

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 330.341.1:004.94

JEL O32, O33, C44

DOI 10.26425/2658-3445-2026-9-1-82-101

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЗРЕЛОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ



Ссылка на статью

Шкарупета Елена Витальевна^{1,2}Д-р экон. наук, вед. науч. сотр.¹, проф. каф. цифровой и отраслевой экономики²

ORCID: 0000-0003-3644-4239

E-mail: 9056591561@mail.ru

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Целью настоящего исследования является разработка и апробация управленческой модели оценки интеллектуальной зрелости промышленных экосистем на основе данных с применением модифицированного метода анализа иерархий. В рамках гипотезы исследования предположено, что интеллектуальная зрелость промышленных экосистем формируется как синергетический результат взаимодействия стратегического, процессного, организационного, информационно-данного, архитектурного и операционно-инновационного измерений, а не как сумма их изолированных характеристик.

Методологическая основа исследования объединяет классическую процедуру Саати с энтропийной объективизацией весов и матрицей межизмерительных взаимодействий, что позволяет учесть нелинейные зависимости и снизить субъективность экспертных оценок за счет анализа вариативности данных.

Эмпирическая апробация проведена на экспертной выборке, представляющей специалистов предприятий машиностроительного, химико-технологического, фармацевтического и информационно-технологического секторов. Средний интегральный уровень интеллектуальной зрелости составил 3,6 по шкале 0–5, что соответствует переходу от управляемого уровня к установленному. Наибольшие уровни интеллектуальной зрелости зафиксированы по стратегическому и архитектурному измерениям (3,9 и 3,8 соответственно). Процессное измерение также демонстрирует близкие к установленному уровню значения (3,7). В то же время организационное, информационно-данное и операционно-инновационное измерения характеризуются более низкими уровнями зрелости (3,4, 3,2 и 3,3 соответственно).

Полученные результаты исследования подтвердили применимость модифицированного метода анализа иерархий для количественной оценки и прогнозирования интеллектуального развития промышленных экосистем. Практическая ценность исследования заключается в возможности использования модели для построения дорожных карт повышения зрелости, формирования приоритетов цифровой и искусственно-интеллектуальной трансформации, а также перехода от фрагментарной цифровизации к устойчивому управлению на основе данных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Интеллектуальная зрелость, промышленная экосистема, метод анализа иерархий, управление на основе данных, цифровая трансформация, энтропийное взвешивание, синергетическая модель, Индустрия 5.0



ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ

15.12.2025



ДОРАБОТАНА

17.02.2026



ПРИНЯТА К ПУБЛИКАЦИИ

11.02.2026



КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов



ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-18-00978, <https://rscf.ru/project/25-18-00978/>.



ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Шкарупета Е.В. Моделирование интеллектуальной зрелости промышленных экосистем на основе данных с применением модифицированного метода анализа иерархий // E-Management. 2026. Т. 9, № 1. С. 82–101.



Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

© Шкарупета Е.В., 2026.

SCIENTIFIC ARTICLE

MODELING THE INTELLECTUAL MATURITY OF INDUSTRIAL ECOSYSTEMS USING DATA-DRIVEN APPROACHES AND THE MODIFIED ANALYTIC HIERARCHY PROCESS



Link to the article

Elena V. Shkarupeta^{1,2}

Dr. Sci. (Econ.), Leading Researcher¹, Prof. at the Digital and Sectoral Economics Department²

ORCID: 0000-0003-3644-4239

E-mail: 9056591561@mail.ru

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

ABSTRACT

The purpose of the study is to develop and empirically validate a data-driven managerial model for assessing the intellectual maturity of industrial ecosystems using the modified Analytic Hierarchy Process. The research hypothesis assumes that the intellectual maturity of industrial ecosystems is formed as a synergistic outcome of the interaction among strategic, process, organizational, data-related, architectural, and operational-innovation dimensions, rather than as the sum of their isolated characteristics.

The research methodological framework integrates the classical Saaty procedure with entropy-based weight objectification and an inter-dimensional interaction matrix, which makes it possible to account for nonlinear relationships and to reduce the subjectivity of expert judgments through the analysis of data variability.

The empirical validation has been conducted on an expert sample representing enterprises from the mechanical engineering, chemical-technological, pharmaceutical, and IT sectors. The average integrated level of intellectual maturity amounted to 3.6 on a 0–5 scale, corresponding to a transition from the Managed to the Established level. The highest levels of intellectual maturity have been observed in the strategic and architectural dimensions (3.9 and 3.8, respectively), forming the core of ecosystem maturity, while the process dimension has also demonstrated values close to the established level (3.7). At the same time, the organizational, data-related, and operational-innovation dimensions have exhibited lower maturity levels (3.4, 3.2, and 3.3, respectively).

The obtained study results confirm the applicability of the modified Analytic Hierarchy Process for the quantitative assessment and forecasting of the intellectual development of industrial ecosystems. The practical value of the study lies in the possibility of using the proposed model to design maturity-enhancement roadmaps, define priorities for digital and AI transformation, and support the transition from fragmented digitalization to sustainable data-driven governance.

KEYWORDS

Intellectual maturity, industrial ecosystem, analytic hierarchy process, data-driven management, data-driven governance, digital transformation, entropy weighting, synergistic model, Industry 5.0



RECEIVED

15.12.2025



REVISED

17.02.2026



ACCEPTED

11.02.2026



CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest



FINANCING

The research was funded by a grant from the Russian Science Foundation No. 25-18-00978, <https://rscf.ru/en/project/25-18-00978/>.



FOR CITATION

E.V. Shkarupeta (2026) Modeling the intellectual maturity of industrial ecosystems using data-driven approaches and the modified analytic hierarchy process. E-Management, vol. 9, no. 1, pp. 82–101. DOI: 10.26425/2658-3445-2026-9-1-82-101



This is an open access article under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

© Shkarupeta E.V., 2026.

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

Современная парадигма цифрового управления промышленностью характеризуется переходом от технологически ориентированных моделей к системам, основанным на данных и знаниях. Этот переход знаменует собой не просто цифровизацию процессов, а глубокое преобразование управленческих и производственных практик, в которых данные становятся ключевым стратегическим ресурсом. В условиях становления экономики данных, усиления процессов цифровой конвергенции и развития концепции Индустрии 5.0 именно способность промышленной экосистемы не только собирать, но и интерпретировать, интегрировать и использовать данные в интеллектуальных управленческих контурах определяет ее конкурентоспособность.

Переход к управлению на основе данных предполагает формирование новых институциональных способностей — способности понимать взаимосвязи между технологическими, организационными и стратегическими аспектами функционирования предприятий. Такие способности становятся центральным элементом интеллектуальной зрелости, под которой понимается комплексная характеристика готовности промышленной экосистемы к использованию цифровых и искусственно-интеллектуальных инструментов для поддержки решений, прогнозирования и адаптации к изменениям. Интеллектуальная зрелость отражает не только уровень цифровой инфраструктуры, но и степень развития организационной культуры, основанной на данных, механизмы интеграции знаний, а также уровень стратегического согласования целей участников экосистемы.

В рамках настоящего исследования интеллектуальная зрелость операционализируется через систему наблюдаемых и экспертно оцениваемых способностей, выступающих прокси-показателями институциональных, когнитивных и процессных характеристик промышленной экосистемы.

Понятие интеллектуальной зрелости промышленных экосистем, раскрытое ранее в трудах научного коллектива, в состав которого входит автор настоящего исследования, отражает степень их готовности к использованию цифровых и искусственно-интеллектуальных инструментов для принятия решений, координации взаимодействий и формирования инновационных сценариев развития [Глухов, 2025; Глухов, 2025]. Повышение интеллектуальной зрелости предполагает переход от фрагментарного цифрового внедрения к системному управлению на основе данных, где процессы планирования, мониторинга и прогнозирования опираются на количественные модели и алгоритмическую поддержку. Несмотря на наличие концептуальных и структурных моделей зрелости, в практике управления по-прежнему отсутствуют методически согласованные инструменты, позволяющие рассчитывать интегральную оценку интеллектуальной зрелости с учетом взаимозависимостей между ее ключевыми измерениями.

В этих условиях особое значение приобретает метод анализа иерархий (англ. Analytic Hierarchy Process, далее — АНР) и его модификации, обеспечивающие формализацию субъективных экспертных суждений и построение взвешенной структуры факторов, влияющих на интеллектуальную зрелость [Portner, 2025]. В настоящем исследовании АНР используется не в классической форме, а в модифицированном виде, расширенном процедурами гибридного взвешивания и учета межизмерительных взаимодействий.

Актуальность темы исследования определяется необходимостью формирования управленческой модели, основанной на данных, способной количественно оценивать и направлять развитие интеллектуальной зрелости промышленных экосистем.

