

Лаврентьева Анастасия Андреевна

бакалавр 4 курса ФПТИ

институт фундаментальной подготовки и технологических инноваций

(Институт ФПТИ)

Санкт-Петербургский Государственный Университет Аэрокосмического

Приборостроения

Назаревич Станислав Анатольевич

Доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества

Заместитель директора института фундаментальной подготовки и

технологических инноваций

Санкт-Петербургский Государственный Университет Аэрокосмического

Приборостроения

МОДЕЛЬ ИНТЕГРАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЦИФРОВОЙ ЗРЕЛОСТИ И ФАКТОРОВ РИСКА ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЯ

***Аннотация:** В статье рассматривается проблема разрыва между оценкой уровня цифровой трансформации предприятия и измерением ее устойчивого развития. Целью работы является разработка интегрированной модели, позволяющей количественно оценить влияние цифровой зрелости на устойчивость процессов жизненного цикла изделия (ЖЦИ) с учетом возникающих цифровых рисков. Предлагаемая модель базируется на трех взаимосвязанных блоках: оценке цифровой зрелости по ключевым измерениям, анализе факторов риска и расчете интегрального показателя устойчивости ЖЦИ. В работе представлена система формул, показателей и инструкций по*

внедрению. Эта модель помогает объединить цифровое развитие и экологические цели, преобразовав их из отдельных задач в единый эффективный процесс. Следовательно, модель станет практическим инструментом, которая позволит проверять текущее состояние, планировать стратегию и принимать обоснованные решения на всех уровнях в ходе цифровой трансформации.

Ключевые слова: цифровая зрелость, факторы риска, устойчивость, жизненный цикл изделия, интеграционная модель, оценка, управление, цифровая трансформация.

***MODEL OF DIGITAL MATURITY INDICATORS AND RISK FACTORS
INTEGRATION FOR ASSESSING THE SUSTAINABILITY OF PRODUCT
LIFE CYCLE PROCESSES***

Lavrentyeva Anastasia Andreevna

4th year bachelor's student, Faculty of Fundamental Training and Technological Innovation (FPTI Institute)

Institute of Fundamental Training and Technological Innovation (FPTI Institute)

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

E-mail: anastasia.lavren@yandex.ru

Nazarevich Stanislav Anatolyevich

Associate Professor, Department of Innovation and Integrated Quality Systems

Deputy Director of the Institute of Fundamental Training and Technological Innovation

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

E-mail: nazarevich@guap.ru

Abstract. *The article discusses the problem of the gap between assessing the level of digital transformation of an enterprise and measuring its sustainable development. The goal of this work is to develop an integrated model that allows for a quantitative assessment of the impact of digital maturity on the sustainability of product lifecycle processes (PLP), taking into account the emerging digital risks. The proposed model*

is based on three interconnected blocks: assessing digital maturity based on key measurements, analyzing risk factors, and calculating an integrated indicator of PLP sustainability. The article presents a system of formulas, indicators, and implementation instructions. This model helps to combine digital development and environmental goals, transforming them from separate tasks into a single, effective process. Consequently, the model will become a practical tool that allows you to check the current state, plan your strategy, and make informed decisions at all levels during your digital transformation.

Keywords: *digital maturity, risk factors, sustainability, product lifecycle, integration model, assessment, management, digital transformation.*

Введение.

Современный этап развития промышленности характеризуется двумя ключевыми векторами: ускоренной цифровой трансформацией и ужесточением требований к устойчивому развитию. Можно отметить, что цифровизация перестала быть исключительно технологической задачей и превратилась в фактор, определяющий конкурентоспособность и долгосрочную жизнеспособность предприятий. Однако на практике сохраняется разрыв: оценка цифровой зрелости и измерение устойчивости процессов жизненного цикла изделия (ЖЦИ) существуют как параллельные, слабо связанные контуры управления.

Целью данной работы является разработка интегрированной модели, позволяющей количественно оценить влияние цифровой зрелости на устойчивость процессов ЖЦИ с учетом возникающих цифровых рисков. Достижение поставленной цели требует решения следующих задач: анализ современных подходов к оценке цифровой зрелости и устойчивости, выявление факторов риска как связующего звена, разработка структуры модели и системы показателей, а также определение практических аспектов внедрения.

