

Методика поиска многокритериальных решений на основе цифровых двойников

Александр Дмитриевич Столяров¹, Владимир Владимирович Гордеев²,
Виктор Иванович Абрамов³✉

^{1, 3} Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

² Общество с ограниченной ответственностью «АЭРОЛАБС», Москва, Россия

¹ mr.alexst@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7259-9348>

² v.gordeev@aerolabs.aero, <https://orcid.org/0000-0001-8514-4705>

³ via@ipit.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-9471-9408>

Аннотация

Цель. Обосновать и предложить методику поиска многокритериальных Парето-оптимальных решений на основе использования социально-экономических моделей или цифровых двойников сложных динамических систем.

Задачи. Обосновать актуальность использования предиктивных методов для принятия управленческих решений в условиях быстрых изменений и необходимость использования для этих целей рекомендательных систем с использованием социально-экономических моделей или цифровых двойников; предложить методику поиска многокритериальных Парето-оптимальных решений и произвести оценку ее точности на математических и социально-экономических моделях; сформулировать рекомендации и ограничения по использованию данной методики.

Методология. При проведении исследования использованы общенаучные методы (анализ, синтез, группировка), математические методы поиска Парето-оптимальных решений и генерации ЛПГ-последовательностей, результаты математического моделирования и численных экспериментов.

Результаты. Предложена методика поиска многокритериальных Парето-оптимальных управленческих решений, сформулированы предложения и ограничения по ее применению.

Выводы. В условиях быстрых изменений важно уметь принимать управленческие решения, учитывающие влияние многих факторов и, соответственно, многих критериев, характеризующих социально-экономическую систему. Вместе с тем необходимо принимать эти управленческие решения в соответствии с логикой «из будущего». Предложена методика поиска многокритериальных Парето-оптимальных решений на основе использования социально-экономических моделей или цифровых двойников. Исследована точность данного метода на математических моделях разной степени нелинейности с различным количеством параметров при решении производственных многопараметрических задач.

Ключевые слова: цифровые двойники, рекомендательные системы, генерация предложений, Парето-оптимальные решения, ЛПГ-последовательности

Для цитирования: Столяров А. Д., Гордеев В. В., Абрамов В. И. Методика поиска многокритериальных решений на основе цифровых двойников // *Экономика и управление*. 2023. Т. 29. № 7. С. 851–858. <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2023-7-851-858>

Methodology for searching multi-criteria solutions based on digital twins

Alexander D. Stolyarov¹, Vladimir V. Gordeev², Victor I. Abramov³✉

^{1, 3} National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

² Aerolabs LLC, Moscow, Russia

¹ mr.alexst@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7259-9348>

² v.gordeev@aerolabs.aero, <https://orcid.org/0000-0001-8514-4705>

³ via@ipit.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-9471-9408>

Abstract

Aim. To justify and propose a methodology for searching multi-criteria Pareto-optimal solutions based on the use of socio-economic models or digital twins of complex dynamical systems.

Tasks. To substantiate the relevance of using predictive methods for making managerial decisions in conditions of rapid changes and the need to use for these purposes recommendation systems using socio-economic models or digital twins. To propose a methodology for searching multi-criteria Pareto-optimal solutions and to evaluate its accuracy on mathematical and socio-economic models. To formulate recommendations and limitations on the use of this methodology.

Methods. General scientific methods (analysis, synthesis, grouping), mathematical methods of searching for Pareto-optimal solutions and generation of LP ϕ sequences, results of mathematical modelling and numerical experiments were used in the research.

Results. The methodology of searching for multicriteria Pareto-optimal managerial decisions is proposed, proposals and limitations on its application are formulated.

Conclusions. In conditions of rapid changes it is important to be able to make managerial decisions that take into account the influence of many factors and, accordingly, many criteria characterising the socio-economic system, and at the same time it is necessary to make these managerial decisions in accordance with the logic “from the future”. The method of searching for multi-criteria Pareto-optimal solutions based on the use of socio-economic models or digital twins is proposed. The accuracy of this method is investigated on mathematical models of different degrees of nonlinearity with different number of parameters when solving production multi-parametric problems.

