 © Авторы статьи / Authors of the article

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА/REGIONAL AND SECTORAL ECONOMICS

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.59 EDN: SINZJO

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ВНЕДРЕНИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Научная статья

Никонова Я.И.[1, *]

[1] ORCID : 0000-0001-6331-4371;

[1] Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ya_shka[at]list.ru)

Предложена: 11.10.2026; Принята: 22.10.2026; Опубликована: 17.11.2026

Аннотация

Статья посвящена проблеме количественного измерения эффектов, которые возникают при совместном функционировании цифровых двойников объектов инфраструктуры, подвижного состава, перевозочных процессов и внешней среды и не выявляются при раздельной оценке инвестиционных проектов. Цель исследования состоит в разработке и эмпирической проверке методики, позволяющей идентифицировать, классифицировать и выразить в стоимостной форме синергию в портфеле цифровых двойников железнодорожной компании. Методической основой служат теория сверхаддитивных функций ценности, концепция комплементарности активов, метод анализа иерархий, процедура Дельфи и спектральная кластеризация графов. Предложена типология, разграничивающая информационную, функциональную, организационную и экономическую синергию, для каждой из которых построена отдельная расчетная модель. Межпроектные связи описываются матрицей взаимодействий, а эффекты высших порядков — степенной функцией сверхаддитивности. Для оценки ценности проектов предложен показатель SAV (Synergy-Adjusted Value), который учитывает накопление синергетических эффектов во времени и их активацию при достижении пороговых значений. Показатель апробирован на 26 проектах четырех дирекций ОАО «РЖД» за 2021–2025 гг. Совокупная ценность портфеля оказалась на 47% выше суммы ценностей отдельных проектов. Около трети реализованного эффекта обеспечила синергия, главным источником которой стал обмен данными между цифровыми двойниками. Анализ выявил три устойчивых кластера проектов с высокой интенсивностью взаимодействий. Полученные результаты позволяют учитывать межпроектные связи при формировании инвестиционной программы и выборе очередности внедрения цифровых двойников.

Ключевые слова: сверхаддитивность ценности, матрица межпроектных взаимодействий, синергия данных, портфельная оценка инвестиций, скорректированная на синергию ценность, синергетический хаб, спектральная кластеризация, комплементарность цифровых активов, цифровая трансформация ОАО «РЖД».

A METHODOLOGY FOR ASSESSING SYNERGISTIC EFFECTS IN THE COMPLEX IMPLEMENTATION OF DIGITAL DOUBLES IN RAIL TRANSPORT

Research article

Nikonova Y.I.[1, *]

[1] ORCID : 0000-0001-6331-4371;

[1] Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation

* Corresponding author (ya_shka[at]list.ru)

Suggested: 11.10.2026; Accepted: 22.10.2026; Published: 17.11.2026

Abstract

The article focuses on the problem of quantitatively measuring the effects that occur when digital doubles of infrastructure assets, rolling stock, transport processes and the external environment operate in conjunction, which are not identified when investment projects are assessed separately. The aim of the study is to develop and empirically test a methodology that makes it possible to identify, classify and quantify the synergies within a railway company’s portfolio of digital twins. The methodological framework is based on the theory of superadditive value functions, the concept of asset complementarity, the Analytic Hierarchy Process, the Delphi method and spectral graph clustering. A typology is suggested that distinguishes between informational, functional, organisational and economic synergy, for each of which a separate calculation model has been developed. Inter-project links are described by an interaction matrix, while higher-order effects are described by a power function of superadditivity. To assess the value of projects, the SAV (Synergy-Adjusted Value) indicator is proposed, which takes into account the accumulation of synergy effects over time and their activation upon reaching threshold values. The indicator was tested on 26 projects across four directorates of JSC 'Russian Railways' for the period 2021–2025. The aggregate value of the portfolio proved to be 47% higher than the sum of the values of the individual projects. Around a third of the achieved effect was attributable to synergies, the main source of which was the exchange of data between digital doubles. The analysis identified three stable clusters of projects characterised by a high level of interaction. The results obtained make it possible to take inter-project links into account when forming an investment programme and prioritising the implementation of digital doubles.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Keywords: value superadditivity, cross-project interaction matrix, data synergy, portfolio investment valuation, synergy-adjusted value, synergy hub, spectral clustering, complementarity of digital assets, digital transformation of JSC 'Russian Railways'.

Введение

Переход крупных транспортных компаний от отдельных пилотных цифровых решений к масштабным программам цифровизации меняет сам предмет экономической оценки. На ранних этапах цифровой двойник (ЦД) рассматривался преимущественно как самостоятельная информационная модель изделия или сооружения. Сегодня акцент смещается к взаимодействию двойников: они обмениваются данными, а результаты их совместной работы используются для принятия управленческих решений. Отечественный стандарт определяет двустороннюю информационную связь с физическим объектом как один из признаков цифрового двойника изделия [1]. На уровне отраслевой сети наряду с этой связью возрастает значение обмена данными между двойниками. При этом, согласно обзорам мировой практики, интеграция разнородных данных остается одной из наиболее острых нерешенных задач внедрения ЦД на железных дорогах [2], [3].

В ОАО «РЖД» развитие цифровых двойников связано с объединением моделей инфраструктуры и подвижного состава. Основой для создания двойника инфраструктурного комплекса компании служит Единая корпоративная платформа проектирования и ведения технической документации (ЕКП ТД) [4]. На ее базе уже созданы двойники устройств железнодорожной автоматики и телемеханики [5]. Архитектура отраслевых решений предусматривает многоуровневую систему, в которой модели инфраструктуры и подвижного состава связаны между собой [6]. Применение двойников для решения задач безопасности движения также опирается на совмещение сведений о состоянии пути, подвижного состава и технологических процессов [7].

Практика эксплуатации таких решений позволяет выдвинуть гипотезу, что экономический результат совместной работы нескольких двойников на одном полигоне больше, чем сумма результатов, рассчитанных для каждого из них по отдельности. Например, связка двойника искусственного сооружения, двойника участка пути и двойника поезда образует контур мониторинга «инфраструктура — подвижной состав — процесс», который порождает информацию, недоступную ни одному компоненту в отдельности. Тем не менее действующие процедуры инвестиционного анализа оценивают проекты автономно и, следовательно, систематически недооценивают межпроектную составляющую ценности.

Проблема исследования заключается в отсутствии формализованного инструментария, который позволял бы выделять, типологизировать и количественно оценивать синергию в портфеле цифровых двойников железнодорожной компании. В предшествующих работах автора предложены ролевая модель управления тиражированием ЦД (DT-R12) [8], пятиуровневая модель цифровой зрелости (DMM-RT5) [9], кадровая модель цифровой трансформации (HR-DT) [10] и показатель сетевой чистой приведенной стоимости (NNPV) [11]. Каждая из этих моделей содержит отдельные механизмы межпроектного взаимодействия, но ни одна не дает их целостного описания.

