

Андрей Юрьевич Подчуфаров

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Российская Федерация, 119017, Москва, ул. Малая Ордынка, 17*

Иван Александрович Аустер

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Российская Федерация, 119017, Москва, ул. Малая Ордынка, 17*

Светлана Сергеевна Ванина

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Российская Федерация, 119017, Москва, ул. Малая Ордынка, 17*

Анастасия Николаевна Галкина

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Российская Федерация, 119017, Москва, ул. Малая Ордынка, 17*

Модели оценки и прогнозирования целевых показателей в кризисных ситуациях на основе цифровых двойников сложных объектов

Аннотация

Развитие методологии системной инженерии на основе методов моделирования (MBSE) стало одним из значимых оснований современного этапа активного расширения областей внедрения цифровых двойников (ЦД) сложных объектов. Для оценки и управления целевыми показателями объектов ЦД широко используется методологический аппарат на основе МКК-моделей. Эффективное взаимодействие рассматриваемых в составе модели участников обеспечивается посредством применения современных подходов UX- и UI-дизайна (дизайна пользовательского опыта и интерфейсов). Требуемое качество расчетных инструментов ЦД обеспечивается путем внедрения алгоритмов, направленных в том числе на решение задач неполноты внешней и внутренней информации, сложной зависимости конкурентоспособности объекта ЦД от его факторов, а также взаимного влияния данных факторов. В число алгоритмов входят методы бифуркационного анализа и мягкого моделирования, методы сетевого анализа, а также методы многокритериальной оптимизации. Совокупность используемых методов позволяет рассматривать ЦД в качестве перспективного инструмента повышения эффективности высокотехнологичных объектов на всех этапах их жизненного цикла и минимизации рисков в кризисных ситуациях.

Ключевые слова: моделирование; системный подход; МКК-модель; цифровой двойник; UX-дизайн

Значительная доля передовых научно-технических достижений последних десятилетий связана с совершенствованием методологии системной инженерии, в том числе системной инженерии на основе методов моделирования (MBSE). MBSE используется для проектирования сложных объектов, которые рассматриваются как системы, состоящие из подсистем и взаимосвязанных компонентов и анализируются на протяжении всего жизненного цикла объекта [London, 2012].

Новой и активно развивающейся формой представления сложных объектов на основе MBSE стали цифровые двойники (ЦД), используемые для повышения эффективности взаимодействия с рассматриваемым объектом всех вовлекаемых участников (агентов). Несмотря на то, что окончательно устоявшегося определения ЦД в профессиональном сообществе еще не сформировалось, под ним в большинстве случаев понимают систему цифровых моделей, связанных между собой и с объектом ЦД, предназначенную для обеспечения всестороннего эффективного взаимодействия с объектом на этапах его жизненного цикла (ЖЦ) посредством предоставления с приемлемой точностью информации о его состоянии и поведении. Данная система должна стать удобным инструментом для анализа восприятия объекта агентами и их поведения в условиях различных характеристик объекта и связанных с ним процессов, результаты которого формируют систему требований к объекту на всех этапах его жизненного цикла.

Особую роль ЦД могут сыграть в кризисных ситуациях, поскольку с их помощью можно не только идентифицировать проблему, но и устранить на этапе возникновения ее предпосылок. На этапах проектирования ЦД используются для апробации расширенного набора сценариев, задействуя виртуальную модель вместо физического объекта, что также снижает риск и последствия нештатных ситуаций.

В рамках мировых трендов можно наблюдать положительную прогнозную динамику развития и более чем десятикратное увеличение показателей объема рынка ЦД к 2028 году. На сегодняшний день развитие ЦД уже является перспективным направлением для крупнейших международных игроков, включая Siemens, General Electric, Microsoft, IBM. Основными претендентами на ключевую роль являются страны Северной Америки и Азиатско-Тихоокеанского региона, при этом страны Европы и Россия также имеют перспективы для конкурентного присутствия на рынке [Прохоров, 2020].

