
МЕТОДИКА ПОИСКА ПАРЕТО-ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ПО РАЗВИТИЮ УМНЫХ ГОРОДОВ НА БАЗЕ ИХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Абрамов Виктор Иванович¹, д-р экон. наук, доц., проф.

Головин Олег Леонидович², канд. экон. наук

Столяров Александр Дмитриевич¹, спец.

¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское ш., 31, Москва, Россия, 115409; e-mail: VIAbramov@mephi.ru; a.stolyarov@aerolabs.ru

² НУ Институт прикладных информационных технологий, Каширское ш., 43, корп.5, Москва, Россия, 115409; e-mail: o.golovin@ipit.ru

Цель: статья посвящена вопросам поиска управленческих многокритериальных парето-оптимальных решений по развитию умного города на основе его цифрового двойника. *Обсуждение:* в условиях быстрых изменений и глобальной нестабильности в мире возрастает роль цифровых технологий и использование перспективных методов предиктивного многоцелевого анализа. Показано, что технология цифровых двойников умных городов активно развивается и может быть применена в поиске парето-оптимальных решений на основе нелинейного многокритериального анализа чувствительности с использованием ЛПτ-последовательностей. *Результаты:* авторами предложена методика поиска многокритериальных парето-оптимальных решений с использованием нелинейного анализа чувствительности показателей эффективности ко многим параметрам в зависимости от времени для управления и развития умных городов на основе их цифровых двойников.

Ключевые слова: умный город, цифровые двойники, парето-оптимизация, предиктивная аналитика, анализ чувствительности, ЛПτ-последовательности.

DOI: 10.17308/meps.2021.9/2666

Введение

Переход к новому технологическому укладу трансформирует не только сферу производства, но и весь образ жизни общества и при растущем уровне урбанизации меняется и значительно увеличивается нагрузка на городские службы и затрудняется управление городами [1]. Города зани-

мают только 3% площади суши, но потребляют 75% природных ресурсов и производят 60-80% мусора [2]. Дальнейшая урбанизация с 54% мирового населения сегодня до 66% к 2050 г. приведёт к ещё большему влиянию на окружающую среду [3]. Города – сложные развивающиеся экономические, экологические и демографические системы, для них характерны не всегда согласующиеся интересы граждан и различных структур. Таким образом, необходимы новые подходы, способные обеспечить оптимальное планирование и управление городскими системами при их трансформации на пути формирования нового технологического уклада. Решением может быть развитие методов многокритериальной оптимизации и предиктивной аналитики в рамках концепции «Умный город».

В конце 2019 г. утвержден первый международный стандарт, определяющий индикаторы информационно-коммуникационных систем, лежащих в основе реализации и оценки проектов умных городов [4]. Проект российского эквивалента этого стандарта планируется представить в 2021 г. Согласно проекту Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии [5], умный город определяется как «Инновационный город, который внедряет комплекс технических решений и организационных мероприятий, направленных на достижение максимально возможного в настоящее время качества управления ресурсами и предоставления услуг, в целях создания устойчивых благоприятных условий проживания и пребывания, деловой активности нынешнего и будущих поколений». Сложность задачи оптимального формирования и развития такого города со значительным количеством стохастических взаимовлияющих и конкурирующих процессов, требующих принятия своевременных и адекватных решений, вызывает необходимость комплексного применения технологий нового уклада, таких как цифровые двойники.

Методология исследования

Впервые термин «цифровой двойник» появился ещё в 2003 г., однако только в последние 3-5 лет рост компьютерных мощностей, продвижение технологий AI, Big data и IoT/IIoT привели к практическому применению цифровых двойников. Начиная с 2017 г. Gartner включает цифровые двойники в топ-10 стратегических технологических тенденций. Цифровой двойник – цифровое представление продукта, процесса или услуги, используемое для мониторинга, анализа и улучшения качества управления [6]. Цифровой двойник является актуальной и точной копией свойств и состояний объекта, включая форму, положение и изменения, что позволяет лучше понимать, прогнозировать и оптимизировать происходящие с объектом процессы [7].