Цель исследования — разработать и апробировать на данных проектов ОАО «РЖД» методику выявления, классификации и стоимостной оценки синергетических эффектов, возникающих при комплексном внедрении цифровых двойников на железнодорожном транспорт

Для достижения цели решались следующие задачи: систематизировать источники дополнительной ценности, возникающей при взаимодействии проектов, и разработать их типологию; формализовать выделенные типы синергии и способ их объединения в портфельной оценке; оценить параметры модели по данным за 2021–2025 гг.; выявить группы проектов с наиболее интенсивными взаимодействиями; сопоставить полученные результаты с ранее разработанными моделями.

Научная новизна заключается в разработке типологии синергетических эффектов цифровых двойников железнодорожного транспорта и способа их учета при оценке проектного портфеля. Типология объединяет информационную, функциональную, организационную и экономическую синергию; для каждого типа предложена отдельная расчетная зависимость. Для оценки портфеля введен показатель скорректированной на синергию ценности (SAV). Он учитывает межпроектные связи через матрицу взаимодействий и функцию сверхаддитивности, позволяя оценить ценность совместной реализации проектов, а не только сумму их индивидуальных результатов. При этом совокупный эффект полностью распределяется между проектами портфеля. На эмпирических данных 26 проектов выделены три синергетических хаба и получена количественная оценка доли синергии в реализованной ценности портфеля.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов оценки инвестиций в цифровые активы за счет учета комплементарности и нелинейного взаимодействия проектов. Практическая значимость определяется возможностью применять методику при ранжировании проектов инвестиционной программы, выборе очередности их развертывания и обосновании приоритета платформенных решений.

Методы и принципы исследования

Методология исследования опирается на системный подход, концепции комплементарности цифровых активов и сверхаддитивности ценности. Для анализа 26 проектов цифровых двойников ОАО «РЖД» за 2021–2025 гг. использованы проектная документация, экономико-математическое моделирование, экспертные оценки по процедуре Дельфи, метод анализа иерархий и спектральная кластеризация межпроектных связей. При оценке синергии информационные, функциональные, организационные и экономические эффекты рассматриваются во взаимосвязи. Стоимостные оценки приводятся к сопоставимому виду, а повторный учёт одних и тех же эффектов исключается. Модель учитывает накопление синергии во времени и её возникновение при достижении пороговых значений. Для

 © Авторы статьи / Authors of the article

проверки результатов предусмотрено их сопоставление с оценками, полученными по модели сетевой чистой приведённой стоимости.

Основные результаты

Представление о том, что целостная система обладает свойствами, не сводимыми к свойствам ее элементов, восходит к общей теории систем Л. фон Берталанфи [12]. В стратегическом менеджменте И. Ансофф ввел синергию как одну из составляющих стратегии диверсификации и выделил ее операционные, инвестиционные и управленческие формы [13]. Микроэкономическое обоснование этих идей дано в концепции экономии от разнообразия: совместное производство нескольких продуктов обходится дешевле, чем их раздельный выпуск, если элементы ресурсной базы используются сообща [14]. П. Милгром и Дж. Робертс показали, что при комплементарности технологических и организационных решений функция результата становится супермодулярной, и выгода от одновременного внедрения взаимодополняющих элементов превосходит сумму выгод от их поочередного внедрения [15]. Именно эта работа служит теоретическим обоснованием допущения о сверхаддитивности, используемого далее.

Применительно к цифровым технологиям синергия обычно трактуется через сетевые эффекты. Теория платформ разграничивает прямые эффекты, связанные с ростом числа участников, и перекрестные эффекты между разными группами пользователей [16]. В российской литературе последних лет этот подход развивается в нескольких направлениях. Т.А. Кузовкова с соавторами рассматривают синергию эффективности цифровых платформ как результат одновременного действия эффектов масштаба, сетевых эффектов и снижения транзакционных издержек и предлагают для ее измерения интегрально-экспертный метод [17]. А.А. Степанов, М.В. Савина и И.А. Степанов предлагают разграничивать функциональную, экономическую, социальную, экологическую и социально-психологическую эффективность цифровой трансформации [18]; такое разграничение близко к декомпозиции синергии по типам, принятой в настоящей работе. Л.В. Лапидус, анализируя стратегии цифровой трансформации в контексте железнодорожного транспорта, подчеркивает, что качественные системные сдвиги достигаются лишь при одновременной реализации нескольких стратегий, а данные выступают ключевым активом их взаимоусиления [19].

Концепция цифрового двойника, сформулированная М. Гривсом и Дж. Викерсом, первоначально была ориентирована на отдельное изделие и его жизненный цикл [20]. Ф. Тао с соавторами показали, что в промышленной практике двойники быстро эволюционируют от одиночных моделей к связанным системам, охватывающим оборудование, производственные линии и предприятие в целом [21]. Для транспортной инфраструктуры аналогичный переход фиксируют обзоры, которые выделяют в качестве ключевых барьеров совместимость данных и масштабирование решений [3], [22]. Предложенная Л. Де Донато с соавторами референтная архитектура интеллектуальных железнодорожных двойников предусматривает взаимодействие нескольких двойников разных подсистем, однако не содержит модели оценки ценности такого взаимодействия [23].

Отечественные работы по железнодорожной тематике сосредоточены главным образом на архитектуре и функциональности двойников. Д.В. Зуев и С.В. Бочкарев описывают цифровой двойник инфраструктуры автоматики и телемеханики [5], систематизируют платформы и проекты этого класса [4], а также предлагают многоуровневую архитектуру отраслевых решений [6]. В.М. Рудановский исследует применение двойников для обеспечения безопасности движения [7]. Эти работы затрагивают связи между двойниками разных предметных областей, однако не содержат стоимостной оценки таких взаимодействий.

Методы количественной оценки синергии можно объединить в три группы. В аддитивном подходе она рассчитывается как разность между эффектом совместной реализации и суммой эффектов, полученных независимо друг от друга. Превышение совместного эффекта над этой суммой соответствует условию сверхаддитивности. Мультипликативный подход оценивает усиление эффектов с помощью коэффициентов. Структурный подход представляет взаимодействия в виде взвешенного графа и исследует его топологию [24]. В известных автору публикациях эти подходы не адаптированы к оценке портфеля цифровых двойников транспортной компании. Таким образом, научный пробел заключается в одновременном отсутствии отраслевой типологии синергии, единой метрики, связывающей парный и портфельный уровни, и эмпирической проверки на реальном массиве проектов.

3.1. Дизайн и база исследования

Исследование проведено в 2025–2026 гг. на материалах 26 проектов цифровых двойников ОАО «РЖД», реализованных в 2021–2025 гг. четырьмя функциональными дирекциями. Работа включала пять последовательных этапов (рис. 1): построение типологии синергии на основе анализа проектной документации, экспертных интервью и литературы; математическую формализацию модели; оценивание компонент синергии; кластерный анализ матрицы взаимодействий; верификацию результатов.

