

Рубрика 3. ЭКОНОМИКА ТРАНСПОРТА

<https://doi.org/10.17816/transsyst688686>

Труды I Международной научно-практической конференции
«Экономика высоких скоростей: технологии будущего»

© М.С. Вагин, Е.С. Палкина

Санкт-Петербургский государственный морской технический
университет
(Санкт-Петербург, Россия)

МАТРИЦА ЗРЕЛОСТИ ЦИФРОВОГО БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Цель. Разработка и обоснование матрицы зрелости цифрового бережливого производства, отражающей пофазную интеграцию инструментов цифровизации и бережливого производства в условиях цифровой трансформации промышленности. Особое внимание уделено применению матрицы зрелости в наукоемких отраслях транспортного машиностроения.

Материалы и методы. Использован фазный подход к классификации инструментов цифровизации и бережливого производства. Применены методы сравнительного анализа, экспертной оценки, логико-структурного моделирования, а также матричной диагностики. Оценка проводилась на базе разработанной модели по четырем фазам внедрения: от базовой реализации до стратегической трансформации.

Результаты. Сформирована матрица зрелости цифрового бережливого производства, включающая 16 ячеек, каждая из которых отражает уровень освоения инструментов цифрового бережливого производства на определенной фазе. Матрица позволяет выявлять несоответствия и провалы зрелости между бережливими и цифровыми направлениями, а также выстраивать индивидуальные траектории развития производственной системы.

Заключение. Представленный инструмент может использоваться для самооценки уровня зрелости как на предприятиях машиностроительного сектора, так и промышленности в целом, разработки дорожных карт трансформации, а также стратегического управления внедрением цифровых и организационных изменений. Применение матрицы способствует достижению согласованного и сбалансированного развития цифрового бережливого производства.

Ключевые слова: цифровое бережливое производств; транспортное машиностроение; промышленное предприятие; экономическая эффективность.

Как цитировать:

Вагин М.С., Палкина Е.С. Матрица зрелости цифрового бережливого производства // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 3. С. 434–449. doi: 10.17816/transsyst688686

Section 3. TRANSPORT ECONOMICS

© **M.S. Vagin, E.S. Palkina**

State Marine Technical University
(St. Petersburg, Russia)

DIGITAL LEAN MANAGEMENT MATURITY MATRIX

AIM: The work aimed to develop and validate a digital lean management maturity matrix reflecting the staged integration of digital transformation and lean management tools in the context of industrial digital transformation. The study is focused on the application of the maturity matrix in knowledge-intensive sectors of the transport engineering industry.

METHODS: The study uses a staged approach to the classification of digital transformation and lean management tools; comparative analysis; expert opinions; logical framework modeling, and matrix analysis. The assessment was based on the developed four-stage implementation model, from basic implementation to strategic transformation.

RESULTS: The authors developed a digital lean management maturity matrix with 16 boxes, where each box represents the implementation level of digital lean management tools at a certain stage. The matrix allows identifying inconsistencies and maturity gaps between lean and digital areas and building individual development pathways for the production system.

CONCLUSION: The presented tool can be used for maturity self-assessment both by mechanical engineering companies and the industry in general; development of transformation roadmaps, and strategic management of the implemented digital and organizational changes. The matrix helps to develop a coordinated and well-balanced digital lean management strategy.

Keywords: digital lean management; transport engineering; industrial company; cost efficiency.

To cite this article:

Vagin MS, Palkina ES. Digital lean management maturity matrix. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2025;11(3):434–449. doi: 10.17816/transsyst688686

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая трансформация производственных систем в промышленности требует комплексной модернизации не только технологической инфраструктуры, но и организационных подходов к управлению процессами. В большей степени эта потребность проявляется в наукоемких отраслях промышленности, таких как транспортное машиностроение, где необходима высокая степень точности, надежности и адаптивности к изменениям внешней среды. Предприятия данной отрасли сталкиваются с необходимостью синхронного внедрения цифровых решений (например, интеллектуальных систем мониторинга, цифровых

двойников, адаптивного планирования) и организационных методов повышения эффективности, таких как бережливое производство [1].

На этом фоне активно развивается парадигма цифрового бережливого производства (ЦБП), интегрирующая принципы бережливого производства (БП) и возможности цифровизации (Ц). ЦБП рассматривается как системный подход, обеспечивающий адаптивность, прозрачность и устойчивое совершенствование производственной системы за счет устранения потерь и цифровизации потоков создания ценности [2, 3]. Однако практика внедрения показывает, что в условиях отсутствия архитектурной согласованности между инициативами бережливого производства и цифровизации возникают риски фрагментации, дублирования процессов, роста издержек и утраты управляемости [4, 5].

В этих условиях актуальной задачей становится разработка модели зрелости, позволяющей не только оценить текущее состояние предприятия, но и определить сбалансированную траекторию интеграции цифровых и бережливых решений. Такая модель должна учитывать не только степень внедрения конкретных инструментов, но и логику их взаимосвязи, фазность развития производственной системы и потенциал синергии [6].

Целью настоящего исследования является разработка и обоснование матрицы зрелости цифрового бережливого производства, предназначенной для диагностики, стратегического планирования и управления рисками несбалансированной трансформации. В отличие от существующих моделей цифровой зрелости, предложенный подход основан на двумерной фазной структуре, включающей четыре уровня зрелости цифровизации и четыре уровня зрелости бережливого производства, что обеспечивает целостное представление об организационно-технологической конфигурации предприятия.

