

УДК: 621.039.003

DOI: 10.53816/23061456_2022_9–10_27

**МОДЕЛИ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
В КРИЗИСНЫХ СИТУАЦИЯХ В СОСТАВЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ
СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**MODELS FOR ASSESSING AND PREDICTING TARGET INDICATORS IN CRISIS
SITUATIONS AS PART OF DIGITAL TWINS OF COMPLEX OBJECTS**

*Канд. техн. наук А.Г. Шалковский¹, д-р техн. наук А.Ю. Подчуфаров², А.Н. Галкина²,
И.А. Аустер², С.С. Ванина²*

Ph.D. A.G. Shalkovsky, D.Sc. A.Y Podchufarov, A.N. Galkina, I.A. Auster, S.S. Vanina

¹ АО «НПО Спецматериалов», ² НИУ ВШЭ

Развитие методологии системной инженерии, основанной на моделировании (MBSE), стало одной из основ расширения областей внедрения цифровых двойников (ЦД) сложных объектов на современном этапе. В составе ЦД для управления целевыми показателями широко используется МКК-подход. Эффективное взаимодействие участников процессов разработки и управления объектом обеспечивается за счет использования методов UX- и UI-дизайна. Качество расчетных инструментов ЦД достигается путем внедрения алгоритмов бифуркационного анализа, мягкого моделирования, сетевого анализа, многокритериальной оптимизации, направленных на решение задач неполноты внешней и внутренней информации, сложной зависимости достижения целевых показателей объекта ЦД от его факторов и их взаимного влияния. Используемые методы позволяют рассматривать ЦД как перспективный инструмент для повышения эффективности сложных объектов. В статье приведены примеры применения ЦД для объектов использования ядерной энергии, в том числе, с целью повышения их антитеррористической защищенности.

Ключевые слова: цифровой двойник, моделирование, системный подход, МКК-модель, UX-дизайн, объект использования атомной энергии.

The development of the model-based system engineering methodology (MBSE) has become one of the foundations for expanding the implementation areas of complex objects digital twins (DT) at the present time. As part of the DT the MCC approach is widely used to manage the target indicators. Effective interaction between participants of the object development and management processes is ensured by UX and UI design approaches. The required quality of DT's calculation tools is ensured by introducing algorithms for bifurcation analysis, soft modeling, network analysis, multicriteria optimization aimed at solving the problems of incompleteness of external and internal information, the complex dependence of digital twin object's competitiveness on factors, and the mutual influence of factors. The methods used make it possible to consider DT as a promising tool for improving the efficiency of complex objects. The article provides examples of the use of DT for nuclear facilities to increase among others anti-terrorist protection.

Keywords: digital twin, modeling, systems-based approach, MCC model, UX design, nuclear facility.

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 разработки и управления сложными объектами, которые рассматриваются в виде совокупности взаимосвязанных подсистем на пространстве состояний, охватывающих все этапы их жизненного цикла [1].

Активно развивающейся и широко используемой на практике формой представления сложных объектов на основе MBSE стали цифровые двойники (ЦД), используемые для получения и совместного использования взаимодействующими с исследуемым объектом участниками (агентами) информации о его фактическом и прогнозном состоянии. Несмотря на то, что окончательно устоявшегося определения ЦД в профессиональном сообществе еще не сложилось, в большинстве случаев под ЦД понимают систему цифровых моделей, связанных между собой и с объектом ЦД, предназначенную для повышения эффективности управления объектом на всех этапах его жизненного цикла (ЖЦ).

Особая роль ЦД отводится в кризисных ситуациях, поскольку с их помощью возникает возможность не только своевременно идентифицировать возникающие нештатные ситуации, но и устранять их развитие при проявлении первичных предпосылок. С целью повышения устойчивости к нештатным ситуациям на этапах разра-

ботки сложных объектов ЦД также используются для апробации возможных решений на основе математического или физико-математического моделирования, применительно к расширенному составу сценариев вероятных событий.

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 [2].

В качестве наглядного примера ЦД сложного объекта может быть рассмотрен ЦД объекта использования атомной энергии, во взаимодействии 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.