1. Теоретические основы интеграции цифровой зрелости и устойчивости: от параллельных концепций к единой система

1.1. Современные модели оценки цифровой зрелости и их потенциал для анализа устойчивости

Цифровая зрелость представляет собой комплексный показатель, который позволяет увидеть способность предприятия или производственной экосистемы не только внедрять современные технологии, но и также их эффективно использовать для преобразования бизнес-процессов и создания ценности. В сформировавшихся условиях экономики данных и ускоренной цифровой трансформации промышленности оценка данного параметра является критически важной не только для измерения технологического прогресса, но и как основу для анализа долгосрочной устойчивости.

Современные исследования демонстрируют устойчивый тренд — переход от анализа внутренних технологических активов предприятия к более широкому, экосистемному взгляду. В рамках данного подхода отображается о том, что интеллектуальная промышленная система не существует изолированно, а представляет собой часть сложной сети, которая включает в себя поставщиков, потребителей и научные организации. Тем самым, эффективный инструментарий оценки должен измерять не только уровень внутренних компетенций, но и способность к созданию синергетического эффекта за счёт кооперации и обмена данными.

Развитие данного направления привело к появлению подхода, позволяющего идентифицировать разрывы цифровой зрелости, то есть несоответствия между текущим состоянием цифровизации и целевыми ориентирами. Важно, что данный подход учитывает не только технологическую, но и управленческую, и компетентностную составляющие, что создает основу для последующего анализа рисков потери устойчивости.

Классические модели оценки зрелости, ориентированные на последовательные стадии развития, закладывают важную основу для управления процессами. Однако их прямой потенциал для оценки устойчивости остается ограниченным, поскольку они изначально не содержат специализированных критериев, связанных с ресурсоэффективностью или экологическими аспектами.

Новые подходы рассматривают цифровизацию как процесс совместной эволюции технологических и бизнес-процессов и предлагают более целостное решение, позволяющее интегрировать показатели устойчивости.

Современные отраслевые исследования подтверждают актуальность этой проблематики: большинство организаций связывают свой долгосрочный успех с программами устойчивого развития, при этом пользователи PLM-систем значительно чаще используют инструменты искусственного интеллекта. Это эмпирически подтверждает наличие прямой связи между глубиной цифровизации и потенциалом для обеспечения устойчивости.

Принцип интеграции оценки цифровой зрелости и факторов устойчивости в рамках жизненного цикла изделия схематично представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Принцип интегрированной оценки устойчивости жизненного цикла изделия

Figure 1 – The principle of integrated product lifecycle sustainability assessment

Схема наглядно демонстрирует, что современная модель предполагает не параллельное, а совместное применение двух систем оценки (цифровой зрелости и факторов устойчивости) к каждому этапу жизненного цикла. Следовательно, позволяет обеспечить синергию, ведущую к интегральной и более точной оценке.

Таким образом, потенциал современных моделей цифровой зрелости для анализа устойчивости раскрывается в следующих ключевых аспектах:

- Системность: переход от оценки отдельного предприятия к оценке зрелости всей цепочки создания ценности.
- Интеграция показателей: возможность включения в модель KPI экологического и социального характера.
- Динамическая оценка: фокус на способности системы к адаптации.
- Управление на основе данных: возможность предиктивного анализа рисков.

1.2. Факторы риска как связующее звено между цифровизацией и устойчивостью

В современных условиях цифровая трансформация промышленных предприятий сопровождается не только расширением возможностей, но и появлением новых классов угроз. Факторы риска в контексте интеграции цифровой зрелости и устойчивости процессов жизненного цикла продукции, которые выполняют двойственную функцию, а именно, когда с одной стороны – отражают уязвимости, возникающие вследствие внедрения цифровых технологий, а с другой — выступают индикаторами, сигнализирующими о потере устойчивости системы.

Исследования показывают, что цифровизация позволяет синхронизировать внутренние и внешние процессы в цепочке поставок, выступая механизмом «поглощения» рисков. Несмотря на это сама цифровая инфраструктура становится источником новых уязвимостей, требующих отдельного управления. В развитие этой темы рассматривается противоречие концентрации поставщиков

в условиях цифровизации, таким образом, что с одной стороны, цифровые инструменты позволяют эффективно управлять узкой базой поставщиков, а с другой — усиливают зависимость и риски при сбоях в информационном обмене.

Анализ современных исследований позволяет выделить три основные категории рисков:

1. Технологические риски. Связаны с отказами и сбоями в работе цифровой инфраструктуры: выход из строя серверов, ошибки в работе промышленного интернета вещей (IIoT), потеря калибровки сенсоров. В условиях санкционного давления и ограничений на поставки оборудования эти риски существенно возрастают.