В работе [8] вводится определение цифрового двойника города (CDT) как цифрового представления или «виртуальной копии» города, которую можно использовать в качестве среды моделирования и управления. То есть CDT – это отображение реального города в цифровой динамической реальности, которое помогает принимать решения для достижения результатов

на уровне города (городское планирование, управление и сопутствующие услуги) [9]. Применение CDT позволяет проводить предиктивную аналитику, ставить виртуальные опыты, прогнозировать поведение всего города или его отдельных систем на основе информации, поступающей с различного рода датчиков, систем мониторинга и счётчиков ресурсов. Цифровой двойник связывает и синхронизирует все внутренние структуры города: водоснабжение, электрификацию, подачу газа, загруженность дорог, услуги здравоохранения и образования, экологические аспекты. Кроме этого, с увеличением частоты стихийных и антропогенных катастроф цифровые двойники используются для прогнозирования таких кризисов и выработки адекватных реакций [10].

Эффективность управления умным городом определяется по целевым показателям. В работе [11] выделяется 8 категорий и 43 существенных показателя умного города. Согласно [4], эти показатели должны соответствовать критерию полноты, то есть должны измерять и балансировать все соответствующие аспекты для оценки умного города.

В стандартах ISO 37120:2014 «Устойчивое развитие сообщества» определен перечень целевых показателей, измерение и контроль которых позволяет городам оценивать их развитие. Регламентируются 46 обязательных и 56 вспомогательных показателей городских услуг и качества жизни по 17 направлениям.

Методы многоцелевой (многокритериальной) оптимизации систем множеством противоречащих друг другу целей, таких как эффективность, надежность, стоимость, и другие основаны, как правило, на поиске парето-оптимальных решений [12]. Однако для динамических систем важно не только получить набор парето-оптимальных решений, но и понимать, насколько полученные решения чувствительны к изменению тех или иных факторов. Для этой цели предлагается использовать нелинейный анализ чувствительности на основе ЛП_τ-последовательностей, который впервые был предложен в работе [13] и в настоящее время активно используется во многих областях [14]. Нелинейность динамических социально-экономических систем и процессов [15] требует специальных методов исследования, и данная методика позволяет их анализировать.

Обозначим целевые показатели, далее критерии эффективности y_j ($j = 1, 2, \dots, N$), тогда можно обозначить, что $y_j = F_j(t, x_i)$, где $F_j(t, x_i)$ – цифровой двойник умного города, как правило, это – сложная система типа «черный ящик», t – время, x_i ($i = 1, 2, \dots, M$) – факторы, влияющие на результат, при этом $x_i \in (a_i, b_i)$ с плотностью $w(x_i)$. Таким образом задача сводится к поиску парето-оптимальных решений $y_j(t) \in (y_j \min(t), y_j \max(t))$, ($j = 1, 2, \dots, N$) по многим параметрам x_i ($i = 1, 2, \dots, M$).

Для того чтобы поиск осуществлять эффективно, предлагается на первом этапе проанализировать влияние всех параметров на критерии эффективности и выделить три группы А, В и С, где группа А – наиболее зна-

чимые, В – среднезначимые и С – слабозначимые. Для решения этой задачи предлагается использовать метод нелинейного анализа чувствительности на основе ЛП_τ-последовательностей [12], в котором определяется чувствительность всех критериев эффективности Y_i к изменению параметров x_j по формуле:

$$s_{ij} = \sigma^2_{ij} / \sigma^2_j,$$

где σ^2_{ji} – частичная дисперсия критерия качества j к изменению параметра i ; σ^2_j – полная дисперсия критерия качества j . В этом методе вычисление σ^2_{ji} и σ^2_j сводится к задаче численного нахождения интегралов:

