

Экономико-математическая модель оценки синергетического эффекта от совместного внедрения бережливого производства и цифровизации на промышленном предприятии

Вагин Михаил Сергеевич¹

Соискатель, SPIN-код РИНЦ: [3582-4226](#), ORCID: [0009-0002-3833-4623](#), vaginms@yandex.ru

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, РФ.

Палкина Елена Сергеевна

Доктор экономических наук, доцент, SPIN-код РИНЦ: [8447-6777](#), ORCID: [0000-0002-4702-3512](#), elena.palkina@hotmail.com

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, РФ.

Аннотация

Современные промышленные предприятия сталкиваются с необходимостью повышения операционной эффективности посредством оптимизации процессов. Это связано с растущей международной конкуренцией, ускорением темпов технологических изменений и необходимостью адаптации производственных организаций к динамичным условиям рынка. В этих условиях бережливое производство и цифровые технологии формируют основу для достижения устойчивого экономического роста и повышения конкурентоспособности на мировом товарном рынке. Бережливое производство, направленное на устранение потерь, совершенствование процессов и повышение ценности для конечного потребителя, а также современные цифровые технологии, такие как большие данные, искусственный интеллект и Интернет вещей, создают дополнительные возможности для роста экономической эффективности деятельности предприятия, позволяя автоматизировать рутинные задачи, улучшить управление ресурсами посредством повышения гибкости и оперативности принятия решений. Многочисленные исследования подтверждают, что изолированное внедрение бережливого производства или цифровизации вносит существенный вклад в снижение потерь и повышение производительности. При этом их совместное использование может создать синергетический эффект, который позволит достичь дополнительных улучшений в экономических показателях деятельности предприятия благодаря гибкости процессов, высокому качеству продукции и сокращению затрат. Несмотря на это, вопрос оценки синергетического эффекта от совместной интеграции бережливого производства и цифровизации остается недостаточно изученным. Большинство исследований сосредоточено на различных аспектах отдельного применения этих подходов, тогда как прогнозирование и количественная оценка их совместного применения в литературе практически не рассматриваются. Отсутствие математических моделей, учитывающих взаимное влияние бережливого производства и цифровизации, затрудняет планирование и оптимизацию их внедрения, особенно на предприятиях, где данные инструменты уже частично реализованы. В статье на основе анализа существующих подходов оценки синергетического эффекта разработана экономико-математическая модель оценки синергетического эффекта при совместном внедрении бережливого производства и цифровизации на промышленном предприятии. Определены ограничения модели, соблюдение которых позволит достичь положительной синергии. Предложенная модель является необходимым инструментом оценки потенциала роста экономической эффективности организации, повышения точности прогнозирования, обоснования стратегии внедрения цифрового бережливого производства, которая исходит из конкретных условий функционирования предприятий и обеспечения долгосрочного устойчивого развития промышленности России.

Ключевые слова

Бережливое производство, интеграция, оценка, промышленное предприятие, синергетический эффект, цифровизация, цифровое бережливое производство, экономико-математическая модель.

Для цитирования

Вагин М.С., Палкина Е.С. Экономико-математическая модель оценки синергетического эффекта от совместного внедрения бережливого производства и цифровизации на промышленном предприятии // Государственное управление. Электронный вестник. 2025. № 112. С. 29–44. DOI: 10.55959/MSU2070-1381-112-2025-29-44

Economic and Mathematical Model for Assessing Synergetic Effect of Lean Production and Digitalization Joint Implementation on Industrial Enterprise

Mikhail S. Vagin²

PhD applicant, ORCID: [0009-0002-3833-4623](#), vaginms@yandex.ru

State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russian Federation.

Elena S. Palkina

DSc (Economics), Associate Professor, ORCID: [0000-0002-4702-3512](#), elena.palkina@hotmail.com

State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russian Federation.

¹ Корреспондирующий автор.

² Corresponding author.

