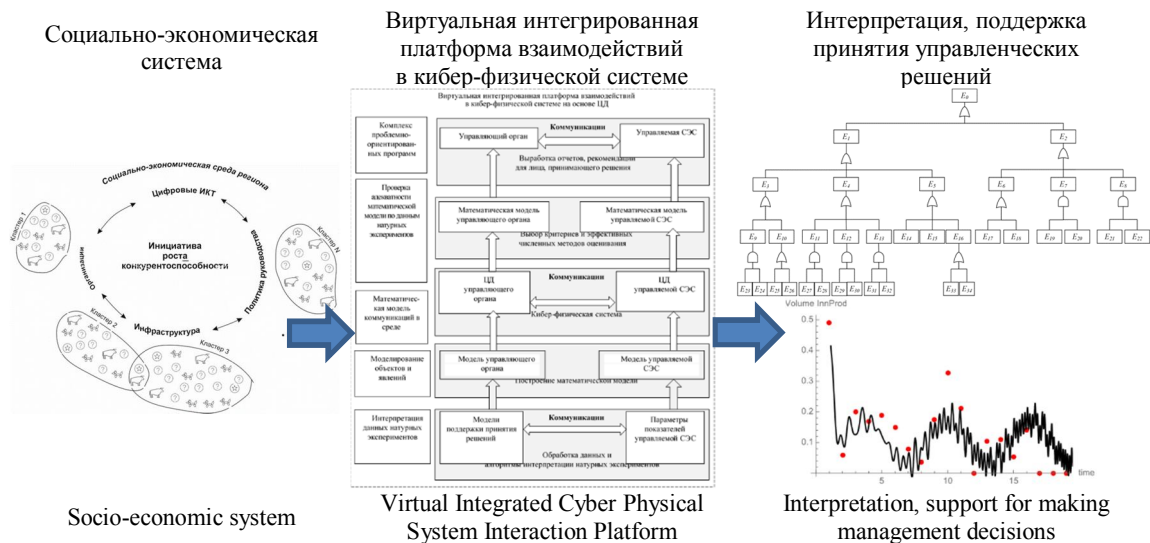
Veshneva Irina V., N.G. Chernyshevsky Saratov National Research University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov, 410012, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID 0000-0002-3908-370X, e-mail: veshnevaiv@gmail.ru
Bolshakov Alexander A., Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 29 Polytechnicheskaya St., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, ORCID 0000-0001-7966-718X, e-mail: aabolshakov57@gmail.ru

To develop complex mathematical models of digital twins of socio-economic systems, it is proposed to apply the mathematical apparatus of the so-called status functions. The corresponding formulation of the problem of constructing new mathematical models for assessing the state of socio-economic complexes has been formulated. It is shown that the process of integrating digital twins into a classical control system is traditionally associated with the implementation of monitoring, analysis and control functions. Trends in the formation of digital twins for use in socio-economic structures are described. A generalized scheme of mathematical modeling based on the use of effective numerical methods and a complex of problem-oriented programs for evaluating communications in an integrated environment of cyber-physical systems based on status functions is proposed. An example of the implementation of the stage of the proposed concept associated with the construction of a complex of problem-oriented programs is considered.

Keywords: mathematical models, digital twins, socio-economic structures, status functions, cyber-physical systems

¹ Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ 20-010-00465.

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Развитие Индустрии 4.0 [1] связано с промышленной революцией, характеризующейся следующими особенностями: не используются новые энергетические технологии, осуществляется массовое использование нового сырья, существенное возрастание энергоэффективности производства, возможность предсказывать будущее, значительное ускорение модернизации и появление экспоненциального увеличения производительности труда [2]. В промышленно развитых странах Европы и Северной Америки государства являются источниками факторов осуществляющихся изменений [3]. В России предложен национальный проект увеличения производительности труда [4, 5], в котором представлена цель обеспечения к 2024 году темпов повышения производительности труда в организациях, относящихся к базовым, несырьевым отраслям не менее 5 % в год (к 2024 году планируется увеличение более чем на 20 % производительности труда). Это позволит перейти Российской Федерации на уровень ведущих экономик мира [7]. Современная четвертая промышленная революция обладает чертами, близкими к предыдущим: модернизация производственной технологии зависит от совершенствования управленческой системы. При этом для более сложных технологий требуется повышать относительный объем автоматизированных систем управления [8]. Эксперты называют критическим уровнем использования цифровых технологий более 40 % предприятий, затем ожидается экспоненциальный рост цифровизации промышленности [9]. Такая цифровизация требует массового внедрения кибер-физических систем, способных самонастраиваться и адаптироваться под новые потребности производителей и потребителей.