В качестве наглядного примера ЦД сложного объекта может быть рассмотрен ЦД атомной электростанции, во взаимодействие с которым вовлекается большое количество внутренних и внешних агентов: проектные, конструкторские, эксплуатирующие, надзорные и иные организации; население, предприятия промышленности, государственные и международные организации (рис. 1).

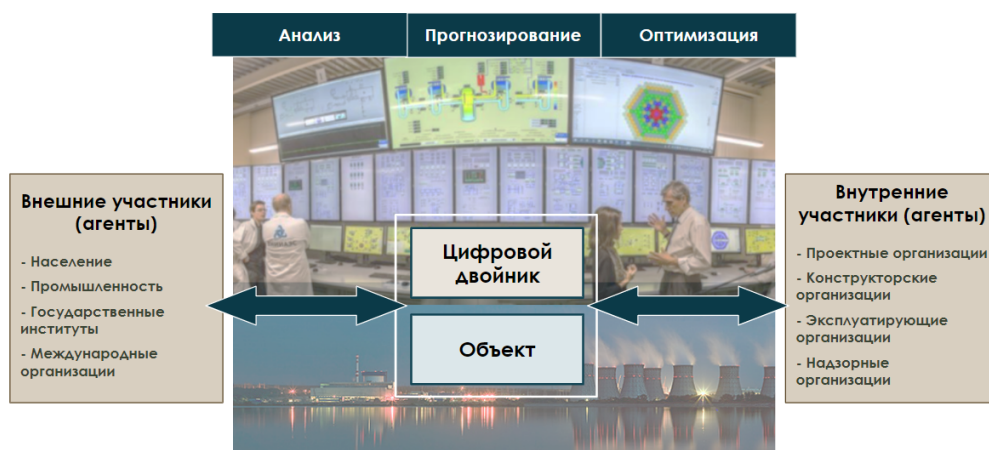


Рис. 1. Цифровой двойник атомной электростанции

В составе ЦД атомных электростанций, как и во многих иных случаях в качестве интегрального базового целевого показателя (БЦП), характеризующего эффективность объекта с позиции всех вовлекаемых участников, принимается показатель конкурентоспособности (КС), методы оценки и прогнозирования которой поступательно развивались на протяжении нескольких столетий (рис.2). Развитие современных вычислительных и коммуникационных технологий обеспечило возможность расширенного применения системных подходов к оценке КС.



Рис. 2. Эволюция подходов оценки конкурентоспособности

Одним из примеров системного класса решений, активно развивающихся последние годы, в том числе в НИУ ВШЭ, является методологический аппарат на основе МКК-моделей, положительно зарекомендовавших себя как в России,

так и за рубежом, включая ГК Росатом и ГК Ростех. Развитие класса МКК-моделей во многом сформировало основу для трансформации устоявшихся методик стратегического менеджмента от подходов, опирающихся на структуру продуктового портфеля, к разработке и развертыванию стратегии развития на основе структуры ключевых компетенций. Накопившийся опыт использования МКК-подхода для обоснования планов стратегического развития современных высокотехнологичных компаний и использование заложенных в моделях алгоритмов при построении подсистем управления базовыми целевыми показателями цифровых двойников сложных объектов, формирует предпосылки для исследования возможного расширения области их применимости.

В составе МКК-модели рассматриваются факторы КС в разрезе трех контуров: характеризующего продуктовые направления; формирующего необходимые условия для создания рассматриваемых продуктовых направлений; обеспечивающего достижение преимущества в условиях конкурентного взаимодействия, представленного оптимальным соотношением достигаемых показателей и затрачиваемых ресурсов [Podchufarov, 2020].

Обобщенным примером классификации факторов в разрезе первых двух контуров МКК-модели применительно к высокотехнологичным объектам энергетики может служить структура, представленная на рис. 3.