Keywords: digital twins, recommendation systems, proposal generation, Pareto-optimal solutions, LP τ -sequences

For citation: Stolyarov A.D., Gordeev V.V., Abramov V.I. Methodology for searching multi-criteria solutions based on digital twins. *Ekonomika i upravlenie = Economics and Management*. 2023;29(7):851-858. (In Russ.). <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2023-7-851-858>

Новая реальность нашего мира — четвертая промышленная революция и начало становления нового технологического уклада. В современной экономической среде, которая характеризуется как *BANI*-мир (акроним от английских слов: хрупкий, тревожный, нелинейный и непонятный), для многих компаний методы управления, обеспечивавшие им успех в прошлом, больше не работают. Задача цифровой трансформации экономики и стимулирования национального экономического развития стоит как никогда остро и вызывает необходимость разработки иного подхода к управлению, использующего инновационные цифровые технологии с новыми возможностями для роста эффективности бизнеса. Цифровая трансформация уже реализуется во всех регионах России [1].

На рынке, где конкуренция обостряется, а жизненные циклы продуктов сокращаются, инновации становятся необходимым условием для повышения устойчивости и роста компаний. Исследования показывают, что внедрение инноваций повышает эффективность работы в нестабильной среде [2]. Субъективная природа инновационного потенциала и его характеристики, связанные с индивидуальной парадигмой, важны для понимания успешного новаторского развития современных организаций [3]. В статье [4] исследован генезис понятия инновационного потенциала, выявлена и детерминирована его личностная природа. В *BANI*-мире только обладание навыком инноваций в ответ на вызовы и проблемы позволит компаниям сохранить свою гиб-

кость, устойчивость и динамику развития, чтобы изменения не представляли для них угрозы, а несли возможности для обеспечения роста [5].

В этих условиях возрастает роль предиктивной аналитики [6] и использования цифровых двойников для сложных социально-экономических систем, даже таких, как система «Умный город» [7]. От качества управленческих решений в организации зависит ее результативность и эффективность. В практической деятельности управленческие процессы, как правило, многоаспектны и требуют своей оценки по множеству показателей. Такие проблемы относятся к категории многокритериальных задач управления. Методология их решения предполагает создание экономико-математической модели и формальных методов получения решения [8].

Экономико-математическая модель — это математическое описание экономического процесса или объекта с целью его изучения и управления, которое должно отвечать следующим общим требованиям: 1) строиться на базе положений экономической теории и отображать объективные закономерности процессов; 2) правильно отображать функцию и структуру данной реальной экономической системы; 3) удовлетворять определенным математическим условиям, таким как разрешимость и согласованность размерностей [9].

Цифровой двойник представляет собой цифровую (виртуальную) модель объектов, систем, процессов или отдельного человека, в точности отражает формат и функциональность оригинала, синхронизируется с ним и тем самым позволяет с помощью математических методов и информационных технологий оптимизировать деятельность компаний [10]. Сегодня использование цифровых двойников находит все более широкое применение. Одной из наиболее важных сфер являются технологические процессы на промышленных предприятиях. В производственных системах должны выполняться заранее запланированные функции и обеспечиваться непрерывная реакция на возникающие отклонения, неполадки и ошибки. Цифровой двойник способен объединить физическую систему с ее виртуальным аналогом для интеллектуального управления в реальном времени.

Путем восприятия данных динамической среды и высокоточной модели в реальном

времени цифровые системы способны своевременно осуществлять интеллектуальное управление, составлять стратегию в сложном контексте, которая соответствует сегодняшним сложным производственным требованиям. Роль цифрового двойника заключается в содействии принятию оптимальных решений на этапах планирования, контроля и анализа управления и для компании в целом, и для конкретных ее направлений деятельности (функциональных блоков, программ/проектов, материальных и людских ресурсов и т. д.). Таким образом, в контексте преобразований и факторов неопределенности цифровой двойник — в первую очередь не просто технология, а технология, способная обеспечить преимущество перед конкурентами по срокам и качеству принимаемых управленческих решений.