 © Авторы статьи / Authors of the article

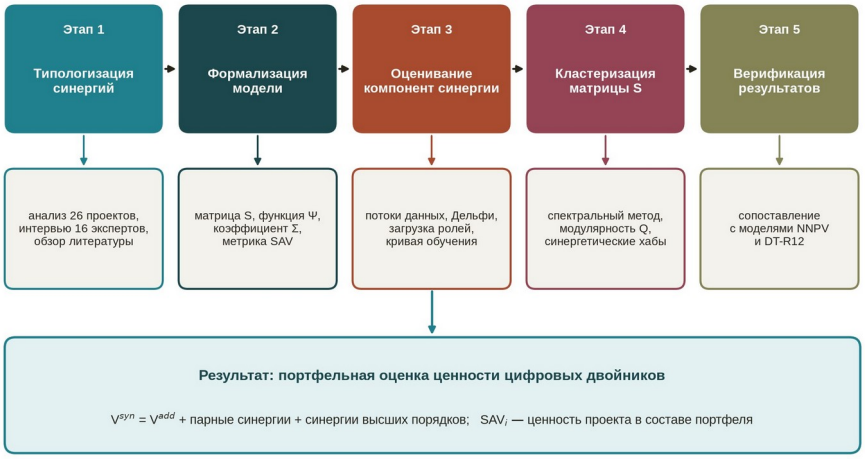


Рисунок 1 - Алгоритм методики оценки синергетических эффектов портфеля цифровых двойников
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.59.1

Структура выборки представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Структура выборки проектов цифровых двойников ОАО «РЖД»
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.59.2

Дирекция	Число проектов, ед.	Доля в выборке, %	Характерные объекты моделирования
Инфраструктура	10	38,5	искусственные сооружения трех типов, участки пути, устройства СЦБ, тоннели
Тяга	7	26,9	локомотивы трех серий в системе «Умный локомотив», диагностические комплексы, депо
Информатизация	5	19,2	ЕКП ТД, центры обработки данных, сетевая инфраструктура
Пассажирские перевозки	4	15,4	вокзальные комплексы, пассажиропотоки, система продаж
Итого	26	100,0	–

Примечание: 2021–2025 гг

Отбор проектов производился по двум критериям: наличие завершенной стадии промышленной эксплуатации не менее чем на одном полигоне и доступность данных о затратах и эффектах.

Для каждой из $\binom{26}{2} = 325$ пар проектов оценены четыре компоненты синергии. Экспертная часть оценки выполнена с участием 16 специалистов, имеющих практический опыт создания и эксплуатации цифровых двойников; опрос проводился по процедуре Дельфи в три раунда.

3.2. Типология синергии

Множество типов синергии обозначим $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4\}$. Их содержание и механизмы возникновения раскрыты в таблице 2.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Таблица 2 - Типология синергетических эффектов в портфеле цифровых двойников

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.59.3

Тип синергии	Обозначение	Содержание эффекта	Источник возникновения
Информационная (синергия данных)	ω_1	рост ценности данных одного двойника при их использовании другим	взаимное обогащение данных, снижение неопределенности, повышение точности прогнозных моделей
Функциональная	ω_2	появление сервисов, недоступных при автономной работе двойников	комплексный мониторинг, сквозная оптимизация, цепочки предиктивной аналитики
Организационная	ω_3	сокращение затрат на управление при совместном сопровождении проектов	общие команды и стандарты, совмещение ролей модели DT-R12
Экономическая	ω_4	снижение удельных затрат за счет масштаба и накопления опыта	кривая обучения, платформенная экономия, совместное использование инфраструктуры

Типы не являются взаимоисключающими: одна пара проектов может одновременно порождать эффекты всех четырех видов.

Синергия рассматривается на трех уровнях агрегирования: парном (L_1) — взаимодействие двух проектов; кластерном (L_2) — взаимодействие группы двойников в пределах технологической цепочки или полигона; портфельном (L_3) – совокупный эффект в масштабе сети.

3.3. Аддитивная база

Обозначим через V_i ценность i-го проекта при его автономном функционировании, $i = 1, \dots, n$. В качестве V_i может использоваться чистая приведенная стоимость или иной интегральный показатель эффективности. При допущении о независимости проектов ценность портфеля равна

$$V^{add} = \sum_{i=1}^{n} V_i$$

3.4. Матрица взаимодействий

Интенсивность синергии между проектами i и j задается элементом неотрицательной матрицы $\mathbf{S} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^{n \times n}$:

$$s_{ij} = \sum_{m=1}^{4} \beta_m s_{ij}^{(m)}, \qquad s_{ii} = 0, \qquad \sum_{m=1}^{4} \beta_m = 1$$

где $s_{ij}^{(m)}$ — компонента синергии типа ω_m , β_m — вес этого типа.

Для информационной, организационной и экономической синергии матрица симметрична. Функциональная синергия, напротив, может иметь направленный характер: один цифровой двойник способен обеспечивать появление новой функции у другого, не получая аналогичного эффекта от взаимодействия с ним. В общем случае матрица синергии, таким образом, может быть несимметричной.

Расчёт компонент синергии. Информационная синергия зависит от доли данных, полезных для другого участника взаимодействия, и качества их технической интеграции:

$$s_{ij}^{(1)} = q_{ij} \rho_{ij} \min(V_i, V_j)$$

В этой формуле $q_{ij} \in [0; 1]$ характеризует информационную связность, а $\rho_{ij} \in [0; 1]$ — совместимость форматов данных, интерфейсов и стандартов. Множитель $min(V_i, V_j)$ отражает ограничение по принципу «узкого места»: масштаб меньшего проекта определяет предел прироста ценности от взаимодействия.

Функциональная синергия оценивается как суммарная ценность новых функций, доступных только при совместной работе двух цифровых двойников:

$$s_{ij}^{(2)} = \sum_{f \in F_{ij}} v_f$$

Здесь F_{ij} — множество функций, возникающих в результате взаимодействия, а v_f — стоимостная оценка каждой из них. Такая оценка выражается через дополнительный доход, величину предотвращённого ущерба или экономию затрат.

Организационная синергия отражает экономию на совместном управлении:

 © Авторы статьи / Authors of the article

$s_{ij}^{(3)} = \gamma_{ij}(G_i + G_j)$

где G_i — затраты на организационное сопровождение проекта в границах ролевой модели DT-R12 [8], $\gamma_{ij} \in [0; 0{,}5]$ — доля сэкономленных затрат. Верхняя граница отражает невозможность полного совмещения ролей.

Экономическая синергия складывается из взаимного снижения удельных затрат:

$$s_{ij}^{(4)} = \Delta C_i^{scale}(j) + \Delta C_j^{scale}(i)$$

где $\Delta C_i^{scale}(j)$ — сокращение затрат проекта i благодаря общей платформе, накопленному опыту и укрупнению закупок совместно с проектом j. Эта компонента согласуется с эффектами обучения и платформенной экономии, ранее формализованными в модели NNPV [11].