Научная новизна исследования заключается не в применении АНР как такового, а в его адаптации к многоуровневой и взаимосвязанной структуре интеллектуальной зрелости промышленной экосистемы, что позволяет формировать обоснованные приоритеты стратегического управления в условиях перехода к экономике данных и Индустрии 5.0.

Практическая значимость исследования заключается в том, что разработанная модель не подменяет управленческие решения, а формирует аналитическую основу для их приоритизации и обоснования в контуре стратегического управления цифровой трансформацией, позволяющую промышленным экосистемам переходить от фрагментарных цифровых инициатив к системной архитектуре data-driven управления. Применение модифицированного метода анализа иерархий обеспечивает возможность количественного выявления дисфункций и структурных разрывов в стратегических, процессных, организационных, архитектурных, информационных и инновационных измерениях, что создает основу для построения приоритизированных дорожных карт развития. Внедрение предлагаемого подхода позволяет повысить управляемость цифровой трансформации, усилить согласованность управленческих решений, ускорить формирование интеллектуальных контуров и обеспечить

устойчивый переход к модели промышленной экосистемы, способной функционировать в условиях экономики данных и Индустрии 5.0.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ / LITERATURE REVIEW

Современные исследования цифрового управления и промышленной трансформации позволяют выделить несколько устойчивых направлений:

- модели цифровой и интеллектуальной зрелости на основе данных и аналитических иерархий;
- использование искусственного интеллекта (далее — ИИ) и цифровых технологий для устойчивого и интеллектуального менеджмента;
- развитие и управление промышленными экосистемами в цифровой экономике;
- моделирование, симуляция и поддержка управленческих решений на основе данных.

Формирование управленческих систем, основанных на данных, требует методической интеграции процессов сбора, интерпретации и использования информации. L. Portner и соавторы представили модель зрелости управления данными (англ. Data Management Maturity Model), включающую 6 процессных измерений — стратегию, процессы, организацию, данные, ИТ-архитектуру (ИТ — информационные технологии) и инновации [Portner, 2025]. В работе использован АНР для определения весов факторов, влияющих на уровень зрелости, что делает данный подход применимым к исследованию интеллектуальной зрелости промышленных экосистем.

Аналитические подходы на основе АНР также активно развиваются в прикладных сферах. Так, P. Yadav и соавторы предложили АНР-модель для выбора технологий апгрейда биогаза, продемонстрировав эффективность метода в условиях множественных критериев принятия решений [Yadav, 2022]. Коллектив экспертов во главе с С. Guo разработал индекс развития цифровой экономики, использующий улучшенную иерархическую DEA-модель (англ. Data Envelopment Analysis — «анализ среды функционирования»), что подтверждает возможности сочетания АНР и DEA в оценке интеллектуальной зрелости [Guo, 2024].

Современные исследования демонстрируют активное внедрение ИИ-технологий в управленческие и инновационные процессы. В.В. Gupta и соавторы показали, что ИИ способствует устойчивому предпринимательству, повышая эффективность принятия решений и адаптивность организаций [Gupta, 2023]. В.Н. Родионова и И.С. Антонов применили многокритериальный анализ для оценки цифровых решений, повышающих конкурентоспособность предприятий в условиях Индустрии 5.0 [Родионова, 2024]. Д.Е. Морковкин и соавторы предложили алгоритмическую архитектуру для принятия управленческих решений на основе ИИ и больших данных, демонстрирующую переход от автоматизации к интеллектуальному управлению [Морковкин, 2025].

Исследования отечественных авторов акцентируют внимание на цифровом единстве и платформенных механизмах развития промышленных экосистем. Ю.А. Ковальчук и И.М. Степнов определили концепцию управления промышленными экосистемами в едином цифровом пространстве, связывая вопросы координации, данных и инноваций [Ковальчук, 2022]. Л.Н. Устинова, А.М. Макаров и В.В. Бритвина представили модель цифровой трансформации инновационной экосистемы, основанную на технологической платформе [Устинова, 2022]. И.В. Смольянинова и соавторы показали, что платформенные решения на основе данных формируют основу для управления развитием инновационно-ориентированных экосистем предприятий [Смольянинова, 2025]. Особое внимание уделяется аспекту устойчивости. А.В. Юдин вместе с коллегами обосновал необходимость моделей управления устойчивым развитием промышленных экосистем, адаптирующихся к динамично меняющейся среде [Юдин, 2025].

С.В. Пономарева и И.Р. Винокур предложили имитационную модель оценки экономической эффективности систем управления знаниями и бизнес-процессами, отражающую взаимосвязь когнитивных и производственных факторов [Пономарева, 2025]. А.Е. Миллер и Л.М. Давиденко разработали управленческий механизм организации интеллектуальной инфраструктуры технологического развития предприятий [Миллер, 2022]. П.В. Трифонов обосновал системные подходы к использованию цифровых моделей для инновационного развития и повышения эффективности промышленных предприятий [Трифонов, 2025]. В.А. Васяйчева представила карту технологии управления инновационным проектированием, направленную на синтез организационно-цифровых механизмов [Васяйчева, 2022]. С.Л. Иголкин вместе с коллегами акцентировал внимание на управлении инновационно-цифровыми трансформациями промышленных предприятий в контексте экономики данных и венчурной акселерации [Иголкин, 2025]. Е.А. Вишнягова и И.А. Соловьева выделили структурные характеристики промышленных экосистем и их внутренние взаимосвязи [Вишнягова, 2024].

Х. Ли и соавторы раскрыли механизмы инноваций бизнес-моделей, управляемых цифровыми платформами, в устойчивом развитии [Li, 2023].

Обобщая представленные направления, мы можем отметить, что научные исследования сходятся в признании необходимости формирования многомерных моделей управления, способных фиксировать и объяснять когнитивные, организационные и технологические аспекты интеллектуальной зрелости. Однако существующие модели в значительной степени ориентированы на оценку отдельных компетенций и не учитывают сложные взаимосвязи между процессными, стратегическими, архитектурными и инновационными контурами развития промышленной экосистемы. Данное обстоятельство формирует методологический разрыв, который требует разработки интегрированных моделей интеллектуальной зрелости, основанных на данных, включающих механизмы синергетического влияния между измерениями, а также адаптацию классических инструментов многокритериальной оценки, таких как метод анализа иерархий, к структуре экосистем цифровой экономики.

Проведенный обзор литературы показывает, что интеграция методов иерархического анализа и моделей зрелости обеспечивает методологическую основу для оценки интеллектуальной зрелости промышленных экосистем, а использование ИИ-технологий и данных создает предпосылки для построения адаптивных, устойчивых и управляемых экосистем нового поколения.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ / RESEARCH METHODOLOGY

Методологическая основа исследования строится на стыке концепции организаций, управляемых данными, и подходов к построению моделей зрелости, разработанных для цифровой трансформации и управления данными. В качестве исходной посылки принимается положение о том, что организация становится управляемой на основе данных не только за счет наличия цифровых технологий и инфраструктуры, но и благодаря институционализированной культуре работы с данными, стратегической встраиваемости данных в контуры принятия решений и наличию устойчивых процессов аналитики и инноваций. Как показано в модели ключевых элементов организации (цифровая трансформация, наука о данных, бизнес-модель, основанная на данных, инновации, управляемые данными, аналитика данных) у коллектива ученых в главе с М.Ж. Нупперц и их последователей, именно интеграция этих компонентов формирует организационную способность к использованию данных в качестве стратегического ресурса [Nupperz, 2021].

В терминах настоящего исследования это означает, что интеллектуальная зрелость промышленной экосистемы не может быть измерена по одному технологическому параметру — она должна описываться как многоуровневая конструкция, включающая стратегию, процессы, организацию, данные, архитектуру и блок операций/инноваций, то есть структуру, близкую к той, что предложена в Data Management Maturity Model и ее модификации для перехода к Индустрии 5.0 [Portner, 2025]. За основу взята логика построения зрелостных моделей по Т. Де Бруйн, включающая 6 этапов: определение области применения, проектирование структуры уровней зрелости, наполнение содержанием, тестирование, развертывание и поддержание [De Bruin, 2005]. Такой подход обеспечивает перенос методологии управления данными в контекст стратегического управления интеллектуальной зрелостью промышленной экосистемы при сохранении воспроизводимости и сопоставимости результатов.

Ключевым элементом методологической конструкции выступает перевод модели в измеримый формат с помощью АНР, расширенного за счет гибридных и нелинейных процедур взвешивания. Это решение обусловлено выявленным в обзорах Л. Портнера ограничением большинства зрелостных моделей: они задают структуру уровней и набор способностей, но не содержат прозрачной процедуры вычисления интегрального показателя и учета взаимозависимостей между измерениями [Portner, 2025].