$$\sigma^2_j = D[F_j(x)] = \int w(x)[F_j(x) - \bar{F}_j]dx = \overline{F_j^2} - \bar{F}_j^2,$$

$$\sigma^2_{ji} = D[F_{ji}(x_i)] = \int w_i(x_i)[F_{ji}(x_i) - \bar{F}_{ji}]dx_i = \overline{F_{ji}^2} - \bar{F}_{ji}^2$$

$$F_{ji}(x_i) = M[F(x)|x_i] = \int w_{-i|i}(x_{-i}|x_i)F(x)dx_{-i},$$

$$w_{-i|i}(x_{-i}|x_i) = w(x)/w_i(x_i), w_i(x_i) = \int w(x)dx_{-i}$$

$$\bar{F}_j = M[F_j(x)] = \int w(x)F_j(x)dx, \overline{F_j^2} = M[F_j^2(x)] = \int w(x)F_j^2(x)dx$$

$$\bar{F}_{ji} = M[F_{ji}(x_i)] = \int w_i(x_i)F_{ji}(x_i)dx_i = \bar{F}_j,$$

$$\overline{F_{ji}^2} = M[F_{ji}^2(x_i)] = \int w_i(x_i)F_{ji}^2(x_i)dx_i.$$

Как показали исследования на математических моделях различной степени нелинейности, наименьшая погрешность чувствительностей достигается путем вычисления многомерных интегралов с помощью ЛП_τ-последовательностей. Следует отметить, что сгенерированные при анализе чувствительности данные можно использовать для поиска парето-оптимальных решений.

Обсуждение результатов

Проведенный анализ чувствительности позволяет выделить наиболее значимые факторы, зафиксировав незначимые, и на их основе проводить поиск парето-оптимальных решений. Обозначим множество найденных парето-оптимальных решений $x_{\alpha i}$. Предлагается отбор решений из этого множества проводить на основе анализа стойкости – устойчивости полученных решений к форс-мажорным ситуациям. Для этого определяются максимально допустимые (и/или минимально допустимые) значения для критериев эффективности и новые области изменения параметров $x_i \in (c_i, d_i)$. При этом при выполнении анализа чувствительности все решения y_j , выходящие из области допустимых значений, убираем из множества решений $x_{\alpha i}$. Из полученного анализа чувствительности выбираем решения $x_{\beta i}$, наименее чувствительные к форс-мажорным изменениям. Если таких решений не оказалось, то требуется заново осуществить поиск парето-оптимальных решений, либо пересмотреть требования к критериям эффективности или области изменения параметров.

Рекомендуется также провести анализ чувствительности полученного множества парето-оптимальных решений $x_{\beta i}$ к возможным неточностям и

погрешностям δ_i , где $x_i \in (x_{\beta i} - \delta_i, x_{\beta i} + \delta_i)$. Из проведенного анализа чувствительности критериев эффективности y_j формируется окончательное множество парето-оптимальных решений $x_{\gamma i}$. В случае, если это множество $x_{\gamma i}$ оказывается пустым, то требуется пересмотреть требования к погрешностям, либо рассмотреть новое множество парето-оптимальных решений. Как показывает опыт, использование анализа чувствительности позволяет понять влияние факторов на критерии эффективности и значительно улучшить качество решений. Понятно, что использовать данный подход можно и к отдельным блокам умного города, сделав декомпозицию по направлениям развития, например, ЖКХ, транспорт и т.д.