3.5. Сверхаддитивность и агрегирование

Ценность портфеля с учетом взаимодействий записывается в виде

$$V^{syn} = \sum_{i=1}^{n} V_i + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} s_{ij} + \Psi(\mathbf{S})$$

где второе слагаемое — суммарный эффект парных взаимодействий (множитель 1/2 исключает повторный учет симметричных компонент), а $\Psi(\mathbf{S})$ — эффекты высших порядков, возникающие во взаимодействиях трех и более двойников. Опираясь на свойство супермодулярности комплементарных систем [15], функцию сверхаддитивности зададим степенной зависимостью от суммы парных эффектов $P = \frac{1}{2}\sum_i \sum_j s_{ij}$:

$$\Psi(\mathbf{S}) = \xi P^{\alpha}, \qquad \xi > 0, \qquad \alpha > 1$$

где ξ — коэффициент масштаба, α — параметр сверхлинейности. При $\alpha = 1$ эффекты высших порядков сводятся к линейной надбавке; при $\alpha > 1$ ценность взаимодействий растет быстрее их плотности.

Относительный вклад синергии характеризует коэффициент

$$\Sigma = \frac{V^{syn} - V^{add}}{V^{add}} = \frac{P + \Psi(\mathbf{S})}{\sum_i V_i}$$

3.6. Показатель SAV

Ценность проекта i в составе портфеля определяется как:

$$SAV_i = V_i + \sigma_i + \Psi(\mathbf{S})\frac{\sigma_i}{P}, \qquad \sigma_i = \frac{1}{4}\sum_{j \neq i}(s_{ij} + s_{ji})$$

Здесь σ_i — доля проекта в парных эффектах (каждая пара делит свой эффект поровну между участниками), а третье слагаемое распределяет эффекты высших порядков пропорционально парному вкладу. Поскольку $\sum_i \sigma_i = P$, выполняется тождество

$$\sum_{i=1}^{n} SAV_i = V^{syn}$$

то есть показатель полностью и без двойного счета распределяет совокупную ценность портфеля между проектами.

3.7. Временная динамика

Синергия формируется постепенно, начиная с момента, когда развернуты оба двойника пары:

$$s_{ij}(t) = s_{ij}^{*}\left(1 - e^{-\kappa(t - \tau_{ij})}\right)\mathbb{1}[t \geq \tau_{ij}], \qquad \tau_{ij} = \max(\tau_i, \tau_j)$$

где s_{ij}^{*} — стационарный уровень синергии, τ_i, τ_j — даты ввода проектов, $\kappa > 0$ — скорость выхода на стационарный уровень.

3.8. Пороговая активация

Часть эффектов проявляется только по достижении критической массы связанных двойников:

$$s_{ij}^{(m)}(t) = s_{ij}^{(m)*}\,\mathbb{1}\left[\sum_{k \in N(i,t)} q_{ki} \geq \theta_m\right]$$

где $N(i,t)$ — множество двойников, связанных с i и развернутых к моменту t, θ_m — пороговая связность для типа ω_m . Так, функция комплексного мониторинга «инфраструктура — подвижной состав — процесс» становится доступной лишь при наличии всех трех компонентов.

3.9. Процедуры оценивания

Для каждой компоненты использовался собственный способ измерения. Информационная синергия оценивалась по фактическим потокам данных между двойниками и приросту точности прогнозных моделей при подключении дополнительных источников (сравнение вариантов модели с дополнительным источником и без него). Функциональная синергия определялась экспертно по процедуре Дельфи с последующей проверкой на бизнес-кейсах. Организационная синергия рассчитывалась по данным о загрузке ролей DT-R12 при совместном и раздельном сопровождении. Экономическая синергия оценивалась ретроспективно по динамике удельных затрат тиражирования с коэффициентом кривой обучения $\lambda = 0{,}85$, откалиброванным ранее в модели NNPV [11]. Веса β_m определялись методом анализа иерархий [25]. Для выделения групп тесно связанных проектов матрица $\mathbf{S}$ рассматривалась как взвешенный граф; число кластеров выбиралось по максимуму модулярности [24].

3.10. Веса и структура синергии

 © Авторы статьи / Authors of the article

Согласованность экспертных суждений признана приемлемой: индекс согласованности составил $CR = 0{,}041$ при пороговом значении 0,10 [25]. Полученные веса и распределение стоимостного эффекта по типам синергии приведены в таблице 3 и на рисунке 2, а.

Таблица 3 - Веса типов синергии и их вклад в совокупный синергетический эффект портфеля

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.59.4

Тип синергии	Вес β_m, доли ед.	Вклад в синергию, млрд руб.	Доля в синергии, %
ω_1 – информационная	0,38	2,87	41
ω_2 – функциональная	0,27	1,96	28
ω_3 – экономическая	0,20	1,33	19
ω_4 – организационная	0,15	0,84	12
Итого	1,00	7,00	100

3.11. Структура матрицы взаимодействий

Пары проектов были разделены на три класса по отношению синергии к ценности большего проекта пары. Высокая синергия ($s_{ij} > 0{,}15 \max(V_i, V_j)$) выявлена у 31 пары (9,5%), умеренная ($0{,}05 < \frac{s_{ij}}{\max(V_i,V_j)} \le 0{,}15$) – у 78 пар (24,0 %), слабая или нулевая — у 216 пар (66,5%). Следовательно, существенные взаимодействия сосредоточены примерно в трети возможных связей.

Наиболее интенсивные связи зафиксированы в трех сочетаниях. Между двойниками искусственных сооружений и участков пути информационная синергия достигает $0{,}23V_{\min}$ благодаря взаимному обмену данными о динамических нагрузках. Связка системы «Умный локомотив» с инфраструктурными двойниками порождает функциональный эффект: автоматическую корректировку режима ведения поезда с учетом состояния пути. Взаимодействие ЕКП ТД со всеми инфраструктурными двойниками дает организационную экономию 18–25% затрат на сопровождение за счет единой платформы документации.

3.12. Калибровка параметров

Параметры, полученные по данным 2021–2025 гг., представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Калиброванные параметры модели синергии

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.59.5

Параметр	Значение	Единица измерения	Способ оценки
α — сверхлинейность	1,18	безразмерная	метод наименьших квадратов по трем волнам тиражирования
ξ — масштабный коэффициент	0,135	(млрд руб.)$^{1-\alpha}$	минимизация расхождения модельного и фактического эффекта высших порядков
к — скорость накопления	0,8	1/год	анализ временных рядов приростной ценности
θ_1 — порог информационной синергии	0,10	доли ед.	минимальная связность для значимого обмена данными
θ_2 — порог функциональной синергии	0,25	доли ед.	минимальная связность для возникновения новых функций

3.13. Совокупные показатели портфеля

Итоговые результаты расчета сведены в таблицу 5, а их соотношение показано на рисунке 2, б. Расчет с параметрами таблицы 4 при сумме парных эффектов $P = 5{,}9$ млрд руб. дает $\Psi = 1{,}1$ млрд руб.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Таблица 5 - Совокупные показатели ценности портфеля цифровых двойников

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.59.6

Показатель	Значение	Единица измерения
Аддитивная ценность V^{add}	14,8	млрд руб.
Парные синергии P	5,9	млрд руб.
Синергии высших порядков Ψ	1,1	млрд руб.
Совокупная ценность V^{syn}	21,8	млрд руб.
Коэффициент синергии Σ	0,47	доли ед.
Доля синергии в совокупной ценности	32	%