Abstract

Modern industrial enterprises face the need to increase operational efficiency through process optimization. This is defined by growing international competition, the accelerating pace of technological change, and the need for manufacturing organizations to adapt to dynamic market conditions. In these conditions, lean production and digital technologies form the basis for achieving sustainable economic growth and increasing competitiveness in the global commodity market. Lean production, aimed at eliminating losses, improving processes and increasing value for the end user, as well as modern digital technologies such as big data, artificial intelligence and the Internet of Things, create additional opportunities for increasing the economic efficiency of the enterprise, allowing automating routine tasks, improving resource management by increasing flexibility and decision-making efficiency. Numerous studies confirm that the isolated implementation of lean production or digitalization makes a significant contribution to reducing losses and increasing productivity. At the same time, their joint use can create a synergistic effect that will allow achieving additional improvements in the economic performance of the enterprise due to the flexibility of processes, high product quality and cost reduction. Despite this, the issue of assessing the synergetic effect of the joint integration of lean production and digitalization remains insufficiently studied. Most studies focus on various aspects of the individual application of these approaches, while forecasting and quantifying their combined application are practically not considered in the literature. The lack of mathematical models that take into account the mutual impact of lean production and digitalization makes it difficult to plan and optimize their implementation, especially in enterprises where these tools have already been partially implemented. Based on the analysis of existing approaches to assessing the synergetic effect, the article develops an economic and mathematical model for assessing the synergetic effect in the joint implementation of lean production and digitalization in an industrial enterprise. The limitations of the model have been identified, compliance with which will allow achieving positive synergy. The proposed model is a necessary tool for assessing the growth potential of an organization's economic efficiency, improving forecasting accuracy, and justifying a strategy for implementing digital lean production based on the specific operating conditions of enterprises and ensuring the long-term sustainable development of the Russian industry.

Keywords

Lean production, integration, evaluation, industrial enterprise, synergetic effect, digitalization, digital lean production, economic and mathematical model.

For citation

Vagin M.S., Palkina E.S. (2025) Economic and Mathematical Model for Assessing Synergetic Effect of Lean Production and Digitalization Joint Implementation on Industrial Enterprise. *Gosudarstvennoye upravleniye. Elektronnyy vestnik*. No. 112. P. 29–44. DOI: 10.55959/MSU2070-1381-112-2025-29-44

Дата поступления/Received: 25.07.2025

Введение

Бережливое производство и цифровизация являются ключевыми трендами, трансформирующими современные промышленные предприятия. Работы отечественных ученых А.К. Гастева и О.А. Ерманского по научной организации труда были положены в основу производственной системы Toyota [Zaytseva 2018], сформировав концепцию бережливого производства, направленную на минимизацию потерь и повышение ценности для потребителя через стандартизацию процессов и вовлечение персонала в непрерывное совершенствование [Кондрашова и др. 2024]. Цифровизация включает внедрение технологий, таких как Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект, большие данные и другие, для оптимизации производственных процессов и повышения их эффективности.

Совместное применение бережливых и цифровых технологий усиливает их положительные эффекты, формируя синергетический эффект. Цифровые инструменты позволяют глубже анализировать процессы, а принципы и методы бережливого производства направляют эти усилия на устранение потерь и улучшение ключевых операций [Marcondes et al. 2023]. Например, данные, собранные IoT-системами, могут выявлять узкие места в производстве, что ускоряет реализацию улучшений. В свою очередь, бережливое производство помогает структурировать внедрение цифровых технологий, избегая при этом избыточных затрат и повышая эффективность их использования [Колычев, Белкин 2023].

Анализ литературы показал, что, несмотря на значительный потенциал взаимодействия бережливого производства и цифровизации, вопрос оценки синергетического эффекта недостаточно изучен в количественном отношении. Существующие исследования часто рассматривают эти

подходы отдельно, не уделяя должного внимания их интеграции. Между тем практика показывает, что максимальные результаты взаимодействия достигаются при их сбалансированном применении³.