Структура этих изменений включает следующие отличительные признаки: интернет вещей (Internet of Things, сокращенно – IoT); цифровые двойники (Digital Twin); 3D-печать [10]; облачные вычисления и большие данные [11]; кибербезопасность; цифровые платформы (digital platforms).

Четвертая промышленная революция началась, ее отличительные признаки проявляются достаточно четко и развернуто. При этом можно с уверенностью утверждать, что, как и в предыдущих революциях, тот, кто раньше других сможет создавать, развивать и использовать технологии отличительных признаков получит преимущество по сравнению с другими предприятиями и странами, причем разрыв будет нарастать экспоненциально.

По экспертным оценкам преимущества получают организации, которые активно работают с инновациями и имеют собственные компетенции в аспекте цифровизации [12].

Одним из возможных препятствий является отсутствие инновационных технологий и моделей [13]. Основу принципиально новой технологии построения и использования математических моделей и систем автоматизированного управления могут составить математические модели с использованием математического аппарата статусных функций.

Причем, в этой связи проблемой является необходимость разработки возможных математических моделей цифровых двойников социально-экономических структур, отличающихся от известных моделей специфическими признаками.

Представим модель формирования цифровых двойников социально-экономических структур на основе статусных функций, разработанных и предложенных в работах [14].

Постановка задачи создания новых математических моделей для оценки состояния социально-экономических систем. Процесс интеграции цифровых двойников (ЦД) в классическую систему управления активно развивается в каждой из следующих функций.

1. *Функция наблюдения.* Наблюдается смена технологического уклада. Индустрия 4.0 имеет дело с совершенно новыми явлениями, которые носят цифровой характер. Цифровой двойник (Digital Twin) в нашем случае является программным аналогом социально-экономической системы (СЭС).

2. *Функция контроля. Синтез и совершенствование ЦД.*

Краткая характеристика в предметной области цифровизации СЭС приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация подходов цифровизации СЭС

Способ цифровизации	Характеристика способа цифровизации
Роботизация – Robot Process Automation (RBA)	Осуществление роботизации операционной деятельности, что позволяет уменьшить продолжительность этих операций и повысить до 80 % результативность и/или эффективность на основе уменьшения фонда заработной платы, а также снижения рисков операционной деятельности
Big Data и соответствующие методы анализа и интерпретации	Повышение результативности деятельности фирмы на основе увеличения скорости и объемов обрабатываемой информации. Использование предиктивной аналитики для построения процедур прогнозирования при обработке больших объемов данных. При этом используются статистические методы обработки многомерных данных, анализ исторических данных, процедуры планирования ожидаемых результатов
Справочные и информационно-поисковые и справочные комплексы (системы)	Осуществление функций формирования требуемой информации, получение требуемых компетенций по систематизации и анализу данных
Чат-роботы	Программные средства, которые функционируют в приложениях. При этом могут имитировать речь и текст для организации взаимодействия по поиску требуемых данных
Искусственный интеллект (AI)	Используется для выполнения комплексных задач программами и оптимизации использования человеческих ресурсов
Виртуальная и дополненная реальность	Технологии проецирования или дополнения реальности техническими средствами для снижения стоимости реализуемых процессов
Интернет вещей (IoT)	Сеть компонентов, которые находятся во взаимодействии, например, совокупность датчиков для сбора данных, удаленного обмена информацией для повышения эффективности решений
Распознавание образов OCR/ICR	Технология способна заменить человека в процессе приема, анализа и проверки документов, предназначена для цифровизации документооборота, систем безопасности, обслуживания клиентов
Блокчейн	Технологии позволяют формировать различные тренировочные ситуации, в которых процесс обучения осуществляется в виде игры