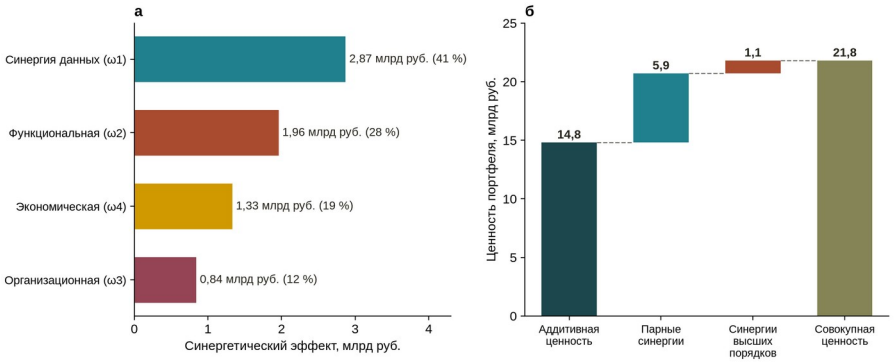


Рисунок 2 - Синергетические эффекты портфеля цифровых двойников ОАО «РЖД»:
а – распределение по типам синергии; *б* – декомпозиция совокупной ценности портфеля

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.59.7

Значение $\Sigma = 0{,}47$ означает, что портфель создает на 47% больше ценности, чем сумма его элементов, оцененных автономно. Около трети (32%) реализованного эффекта приходится на межпроектные взаимодействия, которые не учитываются при раздельной оценке.

3.14. Синергетические хабы

Спектральная кластеризация матрицы $\mathbf{S}$ дала наилучшее разбиение при трех кластерах; модулярность составила $Q = 0{,}52$, что указывает на выраженную групповую структуру графа [24]. Вклад каждого хаба показан на рисунке 3, а.

Первый хаб — «Инфраструктурный мониторинг» — объединяет девять проектов: двойники искусственных сооружений, тоннелей, участков пути и устройств СЦБ. Ведущий тип — информационная синергия: совместный анализ деформаций, вибраций и температурных режимов формирует целостную картину состояния инфраструктуры. Внутрихабовый эффект — 2,4 млрд руб.

Второй хаб — «Предиктивная тяга» — объединяет восемь проектов. В его состав входят три серии «Умного локомотива», цифровые двойники депо и диагностических комплексов, а также двойники участков пути и устройств СЦБ, которые участвуют и в первом хабе. Основной эффект здесь связан с функциональной синергией. Совместное использование данных о состоянии пути, подвижного состава и устройств автоматики позволяет прогнозировать отказы, выбирать оптимальные режимы ведения поездов и корректировать графики технического обслуживания. Внутрихабовый эффект оценивается в 2,1 млрд руб.

Третий хаб — «Интегрированная логистика и пассажирский сервис» – включает девять проектов, среди которых цифровые двойники перевозочного процесса, пассажиропотока, вокзальных комплексов, системы продаж и ЕКП ТД. В этом случае наибольшее значение имеют организационная и экономическая синергия. Единая платформа работы с документацией и общие проектные команды позволяют избежать дублирования ролей и сократить организационные затраты до 25%. Дополнительную экономию обеспечивает использование общей платформы несколькими проектами. Внутрихабовый эффект составляет 1,7 млрд руб.

Совокупный эффект взаимодействия проектов внутри трёх хабов достигает 6,2 млрд руб., или 89% общей синергии. Межхабовые связи обеспечивают ещё 0,8 млрд руб. — оставшиеся 11%.

 © Авторы статьи / Authors of the article

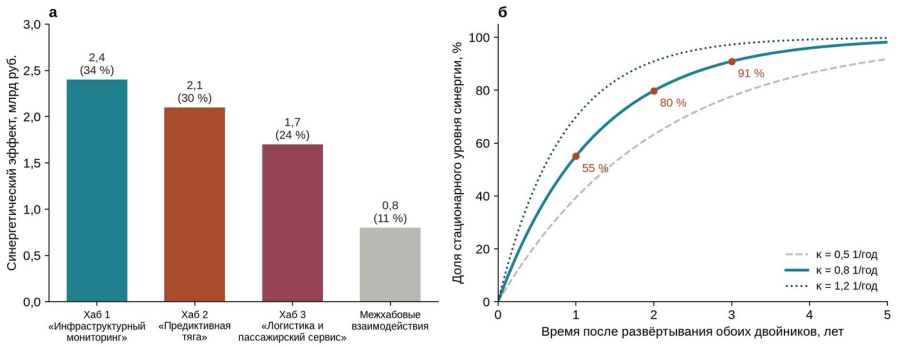


Рисунок 3 - Пространственно-временная структура синергии:
а – распределение синергетического эффекта по хабам; *б* – накопление синергии во времени при различной скорости к
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.59.8

3.15. Ранжирование проектов по SAV

Пять проектов с наибольшим относительным приростом ценности при переходе от автономной оценки к оценке в составе портфеля приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Проекты с наибольшим приростом ценности при учете синергии

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.59.9

Ранг	Проект	V_i, млрд руб.	SAV_i, млрд руб.	Прирост, %	Номер хаба
1	ЕКП ТД	0,82	1,54	+88	3
2	ЦД участков пути I категории	1,45	2,31	+59	1
3	«Умный локомотив» ЭП2К	1,12	1,73	+54	2
4	ЦД мостов средней длины	0,91	1,38	+52	1
5	ЦД перевозочного процесса	0,78	1,14	+46	3

Наибольший прирост показала ЕКП ТД. Это объясняется ее ролью общего информационного основания для всех инфраструктурных двойников: платформа одновременно участвует во множестве парных взаимодействий и порождает как информационную, так и организационную синергию. Данный результат согласуется с оценкой ЕКП ТД как базиса цифрового двойника инфраструктурного комплекса [4].

3.16. Верификация

Сопоставление с моделью NNPV [11] на том же массиве проектов приведено в таблице 7.

Таблица 7 - Сопоставление оценок синергии по показателям SAV и NNPV

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.59.10

Показатель	Оценка по SAV	Оценка по NNPV	Расхождение
Эффект сверх аддитивной ценности, млрд руб.	7,0	6,3	+11 %
Доля синергии в совокупной ценности, %	32	30	+2 п. п.

Превышение оценки по SAV объясняется тем, что она дополнительно учитывает функциональную синергию, не входящую в механизмы NNPV. Таким образом, показатели не конкурируют, а дополняют друг друга: NNPV ориентирован на стоимостную оценку тиражирования, SAV — на полный учет межпроектных взаимодействий.

 © Авторы статьи / Authors of the article

Обсуждение

Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов теоретического характера. Разделение синергии на четыре типа с самостоятельными моделями (формулы 3–6) делает ее управляемой величиной. Структура синергии позволяет определить, какие направления требуют дополнительных инвестиций. При недостаточном информационном взаимодействии приоритет следует отдавать интеграционным платформам и стандартам обмена данными, при слабой функциональной синергии — разработке комплексных сервисов. Дефицит организационной синергии, в свою очередь, указывает на необходимость пересмотра распределения ролей и ответственности в управлении. На информационную синергию приходится 41% совокупного эффекта. Это согласуется с выводом Л.В. Лапидус о данных как основном источнике взаимоусиления цифровых стратегий на транспорте [19]. Значимость интеграции данных отмечается и в зарубежных обзорах, где она рассматривается как ключевое условие масштабирования железнодорожных двойников [2], [22].