Статья структурирована следующим образом: в первом разделе раскрывается логика фазного внедрения инструментов цифровизации и бережливого производства, формулируются критерии их классификации; далее описывается структура матрицы зрелости, ее содержательное наполнение и сценарии практического применения; завершающая часть работы посвящена идентификации рисков несогласованного внедрения и выводам о возможностях стратегического управления цифрово-бережливой трансформацией на предприятиях машиностроительного профиля.

ЛОГИКА ФАЗНОГО ВНЕДРЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ ЦИФРОВИЗАЦИИ И БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Интеграция инструментов бережливого производства и цифровизации в рамках подхода цифрового бережливого производства требует системного и поэтапного анализа.

В настоящей работе под цифровым бережливым производством понимается – комплексный подход к организации бизнеса, объединяющий принципы, инструменты бережливого производства и цифровизации в целях создания ценности для всех заинтересованных сторон посредством полного охвата процессов, их постоянного совершенствования и устранения потерь.

Как показано в ряде исследований [7, 8], эффективность цифровизации промышленного предприятия в значительной степени определяется не только уровнем технологической зрелости, но и последовательностью внедрения инструментов, их взаимосвязанностью и соответствием текущему состоянию производственной системы.

В этой связи особую значимость приобретает системный анализ прикладного состава и классификации инструментов бережливого производства и цифровизации. Современные классификации инструментов преимущественно опираются на функциональные, методологические или технологические основания (например, по видам устраняемых потерь, по направлениям улучшений, по типам технологий) [9–11]. Несмотря на их теоретическую ценность, такие классификации зачастую не учитывают необходимость поступательного развития предприятия и не обеспечивают управленческой привязки к этапам организационной зрелости. В частности, ориентация исключительно на метод или область применения инструмента ограничивает возможность их системной интеграции и последовательного внедрения.

Для преодоления указанных ограничений в настоящем исследовании предложен *фазный подход*, предполагающий распределение инструментов бережливого производства и цифровизации по этапам зрелости производственной системы. Такой подход базируется на логике эволюционного развития предприятия – от первичной стандартизации и стабилизации процессов до стратегической цифровой трансформации, и внедрения самообучающихся систем управления.

Фазное распределение инструментов позволяет:

- обеспечить согласованность между возможностями цифровизации и рационализацией бережливого производства;
- минимизировать риски изолированного или преждевременного внедрения сложных технологий;
- последовательно наращивать потенциал экономической эффективности предприятия за счет взаимного усиления внедренных решений.

Основу предлагаемого подхода составляют четыре прикладных критерия:

1. *Стоимость внедрения*, включая капитальные затраты и операционные расходы.
2. *Сложность внедрения*, учитывающая как технологические, так и организационно-культурные барьеры.
3. *Взаимосвязанность инструментов*, определяющая логическую и функциональную последовательность внедрения.
4. *Влияние на экономическую эффективность*, отражающее эффект от применения инструмента на ключевые показатели: производительность труда, фондоотдачу, материалоотдачу.

Без применения философии бережливого производства позволяющей оптимизировать производственные процессы, цифровизация может привести к автоматизации неэффективных процессов и росту издержек. В то же время внедрение бережливых инструментов без цифровой аналитики и мониторинга ограничивает возможности масштабируемости и устойчивости улучшений [12].

Следовательно, логика фазного внедрения формирует обоснованную траекторию развития производственной системы, где каждый инструмент служит не только локальным улучшением, но и базой для последующих решений. Такая траектория позволяет достигать синергетического эффекта – не просто суммирования эффектов, а формирования новой системной конфигурации управления, способной обеспечить экспоненциальный рост эффективности.

ЧЕТЫРЕ ФАЗЫ ВНЕДРЕНИЯ

На основании изложенного подхода, сформирована классификация инструментов бережливого производства и цифровизации по признаку – *фаза внедрения*. Она включает четыре последовательные стадии трансформации производственной системы, отражающие нарастающую сложность решений, уровень зрелости предприятия и масштабы ожидаемого эффекта. Каждая фаза представляет собой не просто совокупность инструментов, а логически обоснованный этап цифрово-бережливого развития (Рис. 1).

Фаза 1. Базовое внедрение

Начальный этап направлен на устранение наиболее очевидных потерь, стабилизацию процессов и формирование производственной дисциплины. Применяются недорогие и относительно простые в реализации инструменты, такие как 5S, визуализация, стандартизация, чек-листы, система предложений [13]. Основной целью является обеспечение прозрачности, вовлеченности и предсказуемости процессов. Эти инструменты не требуют масштабных инвестиций и могут быть внедрены в условиях ограниченного бюджета и начальной организационной зрелости.

Фаза 2. Процессная оптимизация

На втором этапе внимание смещается к управлению потоком создания ценности и устранению внутренних отклонений. Внедряются более структурные решения: картирование потоков (VSM), SMED, TPM, система вытягивания (Kanban), а также начальные цифровые инструменты (например, мониторинг простоев, MES начального уровня). Для реализации инструментов данной фазы требуется базовая цифровая и организационная инфраструктура, вовлечение кросс-функциональных команд и наличие стандартизированных процессов [14, 15]. Эффект выражается в снижении потерь времени, брака, переналадок и неэффективных перемещений.

Фаза 3. Стратегическая интеграция

На третьей фазе происходит объединение ранее внедренных решений в единую управленческую систему. Осуществляется интеграция цифровых и бережливых практик, внедряются аналитические инструменты (BI, производственные дашборды, системы мониторинга в реальном времени), цифровые двойники и управление отклонениями на основе данных [16, 17]. Уровень зрелости предприятия на этом этапе предполагает наличие формализованных процессов, устойчивой производственной культуры и развитой ИТ-архитектуры. Целью фазы является согласованное управление, адаптивность и предсказуемость системы.