Анализ, выполненный в таблице 1, доказывает, что разработка моделей ЦД социально-экономических структур находит применение анализа больших данных и проведения предиктивной аналитики для формирования прогнозов на основе новых математических моделей. При этом коммуникация между социально-экономическими структурами может быть осуществлена с использованием ЦД. Тогда коммуникация в системе управляющий орган – управляемый социально-экономический объект может быть сведена к модели мета-коммуникаций: управляющий орган – ЦД – управляемый социально-экономический объект, управляемый социально-экономический объект – ЦД – управляющий орган. Новая модель анализа данных позволит сформировать виртуальную интегрированную среду для анализа больших данных и предиктивной аналитики. В новом интегрированном комплексе при реализации управленческих воздействий с использованием больших данных на основе ЦД с применением проблемно-ориентированных программных средств соответствующую технологическую и техническую платформу создают кибер-физические системы. Для синтеза этой организационно-технической платформы определяющее значение имеет технология построения ЦД.

3. *Функции анализа, управления.* Эти функции требуется предусмотреть в архитектуре функционирующей интегрированной платформы кибер-физической системы. При реализации этих функций возникают существенные трудности: ограничение ресурсов, возможное отсутствие обратной связи в подсистеме: управляющий орган – управляемая социально-экономическая система.

Кибер-физическая система включает совокупность взаимодействующих компонентов для достижения в процессе управления единой цели [15]. Математические модели подобных сложных

комплексов в целом соответствуют основным положениям синергетики [16] и создаются на основе методов, разработанных в физике, химии, биологии [17].

Трудность использования математических моделей и методов связана с отсутствием шкал измерения, которые используются в естественных науках (измерение в м/с скорости, в кг массы и т.п.). Для ее преодоления целесообразно использовать лингвистические переменные для описания, например, психофизиологических показателей в эргатических системах на базе теории нечетких множеств [18], а также интерпретации данных, получаемых в процессе натурных экспериментов, с применением так называемых статусных функций (СФ).

Алгоритм на основе СФ позволяет вводить лингвистические оценки и представлять их комплекснозначными функциями, называемых статусными. Математические модели на основе СФ лишены многих недостатков классических моделей социально-экономических процессов, таких как статичность и невозможность учесть перекрестность и взаимовлияние исследуемых компонент процессов.

Основными тенденциями синтеза ЦД социально-экономических систем (СЭС) являются следующие:

1. Увеличение числа состояний, которые оцениваются, а также компонентов структуры данных, которые подлежат анализу.
2. Повышение производительности и сложности информационных платформ, для реализации проблемно-ориентированных программных средств.
3. Усложнение требований к структуре и качеству оцениваемых значений параметров СЭС, многокомпонентности вложенных структур оценок, перекрестности и сложности процессов, которые реализуются в социально-экономических системах.
4. Активизация субъектов и процессов взаимодействия при организации управления для увеличения степени его автоматизации.

При этом возникает проблема создания математических моделей, позволяющих увеличивать количество контролируемых переменных и параметров для автоматизации используемого процесса поддержки принятия решения (ППР). Это инициирует использование современных технологий, техники и соответствующих математических методов [19–20]. Так при разработке новых способов управления образовательным процессом активно применяются различные модели, нечеткие, булевы и т.д.

Таким образом, разработка новых методов для оценивания состояния социально-экономических систем с учетом сложности, субъективности и многомерности является весьма актуальной проблемой. Предложенный математический метод целесообразно применять при построении интеллектуальной мониторинговой системы, а также ППР при анализе показателей функционирования СЭС, таких как, например, отдельные предприятия или структуры показателей деятельности регионов РФ для повышения результативности и эффективности управления по характеристикам СЭС и успешного решения задач, обусловленных целями функционирования системы управления отдельными предприятиями или регионами.

Концепция разработки и интеграции новых математических моделей. Концепция математического моделирования на основе результативных математических методов и построения модели, которая описывает эргатическое взаимодействие в виде соответствующих коммуникаций цифровых двойников на базе интегрированной платформы для различных кибер-физических систем, целесообразно отобразить как последовательность пяти этапов (рис. 1).



Рисунок 1 – Архитектура интегрированной платформы кибер-физических систем с использованием математического моделирования для применения результативных математических методов на основе статусных функций

1 этап. Интерпретация данных, получаемых в результате натуральных экспериментов. На этом этапе требуется анализ данных контролируемых переменных СЭС. Так, например, анализ показателей социально-экономической деятельности регионов РФ и моделей проведен в работах [22, 23].