С помощью цифрового двойника открывается множество приемлемых решений, однако качество каждого из них должно быть оценено по ряду критериев. Выбор наилучшего варианта с учетом этого требует компромисса по различным критериям оценки. Формально задача многокритериальной оптимизации заключается в следующем: пусть D — произвольное множество допустимых решений (альтернатив), $f_1, \dots, f_m$ — числовые функции (критерии), заданные на множестве D , а $f(x) = f_1(x), \dots, f_m(x)$ — векторный критерий. Задача

$$f(x) \rightarrow \min, x \in D \quad (1)$$

называется задачей многокритериальной оптимизации. Идеальным для решения задачи (1) является поиск такого решения, которое принадлежит пересечению множеств оптимальных решений всех задач, то есть

$$\bigcap_{i=1}^m \text{Argmin}(f_i(x)).$$

Обычно это множество пусто, так как несколько функций, вообще говоря, не достигают экстремума в одной и той же точке. Одновременное достижение минимума по всем критериям на одном решении, как правило, невозможно. Выход состоит в поиске некоторого компромисса в достижении локальных целей.

Пусть Z_j — множество значений функций $Z_j = f_j(x_1, \dots, x_n)$, $j = [1, m]$, то есть множество всех оценок по j -му критерию. Тогда множество Z , состоящее из всевозможных упорядоченных наборов оценок по критериям f_j , $j = [1, m]$, называется множеством критериальных векторов. Любой элемент $z \in Z$

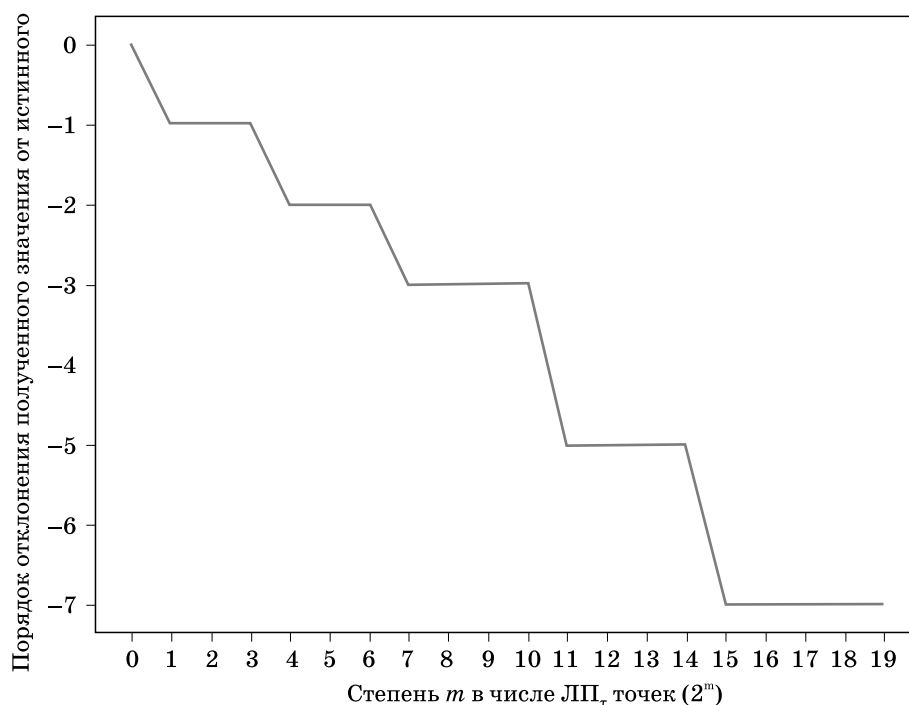


Рис. 1. График зависимости точности определения минимума функции от количества точек (степени 2)
Fig. 1. Dependence of the accuracy of determining the minimum of the function on the number of points (degree 2)

Источник: составлено авторами.

представляет собой вектор $z = (z_1, \dots, z_m)$, где $z_j \in Z_j$.

Эффективным методом поиска многокритериальных управленческих решений является поиск Парето-оптимальных решений на основе ЛП_т-последовательностей [11], который в данной работе был протестирован на математических моделях различной степени нелинейности. Генератор ЛП_т-последовательностей использовался из пакета анализа данных *SciPy* для *Python*. Первоначально была исследована точность нахождения экстремальных значений многомерных функций вида $z = \sum (x_i - a_i)^n$ ($i \in [2, m]$), в зависимости от количества точек.