Разработка экономико-математических моделей, учитывающих взаимодействие бережливых и цифровых инструментов, позволяет прогнозировать результаты их совместного внедрения последовательно, на каждом этапе. Такие модели особенно актуальны для предприятий с различным уровнем готовности к внедрению этих подходов, поскольку они позволяют адаптировать стратегии под конкретные условия [Treviño-Elizondo et al. 2023]. С учетом возрастающего значения цифровой трансформации и бережливого производства в мировой практике исследование их синергетического эффекта представляет значительный научный и практический интерес.

Таким образом, цель данной статьи состоит в разработке интегративной экономико-математической модели, которая объединяет базовые эффекты бережливого производства и цифровизации, а также описывает синергетический результат их взаимодействия. Использование предложенной модели в практике деятельности промышленных предприятий позволит не только количественно оценить эффект от совместного применения бережливого производства и цифровизации, но и разработать рекомендации по оптимизации стратегий внедрения цифрового бережливого производства для организаций с различными исходными условиями. Это создаст научную основу для повышения эффективности функционирования промышленных предприятий в условиях современного технологического уклада.

Методы исследования

Разработка и обоснование модели, описывающей совместный эффект от внедрения бережливого производства и цифровизации, основаны на экономико-математическом моделировании, эмпирической обработке данных и методах статистического анализа.

Следует отметить, что экономико-математическое моделирование использовалось для формализации взаимосвязей между ключевыми параметрами бережливого производства и цифровизации. При этом построение модели основывается на представлении о фазности внедрения технологий, что позволяет описывать постепенное развитие процессов цифровизации и бережливого производства — от начальной до конечной стадии. Введение логистических функций обеспечило реалистичное отражение динамики внедрения цифрового бережливого производства, включая медленный рост на начальных этапах, активное развитие на стадии становления и стабилизацию на стадии зрелости.

Результаты исследования

Результаты анализа отечественной и зарубежной литературы позволяют сделать вывод о том, что методов и способов оценки синергетического эффекта достаточно много: от самых простых и универсальных до сложных и специфических. Целесообразно сгруппировать эти методы по трем признакам (Рисунок 1):

- финансово-экономические методы — наиболее популярны благодаря своей универсальности и простоте;
- математические и статистические методы — востребованы в аналитических и исследовательских задачах, где требуется высокая точность и учет множества факторов;
- качественные методы — широко применяются на ранних этапах анализа и для изучения нематериальных аспектов.

³ Digital lean manufacturing. Industry 4.0 technologies transform lean processes to advance the enterprise // Deloitte [Электронный ресурс]. URL: https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/6515_CIR-Digital-lean-DSN/DI-Digital-lean-DSN.pdf?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 11.01.2025).

Финансово-экономические методы направлены на количественное измерение результатов синергии через анализ ключевых финансово-экономических показателей. Наибольшее распространение они получили в бизнесе, особенно при слияниях и поглощениях (M&A), реструктуризации компаний, оценке инвестиций. Фундаментальный вклад в развитие данного направления внесли работы П.Л. Виленского, А. Дамодарана, Ф. Эванса, послужившие основой для дальнейших научных исследований и практического применения. Т.А. Козенкова рассматривает вопросы оценки экономической эффективности деятельности интегрированных предпринимательских структур [Козенкова 2014]. Автор анализирует финансовые показатели синергетического эффекта интеграции и предлагает методические рекомендации по их оценке. Г.А. Геворкян исследует процессы интеграции наукоемких производств и подчеркивает необходимость совершенствования методологии оценки синергетических эффектов [Геворкян 2023]. В целом финансово-экономические методы дают конкретные количественные результаты (например, экономию затрат, прирост прибыли), обладают простотой интерпретации для руководства и акционеров, однако не учитывают нематериальные аспекты.