2 этап. Математическое моделирование социально-экономических процессов и объектов. Лучшим базисом, который целесообразно использовать для синтеза математических моделей цифровых двойников являются СФ. Из их комбинации можно сформировать итоговые математические модели, которые предложены и представлены в статье [14]. Новая математическая модель позволяет построить интегрированную платформу для кибер-физических систем. На этой платформе целесообразно реализовать обучение для синтеза гибридных эргатических систем.

3 этап. Математическая модель коммуникаций в среде. Будем ориентироваться на метакommunikации в кибер-физической системе. Причем непосредственная коммуникация и взаимодействие управляющий орган – управляемый социально-экономический объект заменяются метакommunikацией цифровых двойников: управляющий орган – ЦД – управляемый социально-экономический объект, управляемый социально-экономический объект – ЦД – управляющий орган.

4 этап. Проверка адекватности предложенных математических моделей с использованием данных натуральных экспериментов. Целесообразно осуществить интерпретацию информации, полученной в результате экспериментов методом СФ, а также на базе уравнений Колмогорова-Чепмена [24, 25] на основе данных, полученных в системе FIRA PRO.

5 этап. Комплекс проблемно-ориентированных программ [26]. Ниже приводится описание архитектуры оценок параметров оценки деятельности СЭС на примере оценки конкурентоспособности регионов РФ.

Пример реализации концепции. Опишем 5-й этап построения комплекса проблемно-ориентированных программ. Во-первых, на основе сбора данных формируется лингвистическое описание результатов оценивания. Для оценки состояния переменных «Степень износа основных фондов», «Численность населения с доходами ниже прожиточного минимума», «Количество официальных безработных», «Ветхое и аварийное жилье», «Задолженность по налогам и сборам» используется таблица 2 с соответствующим лингвистическим описанием.

Таблица 2 – Лингвистическое описание переменных для данных из системы FIRA PRO

Интерпретация значений параметров на основе данных FIRA PRO			
Оценка тренда	Высокие значения показателя, растет последние 3 года, более чем на 10 % превышает аналогичный показатель по соседним регионам	Предельно допустимое пороговое значение, достигнуто в результате снижения показателя	Низкие значения показателя, растет последние 3 года, более чем на 10 % ниже аналогичного показателя по соседним регионам
	Высокие значения, изменения в течение 3 лет в пределах погрешности	Предельно допустимое пороговое значение, изменения в течение 3 лет в пределах погрешности	Низкие значения, изменения в течение 3 лет в пределах погрешности
	Высокие значения показателя, растет последние 3 года	Предельно допустимое пороговое значение, достигнуто в результате повышения показателя	Высокие значения показателя, снижается последние 3 года

В результате формируются соответствующие комплекснозначные статусные функции (СФ). Во-вторых, осуществляется формирование иерархических взаимосвязанных структур. В результате получен причинно-следственный граф (рис. 2).