Показатель **SAV** позволяет учитывать не только самостоятельную ценность проекта, но и его вклад в результаты всего портфеля. Так, автономная оценка ЕКП ТД составляет 0,82 млрд руб. и предполагает сравнительно невысокий приоритет платформы. При учёте связей с другими проектами её SAV достигает 1,54 млрд руб., отражая системообразующую роль ЕКП ТД. При этом тождество $\sum_{i=1}^{n} SAV_i = V^{syn}$ гарантирует, что сумма SAV всех проектов соответствует ценности портфеля, исключая её завышение при агрегировании оценок.

Параметр $\alpha = 1{,}18$ количественно подтверждает тезис о супермодулярности комплементарных систем [15] применительно к цифровым двойникам: рост плотности взаимодействий сопровождается более чем пропорциональным ростом эффекта. Это согласуется и с логикой референтной архитектуры, в которой ценность интеллектуальных железнодорожных двойников связывается с их взаимодействием, а не с изолированной функциональностью [23]. Вместе с тем величина α близка к единице, поэтому основная часть синергии (5,9 из 7,0 млрд руб.) создается парными связями, а эффекты высших порядков играют подчиненную роль.

В сравнении с интегрально-экспертным методом оценки синергии цифровых платформ [17] предложенная методика опирается на явную структуру межпроектных связей и допускает их раздельное измерение. В отличие от подхода, разграничивающего виды эффективности цифровой трансформации [18], она переводит эти виды в единую стоимостную метрику. Кластерная структура портфеля соответствует выделению предметных областей в работах по архитектуре железнодорожных двойников [6], но дополнительно показывает, что границы хабов не совпадают с границами дирекций: хаб «Предиктивная тяга» объединяет проекты тяговой и инфраструктурной дирекций.

Для управления цифровой трансформацией из результатов вытекают следующие рекомендации. Во-первых, при формировании инвестиционной программы целесообразно использовать SAV наряду с проектной NPV, поскольку последняя занижает ценность портфеля примерно на треть. Во-вторых, платформенные проекты, такие как ЕКП ТД, следует развёртывать в приоритетном порядке, поскольку они создают основу для взаимодействия последующих цифровых двойников и ускоряют получение синергетических эффектов. В-третьих, в качестве единицы планирования можно использовать синергетический хаб, запуская входящие в него проекты параллельно либо с минимальным временным разрывом. В-четвёртых, при планировании необходимо учитывать темп накопления синергии. При значении параметра $\kappa = 0{,}8\ \text{год}^{-1}$ эффект достигает примерно 55% стационарного уровня через год и 80% — через два года после развёртывания обоих двойников пары (см. рис. 3, б). Задержка их интеграции, следовательно, откладывает и получение соответствующих выгод. В-пятых, включение SAV в целевую функцию выбора очерёдности тиражирования в модели NNPV [11] позволит учитывать не только результаты отдельных проектов, но и эффекты их взаимодействия.

Предложенная методика дополняет ранее разработанные автором модели. Ролевая структура DT-R12 [8] служит основой для оценки организационной синергии, а модель цифровой зрелости DMM-RT5 [9] задаёт условия реализации информационных и функциональных эффектов: на двух нижних уровнях зрелости они практически отсутствуют. Кадровая модель HR-DT [10] позволяет оценить компетентностный разрыв, ограничивающий коэффициент совместимости. Механизмы, учтённые в NNPV, соответствуют частным случаям информационной и экономической синергии; показатель SAV расширяет эту оценку за счёт функциональной и организационной составляющих.

При интерпретации результатов необходимо учитывать ограничения исследования. Выборка из 26 проектов представляет четыре ключевые дирекции, но охватывает лишь часть портфеля цифровых проектов компании, что ограничивает статистическую мощность оценок. Кроме того, оценка функциональной синергии частично основана на экспертных суждениях. По мере накопления эксплуатационных данных их следует дополнять и заменять количественными измерениями. Ещё одно ограничение связано с предположением о неотрицательности синергии. На практике взаимодействие двойников может приводить и к потерям, например из-за конкуренции за вычислительные ресурсы или противоречивых рекомендаций. Отдельной проверки требует устойчивость параметра α при расширении портфеля до нескольких сотен проектов.

Дальнейшая работа предполагает пять направлений: разработку динамической версии методики, учитывающей изменение синергии по мере модернизации цифровых двойников; распространение подхода на межкорпоративное взаимодействие железной дороги, портов, логистических операторов и грузоотправителей; включение в модель отрицательных межпроектных эффектов; создание программного средства поддержки решений для автоматического расчёта матрицы $\mathbf{S}$ и показателя SAV на основе потоковых данных; применение методов машинного обучения для прогнозирования коэффициентов связности q_{ij} по метаданным цифровых двойников.

Заключение

В работе разработана методика количественной оценки синергетических эффектов совместного внедрения цифровых двойников на железнодорожном транспорте. Она объединяет типологию четырёх видов синергии, матрицу межпроектных взаимодействий, функцию сверхаддитивности и показатель скорректированной на синергию ценности

 © Авторы статьи / Authors of the article

SAV. Методика учитывает постепенное накопление эффектов и пороговые условия их возникновения, позволяя оценивать проекты с учётом их вклада в ценность всего портфеля.

Апробация на 26 проектах ОАО «РЖД» за 2021–2025 гг. показала, что совокупная ценность портфеля составляет 21,8 млрд руб. — на 47% больше аддитивной оценки в 14,8 млрд руб. Синергия обеспечивает 32% общего эффекта, а её крупнейшим источником служит обмен данными между двойниками, на который приходится 41% синергетической ценности. Основная часть межпроектных эффектов сосредоточена в трёх хабах: «Инфраструктурный мониторинг», «Предиктивная тяга» и «Интегрированная логистика и пассажирский сервис». Вместе они формируют 89% совокупной синергии.

Полученные результаты позволяют перейти от автономной оценки цифровых двойников к выбору инвестиционных приоритетов с учётом межпроектных связей. Такой подход обосновывает первоочередное развёртывание платформенных решений и проектов с высоким синергетическим потенциалом. Исследование завершает авторский цикл «зрелость — кадры — тиражирование — синергия», связывая условия внедрения цифровых двойников с оценкой результатов их совместной работы. Дальнейшее развитие методики предполагает учёт отрицательных взаимодействий, построение динамических и межкорпоративных моделей синергии, а также автоматизацию расчётов на основе эксплуатационных данных.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Балалаев А.Н., Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара Российская Федерация

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.59.11

Conflict of Interest

None declared.

Review

Balalaev A.N., Volga State Transport University, Samara Russian Federation

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.173.59.11

Список литературы / References

1. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. — Введ. 2021-09-16. — Москва: Российский институт стандартизации, 2021. — 16 с.