Рисунок 1. Методы анализа синергетического эффекта⁴

Математические и статистические методы применяются благодаря способности анализировать сложные системы, прогнозировать результаты и учитывать множество факторов. Эти методы основываются на анализе данных, построении моделей и прогнозировании эффектов, возникающих в результате взаимодействия элементов системы. Их применение особенно актуально в условиях сложных взаимосвязей, где традиционные подходы оказываются недостаточными. В работе Н.Р. Ижгузиной используется корреляционно-регрессионный анализ для обработки статистических данных, что позволяет выявлять и количественно оценивать взаимосвязи между различными параметрами городской агломерации и ее синергетическим эффектом [Ижгузина 2016]. Вклад в развитие математических моделей оценки синергии также внесли П.Б. Болдыревский, А.К. Игошев и Л.А. Кистанова. В своей работе авторы применили модель Лотки-Вольтерры для моделирования цикличного развития экономических систем с учетом синергетических эффектов [Болдыревский и др. 2018]. В целом математические и статистические методы позволяют проводить довольно точные расчеты, однако имеют сложность в интерпретации результатов и требуют больших объемов данных.

⁴ Составлено авторами.

Качественные методы часто используются на ранних этапах анализа или в дополнение к количественным методам, особенно при анализе нематериальных факторов. Методы этой группы оценивают синергию на основе экспертного мнения, качественных характеристик и описательных подходов. Эти методы применяются в ситуациях, когда количественная оценка либо затруднена, либо невозможна, а ключевые аспекты синергии лежат в плоскости социальных, культурных или стратегических факторов. Их цель — выявление и понимание скрытых взаимосвязей, которые невозможно измерить финансовыми или статистическими показателями. Они помогают анализировать динамику процессов и факторов, влияющих на синергетический эффект, таких как совместимость корпоративных культур, ожидания заинтересованных сторон, стратегические возможности и угрозы. Например, М.М. Шевырев предложил методологию оценки синергетического эффекта инновационных региональных кластеров с использованием качественных подходов (анализ профилей компетенций участников кластера и их стратегическое соответствие) [Шевырев 2010]. Несмотря на свои преимущества, качественные методы имеют ограничения. Основным из них является их субъективность: результаты во многом зависят от компетенции экспертов и интерпретации данных при количественном выражении результатов, что может затруднять их использование для принятия решений.

Качественные методы особенно полезны в сочетании с количественными подходами. А. Дамодаран использует методику дисконтированных денежных потоков для оценки объединяющихся, а также объединенной фирмы после слияния [Дамодаран 2020]:

$$V_{ab} = V_a + V_b + Syn, \quad (1)$$

где V_{ab} — стоимость (ценность) объединенной фирмы, V_a и V_b — стоимость (ценность) фирм до объединения, Syn — синергетический эффект.

Сравнение совокупного результата от взаимодействия двух инициатив с результатами их отдельной реализации — базовая идея в рамках классической финансовой теории⁵.

Следует отметить, что методики оценки синергетического эффекта при слиянии и поглощении сопоставимы с методиками взаимовлияющих инвестиционных проектов и могут быть применены при анализе полного эффекта от совместного внедрения бережливого производства и цифровизации [Королькова 2018].

Внедрение бережливого производства и цифровизации включает несколько фаз [Вагин, Ивченко 2024]. Учет фазности — базовое внедрение, процессная оптимизация, стратегическая интеграция, базисные инновации — позволяет отразить динамику изменения синергетического эффекта во времени, соответствуя реальной практике предприятий. На ранних стадиях уровень внедрения остается низким, что ограничивает масштаб достигнутых улучшений и только к стадии стратегической интеграции наблюдается значительное изменение экономических показателей за счет возникающей синергии между инструментами бережливого производства и цифровыми технологиями.