2. Информационные риски и риски кибербезопасности. Увеличение количества подключенных устройств расширяет поверхность для атак. Цифровые двойники и сквозные PLM-системы, являясь основой современного проектирования, одновременно становятся целями для потенциальных вмешательств.

3. Организационные и компетентностные риски. Дефицит кадров, способных работать с интеллектуальными системами, создает риск неэффективного использования технологий, что подтверждается анализом цифровых разрывов.

В предлагаемой модели факторы риска выступают не как внешние обстоятельства, а как внутренние параметры системы, подлежащие количественной оценке и интеграции в общий показатель устойчивости.

1.3. Концепция устойчивости процессов жизненного цикла изделия в условиях цифровой трансформации

Устойчивость процессов жизненного цикла изделия в контексте данной работы рассматривается как комплексная характеристика, отражающая способность системы сохранять заданные параметры эффективности при воздействии возмущений, одновременно минимизируя негативное влияние на окружающую среду и обеспечивая экономическую целесообразность.

Развитие концепции цифровых паспортов продуктов открывает новые возможности для обеспечения прослеживаемости на всем протяжении жизненного цикла продукции. Подходы к оценке зрелости позволяют определить, насколько полно и качественно собираются данные, необходимые для принятия решений об утилизации или вторичном использовании материалов.

В предлагаемой модели устойчивость рассматривается как динамическая характеристика, которая должна непрерывно оцениваться. Интеграция показателей цифровой зрелости и факторов риска позволяет сформировать численную метрику, отражающую, насколько глубоко цифровые технологии встроены в контур управления устойчивостью.

2. Построение интегрированной модели оценки и её инструментальное направление

2.1. Структура и ключевые компоненты модели

Разработанная модель основополагается на трех взаимосвязанных блоках, обеспечивающих последовательный переход от сбора данных к выработке управленческих решений. Структурная схема модели представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 — Структура интегрированной модели оценки устойчивости жизненного цикла изделия

Figure 2 — Structure of the integrated model for assessing product lifecycle sustainability

Первый блок — блок оценки цифровой зрелости — включает набор метрик, характеризующих оснащенность каждого этапа ЖЦИ цифровыми технологиями, уровень интеграции информационных систем и степень автоматизации процессов сбора и анализа данных. При формировании этого блока учитываются современные подходы к оценке экосистемной зрелости.

Второй блок — блок идентификации и оценки факторов риска — содержит перечень контрольных показателей, фиксирующих отклонения в работе цифровой инфраструктуры, инциденты информационной безопасности и

уровень цифровых компетенций персонала. Основой служат исследования влияния цифровизации на устойчивость цепочек поставок.

Третий блок — блок расчета интегрального показателя устойчивости ЖЦИ — выполняет функцию агрегации, формируя итоговое значение, интерпретируемое как количественная мера устойчивости. Ключевой особенностью предлагаемой структуры является наличие обратных связей: интегральный показатель не только констатирует состояние, но и служит входным сигналом для корректировки параметров в первых двух блоках (например, пересмотр требований к цифровизации при высоком уровне риска).

2.2. Формирование системы показателей и алгоритм расчёта

Система показателей модели строится на принципе декомпозиции: от частных индикаторов к обобщенным индексам.

2.2.1 Показатели цифровой зрелости

Для каждого этапа жизненного цикла изделия оцениваются три группы показателей (нормируются от 0 до 1). Состав этих групп представлен в таблице 1.

Таблица 1 — Показатели цифровой зрелости
Table 1 — Indicators of digital maturity

Группа показателей	Примеры индикаторов	Диапазон
Технологическая оснащённость	Наличие PLM, ERP, MES, IoT-платформ	0–1
Интеграция систем	Сквозной обмен данными между этапами ЖЦИ	0–1
Автоматизация сбора и анализа данных	Доля процессов с цифровым мониторингом	0–1

2.2.2 Показатели факторов риска

Вторая группа показателей характеризует риски, снижающие устойчивость процессов. Их состав детализирован в таблице 2.

Таблица 2 — Показатели факторов риска

Table 2 — Indicators of risk factors

Категория риска	Примеры индикаторов	Диапазон
Технологические риски	Частота отказов серверов, сбои IoT, потеря калибровки	0–1
Информационные риски	Количество инцидентов кибербезопасности, утечек данных	0–1
Организационные риски	Дефицит кадров, уровень цифровых компетенций	0–1

На основе описанных выше показателей строится алгоритм расчёта интегральной оценки устойчивости, который включает три последовательных шага.