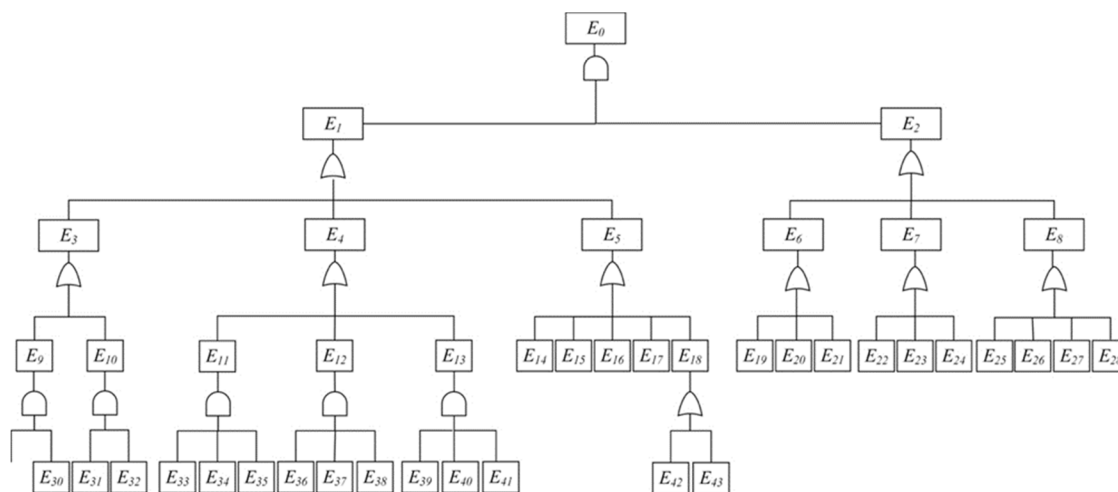


Рисунок 2 – Причинно-следственный граф оценки рисков региональной конкурентоспособности

В представленной на рисунке 2 структуре следующие показатели: стоимость основных фондов (E29); степень износа основных фондов (E30); плотность железнодорожных путей (E31); плотность автомобильных дорог (E32); среднедушевые денежные доходы (E33); численность населения с доходами ниже прожиточного минимума (E34); количество официальных безработных (E35); ожидаемая продолжительность жизни (E36); коэффициент естественного прироста населения (E37); коэффициент миграционного прироста (E38); ветхое и аварийное жилье (E39); численность врачей на 10000 населения (E40); число зарегистрированных преступлений (E41); выбросы загрязняющих продуктов (E42); сброс в водные объекты загрязненных сточных вод (E43) получены в результате сбора и анализа данных [27, 28]. Остальные показатели, объединяющие листовые вершины в причинно-следственный граф введены в результате логических операций, представленных в [14].

В-третьих, для структуры групп более высоких показателей формируется система дифференциальных операторов. В результате аналогом описываемой структуры становится система дифференциальных уравнений на основе СФ. Система получается аналогично уравнениям мировой динамики Форрестера.

Заключение. Таким образом, на основе оценок, представленных методом СФ, можно построить динамические модели ЦД для использования в кибер-физических системах. Структуры, которые можно построить на основе статусных функций, достаточно просто сформировать из моделей оценивания показателей на основе лингвистических термов. Статусные функции являются «мостом» между простыми представлениями человека об окружающем мире и явлениях к строгой неопределенности квантовой механики. Преимуществом модели является учет сложности, высокой степени неопределенности и перекрестности социально-экономических процессов. Модели позволяют строить уровневые структуры возможных состояний. Главным преимуществом является предикативность модели и ее пригодность как для прогнозов, так и для описания мета-взаимодействий интегрированной среде кибер-физических систем.