В ЦД атомных электростанций, по аналогии с большинством высокотехнологичных объектов, в качестве базового целевого показателя (БЦП), характеризующего интегральную эффективность объекта с позиции всех вовлекаемых участников, во многих случаях используется

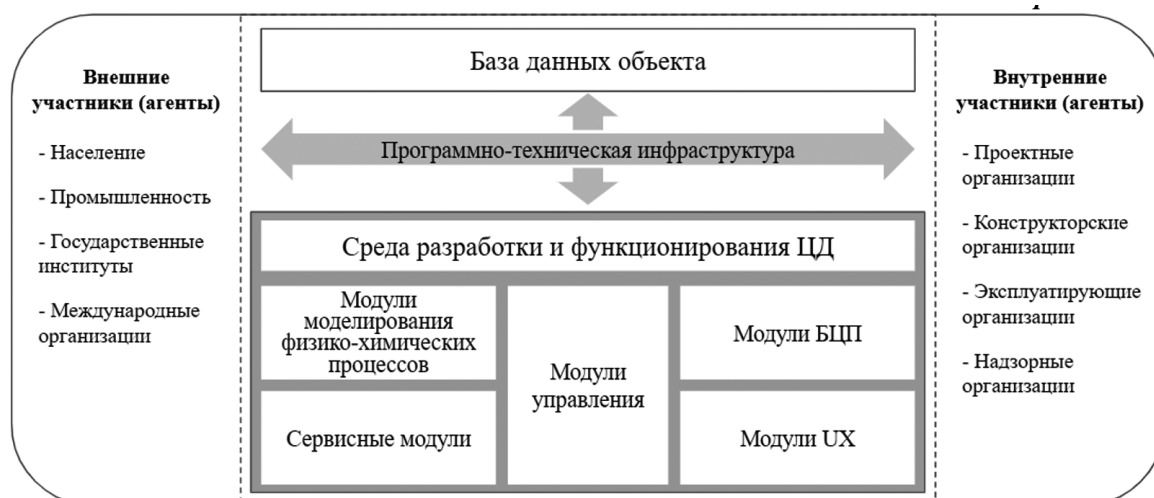


Рис. 1. Обобщенная схема цифрового двойника объекта использования атомной энергии

показатель конкурентоспособности (КС). Методы оценки и прогнозирования КС основываются на глубокой теоретико-методологической проработке, поступательно совершенствуемой на протяжении нескольких столетий (рис. 2). Развитие современных вычислительных и коммуникационных технологий обеспечило возможность расширенного применения системных подходов к оценке КС.

Одним из примеров системных подходов к оценке и прогнозированию КС, активно развивающихся в последние годы, в том числе в НИУ ВШЭ, является методологический аппарат на основе семейства МКК-моделей, положительно зарекомендовавших себя в России, включая ГК Росатом и ГК Ростех, и за рубежом. Развитие МКК-подхода сформировало основу для трансформации широко применявшихся в последние десятилетия методик разработки проектов стратегического развития, опирающихся на структуру продуктового портфеля, в направлении построения стратегий развития высокотехнологичных компаний, обосновываемых на основе сбалансированной системы ключевых компетенций. Накопившийся опыт использования МКК-подхода для разработок планов стратегического развития современных предприятий 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 [3–7].

В составе МКК-модели рассматриваются факторы КС в разрезе трех контуров. Первый контур характеризует факторы продуктовой КС по существующим и перспективным направлениям деятельности. Второй контур отражает факторы операционной эффективности применительно к рассматриваемым на первом контуре

продуктовым направлениям. На третьем контуре анализируется структура ключевых компетенций, формируемая на основе соотношений достигаемых показателей и затрачиваемых ресурсов в условиях развития прогнозного продуктового портфеля [4–6].

При построении 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. На основе имеющихся исторических данных формируется исчерпывающий состав факторов, для которых производится оценка сравнительных показателей (СП), отражающих отношение уровня факторов базового конкурента и исследуемого объекта. После этого для каждого фактора производится оценка показателя значимости (ПЗ), который определяет степень влияния рассматриваемого фактора на результирующий базовый целевой показатель, не зависящий от рассматриваемого конкурента. Итоговая КС рассчитывается на основе агрегирования СП с учётом значимостей (ПЗ) [6]. Упрощенно, формула расчета КС может быть представлена следующим образом:

$$КС_i = \prod_{j=1}^n (ПФ_i^j),$$

где i — соответствует номеру рассматриваемого конкурента, т.е. $КС_i$ отражает преимущество или отставание базового конкурента от i -го конкурента;

j — отражает номер фактора;

n (общее количество факторов контура) = n_1 — для первого контура, n_2 — для второго контура;

$ПФ_i^j$ — передаточная функция — отражает степень влияния j -го фактора на итоговую КС базового конкурента относительно i -го конкурента