Таким образом, синергетический эффект от совместного внедрения бережливых технологий и цифровых решений, имея фазовый характер, увеличивается по мере перехода от одной стадии к другой. Он представляет собой уникальную добавленную ценность, которая возникает исключительно при совместном внедрении бережливого производства и цифровых технологий, и обусловлен тем, что цифровые решения усиливают потенциал бережливого производства, обеспечивая более точное и быстрое выявление и устранение потерь, автоматизацию процессов и повышение прозрачности управления. В то же время бережливое производство способствует

⁵ Ковалев В.В. Финансовый менеджмент: теория и практика. М.: Проспект, 2023.

адаптации цифровых технологий к потребностям конкретных процессов, что увеличивает их прикладную ценность. На поздних стадиях внедрения цифрового бережливого производства, когда достигается максимальное использование различных инструментов, синергия становится основным драйвером роста экономического эффекта, превосходя вклад отдельных технологий.

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

Таким образом, именно взаимодействие инструментов бережливого производства и цифровизации определяет значительный потенциал повышения эффективности деятельности промышленного предприятия, который недостижим в такой степени при их изолированном применении.

Полный эффект от внедрения цифрового бережливого производства в общем случае состоит из эффекта, обусловленного применением бережливых технологий, эффекта от цифровизации и эффекта, обусловленного их совместным внедрением:

$$E_{\text{полный}}(t) = E_{\text{БП}}(t) + E_{\text{Ц}}(t) + E_{\text{синергия}}(t), \quad (2)$$

где $E_{\text{полный}}(t)$ — совокупный эффект в момент времени t , ден. ед.; $E_{\text{БП}}(t)$ и $E_{\text{Ц}}(t)$ — эффекты от внедрения инструментов бережливого производства и цифровизации, соответственно, ден. ед.; $E_{\text{синергия}}(t)$ — отражает дополнительный (синергетический) эффект, возникающий в результате их совместного использования, ден. ед.

Математические и статистические методы составляют основу модели, позволяя описать зависимости, связанные с внедрением бережливых и цифровых технологий, а также их синергетический эффект. Это позволяет учитывать как отдельные результаты внедрения каждого подхода, так и их взаимодействие, которое усиливает общий эффект. Такое представление согласуется с выводами современных исследователей, утверждающих, что комбинированное использование бережливого производства и цифровизации может создавать эффекты, превышающие сумму их индивидуальных вкладов [Rossini et al. 2021].

Для определения эффекта от внедрения бережливых технологий ($E_{\text{БП}}(t)$), усиленного цифровизацией, предлагается использовать подход, основанный на мультипликативном сочетании базового потенциала бережливого производства и уровня фактического внедрения с учетом влияния цифровых технологий:

$$E_{\text{БП}}(t) = E_{\text{БП, баз}} * L_{\text{БП}}(t), \quad (3)$$

где $E_{\text{БП, баз}}$ — максимальный потенциальный эффект от бережливых технологий, определяемый с учетом специфики предприятия, уровня зрелости процессов и масштабов возможных улучшений, ден. ед.; $L_{\text{БП}}(t)$ — логистическая функция уровня внедрения бережливых технологий, которая характеризует их проникновение и рост со временем.

В рамках предлагаемой модели проведено структурное разложение экономического эффекта от внедрения бережливого производства и цифровизации на уровне базового потенциала.

Базовый эффект каждой из трансформационных инициатив представляется как сумма максимально возможных приращений по трем ключевым показателям экономической эффективности: производительность труда (Р), фондоотдача (F), материалоотдача (М).

Такой подход обеспечивает сопоставимость эффектов от различных подходов и позволяет выразить потенциал изменений в едином экономическом пространстве.

Базовый эффект от внедрения бережливого производства определяется выражением:

$$E_{\text{БП, баз}} = \Delta \text{ПТ}_{\text{БП}} + \Delta \text{ФО}_{\text{БП}} + \Delta \text{МО}_{\text{БП}}, \quad (4)$$

где $\Delta \text{ПТ}_{\text{БП}}$ — изменение производительности труда за счет внедрения инструментов бережливого производства (устранение потерь, стандартизация процессов и др.), ден. ед.; $\Delta \text{ФО}_{\text{БП}}$ — изменение фондоотдачи посредством оптимизации загрузки оборудования, сокращения простоев и др., ден. ед.; $\Delta \text{МО}_{\text{БП}}$ — изменение материалоотдачи благодаря снижению отходов, сокращению избыточного запаса и ошибок поставок и др., ден. ед.