Библиографический список

1. Клейменова Л. Индустрия 4.0 в 20 цифрах и фактах / Л. Клейменова. – Режим доступа: <https://www.rbc.ru/trends/industry/5daef6429a7947c1bfe43006>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 01.03.2021).
2. Государство как платформа // Центр стратегических разработок. – Москва, 2018.
3. Государство как платформа: люди и технологии // РАНХиГС. – Москва, 2019.
4. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 20. – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 01.03.2021).
5. Национальный проект «Производительность труда и поддержка занятости». – Режим доступа: https://www.economy.gov.ru/material/directions/nacionalnyy_proekt_proizvoditelnost_truda_i_podderzhka_zanyatosti/, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 02.03.2021).
6. Иванов О. Б. Национальный проект по производительности труда: ключ «Экономического рывка» для России / О. Б. Иванов, Е. М. Бухвальд // ЭТАП. – 2019. – № 2. – С. 28–44.
7. Национальные проекты: ключевые цели и ожидаемые результаты // Правительство России. – Режим доступа: <http://government.ru/projects/selection/741/35675/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 14.03.2021).
8. Четвертая промышленная революция. – Режим доступа: <https://www.tadviser.ru/images/a/aa/6.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 04.03.2021).
9. Сидоров А. В. Роботизация бизнес-процессов как инструмент повышения производительности труда сотрудников компании / А. В. Сидоров // Хроноэкономика. – 2019. – № 4 (17). – С. 64–68.
10. Аддитивные технологии в действии. – Режим доступа: <https://rostec.ru/news/additivnye-tehnologii-v-deystvii/>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 04.03.2021).
11. Максимов К. В. Эффективность использования облачных вычислений: методы и модели оценки / К. В. Максимов // Техническая литература. Прикладная информатика. – 2016.
12. MacKinsey and Company. Эффективная Россия: производительность как фундамент роста. – Режим доступа: <https://www.gtmarket.ru/news/state/2009/04/1986>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 04.03.2021).
13. Романов Е. В. Стратегические ориентиры развития экономики России / Е. В. Романов, Н. В. Кузнецова, О. С. Пономарева, О. Л. Назарова, Ю. В. Литовская, Т. В. Майорова. – Магнитогорск, 2019.
14. Veshneva I. V. The status functions method for processing and interpretation of the measurement data of interactions in the educational environment / I. V. Veshneva, T. B. Chistyakova, A. A. Bolshakov // SPIIRAS Proceedings. – 2016. – Vol. 6, iss. 49. – P. 144–166. – DOI 10.15622/sp.49.8. ISSN 20789181.
15. Yakovenko V. Statistical mechanics of money, wealth, and income / V. Yakovenko, J. B. Rosser, Jr. Colloquium // Reviews Modern Physics. – 2009. – Vol. 81. – 1703 p.
16. Хакен Г. Принципы работы головного мозга: синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности / Г. Хакен. – Москва : ПЕР СЭ, 2001. – 351 с.
17. Social consensus through the influence of committed minorities / J. Xie, S. Sreenivasan, G. Korniss, W. Zhang, C. Lim, B. K. Szymanski // Phys. Rev. E. – 2011. – Режим доступа: http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/1102/1102.3931v2.pdf, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 04.03.2021).
18. Вешнева И. В. Применение математического аппарата теории нечетких множеств к задачам управления вузом на основе сбалансированной системы показателей / И. В. Вешнева, А. А. Большаков, Л. А. Мельников, Л. Г. Перова // Системы управления и информационные технологии. – 2011. – Т. 1.1, № 43. – С. 117–121.
19. Bender C. M. Extension of PT – Symmetric Quantum Mechanics to Quantum Field Theory with Cubic Interaction / C. M. Bender, D. C. Brody, H. F. Jones // Phys. Rev. D. – 2004. – Vol. 70. – 025001 p. ; Erratum // Phys. Rev. D. – 2005. – Vol. 71. – 049901 p.
20. Castellano C. Statistical physics of social dynamics / C. Castellano, S. Fortunato, V. Loreto // Reviews of modern physics. – 2009. – № 81 (2). – P. 591–659. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/0710.3256.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 14.03.2021).
21. Sokolovski D. Are the 'weak measurements' really measurements? / D. Sokolovski // Quanta. – 2013. – Vol. 2. – P. 50–57. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1305.4809.pdf>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 02.03.2021).
22. Bolshakov A. Mathematical model of integration of cyber-physical systems for solving problems of increasing the competitiveness of the regions of the Russian Federation / A. Bolshakov, I. Veshneva, D. Lushin // Studies in Systems, Decision and Control. Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Springer Nature Switzerland AG 2021. Decision and Control 333. – 2021. – Vol. 333. – P. 129–139. – Режим доступа: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63563-3_11, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. ISSN 2198-4182.
23. Veshneva I. Regional competitiveness research based on digital models using Kolmogorov-Chapman equations / I. Veshneva, G. Chernyshova, A. Bolshakov // Studies in Systems, Decision and Control. Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Springer Nature Switzerland AG 2021. Decision and Control 333. – 2021. – Vol. 333. – P. 141–154. – Режим доступа: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63563-3_12, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. ISSN 2198-4182.

24. Осипков А. А. Разработка информационной системы для машинного синтеза и решения системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена / А. А. Осипков, В. А. Кушников // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах : сборник научных статей по материалам XI Международной научно-практической конференции. – 2015. – С. 6–8.

25. Каменский Е. Г. «Киберфизическое» общество: субъектность. Ценности. Коммуникация / Е. Г. Каменский // Известия Юго-Западного государственного университета. Сер. Экономика. Социология. Менеджмент. – 2016. – № 4 (21). – С. 224–233.

26. Вешнева И. В. Проектирование интеллектуальной информационной системы для анализа и прогнозирования динамики рисков конкурентоспособности регионов РФ / И. В. Вешнева, Г. Ю. Чернышова, А. А. Большаков // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2021. – № 56 (82). – С. 81–88.