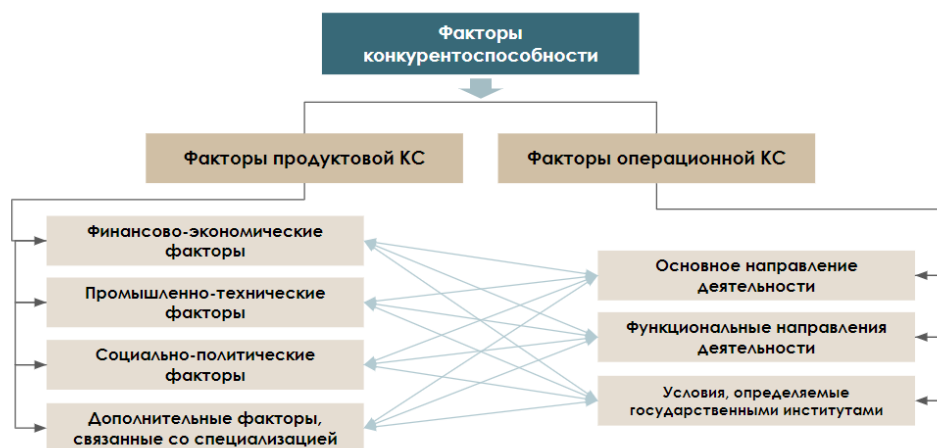


Рис. 3. Обобщенная структура факторов 1, 2 контуров МКК-модели

Для продуктового контура ключевыми группами факторов являются финансово-экономические, технические и социальные, а также факторы, связанные со специализацией объекта. В рамках операционного контура факторы подразделяются на связанные с основным направлением деятельности,

функциональными направлениями и условиями, определяемыми внешним окружением. На 1 и 2 контурах высокой значимостью во многих случаях характеризуются факторы, отражающие эффективное взаимодействие с конкретными участниками. При этом повышение их показателей может быть достигнуто как за счет обоснованной системы требований к объекту, так и за счет повышения качества инструментов ЦД.

В рассматриваемом случае ЦД, с одной стороны, предоставляет инструменты для взаимодействия широкого круга внешних и внутренних участников, связанных с объектом на разных этапах ЖЦ объекта. С другой стороны, сам ЦД представляет собой инструмент, направленный на повышение эффективности взаимодействия пользователей с объектом.

Использование практик дизайна пользовательского опыта (UX-дизайна), направленных на разработку пользовательских интерфейсов взаимодействия и обеспечивающих их удобство и эргономичность, позволяет добиться значительно большей согласованности по требованиям со стороны агентов и обеспечить эффективность их взаимодействия между собой и с ЦД объекта. Основываясь на принципах когнитивной психологии практики дизайна пользовательского опыта включают в себя разработку интерфейсных решений (UI-user interface) в широком и в узком смысле: с широким смысле, интерфейс представляет собой способы организации и построения эффективного взаимодействия между пользователем, группами пользователей и цифровой системой, а, в узком смысле, интерфейс рассматривается как совокупность программных и аппаратных средств, представляющих из себя физическую оболочку для обеспечения эффективного взаимодействия.

При разработке ЦД практическое подтверждение получили методики, основывающиеся на современных принципах прикладной психологии [Купер, 2009], в обобщающем виде включающие в себя следующие этапы UX-дизайна:

1. анализ пользователей в условиях специфики предметной области: учет требований пользователей и факторов КС, категоризация пользовательского опыта;
2. определение структуры взаимодействия: разработка интерфейса в широком смысле, паттерны и шаблоны для экранных форм;
3. детализация интерфейсных решений: разработка интерфейса в узком смысле, программ обучения пользователей, аналитических метрик;

4. проверка эффективности интерфейсных решений: юзабилити-тестирование, обучение пользователей, выработка рекомендаций по совершенствованию интерфейсных пользователей.

Сформированные по результатам UX-дизайна интерфейсные решения подтвердили положительное влияние на работу самого ЦД, так и эффективность взаимодействия с ЦД широкого круга пользователей (агентов).