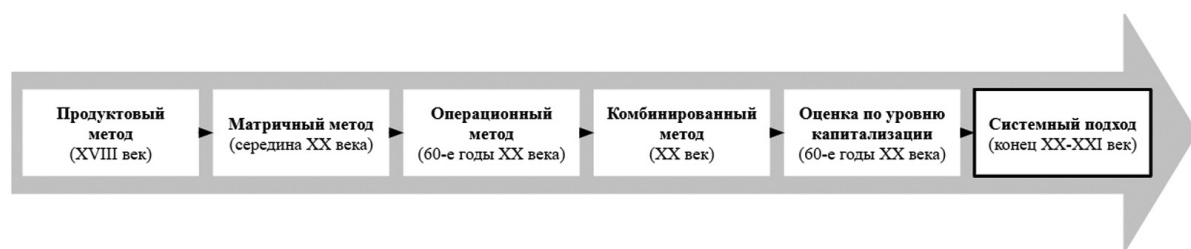


Рис. 2. Эволюция моделей оценки конкурентоспособности

$$ПФ_i^j = \begin{cases} 1 - (1 - СП_i^j) \cdot ПЗ^j, & \text{если } СП_i^j \geq 1; \\ \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{СП_i^j}\right) \cdot ПЗ^j}, & \text{если } СП_i^j < 1. \end{cases}$$

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

Для продуктового контура (контур I) ключевыми группами факторов являются финансово-экономические, промышленно-технические, социально-политические, а также факторы, связанные с базовой специализацией объекта. В составе операционного контура (контур II) выделяют факторы базовой специализации, вспомогательных функциональных направлений и внешней среды. Исходя из сложившегося опыта использования методов обоснования сбалансированной структуры ключевых компетенций, высокой значимостью на первом и втором контурах обладают факторы, характеризующие эффективность взаимодействия участников процессов разработки и управления объектом ЦД на всех этапах его жизненного цикла.

Эффективное повышение СП факторов пользовательского взаимодействия может до-

стигаться за счет использования практик дизайна пользовательского опыта (UX-дизайна). Данные практики направлены на разработку пользовательских интерфейсов взаимодействия и обеспечивают их удобство и эргономичность, позволяют 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: в широком 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 пользователей с ЦД.

При разработке ЦД практическое подтверждение получили методики, основывающиеся на современных принципах прикладной психологии [8], в обобщающем виде включающие в себя следующие этапы UX-дизайна:

– анализ пользователей в условиях специфики предметной области: учет требований пользо-

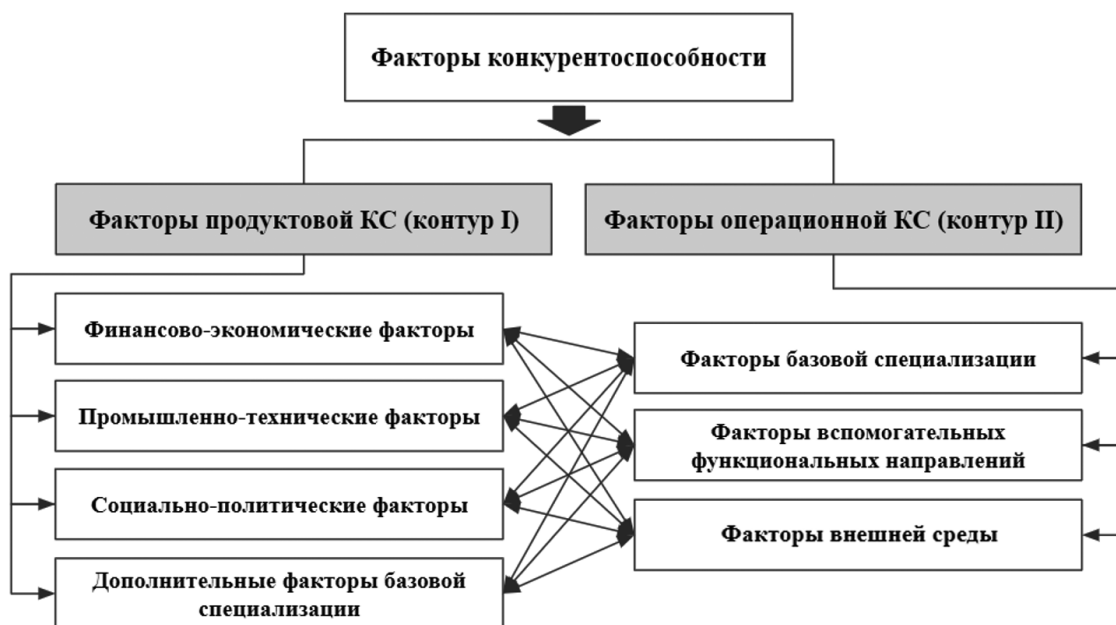


Рис. 3. Обобщенная структура факторов первого и второго контура МКК-модели

вателей и факторов КС, категоризация пользовательского опыта;