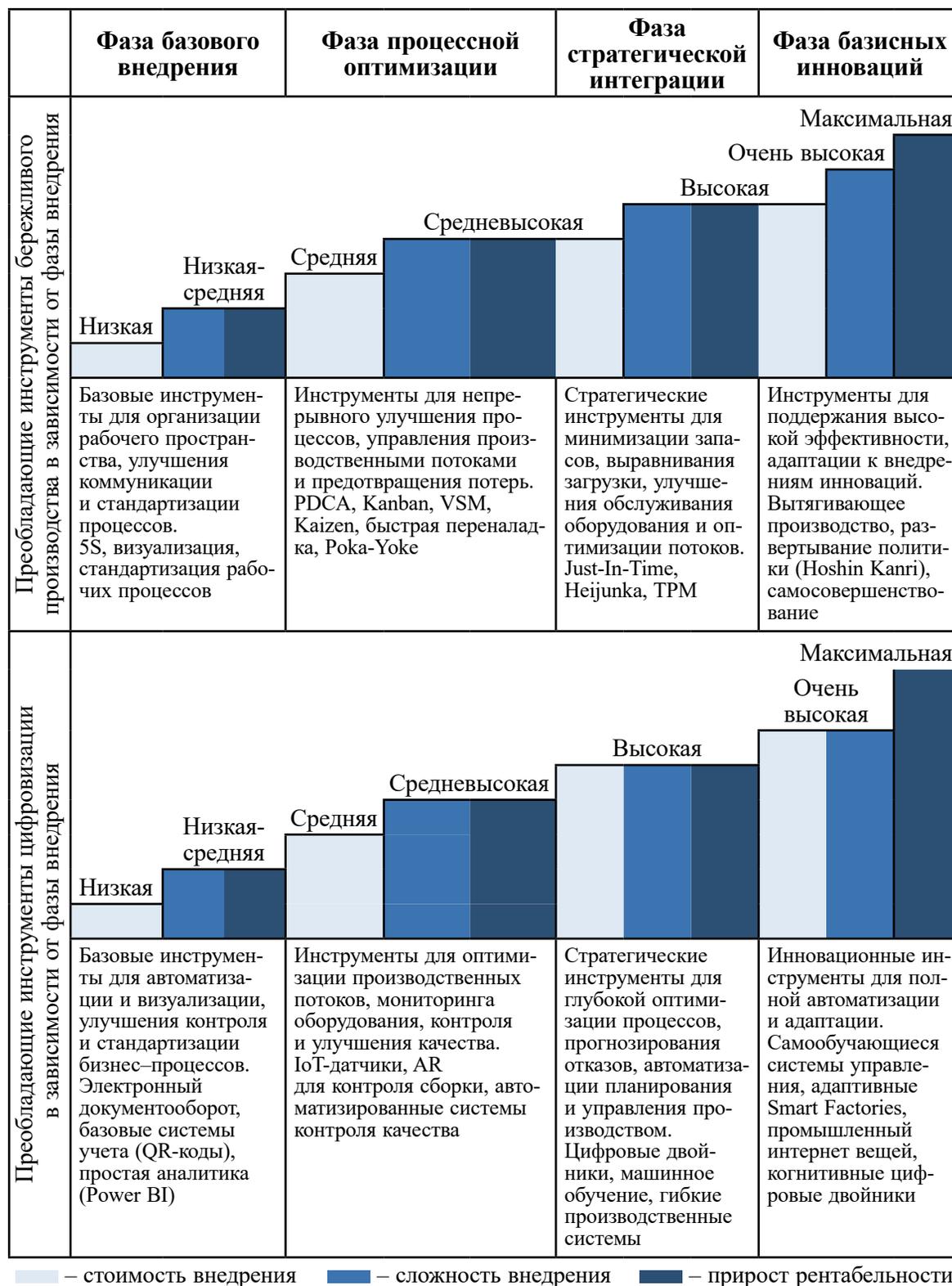


Рис. 1. Классификация инструментов бережливого производства и цифровизации по признаку – фаза внедрения

Fig. 1. Classification of lean management and digital transformation tools by the implementation stage

Фаза 4. Базисные инновации

Заключительная стадия характеризуется внедрением прорывных, трансформирующих решений, способных изменить не только эффективность, но и архитектуру бизнеса. Применяются интеллектуальные и самообучающиеся системы, киберфизические производственные среды, автономная логистика, цифровые экосистемы поставщиков и клиентов, расширенная реальность, распределенные цифровые платформы. Такие инструменты требуют зрелой цифровой среды, высоких компетенций, гибкой структуры управления и развитой организационной культуры. Эффект от их применения выходит за пределы отдельных улучшений и формирует устойчивое конкурентное преимущество на уровне бизнес-модели [18–20].

Таким образом, предложенная фазная структура отражает логику нарастающей сложности, отдачи и взаимосвязанности внедряемых инструментов. Каждая последующая фаза строится на основе достижений предыдущих и создает предпосылки для реализации следующей. Это позволяет перейти от фрагментарного внедрения к управляемой и синергетически согласованной трансформации производственной системы.

КОНЦЕПЦИЯ И СТРУКТУРА МАТРИЦЫ ЗРЕЛОСТИ ЦИФРОВОГО БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Эффективная реализация интеграционной модели цифрового бережливого производства требует формализации критериев оценки степени зрелости предприятия в части внедрения как инструментов бережливого производства, так и цифровых технологий. Для достижения данной цели разработана матрица зрелости, отражающая текущее состояние предприятия с точки зрения согласованности и глубины внедрения цифровых и бережливых решений. В отличие от существующих моделей цифровой зрелости, таких как модели Capgemini, PwC, Deloitte и др., предложенная матрица ориентирована на двумерную структуру, обеспечивающую одновременное отображение уровня развития обоих направлений трансформации.