Заключение

В современных условиях с быстрыми изменениями во внешней среде логика принятия управленческих решений на основе экстраполяции прошлого опыта становится неэффективной, особенно, когда это касается таких сложных систем, как умный город. В работе показана перспективность использования цифровых двойников для поиска эффективных парето-оптимальных решений по развитию умных городов. В этом случае появляется возможность действовать в логике не «из прошлого», а в логике поиска и проверки гипотез «из будущего». Предложена методика поиска парето-оптимальных решений с использованием нелинейного многокритериального анализа чувствительности на основе ЛП_τ-последовательностей, которая позволяет понять влияние факторов на критерии эффективности, повысить эффективность поиска парето-оптимальных решений, и находить решения, стойкие к форс-мажорным обстоятельствам и устойчивые к неточностям и погрешностям. Показана перспективность использования нелинейного анализа чувствительности на основе ЛП_τ-последовательностей совместно с поиском парето-оптимальных решений.

Значимость качества управленческих решений при управлении городами растет, поэтому важно при проектировании архитектур и систем умного города закладывать системы поиска парето-оптимальных решений с возможностью многокритериального нелинейного анализа чувствительности ко многим факторам.

Список источников

1. 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 Всероссийской научно-практической конференции*, Чебоксары, Новое время, 2021, с. 215-220.
2. Информационные технологии Умный город. Показатели. Доступно: <https://d-russia.ru/wp-content/uploads/2020/01/smart-city-1st.pdf>.
3. 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, no. 12(132), с. 27-34.
4. Прохоров А., Лысачев М. *Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт*. Москва, ООО «АльянсПринт», 2020.

5. Соболев И.М., Статников Р.Б. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями*. Москва, Дрофа, 2006.
6. *Цифровая трансформация экономики*. Под ред. В.И. Абрамова, О.Л. Головина. Москва, НИЯУ МИФИ, 2020.
7. Abramov V.I., Kartashev A.P., Roshal A.S. On a method for nonlinear sensitivity analysis of mathematical models // *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1986, Т. 26, pp. 469-476.
8. Adiyarta K., Napitupulu D., Syafrullah M., Mahdiana D., Rusdah R. *Analysis of smart city indicators based on prisma: systematic review*, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020.
9. Bolton A., Butler L., Dabson I., Enzer M., Evans M., Fenemore T., Harradence F. *The Gemini Principles*, 2018. Доступно <https://doi.org/10.17863/CAM.32260>.
10. Ford D.N., Wolf C.M. *Smart Cities with Digital Twin Systems for Disaster Management*, *J. Manage. Eng.*, 2020, no. 36(4).
11. ISO/FDIS 37122, Sustainable cities and communities – Indicators for smart cities. Доступно: <https://www.iso.org/standard/69050.html>.
12. Nocht T., Wan L., Schooling J. & Parlikad A. A Socio-Technical Perspective on Urban Analytics: The Case of City-Scale Digital Twins // *Journal of Urban Technology*, 2021, no. 28 (1-2), pp. 263-287.
13. Song S., Zhou T., Wang L., Kucherenko S., Lu Z. Derivative-based new upper bound of Sobol' sensitivity measur. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 187, 2019, pp. 142-148
14. UN. Global initiative for resource efficient cities, Paris, France, United Nations Environment Programme. Доступно: <https://resourceefficientcities.org/>.
15. World Urbanization Highlights, New York, USA. United Nations Department of Economic and Social Affairs.

METHODOLOGY OF SEARCHING PARETO-OPTIMAL SOLUTIONS FOR THE DEVELOPMENT OF SMART CITIES ON THE BASIS OF THEIR DIGITAL TWINS

Abramov Viktor Ivanovich¹, Dr. Sc. (Econ.), Full Prof.

Golovin Oleg Leonidovich², Cand. Sc. (Econ.)

Stolyarov Alexander Dmitrievich¹, B.B.A.