На рисунке 1 представлен график, характеризующий зависимость точности метода от количества точек ЛП_т-последовательностей. Численные эксперименты показали, что хорошая точность достигается уже при $n = 512$ и $n = 1\,024$, но при более высокой размерности m необходимо, чтобы выполнялось следующее условие: $n \in [2\,048, 16\,384]$.

В более общем виде модель протестирована для большого числа измерений N : 5, 10, 15, 20, 30 и 40. Для расчетов взята функция вида $Z = \sum_{i=1}^I (x_i - a_i)^n$, где параметры $a_i \in [0, 1]$ генерировались случайным образом. Минимум этой функции равен нулю и на-

ходится в точке, в которой все переменные принимают значение, равное параметрам. Для определения сходимости модели и зависимости точности от количества переменных и сгенерированных ЛП_т-точек для каждого набора измерений (5, 10, 15, 20, 30 и 40) были сгенерированы наборы точек 2^m , где $m \in [0, 19]$.

Каждая из сгенерированных точек подставлялась в функцию соответствующего измерения, и записывались координаты той точки, в которой функция принимала минимальное значение. После этого определялись погрешности метода как для установления минимального значения функции Z , так и для значений переменных x_i . Уменьшение погрешности определения Z с увеличением количества точек для разных измерений для квадратичной функции представлены на рисунке 2.

Так как теоретический минимум Z равен нулю, то отклонением являлось значение функции. Для наглядности на графике, представленном на рисунке 3, по оси ординат отложены не абсолютные значения Z , а их десятичные логарифмы (порядок точности).

Для расчета значения отклонения по оси ординат для каждой мерности функции и для каждого набора точек взята усреднен-

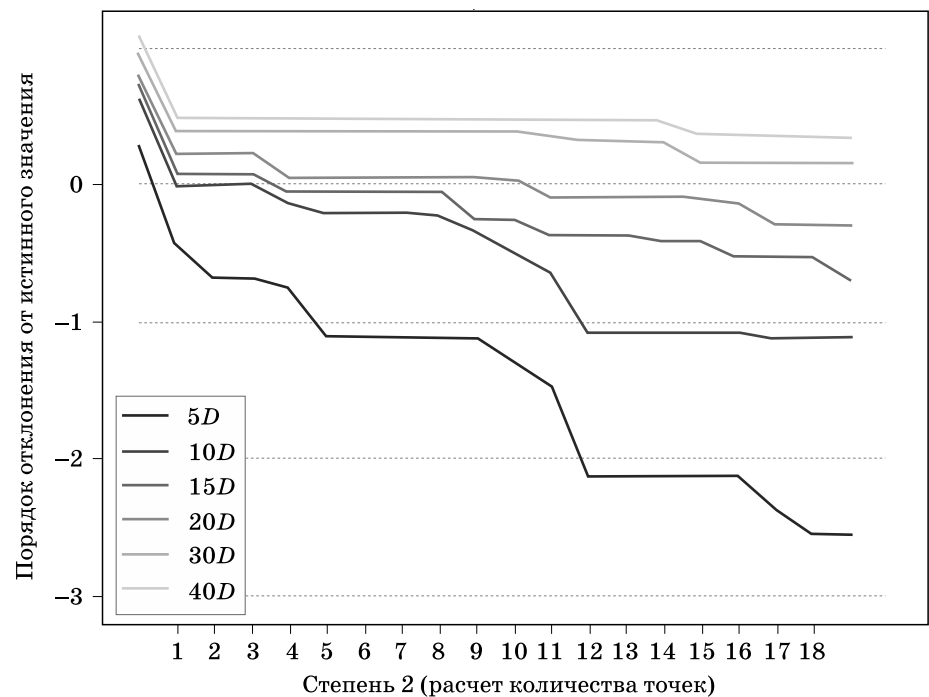


Рис. 2. График зависимости точности определения минимума функции от количества точек (степени 2)
Fig. 2. Dependence of the accuracy of determining the minimum of the function on the number of points (degree 2)
Источник: составлено авторами.