Для повышения качества инструментов ЦД используется широкий набор моделей управления базовыми целевыми показателями ЦД объектов, при построении которых широко используются положения МКК-подхода. С позиции математической формализации рассматривается множество конкурентов размера m , множество факторов первого контура размера n_1 и множество факторов второго контура размера n_2 . [Podchufarov, 2020].

Для построения модели фиксируется базовый конкурент, в качестве которого может быть принят исследуемый объект, объект, обладающий характеристиками опережающего уровня (бенчмарк) или совокупность исторических (плановых) показателей, утвержденных в качестве базового уровня.

Для каждого фактора и конкурента производится оценка сравнительного показателя (СП - определяет сравнительный уровень фактора базового конкурента по отношению к рассматриваемому конкуренту) и показатель значимости (ПЗ - определяет степень влияния рассматриваемого фактора на результирующий базовый целевой показатель, не зависит от рассматриваемого конкурента). Итоговая КС рассчитывается в виде агрегирования СП с учётом значимостей (ПЗ) [Podchufarov, 2020]. Упрощенно, формула расчета КС может быть представлена следующим образом:

$$КС_i = \prod_{j=1}^n (ПФ^j)$$

$$ПФ^j = \begin{cases} 1 - (1 - СП_i^j) * ПЗ^j, & \text{если } СП_i^j \geq 1 \\ \frac{1}{1 - (1 - \frac{1}{СП_i^j}) * ПЗ^j}, & \text{если } СП_i^j < 1 \end{cases}$$

Стандартной проблемой большинства задач, основанных на моделировании, является задача неполноты внешней информации, то есть отсутствия точных данных по каким-либо переменным модели. В случае с построением МКК-модели данная проблема заключается в возможном отсутствии данных о СП некоторых факторов. Наиболее простым решением данной проблемы является декомпозиция факторов, которых нет возможности оценить напрямую. Обозначенные факторы разбиваются до уровня, на котором информация по ним имеется либо ее можно получить расчетным путем при условии возможности получения достоверной оценки с достаточной точностью. Затем факторы нижнего уровня агрегируются, формируя исходный фактор более высокого уровня. При декомпозиции различных факторов формулы для агрегирования могут отличаться и выбираются на основе логики рассматриваемых факторов.

В рамках разработки ЦД в качестве актуального направления применяются методы бифуркационного анализа и мягкого моделирования. Основной целью данных методов является не уточнение данных, а оценка итогового показателя при наличии неполноты информации в модели. Так, мягкое моделирование и бифуркационный анализ могут позволить разбить множество оценок КС на некоторые подмножества, структурно существенно отличающихся друг от друга в зависимости от значений, принимаемых факторами, и позволить выявить оптимальный вариант товара или некоторое множество вариантов при наличии неопределенности в данных.

Более специализированной проблемой при построении МКК-модели является проблема возможной неполноты внутренней информации. Данная проблема возникает в тех случаях, когда лицу, принимающему решение (ЛПР), может быть затруднительно провести точные оценки важностей тех или иных факторов модели. Данная проблема может быть сформулирована как проблема оценки ПЗ факторов. При наличии достаточного набора данных о рассматриваемом рынке для решения данной проблемы могут быть применены статистические методы оценки ПЗ, однако, в тех случаях, когда данных недостаточно (например, рассматривается некоторая новая область, в которой еще не сформировался требуемый объем статистической выборки), возникает необходимость оценки ПЗ на основе того, что в большей и что в меньшей степени интересуется ЛПР (например, предпринимателя, собирающегося вывести

товар на рынок, или заказчика какого-либо объекта). Для решения данной, более конкретной проблемы существует набор методов многокритериальной оптимизации, таких как: методы SMART, SMARTS, SMARTER [Edwards, 1977, Edwards, 1994], метод анализа иерархий [Saaty, 2008], метод последовательных уступок, метод равноценных замен и другие. Данные методы напрямую нацелены на вышеописанную задачу и позволяют в значительной мере упростить для ЛПР оценку значимостей факторов, а также оценку важностей различных отклонений по различным факторам. Важно понимать, что отклонение на некоторые X процентов по различным факторам может иметь различную значимость, однако данное различие далеко не всегда будет связано со значимостью самих факторов, как пример, оно может быть вызвано различной нормировкой факторов или отсутствием нормировки и различием в разбросе значений факторов.