2.2.3 Алгоритм расчёта

Для количественной оценки устойчивости процессов жизненного цикла изделия с учётом описанных выше групп показателей предлагается следующий алгоритм расчета, включающий три последовательных этапа:

Этап 1. Нормирование показателей.

Все значения показателей приводятся к безразмерной шкале от 0 до 1. Для этого используется метод минимаксного нормирования, при котором минимальному фактическому значению показателя присваивается 0,

максимальному — 1, а все остальные значения линейно масштабируются внутри этого диапазона. В случае, если показатель имеет обратную зависимость (то есть рост ухудшает устойчивость), применяется обратное нормирование.

Этап 2. Расчет частных индексов по этапам ЖЦИ:

$$I_j = a \cdot DM_j + b \cdot IT_j + c \cdot AU_j - d \cdot R_j \quad (1)$$

где a, b, c, d — весовые коэффициенты ($a + b + c + d = 1$), определяемые экспертным путем в зависимости от стратегических приоритетов предприятия, I_j — частный индекс устойчивости для этапа j , DM_j — показатель цифровой зрелости для этапа j (технологическая оснащенность), IT_j — показатель интеграции информационных систем этапа j , AU_j — показатель автоматизации сбора и анализа данных этапа j , R_j — интегральный показатель факторов рисков для этапа j .

Этап 3. Расчет интегрального показателя:

Интегральный показатель устойчивости процессов жизненного цикла изделия рассчитывается как среднее арифметическое частных индексов по всем этапам:

$$S_{integral} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I_j \quad (2)$$

где n — количество рассматриваемых этапов ЖЦИ.

Полученное значение $S_{integral}$ интерпретируется в соответствии со шкалой, приведенной в таблице 3.

Таблица 3 — Интерпретация значений интегрального показателя

Table 3 — Interpretation of integral indicator values

Значение интеграционного показателя	Уровень устойчивости	Рекомендуемые действия
0,80 – 1,00	Высокая устойчивость	Поддержание, бенчмаркинг

Значение интеграционного показателя	Уровень устойчивости	Рекомендуемые действия
0,60 – 0,79	Умеренная устойчивость	Выборочные улучшения
0,40 – 0,59	Низкая устойчивость	Корректирующие мероприятия
0,00 – 0,39	Критическая неустойчивость	Немедленное вмешательство

2.3. Практические аспекты сбора данных и применение модели

Для корректного расчёта описанных выше показателей необходимо обеспечить регулярное поступление данных из различных источников. Основные источники и способы получения данных обобщены в таблице 4.

Таблица 4 — Источники данных для модели

Table 4 — Data sources for the model

Этап ЖЦИ	Источник данных	Тип данных
Проектирование	PLM, CAD-системы	Цифровые модели, спецификации
Производство	MES, SCADA, IIoT	Параметры процессов, сбои
Логистика	WMS, TMS, RFID	Трекинг, задержки

Этап ЖЦИ	Источник данных	Тип данных
Эксплуатация	IoT-датчики, CRM	Отказы, наработка
Утилизация	Цифровые паспорта продуктов	Состав материалов, переработка

Качество данных является критическим фактором для всех аналитических процедур. По результатам настройки сбора данных определяется регламент применения модели в зависимости от уровня управления.

Периодичность применения модели:

- Оперативный уровень — ежедневно/еженедельно: мониторинг критических отклонений
- Тактический уровень — ежемесячно/ежеквартально: анализ динамики показателей
- Стратегический уровень — ежегодно: оценка эффективности цифровизации, пересмотр весовых коэффициентов.

При практическом применении разработанной модели необходимо учитывать ряд ограничений, влияющих на точность и полноту получаемых оценок.

Во-первых, на начальном этапе внедрения возможно отсутствие части необходимых данных, что связано с различной степенью цифровизации отдельных этапов жизненного цикла изделий. В этом случае рекомендуется начинать с минимального набора показателей, постепенно расширяя его по мере развития систем учета.

Во-вторых, весовые коэффициенты в формуле расчета требуют периодической калибровки по мере накопления статистических данных. На начальных этапах применения модели коэффициенты устанавливаются экспертным путем, что вносит элемент субъективности в итоговую оценку.

В-третьих, модель дает корректные результаты при условии относительной стабильности бизнес-процессов. При кардинальных организационных или технологических изменениях требуется пересмотр всей системы показателей и повторная калибровка весов.