Для описания временной динамики внедрения бережливого производства использована логистическая функция. Применение зависимости такого вида обосновано эмпирическими данными, которые показывают, что внедрение инициатив имеет S-образную кривую. Эта форма математического выражения является стандартом в моделировании процессов, где эффекты накапливаются постепенно, достигая насыщения:

$$L_{\text{БП}}(t) = \frac{1}{1 + e^{-a_{\text{БП}}(t - t_{1/2, \text{БП}})}}, \quad (5)$$

где $a_{\text{БП}}$ коэффициент скорости внедрения (чем выше $a_{\text{БП}}$, тем быстрее достигается насыщение); $t_{1/2, \text{БП}}$ — время достижения половины максимального уровня зрелости (50% насыщения).

На начальном этапе темпы внедрения медленные (например, вследствие ограниченности ресурсов, сопротивления персонала). После прохождения критической точки (накопления критической массы позитивного эффекта) наблюдается ускорение за счет вовлеченности, накопления компетенций, эффектов масштаба (Рисунок 2). После достижения зрелости в фазе «стратегическая интеграция» рост замедляется из-за приближения к технологическому/организационному пределу. Потенциал экономической эффективности реализуется по мере внедрения инструментария бережливого производства и цифровых технологий.

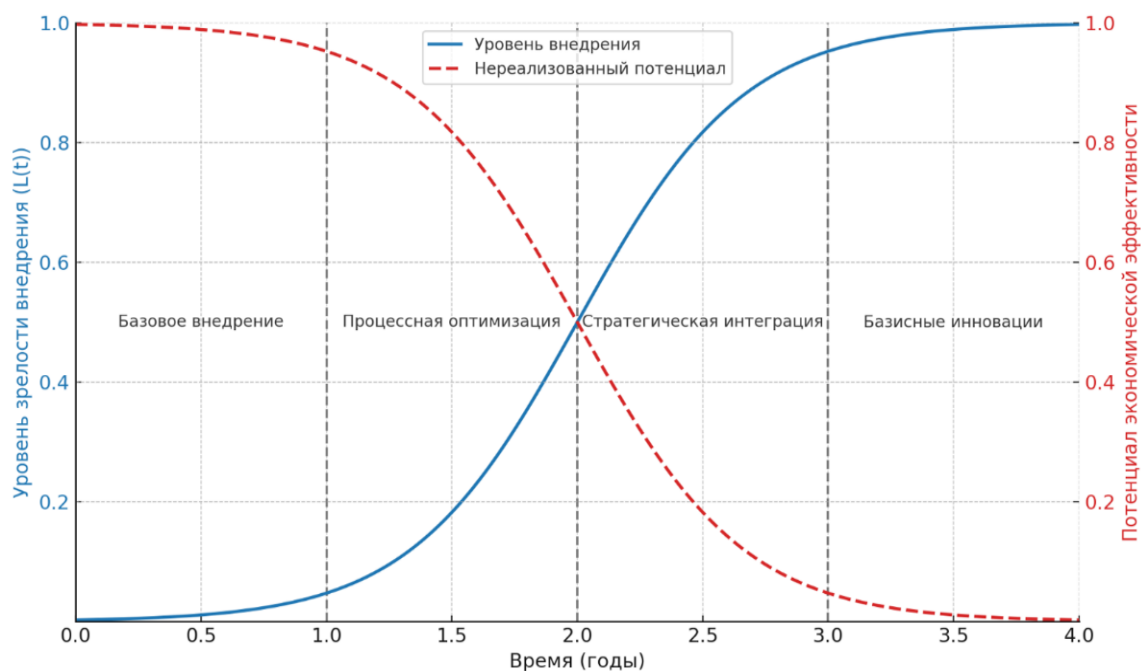


Рисунок 2. Фазная динамика внедрения бережливого производства и цифровизации⁶

⁶Составлено авторами.