27. EU Regional Competitiveness Index (RCI). – Режим доступа: https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/work/201701_regional_competitiveness2016.pdf, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 12.03.2021).

28. Regional Innovation Scoreboard (RIS). Режим доступа: https://ec.europa.eu/growth/industry/innovation/facts-figures/regional_en, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения: 04.03.2021).

References

1. Kleymenova L. *Industriya 4.0 v 20 tsifrakh i faktakh* [Industry 4.0 in 20 figures and facts]. Available at: <https://www.rbc.ru/trends/industry/5daef6429a7947c1bfe43006> (accessed 01.03.2021)

2. Gosudarstvo kak platforma [State as a platform]. *Tsentr strategicheskikh razrabotok* [Center for Strategic Research]. Moscow, 2018.

3. Gosudarstvo kak platforma: lyudi i tekhnologii [The state as a platform: people and technologies]. *RANHiGS* [RANEPa]. Moscow, 2019.

4. *Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 07.05.2018 g. № 20* [Decree of the President of the Russian Federation of 07.05.2018 No. 20]. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027> (accessed 01.03.2021).

5. *Natsionalnyy proyekt «Proizvoditelnost truda i podderzhka zanyatosti»* [National project "Labor productivity and employment support"]. Available at: https://www.economy.gov.ru/material/directions/nacionalnyy_proekt_proizvoditelnost_truda_i_podderzhka_zanyatosti/ (accessed 02.03.2021).

6. Ivanov O. B., Bukhvald E. M. *Natsionalnyy proekt po proizvoditelnosti truda: klyuch «Ekonomiceskogo ryvka» dlya Rossii* [National Project on Labor Productivity: Key to the "Economic Breakthrough" for Russia]. *ETAP* [ETAP], 2019, no. 2, pp. 28–44.

7. *Natsionalnyye proekty: klyuchevyye tseli i ozhidayemye rezultaty* [National Projects: Key Objectives and Expected Results]. Available at: <http://government.ru/projects/selection/741/35675/> (accessed 14.03.2021).

8. *Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya* [The fourth industrial revolution]. Available at: <https://www.tadviser.ru/images/a/aa/6.pdf> (accessed 04.03.2021).

9. Sidorov A. V. Robotizatsiya biznes-processov kak instrument povysheniya proizvoditel'nosti truda sotrudnikov kompanii [Robotization of business processes as a tool for increasing the productivity of company employees]. *Hronoekonomika* [Chronoeconomics], 2019, no. 4 (17), pp. 64–68.

10. *Additivnyye tekhnologii v deystvii* [Additive technologies in action]. Available at: <https://rostec.ru/news/additivnye-tekhnologii-v-deystvii/> (accessed 04.03.2021).

11. Maksimov K. V. *Effektivnost ispolzovaniya oblachnykh vychisleniy: metody i modeli otsenki* [Cloud Computing Efficiency: Methods and Models for Evaluation]. *Tekhnicheskaya literatura. Prikladnaya informatika* [Technical literature. Applied Informatics], 2016.

12. *MacKinsey and Company. Effektivnaya Rossiya: proizvoditelnost kak fundament rosta* [MacKinsey and Company. Effective Russia: Productivity as a Foundation for Growth]. Available at: <https://www.gtmarket.ru/news/state/2009/04/1986> (accessed 04.03.2021).

13. Romanov E. V., Kuznetsova N. V., Ponomareva O. S., Nazarova O. L., Litovskaya Yu. V., Mayorova T. V. *Strategicheskie orientiry razvitiya ekonomiki Rossii* [Strategic guidelines for the development of the Russian economy]. Magnitogorsk, 2019.

14. Veshneva I. V., Chistyakova T. B., Bolshakov A. A. The status functions method for processing and interpretation of the measurement data of interactions in the educational environment. *SPIIRAS Proceedings*, 2016, vol. 6, iss. 49, pp. 144–166. DOI 10.15622/sp.49.8. ISSN 20789181.

15. Yakovenko V., Rosser J. B., Colloquium Jr. Statistical mechanics of money, wealth, and income. *Reviews Modern Physics*, 2009, vol. 81, 1703 p.