Кроме того, точность расчетов напрямую зависит от качества исходных данных: наличие «информационного шума», пропусков или несогласованности данных из разных источников может приводить к искажению интегрального показателя устойчивости

3. Внедрение модели в практику управления жизненным циклом: возможности и управленческие решения

3.1. Практические возможности применения модели на разных этапах жизненного цикла изделия

Предлагаемая интегрированная модель обладает высокой адаптивностью и может быть применена на каждом этапе жизненного цикла изделия с соответствующей настройкой весовых коэффициентов и набора показателей. В таблице 5 представлена матрица применения модели с указанием целевых показателей и ожидаемых эффектов.

Таблица 5 — Матрица применения модели по этапам жизненного цикла изделия

Table 5 — Application matrix of the model by product lifecycle stage

Этап ЖЦИ	Целевые показатели	Ожидаемый эффект
Проектирование	Снижение доработок	Качество проекта
Производство	Снижение сбоев оборудования	Операционная эффективность

Этап ЖЦИ	Целевые показатели	Ожидаемый эффект
Логистика	Сокращение задержек	Прозрачность поставок
Эксплуатация	Обслуживание по состоянию	Сокращение простоев
Утилизация	Полнота данных о материалах	Циркулярная экономика

На этапе проектирования и разработки модель позволяет оценить, насколько использование систем автоматизированного проектирования и цифровых двойников снижает риски последующих дорогостоящих доработок. Интегральный показатель устойчивости на этом этапе отражает «качество проекта» с точки зрения его реализуемости в производстве и эксплуатации.

На этапе производства модель выступает инструментом операционного контроллинга. Отслеживая динамику интегрального показателя, руководитель производства может своевременно выявить негативные тренды, такие как рост количества сбоев оборудования на фоне увеличения объема оцифрованных данных, и принять превентивные меры.

На этапе эксплуатации и сервисного обслуживания модель, интегрированная с системами промышленного интернета вещей, позволяет перейти от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию. Это напрямую повышает устойчивость, сокращая внеплановые простои и оптимизируя затраты на запасные части.

На этапе утилизации модель оценивает полноту и качество данных о составе материалов и способах их переработки, что критически важно для

реализации принципов циркулярной экономики и соответствует современным требованиям к цифровым паспортам продуктов.

3.2. Ключевые управленческие решения и организационным изменения для внедрения

Внедрение интегрированной модели оценки устойчивости требует не только технической подготовки, но и соответствующих организационных изменений. Исследования стратегий цифровизации показывают, что в условиях неопределенности наиболее успешны те предприятия, которые выстраивают гибкие системы управления, сочетающие цифровые инструменты и адаптивные организационные структуры.

Организационные изменения:

1. Создание кросс-функциональной рабочей группы. Для успешного внедрения модели необходимо сформировать команду, включающую представителей IT-службы, производственного блока, отдела качества, логистики и финансового департамента. Это обеспечивает учет всех аспектов деятельности при настройке показателей.

2. Пересмотр существующих регламентов. Процесс принятия управленческих решений должен быть дополнен обязательным анализом рассчитанных показателей устойчивости. Требуется включение соответствующих процедур в корпоративные стандарты и положения о подразделениях.

3. Развитие цифровых компетенций персонала. Выявленные в ходе первоначальной оценки компетентностные разрывы должны устраняться через программы обучения и повышения квалификации сотрудников, работающих с цифровыми инструментами.

4. Адаптация системы мотивации. Целесообразно включение показателей устойчивости в ключевые показатели эффективности (KPI) руководителей соответствующих уровней для обеспечения заинтересованности в результатах внедрения модели.

Ключевые управленческие решения на основе модели:

- **Корректировка инвестиционных планов.** На основе выявленных разрывов цифровой зрелости производится перераспределение средств в пользу тех этапов жизненного цикла, где наблюдается наибольшее расхождение между текущим и целевым уровнями устойчивости.
- **Пересмотр требований к поставщикам.** В договоры поставки включаются условия о минимально допустимом уровне цифровой зрелости и готовности к сквозному обмену данными, что позволяет снизить риски, связанные с концентрацией поставщиков.
- **Разработка программ обучения.** На основе анализа компетентностных рисков организуется целевое повышение квалификации персонала в областях, критических для обеспечения устойчивости процессов.
- **Оптимизация производственных программ.** Оперативные значения частных индексов устойчивости используются для корректировки производственных заданий и графиков обслуживания оборудования.