На первом уровне формируется иерархия «цель — критерии — показатели», где целью является интегральная оценка интеллектуальной зрелости промышленной экосистемы, критериями — 6 процессных измерений, а показателями — конкретные способности внутри каждого измерения. Для каждого уровня строится матрица попарных сравнений с элементами:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, a_{ii} = 1 \quad (1)$$

по девятибалльной шкале Саати. На ее основе вычисляется собственный вектор приоритетов:

$$\tilde{W}_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n}, w_i = \frac{\tilde{w}_i}{\sum_{k=1}^n \tilde{w}_k} \quad (2)$$

и проводится контроль согласованности:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}, CR = \frac{CI}{RI} \leq 0,1, \quad (3)$$

где CI — индекс согласованности матрицы попарных сравнений, характеризующий степень логической непротиворечивости экспертных суждений, λ_{\max} — максимальное собственное значение матрицы попарных сравнений, отражающее фактическую структуру предпочтений экспертов, n — размерность матрицы, соответствующая числу сравниваемых элементов, CR — отношение согласованности, используемое для проверки допустимости уровня рассогласования экспертных оценок, RI — случайный индекс согласованности, принимающий табличные значения в зависимости от размерности матрицы.

При превышении порога оценки корректируются экспертно. Таким образом, на этом шаге использовалась классическая процедура Саати для расчета экспертных весов.

Далее классическая модель расширяется гибридным взвешиванием, в котором экспертные веса из АНР w_d^A комбинируются с данными энтропийной объективизации w_d^E , рассчитанными на основе вариации экспертных оценок по соответствующим измерениям интеллектуальной зрелости. Для каждого измерения:

$$p_{dn} = \frac{x_{dn}}{\sum_{n=1}^N x_{dn}}, e_d = -k \sum_{n=1}^N p_{dn} \ln p_{dn}, k = \frac{1}{\ln N}, w_d^E = \frac{1 - e_d}{\sum_{j=1}^6 (1 - e_j)}, \quad (4)$$

где p_{dn} — нормированная доля значения показателя, используемая для расчета информационной энтропии, N — общее число экспертов в выборке (в нашем случае $N = 20$), x_{dn} — значение показателя интеллектуальной зрелости для d -го измерения у n -го эксперта, e_d — энтропийная мера неопределенности распределения показателей по d -му измерению, k — нормирующий коэффициент, обеспечивающий приведение энтропии к интервалу $[0; 1]$, w_d^E — энтропийный вес d -го измерения, отражающий его объективную дифференцирующую способность.

В рамках настоящего исследования энтропийная объективизация интерпретируется как инструмент межсубъективной стабилизации весов, позволяющий учитывать неоднородность и вариативность экспертных оценок как прокси-показатель структурной дифференциации измерений интеллектуальной зрелости в условиях ограниченной доступности сопоставимых операционных данных.

Интегральный вес определяется как выпуклая комбинация, что обеспечивает баланс между субъективными экспертными и объективными приоритетами в области управления данными:

$$w_d = \alpha w_d^A + (1 - \alpha) w_d^E, \alpha \in [0, 1], \quad (5)$$

где w_d — итоговый интегральный вес d -го процессного измерения интеллектуальной зрелости, w_d^A — экспертный вес, полученный на основе процедуры анализа иерархий, α — коэффициент выпуклой комбинации, задающий относительную значимость экспертной и эмпирической компонент взвешивания и принимающий значения в интервале от 0 до 1.

Внутри каждого измерения аналогично формируются веса способностей:

$$v_j^{(d)} = \beta v_j^{A,(d)} + (1 - \beta) v_j^{E,(d)}. \quad (6)$$

Уровень зрелости отдельного измерения вычисляется как:

$$M_d = \sum_{j=1}^{m_d} v_j^{(d)} L_j^{(d)}, \quad (7)$$

где $L_j^{(d)} \in \{0, \dots, 5\}$ — оценка способности L по шкале ISO/IEC 33002 от незаконченной (англ. incomplete) до инновационной (англ. innovating).

Агрегация индивидуальных экспертных оценок осуществляется в логике экосистемного уровня анализа, при котором согласованные представления экспертов, представляющих различные предприятия и отрасли, рассматриваются как репрезентативное отражение институциональных и процессных характеристик промышленной экосистемы в целом.

Для того чтобы устранить допущение независимости измерений, используется матрица взаимодействий $R = (r_{dk})_{(6 \times 6)}$, отражающая эмпирические или экспертные корреляции между измерениями ($r_{dk} = \rho_{dk}$ при $d \neq k$, $r_{dd} = 1$). Тогда интегральная оценка интеллектуальной зрелости принимает вид квадратичной формы:

$$ИМ = \frac{M^T R w}{1^T R w}, \quad (8)$$

где $M = (M_1, \dots, M_6)^T$, $w = (w_1, \dots, w_6)^T$, 1 — вектор единиц.

Такая форма отражает эффект синергии: если стратегическое и архитектурное измерения высоко взаимосвязаны, их совместное развитие дает нелинейный прирост интегральной зрелости.

Матрица межизмерительных взаимодействий R в рамках апробации сформирована на эмпирической основе: для каждой пары измерений d, k элементы r_{dk} задавались как коэффициенты ранговой корреляции Спирмена ρ_{dk} , вычисленные по массиву агрегированных индивидуальных оценок экспертов ($N = 20$) по соответствующим измерениям (при $r_{dd} = 1$), после чего матрица использовалась в формуле (8) как матрица сопряженностей, фиксирующая силу согласованного соизменения уровней зрелости между контурами. Матрица межизмерительных взаимодействий не претендует на строгую каузальную интерпретацию, а используется как инструмент аналитического учета устойчивых эмпирических и экспертно выявленных сопряженностей между измерениями, обеспечивая корректное моделирование эффектов взаимного усиления и подавления в интегральной оценке зрелости.

Для дальнейшей интерпретации показатель нормируется к шкале 0–5:

$$ИМ = 5 \cdot \frac{ИМ - ИМ_{min}}{ИМ_{max} - ИМ_{min}}. \quad (9)$$

Анализ чувствительности проводится через аппроксимацию приращения при изменении способности $\Delta ИМ$ на :

$$\Delta ИМ \approx \frac{r_{dd} w_d}{1^T R w} v_j^{(d)} \Delta L + \sum_{k \neq d} \frac{r_{kd} w_k}{1^T R w} v_j^{(d)} \Delta L. \quad (10)$$

Данная итерация позволяет количественно оценить какие способности обеспечивают наибольший маржинальный прирост интегральной зрелости и должны быть приоритетными в стратегической дорожной карте.

В расширенной версии методологический подход приобретает дополнительную объяснительную мощь, опираясь на признание того, что интеллектуальная зрелость промышленной экосистемы представляет собой сложную многокомпонентную конструкцию, в которой стратегические, процессные, организационные, архитектурные, инновационные и данные-связанные элементы образуют взаимозависимое целое. В отличие от традиционных зрелостных моделей, ориентированных на линейную оценку отдельных компетенций, предлагаемый подход строится как интегративная структура, объединяющая концепцию data-driven organization, логику многоуровневых зрелостных моделей и аппарат нелинейной многокритериальной агрегации.

Такое методологическое решение позволяет уйти от избыточного технологического редукционизма, характерного для значительной части работ по зрелости, и перейти к оцениванию экосистем как социально-технических организмов, в которых цифровая архитектура, культура данных, управленческие практики и инновационный потенциал развиваются асинхронно и оказывают взаимное влияние. Применение модифицированного АНР играет центральную роль в этой конструкции, так как обеспечивает формальное представление субъективных экспертных оценок, позволяет учитывать степень согласованности мнений и вводит механизм объективизации на основе энтропийного анализа, что делает модель применимой в условиях высокой гетерогенности промышленных акторов.

Дополнительное значение приобретает включение матрицы межизмерительных взаимодействий, которая трансформирует классический АНР из линейной модели в синергетическую, фиксируя эффекты взаимного усиления или подавления между стратегией, организацией, архитектурой и другими измерениями. Это принципиально важно для оценки интеллектуальной зрелости экосистем, поскольку эмпирические исследования убедительно показывают, что именно согласованность стратегического, архитектурного и организационного слоев определяет способность экосистемы использовать данные как управляющий ресурс и генерировать инновации.

Разработанная методология также обеспечивает воспроизводимость и интерпретируемость результатов, что делает ее применимой не только как исследовательский инструмент, но и как практический механизм управленческой диагностики. Использование комбинированных весов, учитывающих и экспертную, и статистическую компоненту, устраняет дисбаланс между субъективной оценкой зрелости и фактическими поведенческими паттернами предприятий. Механизм нормирования и анализа чувствительности, закреплённый в финальных формулах, обеспечивает возможность построения приоритизированных управленческих дорожных карт, определяя какие именно способности и измерения могут стать катализаторами наиболее быстрого роста зрелости.