В основе построения матрицы лежит фазный подход к классификации инструментов. Согласно данному подходу, и цифровизация, и бережливое производство внедряются четырьмя фазами: базовое внедрение, процессная оптимизация, стратегическая интеграция и базисные инновации. Это обеспечивает разбиение пространства зрелости цифрового бережливого производства на 16 уникальных состояний, по четыре уровня для каждого из направлений. Таким образом, матрица имеет размерность 4×4, где по горизонтальной оси (ось X) откладывается уровень зрелости цифровизации, а по вертикальной (ось Y) – уровень зрелости бережливого производства.

Каждая ячейка матрицы отражает типовую конфигурацию предприятия в терминах цифрово-бережливой трансформации и включает следующие компоненты:

- характеристика состояния: описание производственной, управленческой и организационной конфигурации предприятия на данном этапе зрелости,

включая уровень стандартизации процессов, степень автоматизации и зрелость аналитической поддержки;

- ключевые барьеры: ограничивающие факторы, препятствующие переходу к следующему уровню зрелости, в том числе кадровые, технические, методологические и культурные препятствия;
- рекомендации по развитию: направления совершенствования и предложения по внедрению инструментов, развитию компетенций, структурной перестройке и синхронизации цифровых и бережливых инициатив.

Методологически матрица базируется на логике эволюционного и взаимосвязанного внедрения, где каждое последующее решение строится на базе ранее достигнутой зрелости, а также на идее архитектурной синхронизации, при которой цифровые технологии и инструменты бережливого производства не конкурируют, а усиливают друг друга. Это обеспечивает формирование синергетического эффекта, при котором достигается экспоненциальный рост показателей экономической эффективности (включая производительность труда, фондоотдачу и материалоотдачу).

Таким образом, предложенная матрица зрелости цифрового бережливого производства выполняет двойную функцию:

1. Диагностическую – позволяя оценить текущее состояние предприятия в координатах зрелости цифровизации и бережливого производства;
2. Прогностико-управленческую – предоставляя основу для планирования траектории дальнейшей трансформации, включая приоритеты развития, устранение барьеров и формирование синергетических взаимодействий между инструментами.

СОДЕРЖАТЕЛЬНОЕ НАПОЛНЕНИЕ МАТРИЦЫ ЗРЕЛОСТИ ЦИФРОВОГО БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Матрица зрелости цифрового бережливого производства представляет собой не только инструмент формальной оценки уровня трансформации предприятия, но и содержательную модель типовых состояний, возникающих в результате различных комбинаций зрелости цифровизации и бережливого производства (Рис. 2).

Каждая ячейка матрицы отражает конкретную организационно-технологическую конфигурацию предприятия, обусловленную уровнем внедрения инструментов соответствующих фаз.

В крайних точках матрицы фиксируются предельные состояния, отражающие наиболее контрастные сценарии трансформации (Рис. 2).

Координата (1:1) – начальное состояние. На предприятии отсутствует как зрелая цифровая архитектура, так и элементы бережливого производства. Характерна ручная или полуавтоматическая работа, фрагментарные процессы, отсутствие стандартизации и низкая прозрачность. Потенциал экономической эффективности практически не реализуется.

Координата (4:1) – цифровизация осуществляется при отсутствии бережливых основ. Внедрены ИТ-системы (MES, ERP, IoT), однако при этом