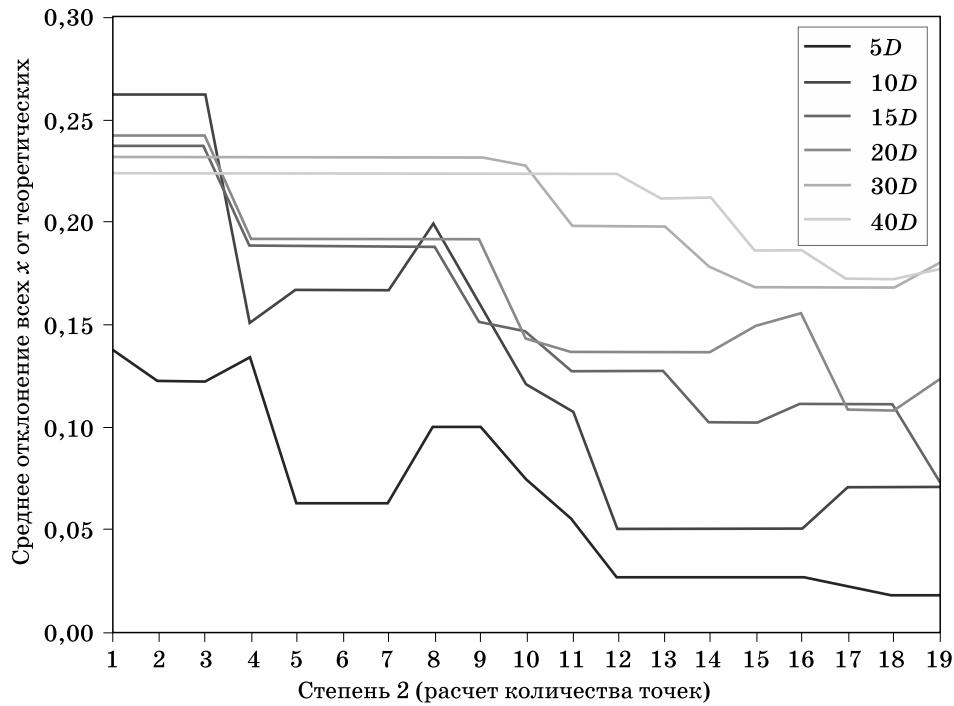


Рис. 3. График зависимости среднего отклонения всех X от количества точек
Fig. 3. The dependence of the average deviation of all X on the number of points
Источник: составлено авторами.

ная разница между координатами точки $x_{\min}$ и значениями соответствующих параметров a_i : $\sum_{i=1}^n |x_i - a_i|/n$.

Точность метода проанализирована при решении производственных задач, в кото-

рых функция дохода предприятия определялась как $F = \sum W_i x_i$, где W_i — цена за тонну произведенной i -й продукции, а x_i — месячный объем произведенной i -й продукции ($i \in [2, m]$). Расходы опре-

Погрешности расчетов для разного количества ЛП_т-точекTable 1. Calculation errors for different number of LP_t points

Число точек	Погрешности			
	Выбора точки, %	Издержек, %	Дохода, %	Прибыли, %
256	5,07	5,89	2,48	0,09
512	2,34	3,38	1,44	0,05
1 024	2,34	3,38	1,44	0,05
2 048	1,56	2,28	1,48	0,03
4 096	2,00	2,42	0,74	0,02
8 192	0,52	0,70	0,41	0,00
16 384	0,52	0,70	0,41	0,00
32 768	0,17	0,20	0,13	0,00
65 536	0,17	0,20	0,13	0,00
131 072	0,17	0,20	0,13	0,00
262 144	0,00	0,00	0,00	0,00
524 288	0,00	0,00	0,00	0,00

делялись по формуле $C_i(x_i) = C_{0i} + a_i x_i + b_i x_i^{\alpha_i}$, где C_{0i} — постоянные расходы, не зависящие от объема выпуска (аренда административных помещений, оплата труда административно-управленческого персонала, амортизационные отчисления и др.); $a_i x_i$ — линейные издержки (материальные затраты, оплата труда производственного персонала — рабочих, обслуживание оборудования, задействованного в выпуске продукции); $b_i x_i^{\alpha_i}$ — нелинейные издержки (нелинейными обычно являются всевозможные прочие расходы, которые описываются степенной функцией $b_i x_i^{\alpha_i}$, где показатель степени $\alpha_i > 1$).