- определение структуры взаимодействия: разработка интерфейса в широком смысле, паттерны и шаблоны для экранных форм;

- детализация интерфейсных решений: разработка интерфейса в узком смысле, программ обучения пользователей, аналитических метрик;

- 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 и эффективность взаимодействия с ЦД широкого круга пользователей (агентов).

Дополнительной стандартной проблемой большинства задач в составе ЦД при применении МКК-подхода является задача неполноты внешней информации, то есть отсутствия точных и полных данных по каким-либо переменным модели. С позиции математической формализации при построении МКК-моделей рассматривается множество конкурентов размера m , множество факторов первого контура размера n_1 и множество факторов второго контура размера n_2 [6]. Возникающая 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 выбираться на основе логики рассматриваемых факторов.

В рамках разработки ЦД в качестве актуального направления предложено использование методов 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 СП рассматриваемых факторов, 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, а что в меньшей степени интересует 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 [9–10], метод анализа иерархий [11], метод последовательных уступок, метод равноценных замен и другие. Данные методы напрямую нацелены на вышеописанную задачу и позволяют в значительной мере упростить для лица, принимающего решение, 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.

Отдельная проблема, которую необходимо учитывать при построении МКК-модели, связана с учетом 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 :

$$\begin{aligned}x &= (x_1, \dots, x_n); \\ f(x) &\rightarrow \max; \\ g_i(x) &\leq 0, \quad i = \overline{1 \dots m},\end{aligned}$$

где x — вектор факторов;

$f(x)$ — функция, соответствующая показателю КС;

$g_i(x) \leq 0$ — неравенства отражающие: 1) взаимосвязь факторов (связь факторов друг с другом; 2) ограничения, наложенные на факторы реальными условиями задачи.

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 , 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 [12–14]. 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.

Выводы

В исследовании проанализированы возможности, определены и апробированы направления повышения эффективности управления сложны-

ми высокотехнологичными объектами в условиях кризисных ситуаций на основе цифровых двойников, разработанных на основе методологии MBSE. В рамках исследования подтверждена эффективность внедрения и выделены следующие направления повышения эффективности управления объектом ЦД: обоснование на основе методологического аппарата МКК-подхода структуры факторов, требующих оценки в составе алгоритмов управления БЦП объекта ЦД; повышение эффективности коммуникаций на основе внедрения практик UX-дизайна и формирования требований со стороны участников, вовлекаемых во взаимодействие с объектом ЦД; разработка и обоснование алгоритмов оценки показателей факторов БЦП, учитывающих их взаимное влияние, внутреннюю и внешнюю неполноту информации.

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 раздельного 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 систем управления технологическими процессами.

Актуальными задачами дальнейшего исследования определены: совершенствование расчетных алгоритмов ЦД, направленных на повышение точности и обоснованности оценок БЦП объектов ЦД; совершенствование прикладных методов формирования требований к показателям факторов ЦД в условиях ограничений в области специализации; апробация разработанных инструментов ЦД применительно к перспективным объектам ядерной энергетики и их инфраструктурному обеспечению.

Литература

1. London B.A. Model-based systems engineering framework for concept development. Massa-

chusetts Institute of Technology, 2012. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/70822> (дата обращения: 17.02.2022).

2. Прохоров А.Н., Лысачев М.Н. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. — М.: ООО «Альянс Принт», 2020. 401 с.

3. Ноздрачев А.В., Подчуфаров А.Ю. Стратегическое планирование и управление конкурентоспособностью предприятий ОПК, практика применения в ГК «Ростех» // Сборник докладов Второй конференции «Экономический потенциал промышленности на службе оборонно-промышленного комплекса», 9–10 ноября 2016 г. — М.: Издательский дом «Коннект». С. 164–167.

4. Самойлов В.И., Подчуфаров А.Ю. Методика оценки конкурентоспособности промышленного холдинга в условиях комплексного импортозамещения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 10. С. 349–354.

5. Подчуфаров А.Ю. Устойчивость развития и сбалансированность факторов конкурентоспособности // В кн.: «Международный экономический симпозиум-2018». Материалы международных научных конференций 19–21 апреля 2018 г. — СПб.: Издательство СПбГУ, 2018. С. 250–250.