3.3. Измерение эффективности и управление на основе ключевых показателей

Эффективность внедрения самой модели оценивается через динамику целевых показателей деятельности предприятия. Основным критерием выступает не столько само значение интегрального показателя, сколько его влияние на классические показатели эффективности.

Таблица 6 – Система показателей эффективности внедрения
Table 6 – Implementation Performance Indicators System

Показатель	Способ оценки	Целевой тренд
Динамика интеграционного показателя	Рост за период	Положительный
Снижение технологических рисков	Уменьшение частоты отказов	Отрицательный
Снижение информационных рисков	Уменьшение инцидентов ИБ	Отрицательный
Рост цифровых компетенций	Доля обученного персонала	Положительный
ROI цифровизации	Эффект / затраты	Рост

Для эффективного использования результатов расчета предлагается внедрение системы визуализации (дашбордов) для разных уровней менеджмента:

- Операционный уровень получает предупреждения о критических отклонениях частных индексов с рекомендациями по немедленному реагированию. Дашборды содержат информацию о текущих значениях показателей в цехах и на производственных участках.
- Тактический уровень анализирует динамику показателей за неделю или месяц, выявляет устойчивые тренды и зоны для улучшения. На этом уровне принимаются решения о корректировке планов и перераспределении ресурсов.
- Стратегический уровень оценивает долгосрочные тренды интегрального показателя, эффективность инвестиций в цифровизацию и

результативность реализованных мероприятий. На основе этого корректируется стратегия цифрового развития предприятия.

Отраслевые исследования подтверждают, что компании с высоким уровнем цифровой зрелости демонстрируют на 25-30% лучшие показатели операционной эффективности по сравнению с отстающими предприятиями, что обосновывает экономическую целесообразность внедрения предлагаемой модели.

3.3.1 Динамика интегрального показателя устойчивости

Для иллюстрации работоспособности предложенной модели на рисунке 3 представлена типовая динамика интегрального показателя устойчивости по этапам жизненного цикла изделия до внедрения модели (базовый уровень) и после внедрения.