Ц БП	Базовое внедрение	Процессная оптимизация	Стратегическая интеграция	Базисные инновации
Базовое внедрение	Ручное управление, бумажный документооборот, отсутствие стандартизации и высокий уровень потерь. Цифровые инструменты не применяются. Основные барьеры: нехватка компетенций. Рекомендации: внедрить 5S, визуализацию, цифровые панели мониторинга (KPI).	Внедряются элементы цифровизации (электронный документооборот, BI), оптимизации – нет. Основные барьеры: сопротивление изменениям, нехватка специалистов по БП. Рекомендации: создать команды по БП, внедрить VSM, Digital Kanban и BI-аналитику.	Используются IoT, автоматизированный контроль качества, процессы не оптимизированы. Основные барьеры: дисбаланс Ц и БП. Рекомендации: провести анализ потерь, внедрить стандартизацию и интегрировать БП с цифровыми технологиями.	Используются Big Data, предиктивная аналитика, блокчейн, но процессы неэффективны, БП – нет. Основные барьеры: отсутствие системы БП. Рекомендации: внедрить стандартизацию, оптимизацию потоков и Heijunka для синергии БП и Ц.
Процессная оптимизация	Предприятие внедряет стандарты и PDCA, но данные собираются вручную. Нет инструментов мониторинга. Основные барьеры: низкая автоматизация, отсутствие системы мониторинга. Рекомендации: внедрить BI-аналитику, цифровые панели и RFID для учета материалов.	Сформирована базовая культура бережливого производства. Применяются разрозненные инструменты цифровизации. Основные барьеры: отсутствие интеграции данных. Рекомендации: внедрить электронный Kanban, IoT-мониторинг и контроль качества.	БП внедрено частично, процессы локально оптимизированы, цифровизация опережает. Подготовка к внедрению AI и IoT. Основные барьеры: сложность внедрения Ц в БП. Рекомендации: внедрить AI для контроля качества, предиктивного обслуживания и цифровых двойников.	БП используется, но Ц опережает его. Управление основано на IoT и AI, улучшения зависят от людей. Основные барьеры: нехватка гибкости процессов, разрыв между Ц и БП. Рекомендации: автоматизировать Kaizen, внедрить самообучающиеся PDCA и AI-оптимизацию.
Стратегическая интеграция	БП внедрено, процессы стандартизованы, JIT работает, цифровизации – нет. Основные барьеры: медленный доступ к данным, сложность анализа. Рекомендации: внедрить BI-аналитику, цифровые двойники и автоматизированное управление.	БП внедрено, используются Kanban, Heijunka, JIT, но Ц локальна. Процессы зависят от ручного контроля. Основные барьеры: отсутствие автоматизированного сбора данных и аналитики. Рекомендации: внедрить IoT, AI-анализ, цифровые двойники и TPM 4.0.	Высокая эффективность интеграции БП и Ц. Процессы гибкие, но остается зависимость от людей. Основные барьеры: зависимость от операторов. Рекомендации: внедрить когнитивные цифровые двойники и AI-оптимизированные системы.	БП и Ц интегрированы, используются AI и Big Data, но автономность не полная. Основные барьеры: ограниченность самообучающихся алгоритмов. Рекомендации: внедрить когнитивные цифровые двойники и управляемые AI-алгоритмы.
Базисные инновации	БП достигло совершенства, процессы оптимизированы, но нет автоматизации. Основные барьеры: нехватка цифровых инструментов. Рекомендации: автоматизировать контроль, внедрить предиктивную аналитику и цифровые двойники.	БП внедрено на высшем уровне, но Ц развивается точно. Данные не используются в реальном времени. Основные барьеры: фрагментарность IT, медленные решения. Рекомендации: внедрить AI-SCM, PoT и интеллектуальный контроль.	БП и Ц интегрированы, производство эффективно, но AI не автономно. Основные барьеры: ограниченность самообучающихся алгоритмов. Рекомендации: внедрить когнитивные цифровые двойники и самоуправляемые AI-алгоритмы.	Предприятие автономно, AI управляет процессами. Основные барьеры: зависимость от цифровых технологий, необходимость кибербезопасности. Рекомендации: развивать кибербезопасность, резервные системы, обновлять алгоритмы.
	Начальный уровень взаимодействия	Фрагментированный уровень взаимодействия	Трансформационный уровень взаимодействия	Гармонизированный уровень взаимодействия

Рис. 2. Матрица зрелости цифрового бережливого производства

Fig. 2. Digital lean management maturity matrix

наблюдается низкий уровень стандартизации, слабая управляемость и высокая нестабильность процессов. Отсутствие бережливой культуры препятствует эффективному использованию цифровых данных. Имеет место риск автоматизации неэффективных процессов, что приводит к росту издержек и фрагментации управления.

Координата (1:4) – зрелое бережливое производство при отсутствии цифровой поддержки. Производственные процессы стандартизированы, применяется VSM, 5S, TPM и другие инструменты, но отсутствуют системы сбора, анализа и интерпретации данных. Потенциал контроля и масштабирования улучшений ограничен.

Координата (4:4) – целевое интеграционное состояние. Предприятие располагает высокоразвитой архитектурой цифрово-бережливого управления. Внедрены системы интеллектуального мониторинга, цифровые двойники, аналитические платформы, верифицированные стандартами бережливого производства. Достигается эффект самонастраиваемой, адаптивной производственной системы с устойчивым приростом экономических показателей.

Между этими крайними точками расположены промежуточные состояния, отражающие реальные конфигурации предприятий, например:

(2:3) – предприятие активно применяет бережливые инструменты на уровне стратегической интеграции, однако цифровизация ограничивается базовыми решениями (электронные таблицы, разрозненные ИТ-системы, ручной сбор данных). Это ограничивает возможности для аналитики и принятия обоснованных управленческих решений.

(3:2) – внедрены цифровые средства визуализации, MES и BI, но при этом отсутствует потоковое мышление, стандартизация и системный контроль по бережливым подходам. В результате цифровые данные собираются, но используются фрагментарно, что снижает управляемость и отдачу от инвестиций.

Такая детализация ячеек позволяет формировать диагностическую карту зрелости, выявлять неравномерность трансформации, оценивать степень согласованности направлений и формулировать обоснованные рекомендации по дальнейшему развитию.

Матрица зрелости цифрового бережливого производства, может быть использована не только как инструмент диагностики, но и как основа для стратегического планирования развития производственной системы. Ее двумерная структура позволяет оценивать характер и степень интеграции цифровых и бережливых инструментов, а также прогнозировать последствия несбалансированного или несогласованного внедрения.

Одним из ключевых практических применений матрицы является формализация возможных траекторий движения предприятия в ячейках зрелости. В зависимости от исходного положения и организационных приоритетов, выделяются три базовых сценария развития:

1. Равномерная траектория (по диагонали от 1:1 к 4:4) Это наиболее предпочтительный и сбалансированный путь, при котором развитие