2. Thompson E.A. Revolutionizing Railway Systems: A Systematic Review of Digital Twin Technologies / E.A. Thompson, P. Lu, P.K. Alimo // High-speed Railway. — 2025. — № 3. — P. 238–250. — DOI: 10.1016/j.hspr.2025.05.005

3. Vieira J. Towards Resilient and Sustainable Rail and Road Networks: A Systematic Literature Review on Digital Twins / J. Vieira, J. Poças Martins, N. Marques de Almeida // Sustainability. — 2022. — № 12. — P. 279–291. — DOI: 10.3390/su14127060

4. Зуев Д.В. Цифровые двойники железнодорожной инфраструктуры и ТИМ-решения: обзор платформ и проектов / Д.В. Зуев, С.В. Бочкарев // Интеллектуальные технологии на транспорте. — 2026. — № 1 (45). — С. 5–15. — DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-5-15

5. Зуев Д.В. Цифровой двойник инфраструктуры железнодорожной автоматики и телемеханики ОАО «РЖД» / Д.В. Зуев, С.В. Бочкарев // Транспорт Российской Федерации. — 2022. — № 3 (100). — С. 19–22.

6. Зуев Д.В. Архитектура цифровых двойников на железнодорожном транспорте / Д.В. Зуев, С.В. Бочкарев // Интеллектуальные технологии на транспорте. — 2026. — № 2 (46). — С. 17–35. — DOI: 10.20295/2413-2527-2026-246-17-35

7. Рудановский В.М. Цифровые двойники в решении задач железнодорожной безопасности / В.М. Рудановский // Безопасность и охрана труда на железнодорожном транспорте. — 2023. — № 4 (40). — С. 4–17.

8. Никонова Я.И. Оценка влияния Big Data на железнодорожную отрасль с применением метода множественного регрессионного анализа / Я.И. Никонова, И.Н. Спицына, А.В. Серова // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. — 2025. — № 7. — С. 249–254. — URL: https://kshp-omd.ru/ru/archivru/2025/kshp-omd-7-2025-el-dop/1322-annotatsii?ysclid=mv5h2ye0g118584557 (дата обращения: 10.10.26).

9. Серова А.В. Генеративные модели в прогнозировании корпоративного роста / А.В. Серова, Я.И. Никонова. // Дни науки – 2025; — Новосибирск: СГУПС, 2025. — С. 277–284. — URL: https://www.stu.ru/particular/get_teamwox_file.php?id=200845&ext=.pdf. (дата обращения: 10.10.26).

10. Лунина Т.А. Компаративный анализ стратегий цифровой трансформации компаний железнодорожной отрасли в России и за рубежом / Т.А. Лунина, Я.И. Никонова // Транспортное дело России. — 2025. — № 2 (48). — С. 23–29. — URL: https://morvesti.ru/izdaniya/tdr/archive/2025/04.php?ysclid=mv5hcg5p3w213884872 (дата обращения: 10.10.26).

11. Серова А.В. Развитие железнодорожного транспорта с использованием технологий Big Data / А.В. Серова, Я.И. Никонова // Инновационная экономика и общество. — 2025. — № 2 (48). — С. 23–29.

12. Bertalanffy L.von. General System Theory: Foundations, Development, Applications / L.von. Bertalanffy. — New York: George Braziller, 1968. — 289 p.

13. Ansoff H.I. Corporate Strategy: An Analytic Approach to Business Policy for Growth and Expansion / H.I. Ansoff. — New York: McGraw-Hill, 1965. — 241 p.

14. Panzar J.C. Economies of Scope / J.C. Panzar, R.D. Willig // American Economic Review. — 1981. — № 71 (2). — P. 268–272.

15. Milgrom P. The Economics of Modern Manufacturing: Technology, Strategy, and Organization / P. Milgrom, J. Roberts // American Economic Review. — 1990. — № 80 (3). — P. 511–528.

 © Авторы статьи / Authors of the article

16. Parker G.G. Platform Revolution: How Networked Markets Are Transforming the Economy and How to Make Them Work for You / G.G. Parker, M.W.Van Alstyne, S.P. Choudary. — New York: W.W. Norton & Company, 2016. — 336 p.

17. Кузовкова Т.А. Понятие ценности цифровых платформ и методы оценки синергии их эффективности / Т.А. Кузовкова, А.Д. Кузовков, И.М. Шаравов // Век качества. — 2022. — № 3. — С. 73–96. — URL: http://www.agequal.ru/pdf/2022/322004.pdf (дата обращения: 09.10.26).

18. Степанов А.А. Эффективность цифровой трансформации: сущность, содержание, критерии оценки / А.А. Степанов, М.В. Савина, И.А. Степанов // Экономические системы. — 2022. — № 1 (56). — С. 12–24. — DOI: 10.29030/2309-2076-2022-15-1-12-24

19. Лапидус Л.В. Синергетические эффекты как результат реализации Data Strategy и стратегии цифровой трансформации / Л.В. Лапидус // Экономика железных дорог. — 2022. — № 11. — С. 26–39.

20. Grieves M. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers. // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems; edited by F.-J. Kahlen S. Flumerfelt A. Alves — Cham: Springer, 2017. — P. 85–113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4

21. Tao F. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu et al. // IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2019. — № 4. — P. 2405–2415. — DOI: 10.1109/TII.2018.2873186

22. Yan B. Digital Twin in Transportation Infrastructure Management: A Systematic Review / B. Yan, F. Yang, S. Qiu // Intelligent Transportation Infrastructure. — 2023. — № 2. — DOI: 10.1093/iti/liad024

23. Donato L.De Towards AI-Assisted Digital Twins for Smart Railways: Preliminary Guideline and Reference Architecture / L.De Donato, R. Dirnfeld, A. Somma // Journal of Reliable Intelligent Environments. — 2023. — № 3. — P. 303–317. — DOI: 10.1007/s40860-023-00208-6

24. Newman M.E.J. Modularity and Community Structure in Networks / M.E.J. Newman // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. — 2006. — № 23. — P. 8577–8582. — DOI: 10.1073/pnas.0601602103

25. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation / T.L. Saaty. — New York: McGraw-Hill, 1980. — 285 p.