Тем самым методология формирует концептуально и инструментально согласованную основу для анализа и развития интеллектуальной зрелости промышленной экосистемы в условиях экономики данных. Она объединяет системное видение цифровой трансформации, формализованный аппарат гибридного анализа и эмпирическую проверяемость, создавая полноценный фундамент для исследований, управленческой аналитики и практического стратегирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ / STUDY RESULTS

Для тестирования валидности и применимости разработанной модели интеллектуальной зрелости промышленной экосистемы, основанной на данных, проведена апробация, включавшая экспертное анкетирование и аналитическую обработку результатов с применением модифицированного АНР и корреляционного анализа. Целью эмпирической проверки стало выявление ключевых проблемных измерений и установление взаимосвязей между стратегией, процессами, организацией, данными, архитектурой и операционно-инновационным блоком.

Объектом апробации выступила промышленная экосистема высокотехнологичных и обрабатывающих отраслей (машиностроительный, химико-технологический, фармацевтический и ИТ-секторы), представленная экспертной выборкой специалистов предприятий с различным уровнем цифровой трансформации и зрелости управления данными. Выбор именно этой группы обусловлен ее репрезентативностью для анализа интеллектуальной зрелости: указанные отрасли являются ядром индустриального перехода к Индустрии 5.0 и демонстрируют широкий диапазон зрелостных состояний, от локальной автоматизации процессов до системного внедрения ИИ и платформенных решений.

Исследование реализовано в форме опроса экспертов — консультантов и аналитиков в области управления данными и цифровой трансформации промышленности. В выборку вошли 20 специалистов, представляющих предприятия машиностроительного, химико-технологического, фармацевтического и ИТ-секторов. Опрос проводился с использованием анкетного инструментария, включавшего 34 вопроса, сгруппированных по 6 измерениям модели (табл. 1–6). Для обеспечения сопоставимости данных использовались шкалы типа «Да/Нет», шкала Лайкерта от 1 до 7, а также открытые вопросы для получения качественных комментариев. Такой формат позволил сочетать количественную оценку зрелости с содержательными интерпретациями.

Таблица 1. Измерение D1 — Стратегия

Table 1. Dimension D1 — Strategy

Вопрос	Тип шкалы	Диапазон оценки	Интерпретация
Разработана и утверждена единая дата-/цифровая/ИИ-стратегия	Лайкерт 1–7	1 — отсутствует, 7 — встроена в стратегическое управление	Стратегия и план действий в области данных
Стратегия согласована с бизнес-целями и бюджетным циклом	Лайкерт 1–7	1 — не согласована, 7 — интегрирована	Согласование бизнеса и ИТ
Элементы культуры данных закреплены в управленческих документах	Лайкерт 1–7	1 — отсутствуют, 7 — институционализированы	Культурная совместимость стратегии

Окончание табл. 1

Вопрос	Тип шкалы	Диапазон оценки	Интерпретация
KPI и мониторинг реализации стратегии определены	Лайкерт 1–7	1 — нет KPI, 7 — KPI действуют и пересматриваются	Система KPI на основе данных

Составлено автором по материалам исследования / *Compiled by the author on the materials of the study***Таблица 2.** Измерение D2 — Процессы

Table 2. Measurement D2 — Processes

Вопрос	Тип шкалы	Диапазон	Интерпретация
Формализованы процессы работы с данными	Лайкерт 1–7	1 — отсутствуют, 7 — регламентированы	Управление жизненным циклом данных
Процессы автоматизированы и интегрированы	Лайкерт 1–7	1 — ручные, 7 — end-to-end	Автоматизация процессов
Проводится регулярная миграция и очистка данных	Лайкерт 1–7	1 — нет, 7 — циклично	Очистка и миграция данных
Внедрен процесс непрерывного улучшения	Лайкерт 1–7	1 — нет, 7 — действует	Непрерывное совершенствование

Составлено автором по материалам исследования / *Compiled by the author on the materials of the study***Таблица 3.** Измерение D3 — Организация

Table 3. Dimension D3 — Organization

Вопрос	Тип шкалы	Диапазон	Интерпретация
Определены роли владельца и управляющего данными	Лайкерт 1–7	1 — нет, 7 — действуют везде	Роли и обязанности
Функционирует комитет по управлению данными	Лайкерт 1–7	1 — нет, 7 — заседает регулярно	Комитет по управлению данными
Сотрудники проходят обучение по аналитике	Лайкерт 1–7	1 — нет, 7 — ежегодно	Грамотность в области данных
Обеспечено внутреннее спонсорство и коммуникация	Лайкерт 1–7	1 — нет, 7 — формализовано	Коммуникация и спонсорство

Составлено автором по материалам исследования / *Compiled by the author on the materials of the study***Таблица 4.** Измерение D4 — Данные

Table 4. Measurement D4 — Data

Вопрос	Тип шкалы	Диапазон	Интерпретация
Существует единая модель и словарь данных	Лайкерт 1–7	1 — нет, 7 — корпоративный репозиторий	Словарь данных
Данные визуализируются и доступны пользователям	Лайкерт 1–7	1 — изолированные системы, 7 — BI-панели	Визуализация данных
Решения принимаются на основе достоверных данных	Лайкерт 1–7	1 — по интуиции, 7 — по аналитике	Решения на основе данных
Внедрена система контроля качества данных	Лайкерт 1–7	1 — нет, 7 — действует	Управление качеством данных

Составлено автором по материалам исследования / *Compiled by the author on the materials of the study***Таблица 5.** Измерение D5 — Архитектура

Table 5. Dimension D5 — Architecture

Вопрос	Тип шкалы	Диапазон	Интерпретация
Определена архитектура данных и приложений	Лайкерт 1–7	1 — нет, 7 — согласована	Архитектура системы
Обеспечена интеграция ключевых ИТ-систем	Лайкерт 1–7	1 — изолированы, 7 — интегрированы	Интеграция

Окончание табл. 5

Вопрос	Тип шкалы	Диапазон	Интерпретация
Используются средства управления качеством данных и потока операций	Лайкерт 1–7	1 — нет, 7 — автоматизированы	Инструменты мониторинга
Внедряются инновационные технологии (ИИ, роботизированная автоматизация процессов, Интернет вещей)	Лайкерт 1–7	1 — нет, 7 — действуют	Инновационные технологии

Составлено автором по материалам исследования / *Compiled by the author on the materials of the study***Таблица 6.** Измерение D6 — Операции, поддержка и инновации

Table 6. Measurement D6 — Operations, support and innovation

Вопрос	Тип шкалы	Диапазон	Интерпретация
Разработана ИИ-/инновационная дорожная карта	Лайкерт 1–7	1 — нет, 7 — утверждена	Дорожная карта инноваций
Реализуются ИИ-/ML-проекты	Лайкерт 1–7	1 — нет, 7 — активно внедряются	Примеры использования ИИ
Есть системная поддержка пользователей	Лайкерт 1–7	1 — нет, 7 — работает соглашение об уровне сервиса	Поддержка и обслуживание
Инновации внедряются в бизнес-модели	Лайкерт 1–7	1 — нет, 7 — масштабируются	Бизнес-инновации

Составлено автором по материалам исследования / *Compiled by the author on the materials of the study*

На первом этапе обобщены характеристики организаций. В отраслевой структуре выборки доминировали предприятия автомобильного и машиностроительного профиля (40 %), а также представители химико-технологического, фармацевтического, ИТ- и смежных высокотехнологичных секторов, что отражает межотраслевой характер анализируемой промышленной экосистемы.

Далее осуществлялся расчет полных матриц попарных сравнений по Саати для всех 6 измерений модели. Табл. 7 иллюстрирует примеры формулировок вопросов, используемых при установлении экспертных предпочтений.

Таблица 7. Вопросы, используемые при установлении экспертных предпочтений

Table 7. Questions used in establishing expert preferences

Пара измерений	Вопрос эксперту	Шкала (1–9 / 1/9)
Стратегия — Процессы	Что важнее для повышения зрелости?	1–9
Стратегия — Организация	Что оказывает большее влияние?	1–9
Стратегия — Данные	Что критичнее для устойчивости?	1–9
Процессы — Архитектура	Что более значимо для интеграции?	1–9
Архитектура — Инновации	Что важнее для прогресса?	1–9

Составлено автором по материалам исследования / *Compiled by the author on the materials of the study*

Проверка согласованности матриц показала, что рассчитанные значения отношения согласованности CR превышали порог 0,1, что потребовало экспертной корректировки матриц попарных сравнений. После корректировки матриц и последующей энтропийной стабилизации весовой структуры итоговые интегральные веса измерений, полученные по формуле (5) при $\alpha = 0,75$, распределились следующим образом: стратегия — 0,21, процессы — 0,19, организация — 0,18, данные — 0,15, архитектура — 0,17, операции и инновации — 0,10.

Для интерпретации результатов и формирования управленческих сценариев применен набор критериев и альтернатив (табл. 8).