Следует отметить, что подобные аналитические зависимости, учитывающие нелинейный характер динамики сложных многоэлементных моделей систем с иерархической организационной структурой, успешно применяются в задачах организации опытно-конструкторских работ. Например, закон Щеглова-Сайбеля, представляющий собой зависимость коэффициента потери времени на координацию параллельных процессов и согласование результатов проектно-конструкторских работ от численности коллектива инженерно-технических работников, имеет вид обратной логистической кривой [Щеглов, Сайбель 2022; Shcheglov 2024].

Эффект от внедрения цифровых технологий $E_{ц}(t)$ может быть описан аналогично:

$$E_{ц}(t) = E_{ц,баз} \cdot L_{ц}(t), \quad (6)$$

$$E_{ц,баз} = \Delta ПТ_{ц} + \Delta ФО_{ц} + \Delta МО_{ц}, \quad (7)$$

$$L_{ц}(t) = \frac{1}{1 + e^{-a_{ц}(t - t_{1/2,ц})}}, \quad (8)$$

Моделирование синергетического эффекта является ключевым элементом методологии бережливого производства в условиях цифровизации. Синергия бережливого производства и цифровизации представляет собой нелинейный процесс, явно проявляющийся на поздних стадиях совместного внедрения этих подходов. На ранних стадиях эффект от взаимодействия минимален, однако с достижением зрелости наблюдается уверенный рост эффективности, пока на этапе насыщения динамика не стабилизируется. Это отражает сложный характер интеграции бережливого производства и цифровизации, который учитывает как технологические, так и организационные аспекты [Левенцов, Левенцов 2023]. Включение синергии в модель обеспечивает ее более точное соответствие реальным процессам и дает возможность для прогнозирования долгосрочных результатов.

В общем виде формула для расчета синергетического эффекта может быть представлена как разница эффекта с синергией и эффекта без синергии (как сумма от внедрения бережливого производства и цифровизации):

$$E_{\text{синергия}}(t) = (E_{\text{БП}}(t) + E_{\text{ц}}(t)) \cdot K_{\text{синергия}}(t) - (E_{\text{БП}}(t) + E_{\text{ц}}(t)), \quad (9)$$

где $E_{\text{синергия}}(t)$ скалирующий фактор, который моделирует рост дополнительного эффекта за счет взаимодействия бережливого производства и цифровых технологий.

Упрощая, это выражение можно представить следующим образом:

$$E_{\text{синергия}}(t) = (E_{\text{БП}}(t) + E_{\text{ц}}(t)) \cdot (K_{\text{синергия}}(t) - 1). \quad (10)$$

Скалирующий фактор, или коэффициент синергии $K_{\text{синергия}}(t)$, необходим для отражения реальной природы совместного внедрения, где интеграция подходов создает эффект, превышающий простое суммирование их отдельных вкладов. На начальных этапах эффект от взаимодействия практически отсутствует, поскольку оба компонента внедряются изолированно или недостаточно глубоко, чтобы их взаимодействие могло проявиться. Однако с развитием процессов и их интеграцией синергия начинает нарастать, достигая максимального значения на этапах зрелости и насыщения.

Для описания этого роста в модели также используется логистическая кривая, поскольку она наиболее адекватно отражает фазный характер формирования синергии, что позволяет учитывать постепенный характер роста синергии, ее зависимость от уровней внедрения каждого компонента и насыщение эффекта на поздних стадиях:

$$K_{\text{синергия}}(t) = 1 + \frac{k}{1 + e^{-a \cdot (L_{\text{БП}}(t) + (L_{\text{Ц}}(t) - b))}} \quad (11)$$

где k — коэффициент потенциального синергетического эффекта; a — скорость роста синергии; b — уровень внедрения, при котором синергия достигает половины максимума (экспертно задаваемые параметры).