- бережливого производства и цифровизации осуществляется синхронно, с учетом их взаимосвязанности и последовательности фаз. На каждой стадии создаются предпосылки для следующей, обеспечивается нарастающий синергетический эффект и минимизируются организационные дисбалансы. Такой сценарий требует наличия координирующей структуры трансформации и архитектурного проектирования внедрения.
2. Сценарий с приоритетом бережливого производства (движение со смещением в сторону 4:1) Данный сценарий реализуется в условиях, когда предприятие сталкивается с высокой долей ручного труда, значительными потерями, нестабильными процессами и слабой дисциплиной исполнения. В таких условиях целесообразно начинать с формирования стандартизированной среды, визуального контроля, потокового мышления и устранения отклонений. После стабилизации процессов и достижения базовой эффективности возможно подключение цифровых решений, обеспечивающих масштабирование, мониторинг и предиктивную аналитику. Недостатком этого подхода является возможная задержка в реализации цифровых инициатив.
 3. Сценарий с приоритетом цифровизации (движение со смещением в сторону 1:4) Характерен для предприятий с высокой технической оснащенностью, высокой долей автоматизации или ориентированных на работу в высокотехнологичных сегментах. Здесь цифровые технологии (MES, IoT, цифровые двойники) внедряются в первую очередь для решения задач управления качеством, гибкости и интеграции данных. Однако при отсутствии предварительной стандартизации, потокового управления и вовлеченности персонала такие решения часто сталкиваются с проблемами интерпретации данных, фрагментацией системы и высокой зависимостью от ИТ-специалистов. Приоритет цифровизации без организационной зрелости может привести к автоматизации неэффективных процессов и росту издержек.

Выбор сценария определяется отраслевыми характеристиками, уровнем зрелости процессов, кадровым потенциалом, доступными ресурсами и стратегическими целями предприятия. В то же время равномерная траектория по-прежнему остается предпочтительной с точки зрения обеспечения устойчивой синергии и минимизации рисков.

Применение матрицы зрелости также позволяет выявить и систематизировать риски, связанные с несогласованным или несинхронным внедрением инструментов цифровизации и бережливого производства. При отсутствии координации между программами трансформации возникает опасность формирования параллельных, но несвязанных между собой управленческих контуров, что приводит к неэффективности и даже деградации производственной системы.

К числу наиболее типичных рисков относится:

Несогласованность инициатив. Проекты по цифровизации и бережливому производству развиваются независимо, с различными приоритетами и на разных уровнях управления. Это приводит к конфликту целей, дублированию функций,

увеличению нагрузки на персонал и снижению общей отдачи от программ. Результатом становится утрата эффекта взаимного усиления и расфокусировка трансформационных усилий.

Ресурсное рассредоточение. При одновременном, но неинтегрированном запуске цифровых и бережливых инициатив наблюдается перегрузка управленческих и производственных команд, снижение вовлеченности и увеличение операционных затрат. Отсутствие приоритетов и архитектурной логики приводит к хаотичному распределению усилий, особенно в условиях ограниченных ресурсов.

Стратегическая фрагментация. Возникает в случае, когда цифровизация и бережливое производство трактуются как изолированные направления, без формирования единой архитектурной концепции. В результате трансформация приобретает разрозненный, тактический характер, не достигая долгосрочных целей. Нарастают внутренние противоречия, ослабляется стратегическое управление, снижается рентабельность инвестиций.

Неполная реализация потенциала ЦБП. Внедряемые цифровые и бережливые инструменты не поддерживают и не усиливают друг друга, функционируя, как отдельные модули. В таких условиях невозможно достичь системного эффекта, основанного на архитектурной интеграции. Потенциал цифрового бережливого производства как источника экспоненциального роста производительности и рентабельности остается нереализованным.

Особую значимость данные риски приобретают на третьей и четвертой фазах зрелости, когда от предприятия требуется не только внедрение сложных решений, но и их согласованная интеграция в рамках единой производственной архитектуры. В этих условиях формируется синергетический эффект, не как сумма локальных улучшений, а как эмерджентное качество системы, обеспечивающее ее адаптивность, интеллектуальность и устойчивость к изменениям.

Таким образом, матрица зрелости цифрового бережливого производства выступает не только инструментом диагностики, но и средством управления стратегической целостностью трансформации, позволяя выстраивать сбалансированную и согласованную траекторию цифрово-бережливого развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные вызовы, стоящие перед предприятиями машиностроительного сектора, включая стратегически значимые направления такие как вагоностроение, судостроение, авиастроение требуют интеграции гибких производственных систем с интеллектуальными цифровыми решениями. В условиях цифровой трансформации особую актуальность приобретает необходимость системной координации цифровизации и организационных изменений на основе принципов бережливого производства.

В рамках настоящего исследования предложена концептуально и методически обоснованная матрица зрелости цифрового бережливого производства, предназначенная для оценки, планирования и управления интеграцией цифровых и бережливых подходов. В отличие от традиционных моделей зрелости,

ориентированных преимущественно на цифровые аспекты, разработанная матрица учитывает двумерную структуру зрелости как цифровизации, так и бережливого производства, включая их поэтапное развитие по четырем фазам: базовое внедрение, процессная оптимизация, стратегическая интеграция, базисные инновации.

Каждая из 16 ячеек матрицы отражает типовое состояние предприятия, соответствующее различным комбинациям зрелости, и сопровождается аналитическим описанием, выявлением барьеров и рекомендациями по развитию. Такой подход позволяет использовать матрицу не только как инструмент диагностики текущего состояния, но и как основу для планирования стратегически согласованных траекторий трансформации.

Особое внимание в работе уделено идентификации рисков несогласованного внедрения цифровых и бережливых инициатив, что критично для высокотехнологичных производств, таких как вагоностроительные предприятия, находящиеся на стыке машиностроения и цифровой логистики. Показано, что фрагментарная цифровизация без организационной зрелости, так же, как и изолированное применение бережливых методов без аналитической поддержки, может привести к автоматизации неэффективных процессов, росту издержек и снижению управляемости.