Таблица 8. Критерии и альтернативы управленческого выбора

Table 8. Criteria and alternatives for managerial choice

Альтернатива	Индекс интеллектуальной зрелости (ИИМ)	Трудоемкость	Горизонт эффекта	Влияние на другие измерения	Приоритет
Усиление стратегии	Высокий	Средний	Долгосрочный	Обеспечивает структурное выравнивание всей системы целей, повышает интеграцию между стратегией, процессами и архитектурой. Создает синергетический эффект, усиливая весовые коэффициенты и повышая согласованность всей экосистемы. Стратегические изменения приводят к росту зрелости большинства измерений в силу их высокой коррелированности с D1 ($\rho = 0,61-0,74$)	1
Усиление организации	Высокий	Высокий	Среднесрочный	Укрепляет культуру данных, формирует устойчивые институты (комитеты, роли, обучение). Является «узким местом» по результатам апробации, поэтому его развитие значительно повышает ИИМ за счет роста согласованности и снижения вариативности по шкале Лайкерта. Влияет на процессы, данные и инновации, устраняя институциональные барьеры	2
Усиление архитектуры	Средний	Высокий	Долгосрочный	Повышает технологическую интеграцию, улучшает стандарты DQM (англ. Data Quality Management), обеспечивает реализацию ИИ-проектов или проектов на основе Интернета вещей. Усиливает устойчивость данных и процессов, формируя технический фундамент для перехода к data-driven управлению. Дает синергетический эффект в сочетании со стратегией, но требует больших ресурсов и времени	3
Развитие данных	Средний	Низкий	Краткосрочный	Быстро увеличивает доступность и качество данных, повышает визуализацию, сокращает ошибки и повышает надежность решений. Влияет на процессы и архитектуру, но без изменений в организации и стратегии эффект ограничен. Обеспечивает наиболее быстрый прирост локальной зрелости, но умеренный прирост интегрального индекса	4
Развитие инноваций	Низкий	Средний	Долгосрочный	Мало влияет на системную зрелость при низкой развитости процессов, данных и организации. Эффект проявляется преимущественно при высоких значениях стратегического и архитектурного измерений. Наличие пилотных ИИ-/ML-проектов не приводит к росту ИИМ без институциональной поддержки и зрелой архитектуры	5

Составлено автором по материалам исследования / Compiled by the author on the materials of the study

Для оценки взаимозависимостей между процессными измерениями проведен корреляционный анализ по коэффициенту Спирмена (ρ), а также использованы контрольные вопросы (табл. 9).

Таблица 9. Контрольные вопросы для корреляционного анализа

Table 9. Control questions for correlation analysis

Вопрос	Шкала	Интерпретация
Организация активно инвестирует в цифровизацию	1–7	Предполагается положительная корреляция с измерением «Операции и инновации», поскольку интенсивность цифровых инвестиций отражает готовность предприятия к внедрению ИИ-/ML-проектов, расширению цифровой инфраструктуры и развитию инновационных практик. Высокие значения по вопросу усиливают влияние инвестиционной активности на способность экосистемы к технологическому обновлению
Разрабатываются новые бизнес-модели на основе данных	1–7	Связано с измерением «Архитектура», так как создание data-driven бизнес-моделей требует развитой ИТ-инфраструктуры, устойчивых интеграций и доступности данных в real-time. Предполагается сильная положительная корреляция: зрелая архитектура повышает способность формировать цифровые продуктовые и сервисные модели
Решения принимаются интуитивно (обратная шкала)	1–7	Ожидается выраженная отрицательная корреляция со всеми измерениями, но наиболее сильная — с «Данными» и «Процессами». Преобладание интуитивного принятия решений указывает на низкую зрелость контуров аналитики, слабую системность процессов и отсутствие устойчивых механизмов использования данных в стратегическом цикле управления
Сотрудники обучаются аналитике и управлению данными	1–7	Предполагается положительная корреляция с измерением «Организация». Регулярное обучение отражает уровень сформированности культуры данных, наличие компетенций и способность персонала интегрировать аналитические инструменты в операционную деятельность. Высокие значения усиливают институциональную устойчивость и уменьшают когнитивный разрыв
Проводится оценка экономического эффекта цифровых инвестиций	1–7	Связано со стратегическим измерением «Стратегия», так как системная оценка ROI (англ. Return on Investment — «окупаемость инвестиций») цифровизации является маркером зрелого стратегического управления, интеграции данных в бюджетный контур и способности использовать аналитические модели для обоснования решений. Ожидается положительная корреляция как индикатор стратегической осознанности и управляемости цифровой трансформации

Составлено автором по материалам исследования / *Compiled by the author on the materials of the study*

Дальнейший анализ показал наличие сильных положительных корреляций между «Стратегией» и «Процессами» ($\rho = 0,61$), «Стратегией» и «Организацией» ($\rho = 0,65$), а также «Стратегией» и «Архитектурой» ($\rho = 0,74$). Слабые корреляции зафиксированы между измерением «Данные» и остальными ($\rho < 0,3$).

После расчета весов и проверки согласованности матриц проведена количественная оценка уровней интеллектуальной зрелости по каждому процессному измерению. Расчеты осуществлялись в соответствии с модифицированной формой метода АНР, в которой интегрируются экспертные веса w_d^A и энтропийно-нормированные веса w_d^E по формуле (5), где $\alpha = 0,75$ отражает приоритет экспертного мнения при сохранении объективной устойчивости распределений.

Оценка уровней зрелости выполнялась по шкале ISO/IEC 33002 (0–5), адаптированной под Индустрию 5.0. Переход от шкалы Лайкерта 1–7 к шкале ISO/IEC 33002 0–5 осуществлялся линейным мэппингом:

$$L_{0-5} = \frac{x_{1-7} - 1}{6} \cdot 5, \quad (11)$$

где x_{1-7} — значение показателя, полученное по шкале Лайкерта от 1 до 7, L_{0-5} — нормированное значение уровня зрелости в интервале [0; 5].

Полученные значения представлены в табл. 10.

Таблица 10. Уровни зрелости по процессным измерениям

Table 10. Maturity levels based on process measurements

Измерение	Вес (w _p)	Средний уровень зрелости (0–5)	Стандартное отклонение	Уровень	Интерпретация
Стратегия	0,21	3,9	0,4	Established (установленный)	Стратегический контур управления данными институционализирован и встроены в корпоративное управление, обеспечивая согласование целей цифровой визии с бизнес-приоритетами, бюджетным циклом и KPI. Наблюдаются устойчивая практическая интеграция принципов data-driven в стратегическое планирование, регулярный пересмотр стратегических ориентиров и закрепление культуры данных в нормативно-управленческих документах. Стратегические решения в значительной степени опираются на аналитические модели, однако потенциал прогнозных и адаптивных контуров управления реализован неполностью
Процессы	0,19	3,7	0,5	Managed (управляемый) → Established (установленный)	Процессы управления данными формализованы, регламентированы и частично автоматизированы. Значительная часть операций охватывает циклы end-to-end, что обеспечивает воспроизводимость и контроль качества данных. Наблюдается наличие механизмов регулярной очистки, миграции и обновления данных, а также элементов процессного контроля и улучшения. Вместе с тем автоматизация не является повсеместной, а контуры непрерывного совершенствования работают неоднородно, что свидетельствует о переходе к установленному уровню зрелости, но с ограниченной глубиной
Организация	0,18	3,4	0,6	Managed (управляемый)	Определены роли владельцев данных, функционируют комитеты и координационные органы, однако культура работы с данными находится в стадии становления. Обучение и развитие компетенций проводится нерегулярно, вовлеченность сотрудников ограничена, а спонсорство со стороны руководства не всегда сопровождается структурными изменениями. Существуют элементы организационной поддержки, но они фрагментарны, что ограничивает способность экосистемы институционализировать управление данными на стратегическом уровне