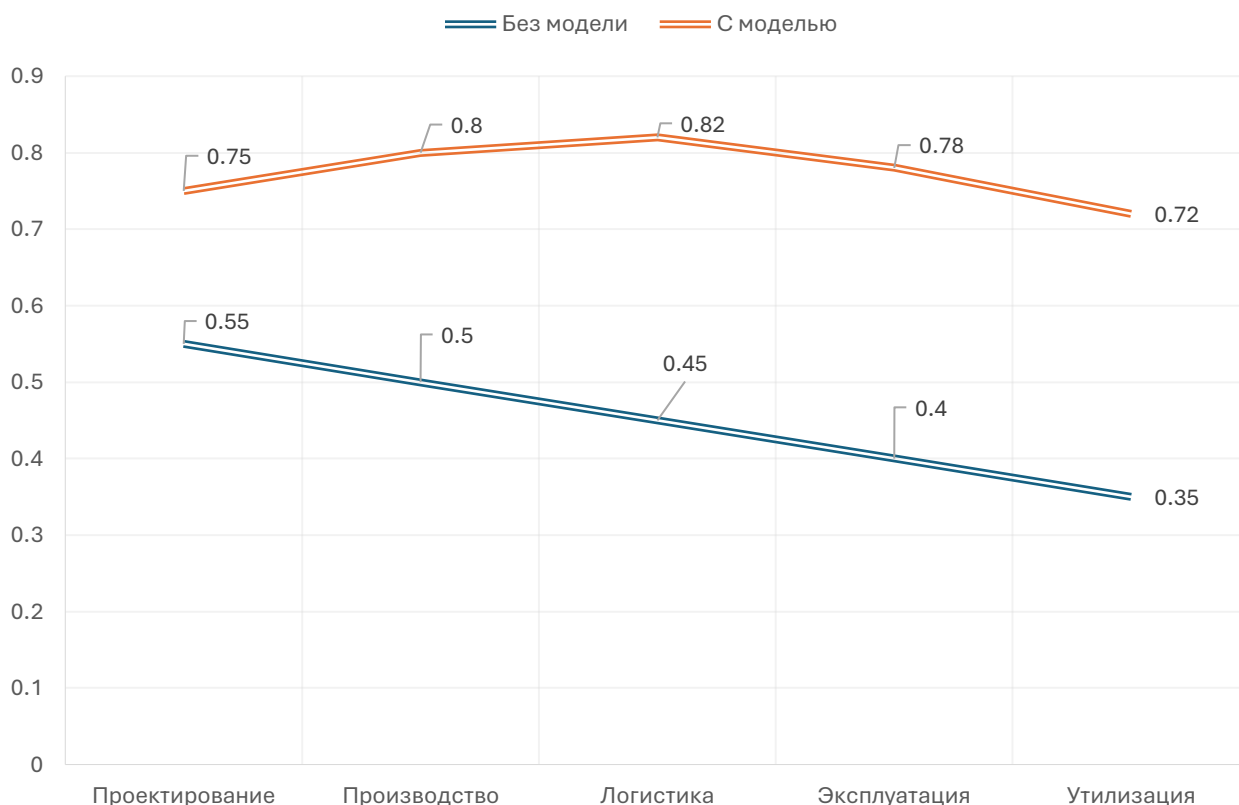


Рисунок 3 — Динамика интегрального показателя устойчивости ЖЦИ

Figure 3 — Dynamics of the integral sustainability indicator of the product lifecycle

Базовый уровень (линия «Без модели») демонстрирует нисходящий тренд: от 0,55 на этапе проектирования до 0,35 на этапе утилизации. Снижение связано

с накоплением неучтённых цифровых рисков по мере продвижения по этапам ЖЦИ. Значения в диапазоне 0,35–0,55 соответствуют уровню «низкая – критическая устойчивость» согласно таблице 3.

После внедрения модели (линия «С моделью») наблюдается устойчивый рост показателя: от 0,75 на этапе проектирования до 0,82 на этапе логистики с последующей стабилизацией в диапазоне 0,72–0,82. Это соответствует уровням «умеренная – высокая устойчивость».

3.4. Анализ практических барьеров и стратегический вектор развития модели

3.4.1 Практические барьеры внедрения

При практическом внедрении описанной модели предприятия могут столкнуться с рядом барьеров, которые целесообразно учитывать на этапе планирования.

1. Методологические барьеры. Сложность определения объективных весовых коэффициентов и граничных значений показателей на начальном этапе, когда отсутствует достаточная статистическая база. Высокая зависимость результатов от качества экспертных оценок.

2. Информационные барьеры. Недостаточное качество исходных данных, наличие «информационного шума», пропуски в данных, несогласованность информации из различных источников. Отсутствие исторических данных для калибровки модели и верификации результатов.

3. Технические барьеры. Сложность интеграции разнородных информационных систем (PLM, MES, ERP) в единый контур сбора данных. Устаревшее оборудование, не поддерживающее сбор данных в автоматическом режиме.

4. Организационные барьеры. Сопротивление персонала, связанное с прозрачностью результатов работы и возможным усилением контроля. Отсутствие заинтересованности руководителей среднего звена во внедрении

дополнительных инструментов оценки. Дефицит квалифицированных кадров, способных работать с моделью и интерпретировать ее результаты.

5. Экономические барьеры. Необходимость дополнительных инвестиций в дооснащение систем сбора данных, обучение персонала и интеграцию информационных систем. Длительный срок окупаемости на начальном этапе внедрения.

3.4.2 Стратегический вектор развития модели

Дальнейшее развитие предложенной модели видится в следующих направлениях:

1. Эволюция в сторону предиктивных возможностей. Следующим шагом должна стать разработка механизмов прогнозирования значения интегрального показателя на основе текущих трендов и моделирования сценариев развития событий. Это позволит перейти от реактивного управления, предполагающего реагирование на уже произошедшие события, к проактивному, направленному на предотвращение потери устойчивости до наступления критических событий.

2. Автоматизация калибровки весовых коэффициентов. По мере накопления статистических данных целесообразно внедрение алгоритмов автоматической калибровки весовых коэффициентов на основе ретроспективного анализа и методов машинного обучения.

3. Расширение набора показателей. Включение в модель дополнительных показателей, характеризующих экологическую и социальную составляющие устойчивости, таких как углеродный след, использование возобновляемых источников энергии, безопасность труда и социальная ответственность.

4. Интеграция с цифровыми двойниками. Развитие модели в направлении интеграции с цифровыми двойниками изделий и производственных процессов позволит осуществлять не только оценку текущего состояния, но и имитационное моделирование различных сценариев развития.

5. Стандартизация подхода. Разработка отраслевых рекомендаций по применению модели и ее адаптации для различных типов производств с целью обеспечения сопоставимости результатов и бенчмаркинга между предприятиями.