Кроме того, важной проблемой, которую необходимо учитывать при построении МКК-модели, является проблема возможного влияния факторов друг на друга (внутри каждого из двух контуров). Данная проблема не представляет интереса с точки зрения оценки ПЗ или оценки итоговой КС на основе построенных ПЗ, однако ее необходимо рассматривать в тех случаях, когда ставится задача оптимизации, то есть поиска оптимального потенциального объекта. В данном случае само построение множества потенциальных объектов может оказаться невозможным без предварительного анализа взаимных влияний факторов. Оптимальным решением данной проблемы является построение задачи условной оптимизации следующего вида:

$$\begin{cases} x = (x_1, \dots, x_n) - \text{факторы} \\ f(x) \rightarrow \max \\ g_i(x) \leq b_i, i = \overline{1 \dots m} - \text{зависимости факторов} \end{cases}$$

Однако, данная задача может быть нелинейной и иметь достаточно сложную структуру, как с точки зрения функции f , то есть того, как именно агрегируются показатели в итоговую оценку КС, так и с точки зрения функций g_i , то есть того, как именно факторы влияют друг на друга. Таким образом, данная задача может быть вычислительно слишком сложной. Для решения этой проблемы могут быть применены различные численные методы, а также методы сетевого анализа [Aleskerov, 2014, Aleskerov, 2016a, Aleskerov, 2016b]. Сетевой

анализ может быть полезен как для уменьшения размерности задачи (отбрасывания наименее значимых факторов с точки зрения их влияния друг на друга и на итоговую КС), так и для выявления наиболее значимых факторов, на которые следует обратить наибольшее внимание, например, в тех случаях, когда ставится задача инвестирования в разработки или оптимизации факторов.

Представленные решения были апробированы на имитационных моделях перспективных объектов энергетической отрасли и подтвердили свою высокую эффективность. В рамках выполненного исследования также была проведена оценка как совместного, так и отдельного влияния алгоритмов комплексного управления БЦП и практик пользовательского опыта применительно к рассматриваемым объектам ЦД. Выявлен значительный синергетический эффект совместного использования названных алгоритмов, существенный дополнительный вклад в который оказывает качество моделей физических подсистем объекта, а также полнота и достоверность информации о состоянии объекта, поступающая из системам управления технологическими процессами.

В исследовании проанализированы возможности, определены и апробированы направления повышения эффективности управления сложными высокотехнологичными объектами в условиях кризисных ситуациях на основе цифровых двойников, разработанных с использованием инструментов методологии MBSE. В рамках исследования выделены следующие направления повышения эффективности управления объектом ЦД: обоснование структуры факторов, требующих оценки в составе алгоритмов управления БЦП объекта ЦД, на основе методологического аппарата МКК-подхода; повышение согласованности коммуникаций и формирования требований со стороны участников, вовлекаемых во взаимодействие с объектом ЦД на основе внедрение практик UX-дизайна; разработка и обоснование алгоритмов оценки показателей факторов БЦП, в том числе в разрезе их взаимного влияния и с учетом внутренней и внешней неполноты информации, оптимизация требований к факторам БЦП объекта ЦД на основе данных алгоритмов.

По результатам проведенного исследования подтверждена эффективность внедрения МКК-подхода как инструмента прогнозирования и управления базовыми и внутренними целевыми показателями объекта ЦД. Направлениями совершенствования расчетных алгоритмов ЦП, входящих в состав МКК-подхода и предопределяющими существенное повышение точности и обоснованности

результатов являются оценка внешней и внутренней неопределенности, оценка взаимного влияния факторов, а также задача оптимизации требований к показателям факторов в условиях ограничений. Актуальными задачами дальнейшего исследования является апробация разработанных инструментов ЦД на перспективных объектах ядерной энергетики и инфраструктурного обеспечения.