Предложенный подход в первую очередь будет востребован под задачи цифрово-бережливой трансформации предприятий транспортного машиностроения, где требуется высокая степень точности, гибкости, предсказуемости и рентабельности при одновременной модернизации инфраструктуры и логистических процессов.

Направления дальнейших исследований включают:

- практическую верификацию матрицы зрелости цифрового бережливого производства;
- развитие цифрового инструментария для оценки зрелости на основе предложенной модели;
- исследование связи зрелости цифрового бережливого производства с устойчивостью и адаптивностью производственных систем.

Таким образом, представленная матрица зрелости цифрового бережливого производства закладывает методологическую и прикладную основу для стратегического управления трансформацией как машиностроительных производств, так и промышленных предприятий в целом и может служить ориентиром для повышения их технологической, экономической и организационной эффективности в условиях цифровой экономики.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ху Т. Обзор национальных стратегий перехода к Индустрии 5.0 // Экономика и управление инновациями. 2022. № 3(22). С. 28–38. doi: 10.26730/2587-5574-2022-3-28-38
2. Manish. What Is Digital Lean Or Lean 2.0 In VUCA world? Learn Transformation [internet]. 24 авг. 2023. Дата обращения: 04.05.2025. Режим доступа: <https://learntransformation.com/lean-2-0/>
3. Powell D.J., Romero D. Digital Lean Manufacturing: A Literature Review. In: IEEE Int. Conf. on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM); 13–16 Dec. 2021; Singapore. IEEE, 2021. doi: 10.1109/IEEM50564.2021.9673032
4. Кох Л.В., Кох Ю.В. Цифровая трансформация производственной системы в судостроении: проблемы и способы их решения // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Эконом. науки. 2019. Т. 12, № 4. С. 78–89. doi: 10.21209/2227-9245-2021-27-6-107-123 EDN: BVGBAN
5. Palkina E.S. Risks of digital transformation of transport logistics in priority market segments // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 371. P. 04047. doi: 10.1051/e3sconf/202337104047 EDN: TYGRVQ
6. Глухов В.В., Бабкин А.В., Шкарупета Е.В. Цифровое стратегирование промышленных систем на основе устойчивых экоинновационных и циркулярных бизнес-моделей в условиях перехода к Индустрии 5.0 // Экономика и управление. 2022. Т. 28, № 10. С. 1006–1020. doi: 10.35854/1998-1627-2022-10-1006-1020 EDN: JDJSWV
7. Шафиева Э.Т., Хачидогов Р.А. Основные этапы цифровой трансформации современной национальной экономики // Журн. приклад. исслед. 2021. Т. 5, № 2. С. 142–147. doi: 10.47576/2712-7516_2021_5_2_142 EDN: GUYNVU
8. Rossini M., Dafne Cifone F., Kassem B., Costa F., Portioli-Staudacher A. Being lean: how to shape digital transformation in the manufacturing sector // Journal of Manufacturing Technology Management. 2021. Vol. 32, № 9. P. 239–259. doi: 10.1108/JMTM-12-2020-0467 EDN: UXPVII
9. Бельш К.В. Классификация основных методов и инструментов бережливого производства // Вестн. РУДН. Сер. Экономика. 2016. № 1. С. 70–77.
10. Сахнович Т.А. Инструменты бережливого производства Lean production tools. В кн.: Наука – образованию, производству, экономике: сб. материалов 19-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2022. С. 150–155.
11. Валинурова Л.С., Мазур Н.З. Цифровой инструментарий управления предприятиями // Инновации и инвестиции. 2023. № 6. С. 459–464.
12. Колычев В.Д., Белкин И.О. Интеграция бережливого производства и цифровых технологий в управление операционной деятельностью промышленных предприятий // Изв. высш. учеб. заведений. Сер.: Экономика, финансы и управление производством. 2023. № 3 (57). С. 45–58. doi: 10.6060/ivcofin.2023573.653 EDN: UAWLCH
13. Глухов В.В., Балашова Е.С. Организация производства. Бережливое производство: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007.
14. Флек М.Б., Угнич Е.А. Управление предприятием в условиях цифровой трансформации. Ростов на Дону: ДГТУ, 2020.
15. Treviño-Elizondo B.L., García-Reyes H., Peimbert-García R.E. A maturity model to become a smart organization based on lean and industry 4.0

- synergy // Sustainability. 2023. Vol. 15. doi: 10.3390/su151713151 EDN: NRJWUQ
16. Vaz N. Digital Business Transformation. How Established Companies Sustain Competitive Advantage from Now to Next. Wiley, 2021.
 17. Боровков А.И., Гамзикова А.А., Кукушкин К.В., Рябов Ю.А. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: краткий доклад. СПб.: Политех-Пресс, 2019.
 18. Digital Transformation in Industry: Trends, Management, Strategies / eds. V. Kumar, J. Rezaei, V. Akberdina, E. Kuzmin. Lecture Notes in Information Systems and Organisation. Vol. 44. Cham: Springer, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-73261-5 EDN: BNTNXN
 19. Кобзев В.В., Бабкин А.В., Скоробогатов А.С. Цифровая трансформация промышленных предприятий в условиях новой реальности // *π-Economy*. 2022. Т. 15, № 5. С. 7–27. doi: 10.18721/IE.15501 EDN: NUNQPQ
 20. Бабкин А.В., Шкарупета Е.В., Плотников В.А. Интеллектуальная киберсоциальная экосистема Индустрии 5.0: понятие, сущность, модель // *Экон. возрождение России*. 2021. № 4 (70). С. 39–62. doi: 10.37930/1990-9780-2021-4-70-39-62 EDN: TCYAIR