Список литературы на английском языке / References in English

1. GOST R 57700.37–2021. Kompyuternie modeli i modelirovanie. Tsifrovie dvoiniki izdelii. Obshchie polozheniya [Computer Models and Simulation. Digital Twins of Products. General Provisions]. — Introduced 2021-09-16. — Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021. — 16 p. [in Russian]

2. Thompson E.A. Revolutionizing Railway Systems: A Systematic Review of Digital Twin Technologies / E.A. Thompson, P. Lu, P.K. Alimo // High-speed Railway. — 2025. — № 3. — P. 238–250. — DOI: 10.1016/j.hspr.2025.05.005

3. Vieira J. Towards Resilient and Sustainable Rail and Road Networks: A Systematic Literature Review on Digital Twins / J. Vieira, J. Poças Martins, N. Marques de Almeida // Sustainability. — 2022. — № 12. — P. 279–291. — DOI: 10.3390/su14127060

4. Zuev D.V. Cifrovy'e dvojniki zheleznodorozhnoj infrastruktury' i TIM-resheniya: obzor platform i proektov [Digital Twins for Railway Infrastructure and BIM Solutions: An Overview of Platforms and Projects] / D.V. Zuev, S.V. Bochkarev // Intellectual Technologies on Transport. — 2026. — № 1 (45). — P. 5–15. — DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-5-15 [in Russian]

5. Zuev D.V. Cifrovoj dvojnik infrastruktury' zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemexaniki OAO «RZhD» [Digital Twin of the Railway Automation and Remote Control Infrastructure of JSC 'Russian Railways'] / D.V. Zuev, S.V. Bochkarev // Transport of the Russian Federation. — 2022. — № 3 (100). — P. 19–22. [in Russian]

6. Zuev D.V. Arxitektura cifrovy'x dvojnikov na zheleznodorozhnom transporte [Architecture of Digital Twins in Railway Transport] / D.V. Zuev, S.V. Bochkarev // Intellectual Technologies on Transport. — 2026. — № 2 (46). — P. 17–35. — DOI: 10.20295/2413-2527-2026-246-17-35 [in Russian]

7. Rudanovskij V.M. Cifrovy'e dvojniki v reshenii zadach zheleznodorozhnoj bezopasnosti [Digital Twins in Solving Railway Safety Problems] / V.M. Rudanovskij // Safety and Labour Protection in Railway Transport. — 2023. — № 4 (40). — P. 4–17. [in Russian]

8. Nikonova Ya.I. Otsenka vliyaniya Big Data na zheleznodorozhnuyu otrasl s primeneniem metoda mnozhestvennogo regressionnogo analiza [Assessing the Impact of Big Data on the Railway Industry Using Multiple Regression Analysis] / Ya.I. Nikonova, I.N. Spitsina, A.V. Serova // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem [Forging and Stamping Production. Metal Forming]. — 2025. — № 7. — P. 249–254. — URL: https://kshp-omd.ru/ru/archivru/2025/kshp-omd-7-2025-el-dop/1322-annotatsii?ysclid=mv5h2ye0g118584557 (accessed: 10.10.26). [in Russian]

9. Serova A.V. Generativny'e modeli v prognozirovanii korporativnogo rosta [Generative Models in Forecasting Corporate Growth] / A.V. Serova, Ya.I. Nikonova. // Science Days 2025; — Novosibirsk: SGUPS, 2025. — P. 277–284. — URL: https://www.stu.ru/particular/get_teamwox_file.php?id=200845&ext=.pdf. (accessed: 10.10.26). [in Russian]

10. Lunina T.A. Komparativnii analiz strategii tsifrovoi transformatsii kompanii zheleznodorozhnoi otrasli v Rossii i za rubezhom [Comparative Analysis of Digital Transformation Strategies of Railway Companies in Russia and Abroad] / T.A. Lunina, Ya.I. Nikonova // Transportnoe delo Rossii [Transport Business of Russia]. — 2025. — № 2 (48). — P. 23–29. — URL: https://morvesti.ru/izdaniya/tdr/archive/2025/04.php?ysclid=mv5hcg5p3w213884872 (accessed: 10.10.26). [in Russian]

11. Serova A.V. Razvitie zheleznodorozhnogo transporta s ispol'zovaniem texnologij Big Data [Development of Railway Transport Using Big Data Technologies] / A.V. Serova, Ya.I. Nikonova // Innovative Economy and Society. — 2025. — № 2 (48). — P. 23–29. [in Russian]

 © Авторы статьи / Authors of the article

12. Bertalanffy L.von. General System Theory: Foundations, Development, Applications / L.von. Bertalanffy. — New York: George Braziller, 1968. — 289 p.

13. Ansoff H.I. Corporate Strategy: An Analytic Approach to Business Policy for Growth and Expansion / H.I. Ansoff. — New York: McGraw-Hill, 1965. — 241 p.

14. Panzar J.C. Economies of Scope / J.C. Panzar, R.D. Willig // American Economic Review. — 1981. — № 71 (2). — P. 268–272.

15. Milgrom P. The Economics of Modern Manufacturing: Technology, Strategy, and Organization / P. Milgrom, J. Roberts // American Economic Review. — 1990. — № 80 (3). — P. 511–528.

16. Parker G.G. Platform Revolution: How Networked Markets Are Transforming the Economy and How to Make Them Work for You / G.G. Parker, M.W.Van Alstyne, S.P. Choudary. — New York: W.W. Norton & Company, 2016. — 336 p.

17. Kuzovkova T.A. Ponyatie tsennosti tsifrovikh platform i metodi otsenki sinergii ikh effektivnosti [The Concept of Digital Platform Value and Methods for Assessing the Synergy of Their Efficiency] / T.A. Kuzovkova, A.D. Kuzovkov, I.M. Sharavov // Vek kachestva [Age of Quality]. — 2022. — № 3. — P. 73–96. — URL: http://www.agequal.ru/pdf/2022/322004.pdf (accessed: 09.10.26). [in Russian]

18. Stepanov A.A. E'ffektivnost' cifrovoj transformacii: sushhnost', soderzhanie, kriterii ocenki [Digital Transformation Efficiency: Essence, Content, Evaluation Criteria] / A.A. Stepanov, M.V. Savina, I.A. Stepanov // Economic Systems. — 2022. — № 1 (56). — P. 12–24. — DOI: 10.29030/2309-2076-2022-15-1-12-24 [in Russian]

19. Lapidus L.V. Sinergeticheskie e'ffekty' kak rezul'tat realizacii Data Strategy i strategii cifrovoj transformacii [Synergistic Effects as a Result of Implementing a Data Strategy and a Digital Transformation Strategy] / L.V. Lapidus // Railway Economics. — 2022. — № 11. — P. 26–39. [in Russian]

20. Grieves M. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers. // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems; edited by F.-J. Kahlen S. Flumerfelt A. Alves — Cham: Springer, 2017. — P. 85–113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7_4

21. Tao F. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu et al. // IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2019. — № 4. — P. 2405–2415. — DOI: 10.1109/TII.2018.2873186

22. Yan B. Digital Twin in Transportation Infrastructure Management: A Systematic Review / B. Yan, F. Yang, S. Qiu // Intelligent Transportation Infrastructure. — 2023. — № 2. — DOI: 10.1093/iti/liad024

23. Donato L.De Towards AI-Assisted Digital Twins for Smart Railways: Preliminary Guideline and Reference Architecture / L.De Donato, R. Dirnfeld, A. Somma // Journal of Reliable Intelligent Environments. — 2023. — № 3. — P. 303–317. — DOI: 10.1007/s40860-023-00208-6

24. Newman M.E.J. Modularity and Community Structure in Networks / M.E.J. Newman // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. — 2006. — № 23. — P. 8577–8582. — DOI: 10.1073/pnas.0601602103

25. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation / T.L. Saaty. — New York: McGraw-Hill, 1980. — 285 p.