16. Haken G. *Printsipy raboty golovnogo mozga: sinergeticheskiy podkhod k aktivnosti mozga, povedeniyu i kognitivnoy deyatel'nosti* [How the Brain Works: A Synergistic Approach to Brain Activity, Behavior, and Cognitive Performance]. Moscow, PER SE, 2001. 351 p.

17. *Social consensus through the influence of committed minorities*. Available at: http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/1102/1102.3931v2.pdf (accessed 04.03.2021).

18. Veshneva I. V., Bolshakov A. A., Melnikov L. A., Perova L. G. *Primenenie matematicheskogo apparata teorii nechetkikh mnozhestv k zadacham upravleniya vuzom na osnove sbalansirovannoy sistemy pokazateley* [Application of the mathematical apparatus of the theory of fuzzy sets to the problems of university management based on a balanced scorecard]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control systems and information technologies], 2011, vol. 1.1, no. 43, pp. 117–121.

19. Bender C. M., Brody D. C., Jones H. F. Extension of PT – Symmetric Quantum Mechanics to Quantum Field Theory with Cubic Interaction. *Phys. Rev. D.*, 2004, vol. 70, p. 025001. *Erratum Phys. Rev. D.*, 2005, vol. 71, p. 049901.
20. Castellano C., Fortunato S., Loreto V. Statistical physics of social dynamics. *Reviews of modern physics*, 2009, no. 81 (2), pp. 591–659. Available at: <https://arxiv.org/pdf/0710.3256.pdf>. (accessed 14.03.2021).
21. Sokolovski D. Are the 'weak measurements' really measurements? *Quanta*, 2013, vol. 2, pp. 50–57. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1305.4809.pdf> (accessed 02.03.2021).
22. Bolshakov A. A., Veshneva I. V., Lushin D. Mathematical Model of Integration of Cyber-Physical Systems for Solving Problems of Increasing the Competitiveness of the Regions. *Studies in Systems, Decision and Control. Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Springer Nature Switzerland AG 2021, Decision and Control 333*, 2021, vol. 333, pp. 129–139. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63563-3_11. ISSN 2198-4182.
23. Veshneva I. V., Chernyshova G., Bolshakov A. A. Regional Competitiveness Research Based on Digital Models Using Kolmogorov-Chapman Equations. *Studies in Systems, Decision and Control. Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Springer Nature Switzerland AG*, 2021, vol. 333, pp. 141–154. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63563-3_12. ISSN 2198-4182.
24. Osipkov A. A., Kushnikov V. A. Razrabotka informacionnoj sistemy dlya mashinnogo sinteza i resheniya sistemy differencial'nyh uravnenij Kolmogorova-Chepmena [Development of an information system for machine synthesis and solution of the Kolmogorov-Chapman system of differential equations]. *Problemy upravleniya v social'no-ekonomicheskikh i tekhnicheskikh sistemah : sbornik nauchnykh statey po materialam XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. [Problems of management in socio-economic and technical systems : collection of scientific articles based on the materials of the XI International Scientific and Practical Conference], 2015, pp. 6–8.
25. Kamensky E. G. «Kiberfizicheskoe» obshchestvo: subektnost. Cennosti. Kommunikaciya ["Cyber-physical" society: subjectivity. Values. Communication]. *Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Ekonomika. Sociologiya. Menedzhment* [Bulletin of the South-West State University. Ser. Economics. Sociology. Management], 2016, no. 4 (21), pp. 224–233.
26. Veshneva I. V., Chernyshova G., Bolshakov A. A. Proektirovanie intellektualnoy informatsionnoy sistemy dlya analiza i prognozirovaniya dinamiki riskov konkurentosposobnosti regionov RF [Designing an intelligent information system for analyzing and predicting the dynamics of risks to the competitiveness of the regions of the Russian Federation]. *Izvestiya SPbGTI(TU)* [Izvestia SPbGTI(TU)], 2021, no. 56 (82), pp. 81–88.
27. *EU Regional Competitiveness Index (RCI)*. Available at: https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/work/201701_regional_competitiveness2016.pdf (accessed 12.03.2021).
28. *Regional Innovation Scoreboard (RIS)*. Available at: https://ec.europa.eu/growth/industry/innovation/facts-figures/regional_en (accessed 04.03.2021).