Список литературы

1. *Aleskerov F., Andrievskaya I., Permjakova E.* Key borrowers detected by the intensities of their short-range interactions //International Conference on Network Analysis. – Springer, Cham, 2014. – С. 267-280. https://doi.org/10.1142/9789811202391_0009
2. *Aleskerov, F.T., Meshcheryakova N.G., Nikitina, A., Shvydun, S.V.* Key Borrower Detection by Long-Range Interactions // National research university Higher School of economics. Series WP BRP "Basic research program". 2016. N. 56. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1807/1807.10115.pdf>
3. *Aleskerov F. T., Meshcheryakova N., Shvydun S.* Centrality measures in networks based on nodes attributes, long-range interactions and group influence // Long-Range Interactions and Group Influence. 2016. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3196962>
4. *Edwards W., Barron F. H.* SMARTS and SMARTER: Improved simple methods for multiattribute utility measurement //Organizational behavior and human decision processes. 1994. Vol. 60. N. 3. P. 306-325. <https://doi.org/10.1006/obhd.1994.1087>
5. *Edwards W.* How to use multiattribute utility measurement for social decisionmaking //IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. 1977. Vol. 7. N. 5. P. 326-340. doi: 10.1109/TSMC.1977.4309720
6. *London B.* A model-based systems engineering framework for concept development : дис. – Massachusetts Institute of Technology, 2012. <http://hdl.handle.net/1721.1/70822>
7. *Podchufarov A. Y., Ponomarev V. I., Senkov R. V.* Supply chain efficiency analysis in innovative company based on MCC-3C methodology //Inclusive Development of Society. CRC Press, 2020.

8. *Saaty, T.* Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process // *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A, Matemáticas.* 2008. Vol. 102, No.2. <https://doi.org/10.1007/BF03191825>
9. *Кунер А. и др.* Об интерфейсе. Основы проектирования взаимодействия // М.: Символ-плюс. – 2009. – С. 189-196.
10. *Подчуфаров А. Ю.* В кн.: Международный экономический симпозиум — 2018: Материалы международных научных конференций 19–21 апреля 2018 г. СПб.: Издательство СПбГУ, 2018.
11. *Прохоров А., Лысачев М., Боровков А.* Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт // АС Прохоров–М.: ООО «АльянсПринт, 2020.

Andrey Yurievich Podchufarov

*National Research University Higher School of Economics,
Russian Federation, 119017, Moscow, Malaya Ordynka, 17*

Ivan Alexandrovich Auster

*National Research University Higher School of Economics,
Russian Federation, 119017, Moscow, Malaya Ordynka, 17*

Svetlana Sergeevna Vanina

*National Research University Higher School of Economics,
Russian Federation, 119017, Moscow, Malaya Ordynka, 17*

Anastasia Nikolaevna Galkina

*National Research University Higher School of Economics,
Russian Federation, 119017, Moscow, Malaya Ordynka, 17*

Models for assessing and predicting target indicators in crisis situations based on digital twins of complex objects

Abstract

The development of the system engineering methodology based on modeling methods (MBSE) has become one of the significant foundations of the current stage of actively

expanding the areas of implementation of digital twins of complex objects. To assess and manage the target indicators of digital twin objects, the methodological apparatus based on MCC-models is widely used. Effective interaction of the participants considered as part of the model is ensured through the use of modern approaches to UX and UI design (user experience and interface design). The required quality of digital twins calculation tools is ensured by introducing algorithms aimed, among other things, at solving the problems of incompleteness of external and internal information, the complex dependence of competitiveness on factors, and the mutual influence of factors. The algorithms include methods of bifurcation analysis and soft modeling, methods of network analysis, as well as methods of multicriteria optimization. The combination of methods used makes it possible to consider digital twins as a promising tool for improving the efficiency of high-tech facilities at all stages of their life cycle and minimizing risks in crisis situations.

Keywords: modeling; systems approach; MCC model; digital twin; UX design