Преодоление указанных барьеров и реализация стратегических направлений развития позволит превратить предложенную модель в полноценный инструмент управления устойчивостью, органично встроенный в цифровую экосистему современного предприятия.

Заключение. В результате выполненного исследования разработана интегрированная модель оценки устойчивости процессов жизненного цикла изделия, основанная на совместном анализе уровня цифровой зрелости и факторов риска. Новизна предложенного подхода заключается в органичном единстве этих двух аспектов в рамках единой системы показателей.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Обоснована необходимость перехода от отдельной оценки цифрового развития и устойчивости к интегрированному анализу, отражающему системный характер современных производственных экосистем.

2. Выявлена роль факторов риска как связующего звена между цифровизацией и устойчивостью, систематизированы основные категории рисков: технологические, информационные и компетентностные.

3. Разработана трехуровневая структура интегрированной модели, включающая блок оценки цифровой зрелости, блок идентификации рисков и блок расчета интегрального показателя устойчивости с обратными связями.

4. Предложен математический аппарат для нормирования показателей и их свертки в единый индекс с системой весовых коэффициентов.

5. Определены практические аспекты сбора данных, источники информации, периодичность расчетов и ограничения предложенного подхода.

6. Разработана матрица применения модели на различных этапах жизненного цикла изделия, определены ключевые управленческие решения и необходимые организационные изменения.

7. Проанализированы практические барьеры внедрения и определены стратегические направления развития модели, включая эволюцию в сторону предиктивных возможностей.

Представленная модель обладает свойством масштабируемости и может быть адаптирована для предприятий различных отраслей промышленности. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на разработке методик количественного определения весовых коэффициентов, создании предиктивных расширений модели и ее апробации в реальных производственных условиях.

Таким образом, предложенная интегрированная модель закрывает существующий разрыв между стратегическими целями цифровой трансформации и задачами обеспечения устойчивого развития, предоставляя менеджменту практический инструмент для принятия обоснованных решений на всех этапах жизненного цикла изделия.

Список использованных источников

1. Бабкин А. В., Михайлов П. А., Шкарупета Е. В., Чэнь Лэйфэй. Инструментарий оценки цифровой зрелости интеллектуальной промышленной экосистемы на основе коэволюции и экосистемной синергии // КиберЛенинка. – 2025.
2. Краковская И. Н., Корокошко Ю. В., Слушкина Ю. Ю. Цифровая зрелость промышленных предприятий: опыт оценки // КиберЛенинка. – 2024.
3. Дыбская В. В., Сергеев В. И., Лычкина Н. Н. и др. Цифровые технологии в логистике и управлении цепями поставок: аналитический обзор [Текст] / под общ. и науч. ред. В. И. Сергеева ; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М. : Изд. дом Высшей школы экономики, 2020. – 190, [2] с. – 500 экз.
4. Зырянов Д. А., Бадика Е. М., Бабчинецкий С. Г. Цифровые двойники в управление жизненным циклом изделий и технологий // КиберЛенинка. – 2022.
5. Стырин Е. М., Атаева А. Г., Жатикова Д. В. Цифровая зрелость государственного управления в России: теория, методология, практика оценки:

монография / Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М. : Изд. дом Высшей школы экономики, 2025.

References

1. Babkin, A. V., Mikhailov, P. A., Shkarupeta, E. V., & Chen, Leifei. (2025). Tools for assessing the digital maturity of an intelligent industrial ecosystem based on co-evolution and ecosystem synergy. CyberLeninka.
2. Krakovskaya, I. N., Korokoshko, Yu. V., & Slushkina, Yu. Yu. (2024). Digital maturity of industrial enterprises: Assessment experience. CyberLeninka.
3. Dybskaya, V. V., Sergeev, V. I., Lychkina, N. N., et al. (2020). Digital technologies in logistics and supply chain management: An analytical review [Text]. V. I. Sergeev (Ed.). Moscow: Higher School of Economics Publishing House. 190 p. 500 copies.
4. Zyryanov, D. A., Badika, E. M., & Babchinetsky, S. G. (2022). Digital twins in product and technology lifecycle management. CyberLeninka.
5. Styrin, E. M., Ataeva, A. G., & Zhatikova, D. V. (2025). Digital maturity of public administration in Russia: Theory, methodology, assessment practice: A monograph. Moscow: Higher School of Economics Publishing House.