¹ National Research Nuclear University MPhI, Kashirskoe hwy., 31, Moscow, Russia, 115409; e-mail: VIAbramov@mephi.ru; a.stolyarov@aerolabs.ru

² NU Institute of Applied Information Technologies, Kashirskoe hwy., 43, building 5, Moscow, Russia, 115409; e-mail: o.golovin@ipit.ru

Purpose: the article deals with the search for management multicriteria Pareto-optimal solutions for the development of a smart city based on its digital twin. *Discussion:* in the context of rapid changes and global instability, the role of digital technologies and the use of promising methods of predictive multi-objective analysis are increasing. The article shows that the technology of digital twins of smart cities is actively developing and presents the method for finding Pareto optimal solutions using nonlinear multicriteria sensitivity analysis using LP_{τ} – sequences based on them. *Results:* the authors proposed a methodology using a nonlinear analysis of the sensitivity of performance indicators to many parameters depending on time with new search capabilities for Pareto-optimal solutions for the development of smart cities.

Keywords: smart city, digital twins, Pareto optimization, predictive analytics, sensitivity analysis, LP_{τ} – sequences.

References

1. Abramov V.I., Gromyko A.A. [The digital twin of a smart city as a modern trend of the digital economy]. Gosudarstvo i obshchestvo Rossii v kontekste sovremennykh geopoliticheskikh vyzovov: novatsii, ekonomika, perspektivy. *Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [The state and society of Russia in the context of modern geopolitical challenges: innovations, economy, prospects: Materials of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference]. Cheboksary, Novoe Vremya, 2021, pp. 215-220. (In Russ.)
2. [Information technologies Smart City. Indicators]. (In Russ.) Available at: <https://d-russia.ru/wp-content/uploads/2020/01/smart-city-1st.pdf>
3. Kovaleva K.A., Kumratova A.M., Velikanova O.L., Klintsevich R.I. O svoistvakh nelineinosti dinamicheskikh sotsialno-ekonomicheskikh sistem i protsessov [On the properties of nonlinearity of dynamic socio-economic systems and processes]. *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya*, 2020, no. 12(132), pp. 27-34. (In Russ.)
4. Prokhorov A., Lysachev M. *Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoi opyt* [Digital double. Analysis, trends, world experience]. Moscow, Alliansprint LLC, 2020. (In Russ.)
5. Sobol I.M., Statnikov R.B. *Vybor optimalnykh parametrov v zadachah so mnogimi kriteriyami* [The choice of optimal parameters in tasks with many criteria]. Moscow, Dropha, 2006. (In Russ.)

6. *Tsifrovaya transformatsiya ekonomiki* [Digital transformation of the economy]. Edited by V.I. Abramov, O.L. Golovin. Moscow, NR NUM, 2020.
7. Abramov V.I., Kartashev A.P., Roshal A.S. On a method for nonlinear sensitivity analysis of mathematical models. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1986, T. 26, pp. 469-476.
8. Adiyarta K., Napitupulu D., Syafrullah M., Mahdiana D., Rusdah R. *Analysis of smart city indicators based on prisma : systematic review*, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2020.
9. Bolton A., Butler L., Dabson I., Enzer M., Evans M., Fenemore T., Harradence F., *The Gemini Principles*, 2018. Available at: <https://doi.org/10.17863/CAM.32260>.
10. Ford D.N., Wolf C.M. *Smart Cities with Digital Twin Systems for Disaster Management*, *J. Manage. Eng.*, 2020, no. 36(4).
11. ISO/FDIS 37122, Sustainable cities and communities – Indicators for smart cities. Available at: <https://www.iso.org/standard/69050.html>.
12. Nohta T., Wan L., Schooling J. & Parlikad A. A Socio-Technical Perspective on Urban Analytics: The Case of City-Scale Digital Twins. *Journal of Urban Technology*, 2021, no. 28 (1-2), pp. 263-287.
13. Song S., Zhou T., Wang L., Kucherenko S., Lu Z. Derivative-based new upper bound of Sobol' sensitivity measur. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 187, 2019, pp. 142-148.
14. UN. Global initiative for resource efficient cities, Paris, France, United Nations Environment Programme. Available at: <https://resourceefficientcities.org/>.
15. World Urbanization Highlights, New York, USA. United Nations Department of Economic and Social Affairs.