Окончание табл. 10

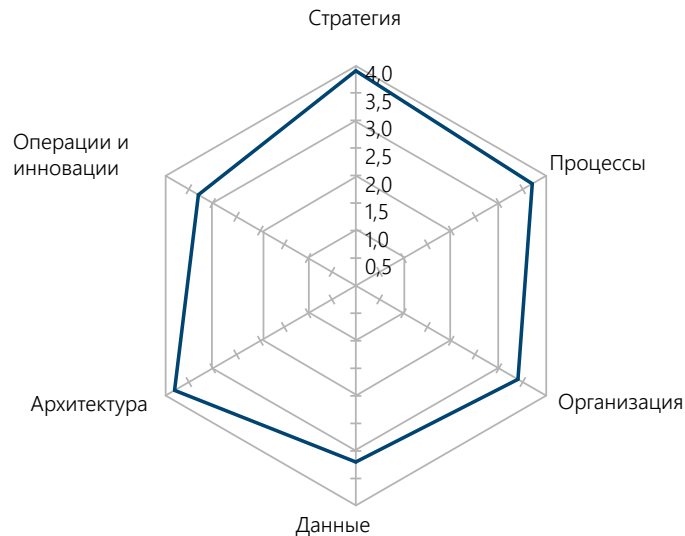
Измерение	Вес (w_j)	Средний уровень зрелости (0–5)	Стандартное отклонение	Уровень	Интерпретация
Данные	0,15	3,2	0,5	Performed (выполняемый) → Managed (управляемый)	Сформированы базовые механизмы работы с данными: существуют словари данных, принципы визуализации, инструменты аналитической поддержки. Однако управление качеством данных внедрено неполностью, а архитектура данных развита неравномерно. Аналитические решения используются точечно и зависят от инициатив отдельных подразделений. Данные применяются для оперативных решений, но редко – для стратегической аналитики и прогнозирования, что показывает высокую потенциальную, но частично реализованную зрелость
Архитектура	0,17	3,8	0,4	Established (установленный)	ИТ-архитектура характеризуется высокой степенью интеграции систем, наличием стандартов DQM (англ. Data Quality Management) и развитой инфраструктурой хранения и обработки данных. Используются автоматизированные средства мониторинга качества данных и рабочих процессов. Архитектура технологически готова к внедрению ИИ, Интернета вещей и других интеллектуальных решений. Взаимосвязи между приложениями и корпоративными платформами формируют устойчивый архитектурный фундамент, создающий предпосылки для масштабирования data-driven управления
Операции и инновации	0,10	3,3	0,7	Managed (управляемый)	В экосистеме реализуются пилотные ИИ/ML-проекты (в сфере ИИ и машинного обучения) и начальные элементы инновационной дорожной карты, однако масштабирование инноваций ограничено. Поддержка пользователей функционирует на уровне базового соглашения об уровне обслуживания (SLA); механизмы сопровождения, внедрения и оценки эффектов инноваций развиты недостаточно. Наблюдается наличие инициатив по внедрению инноваций в бизнес-процессы, но отсутствует системная интеграция инновационных решений в операционные контуры, что приводит к фрагментарному характеру инновационного развития

Составлено автором по материалам исследования / Compiled by the author on the materials of the study

Для расчета интегрального индекса интеллектуальной зрелости использовалась обобщенная формула (8) с учетом матрицы межизмерительных взаимодействий R , где M — вектор уровней зрелости по измерениям, а R — матрица межизмерительных корреляций.

Значение индекса составило $IIM = 3,6$ при теоретическом максимальном значении 5,0 по шкале 0–5. Данное значение соответствует переходу от уровня Managed (управляемого) к Established (установленному), что указывает на формирование устойчивой архитектурно-технологической зрелости при отставании организационно-культурных компонентов.

Графически профиль зрелости представлен на рисунке как сбалансированный контур с выраженным стратегическим ядром (стратегия, процессы, архитектура) и «институциональной лаговой зоной» (организация, данные, инновации).



Составлено автором по материалам исследования / Compiled by the author on the materials of the study

Рисунок. Радар-диаграмма интеллектуальной зрелости промышленной экосистемы

Figure. Radar chart of the intellectual maturity of the industrial ecosystem

Результаты апробации подтвердили, что предложенный модифицированный АНР обеспечивает воспроизводимую количественную оценку уровней интеллектуальной зрелости и выявляет структурную асимметрию развития промышленной экосистемы. Интегральный уровень 3,6 свидетельствует о достижении стадии управляемой зрелости, а весовые соотношения и корреляции подтверждают наличие стратегического ядра зрелости, формируемого сочетанием стратегического, процессного и архитектурного измерений, демонстрирующих наивысшие уровни зрелости и наиболее сильные взаимосвязи. Модель показала способность отражать не только текущее состояние, но и направления дальнейшего роста, что подтверждает ее пригодность для практического применения в контуре стратегического управления и оценки готовности экосистем к человекоцентричной парадигме Индустрии 5.0.

В отличие от классического АНР предложенная методология реализует многоуровневую архитектуру оценивания, направленную на выявление не только приоритетов, но и взаимозависимостей и синергетических эффектов между измерениями зрелости. В модифицированном АНР совмещены экспертные и энтропийно-нормированные веса. Такое решение позволило учесть вариацию ответов и минимизировать субъективные искажения. Кроме того, введена матрица межизмерительных взаимодействий R , что обеспечивает учет нелинейных эффектов и отражает фактические взаимосвязи между стратегией, процессами, организацией и архитектурой, подтвержденные эмпирическими корреляциями ($\rho = 0,61-0,74$). Анализ чувствительности $\Delta IIM / \Delta L_j^{(d)}$ выявил, что наибольший вклад в интегральный индекс по весам и чувствительности дают стратегическое, процессное и организационное измерения.

Наряду с расчетом энтропийно-нормированных весов анализ дисперсии ответов по шкале Лайкерта показал, что высокая когерентность по стратегическому и процессному измерениям сопровождается более высокой вариативностью оценок по организационному и информационно-данному измерениям, что воспроизводит структуру весов при $\alpha \approx 0,7-0,8$.

Предложенная методология продемонстрировала принципиальные отличия от классического АНР: она позволяет учитывать нелинейность и взаимозависимость факторов, снижает субъективность за счет энтропийной нормализации, обеспечивает чувствительность индекса к «ускоряющим» управленческим изменениям. Полученные результаты исследования показали, что стратегический, архитектурный и процессный контуры выступают ядром интеллектуальной зрелости, тогда как организационный, информационно-данный и операционно-инновационный блоки развиваются с запаздыванием. Таким образом, апробация эмпирически подтвердила корректность модифицированного АНР и его способность обеспечивать системное измерение и прогнозирование траекторий интеллектуального роста промышленных экосистем в логике Индустрии 5.0.

ВЫВОДЫ / DISCUSSION

Полученные результаты апробации подтверждают применимость предложенной методологии оценки интеллектуальной зрелости промышленной экосистемы и одновременно демонстрируют ряд принципиальных особенностей, которые позволяют глубже интерпретировать выявленные закономерности. Модель, основанная на модифицированном АНР с интеграцией энтропийных весов и учетом межизмерительных взаимодействий, показала устойчивую внутреннюю согласованность и способность отражать структурную архитектуру зрелости экосистемы. В то же время апробация выявила важные содержательные и методические ограничения, требующие последующей доработки и расширения эмпирического поля исследования.

Средний интегральный уровень зрелости 3,6 указывает на то, что промышленная экосистема находится в переходной зоне между состояниями Managed (управляемое) и Established (установленное), что хорошо согласуется с текущими тенденциями цифровой трансформации в российской промышленности. Наиболее низкие значения — «Данные» (3,2), «Организация» (3,4) и «Операции и инновации» (3,3) — выявляют системную проблему институционально-культурной и управленческой природы.

Несмотря на то что предприятия обладают достаточной технологической базой, они демонстрируют ограниченную готовность к институционализации практик управления данными, к развитию аналитической культуры и формированию механизмов ответственности за данные. Это создает эффект «организационного трения», когда технологические возможности экосистемы развиваются быстрее, чем ее управленческие и когнитивные контуры.

В экосистемах, которые начинают использовать данные как стратегический ресурс, стратегический и архитектурный контуры развиваются быстрее, так как связаны с инвестициями и формальными организационными решениями. Напротив, изменения в культуре, процессах и инновационных практиках требуют более длительных периодов адаптации, что закономерно ведет к асимметрии зрелости.

Корреляционные зависимости $\rho = 0,61-0,74$ между стратегией, процессами и архитектурой свидетельствуют о наличии выраженного стратегического ядра экосистемы, тогда как организационное ядро, несмотря на высокую сопряженность с этими контурами, отстает по текущему уровню зрелости.

Методологические ограничения требуют отдельного обсуждения. Во-первых, выборка ограничена как по размеру ($N = 20$), так и по отраслевой структуре, что снижает возможности статистической генерализации. Несмотря на высокую квалификацию экспертов, выборка смещена в сторону автомобильной отрасли, отличающейся более развитой цифровой инфраструктурой по сравнению с другими секторами. Во-вторых, вся логика оценки опирается на процессные способности, а не на реальные операционные показатели (KPI, метрики эффективности, показатели возврата инвестиций в цифровизацию). Это характерно для зрелостных моделей, однако требует последующих шагов по связке уровней зрелости с результативностью.

Отдельным методологическим ограничением стала проблема согласованности матриц АНР, выражавшаяся в превышении допустимого порога отношения согласованности ($CR > 0,1$) на этапе первичной экспертной оценки. Несмотря на последующую корректировку, данный факт свидетельствует о сложности экспертного восприятия взаимозависимостей между измерениями зрелости и необходимости проведения очных экспертных сессий с применением методов групповой работы (Delphi, метод номинальных групп NGT). Введение матрицы межизмерительных взаимодействий R не устраняет проблему согласованности экспертных суждений, однако частично компенсирует допущение независимости измерений, позволяя учитывать устойчивые сопряженности между ключевыми контурами зрелости.