REFERENCES

1. Khu T. National strategies for transition to Industry 5.0 (Obzor natsional'nykh strategii perekhoda k Industrii 5.0). *Economics and Innovation Management*. 2022;(3):28–38. (In Russ.) doi: 10.26730/2587-5574-2022-3-28-38
2. Manish. What Is Digital Lean Or Lean 2.0 In VUCA world? Learn Transformation [Internet]. 2023 Aug 24 Accessed: 2025 May 4. Available from: <https://learntransformation.com/lean-2-0/>
3. Powell DJ, Romero D. Digital Lean Manufacturing: A Literature Review. In: *Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM); 2021 Dec 13–16; Singapore*. IEEE; 2021. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/357968752>
4. Kokh LV, Kokh YV. Digital transformation of the production system in shipbuilding: problems and solutions. *Science and Technology Bulletin of SPbPU. Economics*. 2019;12(4):78–89. (In Russ.) doi: 10.21209/2227-9245-2021-27-6-107-123 EDN: BVGBAN
5. Palkina ES. Risks of digital transformation of transport logistics in priority market segments. *E3S Web of Conferences*. 2023;371:04047. doi: 10.1051/e3sconf/202337104047 EDN: TYGRVQ
6. Glukhov VV, Babkin AV, Shkarupeta EV. Digital strategizing of industrial systems based on sustainable eco-innovative and circular business models during the transition to Industry 5.0. *Economics and Management*. 2022;28(10):1006–1020. (In Russ.) doi: 10.35854/1998-1627-2022-10-1006-1020 EDN: JDJSWV
7. Shafieva ET, Khachidogov RA. Main stages of digital transformation of the national economy. *Journal of Applied Research*. 2021;5(2):142–147. (In Russ.) doi: 10.47576/2712-7516_2021_5_2_142 EDN: GUYNVU
8. Rossini M, Cifone FD, Kassem B, Costa F, Portioli-Staudacher A. Being lean: how to shape digital transformation in the manufacturing sector. *J Manuf Technol Manag*. 2021;32(9):239–259. doi: 10.1108/JMTM-12-2020-0467 EDN: UXPVYI

9. Belysh KV. Classification of the main methods and tools of lean production. *RUDN Journal of Economics*. 2016;(1):70–77.
10. Sakhnovich TA. Lean production tools. In: *Proceedings of the 19th Int. Sci. and Tech. Conf.* Minsk: BNTU; 2022. p. 150–155. (In Russ.)
11. Valinurova LS, Mazur NZ. Digital tools for enterprise management. *Innovations and Investments*. 2023;(6):459–464. (In Russ.)
12. Kolychev VD, Belkin IO. Integration of lean production and digital technologies in the operational management of industrial enterprises. *Higher Education Institutions Proceedings. Economics, Finance and Production Management*. 2023;3(57):45–58. (In Russ.) doi: 10.6060/ivecofin.2023573.653 EDN: UAWLCH
13. Glukhov VV, Balashova ES. *Production organization. Lean Production: Textbook*. St. Petersburg: Polytechnic University Press; 2007. (In Russ.)
14. Flek MB, Ugnich EA. *Enterprise management in the context of digital transformation*. Rostov-on-Don: DSTU; 2020. (In Russ.)
15. Treviño-Elizondo BL, García-Reyes H, Peimbert-García RE. A maturity model to become a smart organization based on lean and industry 4.0 synergy. *Sustainability*. 2023;15:13151. doi: 10.3390/su151713151 EDN: NRJWUQ
16. Vaz N. *Digital Business Transformation. How Established Companies Sustain Competitive Advantage from Now to Next*. Wiley; 2021.
17. Borovkov AI, Gamzikova AA, Kukushkin KV, Ryabov YA. *Digital twins in high-tech industry: Summary report*. St. Petersburg: Politek-Press; 2019. (In Russ.)
18. Kumar V, Rezaei J, Akberdina V, Kuzmin E, eds. *Digital Transformation in Industry: Trends, Management, Strategies. Lecture Notes in Information Systems and Organisation*. Vol. 44. Cham: Springer; 2021. doi: 10.1007/978-3-030-73261-5 EDN: BNTNXN
19. Kobzev VV, Babkin AV, Skorobogatov AS. Digital transformation of industrial enterprises in the new reality. *π-Economy*. 2022;15(5):7–27. (In Russ.) doi: 10.18721/JE.15501 EDN: NUNQPQ
20. Babkin AV, Shkarupeta EV, Plotnikov VA. Intellectual cyber-social ecosystem of Industry 5.0: concept, essence, model. *Economic Revival of Russia*. 2021;(4):39–62. (In Russ.) doi: 10.37930/1990-9780-2021-4-70-39-62 EDN: TCYAIR

Сведения об авторах:

Вагин Михаил Сергеевич, соискатель;

eLibrary SPIN: 3582-4226; ORCID: 0009-0002-3833-4623;

E-mail: vaginms@yandex.ru

Палкина Елена Сергеевна, д-р экон. наук, доцент, профессор;

eLibrary SPIN: 8447-6777; ORCID: 0000-0002-4702-3512;

E-mail: elena_palkina@hotmail.com

Information about the authors:

Mikhail S. Vagin, Applicant;

eLibrary SPIN: 3582-4226; ORCID: 0009-0002-3833-4623;

E-mail: vaginms@yandex.ru

Elena S. Palkina, Dr. Sci. (Economics), Associated Professor, Professor;

eLibrary SPIN: 8447-6777; ORCID: 0000-0002-4702-3512;

E-mail: elena_palkina@hotmail.com