6. Senkov R.V., Ponomarev V.I. et al. Supply chain efficiency analysis in innovative company based on MCC-3C methodology, in: Inclusive Development of Society Proceedings of the 6th International Conference on Management and Technology in Knowledge, Service, Tourism & Hospitality (SERVE 2018). — L.: CRC Press, 2020. Ch. 6. Pp. 36–43.

7. Галкина А.Н., Аустер И.А., Попенков Е.Е., Шалковский А.Г. и др. Конкурентоспособность атомной отрасли как фактор глобальной стабильности, противодействия терроризму и опережающего развития российской промышленности // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 5–6 (155–156). С. 143–150.

8. Купер А., Рейман Р., Кронин Д. Алан Купер об интерфейсе. Основы проектирования взаимодействия. Пер. с англ. — СПб.: Символ-Плюс, 2009. 688 с.

9. Edwards W., Barron F.H. SMARTS and SMARTER: Improved simple methods for multiattribute utility measurement // Organizational behavior and human decision processes, 1994.

Vol. 60. № 3. Pp. 306–325. <https://doi.org/10.1006/obhd.1994.1087>

10. Edwards W. How to use multiattribute utility measurement for social decisionmaking // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. 1977. Vol. 7. № 5. Pp. 326–340. doi: 10.1109/TSMC.1977.4309720

11. 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. № 2. <https://doi.org/10.1007/BF03191825>

12. 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. Pp. 267–280. https://doi.org/10.1142/9789811202391_0009

13. 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. № 56. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1807/1807.10115.pdf>

14. 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>

References

1. London B.A Model-based systems engineering framework for concept development. Massachusetts Institute of Technology, 2012. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/70822> (дата обращения 17.02.2022)

2. Prokhorov A.N., Lysachev M.N. Digital twin. Analysis, trends, world experience. — М.: LLC «AlyansPrint». 2020. 401 p.

3. Nozdrachev A.V., Podchufarov A.Yu. Strategic planning and management of the competitiveness of defense enterprises, the practice of application in the State Corporation «Rostec» // Proceedings of the Second Conference «The economic potential of industry in the service

of the military-industrial complex», November 9–10, 2016. — M.: Publishing house «Konnekt». Pp. 164–167

4. Samoylov V.I., Podchufarov A.Yu. Methodology for assessing the competitiveness of an industrial holding in the context of complex import substitution // *Bulletin of the Tula State University. Technical science*, 2016. № 10. Pp. 349–354.

5. Podchufarov A.Yu. Sustainability development and competitiveness factors balance // In the book: «International Economic Symposium-2018» // *Proceedings of international scientific conferences April 19–21, 2018*. — St. Petersburg: St. Petersburg State University Publishing House. 2018. Pp. 250–250.

6. Senkov R.V., Ponomarev V.I. et al. Supply chain efficiency analysis in innovative company based on MCC-3C methodology, in: *Inclusive Development of Society Proceedings of the 6th International Conference on Management and Technology in Knowledge, Service, Tourism & Hospitality (SERVE 2018)*. — L.: CRC Press. 2020. Ch. 6. P. 36–43

7. Galkina A.N., Auster I.A., Popenkov E.E., Shalkovsky A.G. et al. Nuclear power competitiveness as a factor of global stability, countering terrorism and advanced development of the Russian industry // *Journal of defense equipment Series 16. Technical means of countering terrorism*, 2021. № 5–6 (155–156). Pp. 143–150.

8. Cooper A., Reiman R., Cronin D. Alan Cooper on the interface. *Interaction Design Fundamentals*. — Translated from English. — St. Petersburg: Symbol-Plus, 2009. 688 p.

9. Edwards W., Barron F.H. SMARTS and SMARTER: Improved simple methods for mul-

tiattribute utility measurement // *Organizational behavior and human decision processes*, 1994. Vol. 60. № 3. Pp. 306–325. <https://doi.org/10.1006/obhd.1994.1087>

10. Edwards W. How to use multiattribute utility measurement for social decisionmaking // *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. 1977. Vol. 7. № 5. Pp. 326–340. doi: 10.1109/TSMC.1977.4309720

11. 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. № 2. <https://doi.org/10.1007/BF03191825>

12. 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. Pp. 267–280. https://doi.org/10.1142/9789811202391_0009

13. 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. № 56. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1807/1807.10115.pdf>

14. 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>