Использование шкалы Лайкерта (1–7) укрепляет надежность оценок, но не снимает рисков центральной тенденции и социально желательных ответов. В следующей итерации исследования целесообразно расширить

шкалы путем включения инструментов адаптивного анкетирования или калибровочных вопросов, а также использовать более широкий массив наблюдений для энтропийной нормализации весов.

Дополнительно важно подчеркнуть, что исследование не учитывало воздействие внешних факторов — макроэкономической нестабильности, изменения нормативного регулирования в сфере ИИ, доступности данных или ограничений, связанных с технологическим суверенитетом. Эти факторы оказывают непосредственное влияние на оперативные и стратегические решения предприятий и могут смещать результаты диагностики зрелости.

Следует также отметить, что реализация жизненного цикла модели (по T. De Bruin) пока охватывает лишь этапы «Тест» (англ. Test) и «Развертывание» (англ. Deploy) [De Bruin, 2005]. Ключевой этап «Поддержка» (англ. Maintain) — построение отраслевых нормативов зрелости, ежегодное обновление данных, моделирование динамических изменений — остается за рамками настоящего исследования. Его реализация создаст условия для формирования полноценного мониторинга интеллектуальной зрелости в динамике.

В совокупности результаты апробации демонстрируют как концептуальную состоятельность методологии, так и высокую прикладную значимость предложенного подхода. Модель обеспечивает возможность количественного измерения интеллектуальной зрелости и позволяет формировать структурно-ориентированные управленческие рекомендации, направленные на приоритизацию контуров развития, а не на прямую оценку экономической результативности. Она выявляет структурные разрывы, определяет синергетические зоны и указывает на необходимые направления развития: от усиления стратегической согласованности и архитектурной интеграции до институционального закрепления культуры данных и формирования инновационной среды. Данное обстоятельство делает ее инструментом, способным поддерживать переход от фрагментарной цифровизации к устойчивому управлению на основе данных и формированию человекоцентричных экосистем Индустрии 5.0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION

Проведенное исследование подтвердило научную и прикладную состоятельность разработанной модели оценки интеллектуальной зрелости промышленных экосистем, основанной на данных и реализующей модифицированный АНР. Модель формирует целостный инструментарий диагностики интеллектуальной зрелости и поддержки структурно-ориентированных управленческих решений, направленных на приоритизацию контуров развития, а не на прямую оценку экономической результативности.

В отличие от традиционных подходов предложенная методология сочетает экспертную компоненту (АНР) с энтропийной стабилизацией весов, интерпретируемой как межсубъективная нормализация вариативности экспертных оценок. Введение матрицы межизмерительных взаимосвязей (R) расширило модель за счет учета эффектов взаимодействия между измерениями, обеспечивая аналитическое отражение синергетических и компенсаторных эффектов. Эмпирическая апробация показала, что стратегическое и организационное изменения обладают наибольшей значимостью с точки зрения весов и маргинального влияния на интегральный индекс, тогда как по текущему уровню зрелости ядро экосистемы формируется стратегией, процессами и архитектурой, а блоки данных и инноваций развиваются с отставанием.

Средний уровень интеллектуальной зрелости промышленной экосистемы составил 3,6 по шкале 0–5, что соответствует переходной стадии между уровнями Managed (управляемый) и Established (установленный). Это указывает на частичное внедрение принципов управления на основе данных при сохранении фрагментарности процессов и недостаточной зрелости культуры работы с данными. Полученные результаты исследования демонстрируют необходимость усиления управленческих и кадровых механизмов, развития аналитических компетенций и институционализации роли данных в стратегическом цикле предприятий.

Методологическая гибкость модели позволяет адаптировать ее к различным секторам промышленности, при этом эмпирическое подтверждение отраслевой универсальности требует расширения выборки и последующей валидации на более широком массиве данных. На следующем этапе исследования планируется расширение эмпирической базы и переход к фазе «Поддержка» (англ. Maintain), предусматривающей формирование отраслевых бенчмарков и динамического мониторинга зрелости. Данное обстоятельство создаст основу для сценарной интерпретации и последующего прогнозирования траекторий развития интеллектуальной зрелости по мере накопления динамических данных в этой фазе.

В дальнейшем целесообразно развить исследование в нескольких направлениях. Во-первых, требуется расширение эмпирической базы за счет включения предприятий различных отраслей — энергетической, авиакосмической, биотехнологической и строительной — с целью проверки отраслевой универсальности модели.

Во-вторых, необходимо интегрировать динамические показатели, позволяющие отслеживать эволюцию уровней зрелости во времени и оценивать устойчивость переходов между стадиями. В-третьих, перспективным направлением является использование методов машинного обучения и байесовских сетей для автоматизации расчетов весов и прогнозирования траекторий интеллектуального развития. В-четвертых, следует развить концепцию «умных» индикаторов зрелости (англ. Smart Maturity Indicators), способных адаптироваться к контексту данных в режиме реального времени. В-пятых, важно апробировать модель в связке с ESG- и ИИ-driven-метриками для оценки сбалансированности технологического и институционально-когнитивного развития экосистем. Завершающим направлением является формирование отраслевых бенчмарков и построение цифровой платформы мониторинга интеллектуальной зрелости, обеспечивающей аналитическую поддержку стратегических решений в логике Индустрии 5.0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васяйчева, В. А. Карта технологии управления инновационным проектированием промышленного предприятия / В. А. Васяйчева // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. — 2022. — Т. 13, № 3. — С. 71–78. — DOI 10.18287/2542-0461-2022-13-3-71-78. — EDN ZWFDHM.
- Вишнягова, Е. А. Идентификация структуры и особенностей промышленных экосистем / Е. А. Вишнягова, И. А. Соловьева // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. — 2024. — Т. 18, № 1. — С. 80–89. — DOI 10.14529/em240107. — EDN NTVBIIH.
- Глухов, В. В. Концептуальный фреймворк для оценки и управления интеллектуальной зрелостью промышленных экосистем / В. В. Глухов, А. В. Бабкин, Е. В. Шкарупета // Journal of New Economy. — 2025. — Т. 26, № 3. — С. 105–123. — DOI 10.29141/2658-5081-2025-26-3-6. — EDN QMXRKU.
- Глухов, В. В. Формирование терминологической платформы стратегического управления интеллектуальной зрелостью промышленных экосистем в целях технологического суверенитета / В. В. Глухов, А. В. Бабкин, Е. В. Шкарупета, С. В. Здольникова // Экономика и управление. — 2025. — Т. 31, № 8. — С. 1016–1029. — DOI 10.35854/1998-1627-2025-8-1016-1029. — EDN FJJQVC..
- Иголкин, С. Л. Управление инновационно-цифровыми трансформациями промышленных предприятий в условиях экономики данных и венчурной акселерации / С. Л. Иголкин, Е. А. Кравцов, Е. И. Макеев [и др.] // Экономика и управление: проблемы, решения. — 2025. — Т. 3, № 4(157). — С. 19–26. — DOI 10.36871/ek.up.p.r.2025.04.03.002. — EDN NQTVNH..
- Ковальчук, Ю. А. Управление промышленными экосистемами в едином цифровом пространстве / Ю. А. Ковальчук, И. М. Степнов // Проблемы рыночной экономики. — 2022. — № 3. — С. 107–121. — DOI 10.33051/2500-2325-2022-3-107-121. — EDN CMOQDC.
- Миллер, А. Е. Разработка управленческого механизма организации интеллектуальной инфраструктуры технологического развития промышленных предприятий / А. Е. Миллер, Л. М. Давиденко // Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий. — 2022. — Т. 11, № 1. — С. 53–61. — DOI 10.24412/2225-8264-2022-1-53-61. — EDN UCFVGX.
- Морковкин, Д. Е. Развитие механизмов принятия управленческих решений на основе технологий искусственного интеллекта и больших данных / Д. Е. Морковкин, Д. С. Шихалиева, Г. И. Алеева, Т. В. Петрусевич // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17, № S1. — EDN NHXLCG..
- Пономарева, С. В. Имитационное моделирование оценки экономической эффективности системы управления знаниями и производственными бизнес-процессами промышленного предприятия / С. В. Пономарева, И. Р. Винокур // Экономика и управление: проблемы, решения. — 2025. — Т. 16, № 1(154). — С. 36–45. — DOI 10.36871/ek.up.p.r.2025.01.16.004. — EDN WNPMPRK.
- Родионова, В. Н. Многокритериальный анализ и цифровые решения для повышения конкурентоспособности предприятий в условиях Индустрии 5.0 / В. Н. Родионова, И. С. Антонов // *π-Economy*. — 2024. — Т. 17, № 5. — С. 32–44. — DOI 10.18721/JE.17502.
- Смольянинова, И. В. Управление развитием инновационно ориентированных экосистем предприятий на основе платформенных решений и экономики данных / И. В. Смольянинова, Н. Р. Пузаков, Д. В. Стариков, С. А. Тыщенко // Первый экономический журнал. — 2025. — № 4(358). — С. 111–120. — DOI 10.58551/20728115_2025_4_111. — EDN STFPMA.
- Трифонов, П. В. Разработка системных подходов к использованию цифровых моделей для инновационного развития и повышения эффективности промышленных предприятий в условиях цифровой экономики / П. В. Трифонов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. — 2025. — № 1. — С. 74–82. — EDN PKLQGG.