Ключевыми показателями, полученными в результате применения данного подхода, являются погрешности определения целевых характеристик модели. При расчете погрешностей за истинные значения принимались показатели, полученные при количестве ЛП_т-точек, равном 524 288. Итоговые результаты расчетов одного из характерных численных экспериментов приведены в таблице 1. Видно, что можно выделить три группы по точности вычислений: 256–1 024 — приблизительный расчет, диапазон 2 048–16 384 — относительно хорошая точность, и при большем количестве ЛП_т-точек достигается высокая точность.

Следует при этом отметить, что для динамических систем важно не только полу-

чить набор Парето-оптимальных решений, но и понимать, насколько полученные решения чувствительны к изменению тех или иных факторов. Нелинейность динамических социально-экономических систем и процессов [12] требует специальных методов исследования, и данная методика позволяет их анализировать.

В заключение следует отметить, что в условиях турбулентности экономической среды важно уметь принимать управленческие решения с учетом влияния многих факторов и, соответственно, многих критериев, характеризующих социально-экономическую систему. Следует обратить внимание на то, что в условиях изменений принимаемые решения, основанные на прошлом опыте, оказываются недостаточно эффективными, и важно принимать управленческие решения по принципу «из будущего», то есть с учетом прогностических данных с помощью цифровых двойников.

Для нахождения многокритериальных Парето-оптимальных решений предложена методика с использованием социально-экономических моделей или цифровых двойников. Точность метода определялась с помощью математических моделей с различной степенью нелинейности и различным количеством параметров, а также при решении многопараметрических задач в производстве.

Список источников

1. Абрамов В. И., Андреев В. Д. Анализ стратегий цифровой трансформации регионов России в контексте достижения национальных целей // Вопросы государственного и муниципального управления. 2023. № 1. С. 89–119. DOI: 10.17323/1999-5431-2023-0-1-89-119
2. Covin J. G., Selvin D. P. Strategic management of small firms in hostile and benign environments // *Strategic Management Journal*. 1989. Vol. 10. No. 1. P. 75–87. DOI: 10.1002/smj.4250100107
3. Абрамов В. И. Методология оценки инновационного потенциала: дис. ... д-ра экон. наук. СПб., 2012. 302 с.
4. Абрамов В. И. Генезис инновационного потенциала // Теория и практика общественного развития. 2012. № 10. С. 231–234.
5. Абрамов В. И., Лаврентьев И. А., Гремпель В. О. Роль инноваций и стартапов в развитии экосистем // Экономические науки. 2022. № 210. С. 97–100. DOI: 10.14451/1.210.97
6. Столяров А. Д., Гордеев В. В., Абрамов В. И. Модель модуля динамической генерации персональных предложений дополнительных услуг для пассажиров авиакомпаний // Экономика и управление. 2023. Т. 29. № 3. С. 335–344. DOI: 10.35854/1998-1627-2023-3-335-344
7. Абрамов В. И., Громыко А. А. Цифровой двойник умного города как современная тенденция цифровой экономики // Государство и общество России в контексте современных геополитических вызовов: новации, экономика, перспективы: материалы XII Всерос. науч.-практ. конф. Чебоксары: ИПК «Новое время» (Чебоксары), 2021. С. 215–220.
8. Яроцкая Е. В. Экономико-математические методы и моделирование: учебное пособие. Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2018. 227 с.
9. Методы оптимизации: учебное пособие / Е. К. Ершов и др. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2016. 89 с.
10. Зуйкова А. Что такое цифровые двойники и где их используют // РБК Тренды. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb> (дата обращения: 23.06.2023).
11. Абрамов В. И., Головин О. Л., Столяров А. Д. Методика поиска Парето-оптимальных решений по развитию умных городов на базе их цифровых двойников // Современная экономика: проблемы и решения. 2021. № 9 (141). С. 8–15. DOI: 10.17308/meps.2021.9/2666
12. Ковалева К. А., Кумратова А. М., Великанова О. Л., Клинецвич Р. И. О свойствах нелинейности динамических социально-экономических систем и процессов // Современная экономика: проблемы и решения. 2020. № 12 (132). С. 27–34. DOI: 10.17308/meps.2020.12/2487