- Устинова, Л. Н. Модель цифровой трансформации инновационной экосистемы на основе технологической платформы / Л. Н. Устинова, А. М. Макаров, В. В. Бритвина // *π-Economy*. — 2022. — Т. 15, № 4. — С. 110–122. — DOI 10.18721/JE.15408. — EDN NILHBK.
- Юдин, А. В. Управление устойчивым развитием промышленных экосистем в условиях динамично меняющейся среды / А. В. Юдин, Е. С. Митяков, Н. Н. Карпухина, П. Ю. Грошева // *Развитие и безопасность*. — 2025. — № 1(25). — С. 58–69. — EDN LFGNEC.
- De Bruin, T. Understanding the main phases of developing a maturity assessment model / T. De Bruin, M. Rosemann, R. Freeze, U. Kaulkarni // *Proceedings of the Australasian Conference on Information Systems (ACIS)*. — Sydney: Australasian Chapter of the Association for Information Systems, 2005. — Pp. 8–19.
- Guo, C. A digital economy development index based on an improved hierarchical data envelopment analysis approach / C. Guo, Q. Song, M. M. Yu, J. Zhang // *European Journal of Operational Research*. — 2024. — No. 316(3). — Pp. 1146–1157. — DOI 10.1016/J.EJOR.2024.02.023.
- Gupta, B. B. Analysis of artificial intelligence-based technologies and approaches on sustainable entrepreneurship / B. B. Gupta, A. Gaurav, P. K. Panigrahi, V. Arya // *Technological Forecasting and Social Change*. — 2023. — No. 186. — DOI 10.1016/J.TECHFORE.2022.122152.
- Hupperz, M. J. What is a data-driven organization? / M. J. Hupperz, I. Gur, F. Moller, B. Otto // *Proceedings of the Americas Conference on Information Systems (AMCIS)*. — Montreal, 2021.
- Li, X. Research on the mechanism of sustainable business model innovation driven by the digital platform ecosystem / X. Li, L. Zhang, J. Cao // *Journal of Engineering and Technology Management*. — 2023. — No. 68. — DOI 10.1016/J.JENGTCE-MAN.2023.101738.
- Portner, L. Data Management Maturity Model — Process Dimensions and Capabilities to Leverage Data-Driven Organizations Towards Industry 5.0 / L. Portner, A. Riel, B. Schmidt, M. Leclair // *Applied System Innovation*. — 2025. — Vol. 8, No. 2. — DOI 10.3390/ASI8020041.
- Yadav, P. An analytical hierarchy process-based decision support system for the selection of biogas up-gradation technologies / P. Yadav, S. Yadav, D. Singh, R. M. Kapoor // *Chemosphere*. — 2022. — No. 302. — DOI 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.134741.

REFERENCES

- De Bruin, T., Rosemann, M., Freeze, R., & Kaulkarni, U. (2005). Understanding the main phases of developing a maturity assessment model. In: *Proceedings of the Australasian Conference on Information Systems (ACIS)*. Sydney: Australasian Chapter of the Association for Information Systems.
- Glukhov, V. V., Babkin, A. V., & Shkarupeta, E. V. (2025). Conceptual framework for assessing and managing the intellectual maturity of industrial ecosystems. *Journal of New Economy*, 26(3), 105–123. (In Russian). <https://doi.org/10.29141/2658-5081-2025-26-3-6>
- Glukhov, V. V., Babkin, A. V., Shkarupeta, E. V., & Zdolnikova, S. V. (2025). Formation of a terminological platform for strategic management of industrial ecosystem intellectual maturity in the context of technological sovereignty. *Economics and Management*, 31(8), 1016–1029. (In Russian). <https://doi.org/10.35854/1998-1627-2025-8-1016-1029>
- Guo, C., Song, Q., Yu, M. M., & Zhang, J. (2024). A digital economy development index based on an improved hierarchical data envelopment analysis approach. *European Journal of Operational Research*, 316(3), 1146–1157. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.02.023>
- Gupta, B. B., Gaurav, A., Panigrahi, P. K., & Arya, V. (2023). Analysis of artificial intelligence-based technologies and approaches on sustainable entrepreneurship. *Technological Forecasting and Social Change*, 186, 122152. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122152>
- Hupperz, M. J., Gur, I., Moller, F., & Otto, B. (2021). What is a data-driven organization? In: *Proceedings of the Americas Conference on Information Systems (AMCIS)*. Montreal.
- Igolkin, S. L., Kravtsov, E. A., Makeev, E. I., Marenich, B. Yu., & Milov, A. S. (2025). Management of innovation and digital transformations of industrial enterprises in the data economy and venture acceleration context. *Economics and Management: Problems, Solutions*, 4(3), 19–26. (In Russian). <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2025.04.03.002>

- Kovalchuk, Yu. A., Stepnov, I. M. (2022). Management of industrial ecosystems in a unified digital space. *Market Economy Problems*, 3, 107–121. (In Russian). <https://doi.org/10.33051/2500-2325-2022-3-107-121>
- Li, X., Zhang, L., & Cao, J. (2023). Research on the mechanism of sustainable business model innovation driven by the digital platform ecosystem. *Journal of Engineering and Technology Management*, 68, 101738. <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2023.101738>
- Miller, A. E., Davidenko, L. M. (2022). Development of a management mechanism for organizing the intellectual infrastructure of industrial technological development. *Bulletin of the Siberian Institute of Business and Information Technologies*, 11(1), 53–61. (In Russian). <https://doi.org/10.24412/2225-8264-2022-1-53-61>
- Morkovkin, D. E., Shikhaliyeva, D. S., Aleeva, G. I., & Petrusevich, T. V. (2025). Development of management decision-making mechanisms based on artificial intelligence and big data technologies. *Bulletin of Eurasian Science*, 17(S1). (In Russian).
- Ponomareva, S. V., Vinokur, I. R. (2025). Simulation modeling for assessing the economic efficiency of knowledge management and production business processes of an industrial enterprise. *Economics and Management: Problems, Solutions*, 16(1), 36–45. (In Russian). <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2025.01.16.004>
- Portner, L., Riel, A., Schmidt, B., & Leclair, M. (2025). Data Management Maturity Model — Process Dimensions and Capabilities to Leverage Data-Driven Organizations Towards Industry 5.0. *Applied System Innovation*, 8(2), 41. <https://doi.org/10.3390/asi8020041>
- Rodionova, V. N., Antonov, I. S. (2024). Multicriteria analysis and digital solutions to enhance enterprise competitiveness in Industry 5.0. *π-Economy*, 17(5), 32–44. (In Russian). <https://doi.org/10.18721/JE.17502>
- Smolyaninova, I. V., Puzakov, N. R., Starikov, D. V., & Tyshchenko, S. A. (2025). Management of innovation-oriented enterprise ecosystems based on platform solutions and the data economy. *First Economic Journal*, 4(358), 111–120. (In Russian). https://doi.org/10.58551/20728115_2025_4_111
- Trifonov, P. V. (2025). Development of systemic approaches to the use of digital models for innovative development and improving the efficiency of industrial enterprises in the digital economy. *Forging and Stamping Production. Material Forming Engineering*, 1, 74–82. (In Russian).
- Ustinova, L. N., Makarov, A. M., & Britvina, V. V. (2022). Model of digital transformation of an innovation ecosystem based on a technological platform. *π-Economy*, 15(4), 110–122. (In Russian). <https://doi.org/10.18721/JE.15408>
- Vasyaicheva, V. A. (2022). Technology map for managing innovative design of an industrial enterprise. *Bulletin of Samara University. Economics and Management*, 13(3), 71–78. (In Russian). <https://doi.org/10.18287/2542-0461-2022-13-3-71-78>
- Vishniagova, E. A., Solovieva, I. A. (2024). Identification of the structure and features of industrial ecosystems. *Bulletin of South Ural State University. Series: Economics and Management*, 18(1), 80–89. (In Russian). <https://doi.org/10.14529/em240107>
- Yadav, P., Yadav, S., Singh, D., & Kapoor, R. M. (2022). An analytical hierarchy process-based decision support system for the selection of biogas up-gradation technologies. *Chemosphere*, 302, 134741. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134741>
- Yudin, A. V., Mityakov, E. S., Karpukhina, N. N., Grosheva, P. Yu. (2025). Management of sustainable development of industrial ecosystems in a dynamically changing environment. *Development and Security*, 1(25), 58–69. (In Russian).