References

1. Abramov V.I., Andreev V.D. Analysis of strategies for digital transformation of Russian regions in the context of achieving national goals. *Voprosy gosudarstvennogo i munitsipal'nogo upravleniya = Public Administration Issues*. 2023;(1):89-119. (In Russ.). DOI: 10.17323/1999-5431-2023-0-1-89-119
2. Covin J.G., Selvin D.P. Strategic management of small firms in hostile and benign environments. *Strategic Management Journal*. 1989;10(1):75-87. DOI: 10.1002/smj.4250100107
3. Abramov V.I. Methodology for assessing innovative potential. Doct. econ. sci. diss. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Economics and Finance; 2012. 302 p. (In Russ.).
4. Abramov V.I. Genesis of innovative potential. *Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya = Theory and Practice of Social Development*. 2012;(10):231-234. (In Russ.).
5. Abramov V.I., Lavrentiev I.A., Grempele V.O. The role of innovations and startups in the development of ecosystems. *Ekonomicheskie nauki = Economic Sciences*. 2022;(210):97-100. (In Russ.). DOI: 10.14451/1.210.97
6. Stolyarov A.D., Gordeev V.V., Abramov V.I. Model of a module for dynamic generation of personalized offers of additional services for airline passengers. *Ekonomika i upravlenie = Economics and Management*. 2023;29(3):335-344. (In Russ.). DOI: 10.35854/1998-1627-2023-3-335-344
7. Abramov V.I., Gromyko A.A. Digital twin of a smart city as a modern trend of the digital economy. In: State and society of Russia in the context of modern geopolitical challenges: Innovations, economics, prospects. Proc. 12th All-Russ. sci.-pract. conf. Cheboksary: Novoe vremya; 2021:215-220. (In Russ.).
8. Yarotskaya E.V. Economic-mathematical methods and modeling. Saratov: IPR Media; 2018. 227 p. (In Russ.).
9. Ershov E.K. et al. Optimization methods. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2016. 89 p. (In Russ.).

10. Zuikova A. What are digital twins and how they are used. RBC Trends. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb> (accessed on 23.06.2023). (In Russ.).

11. Abramov V.I., Golovin O.L., Stolyarov A.D. Methodology of searching Pareto-optimal solutions for the development of smart cities on the basis of their digital twins. *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya = Modern Economics: Problems and Solutions*. 2021;(9):8-15. (In Russ.). DOI: 10.17308/meps.2021.9/2666

12. Kovaleva K.A., Kumratova A.M., Velikanova O.L., Klintsevich R.I. On the properties of non-linearity of dynamic socio-economic systems and processes. *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya = Modern Economics: Problems and Solutions*. 2020;(12):27-34. (In Russ.). DOI: 10.17308/meps.2020.12/2487

Сведения об авторах

Александр Дмитриевич Столяров

аспирант

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31

Владимир Владимирович Гордеев

Генеральный директор

Общество с ограниченной ответственностью «АЭРОЛАБС»

115201, Москва, Котляковская ул., д. 3, стр. 13

Виктор Иванович Абрамов

доктор экономических наук, кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры управления бизнес-проектами

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31

Поступила в редакцию 03.07.2023
Прошла рецензирование 28.07.2023
Подписана в печать 10.08.2023

Information about Authors

Alexander D. Stolyarov

postgraduate student

National Research Nuclear University
MEPhI

31 Kashirskoe highway, Moscow 115409, Russia

Vladimir V. Gordeev

CEO

Aerolabs LLC

3 Kotlyakovskaya st., bldg. 13, Moscow 115201, Russia

Victor I. Abramov

D.Sc. in Economics, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Business Project Management

National Research Nuclear University
MEPhI

31 Kashirskoe highway, Moscow 115409, Russia

Received 03.07.2023
Revised 28.07.2023
Accepted 10.08.2023

Конфликт интересов: авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest related to the publication of this article.