Введение в модель параметров, задаваемых экспертно, обосновано необходимостью учета специфики внедрения в конкретных условиях предприятия. Экспертная оценка позволяет адаптировать модель под конкретные реалии, обеспечивая ее практическую применимость и точность прогнозирования.

Каждое предприятие имеет свои уникальные характеристики, такие как степень автоматизации, сложность процессов, организационная культура и готовность к изменениям. Многие параметры, например скорость роста внедрения ($a_{\text{БП}}$; $a_{\text{Ц}}$) или потенциал синергетического эффекта (k), зависят от конкретных условий. В большинстве случаев такие параметры требуют экспертной оценки на основе опыта и анализа результатов реализации аналогичных проектов.

Для типичных промышленных предприятий наблюдается средняя скорость внедрения бережливых и цифровых технологий в интервале $2 \leq (a_{\text{БП}}; a_{\text{Ц}}) \leq 5$. Низкие значения (<2) характерны для предприятий с ограниченными ресурсами и сопротивлением изменениям. Более высокие значения (>5) встречаются на высокоорганизованных и мотивированных предприятиях [Bortolotti et al. 2015].

Параметр a , описывающий скорость роста синергии $K_{\text{синергия}}(t)$, имеет другую природу и отражает дополнительный эффект от их взаимодействия. Косвенная оценка результатов внедрения подходов бережливого производства и шести сигм, представленных в [Shah et al. 2008], позволяет оценивать данный диапазон в интервале $0,05 \leq a \leq 0,2$.

Параметр b в логистической функции синергии $K_{\text{синергия}}(t)$ отражает порог насыщения синергетического эффекта. Он измеряется как суммарный уровень внедрения, нормализованный в диапазоне от 0 до 2. Если $b = 1$, это означает, что синергетический эффект достигает половины своего максимума, когда суммарный уровень внедрения $L_{\text{БП}}(t)$ и $L_{\text{Ц}}(t)$ составляет 100% (например, 50% бережливое производство + 50% цифровизация). Когда оба подхода внедряются равномерно, $b \approx 1,0$, отражая сбалансированный сценарий. Для компаний, где бережливое производство и цифровизация развиваются асинхронно, b может быть смещен в диапазоне $0,8 \leq b \leq 1,2$.

Значение коэффициента потенциального синергетического эффекта принимают значения в интервале $k \in [0,5; 0,7]$. Диапазон основан на эмпирических данных исследования [Tortorella, Fettermann 2018].

Вопрос оценки и потенциала увеличения синергетического эффекта от интеграции бережливого производства и цифровизации в настоящее время находится в центре внимания многих исследователей [Buer et al. 2021; Бабосов 2023]. Однако, несмотря на активное изучение данной темы, она остается недостаточно исследованной. Для более полного понимания механизма и масштаба взаимодействия этих подходов необходимы дополнительные эмпирические данные и углубленные научные исследования, направленные на анализ их совместного влияния на производственные процессы.

Следует отметить, что значение коэффициента синергии зависит от внешних условий. При благоприятной конъюнктуре (например, рост спроса, стабильность рынка) он максимизирует положительный эффект, так как взаимодействие технологий реализуется в полной мере. Однако при негативном сценарии (например, экономический спад, снижение спроса) тот же коэффициент

может усилить негативные последствия, поскольку инвестиции в технологии не окупаются из-за снижения объемов производства или других внешних ограничений. Таким образом, коэффициент синергии не только усиливает положительные результаты, но и увеличивает риски снижения эффективности деятельности предприятия при неблагоприятных условиях.

Цифровизация и фундаментальное перестроение производственных процессов, как правило, требуют значительных инвестиционных вложений, которые не всегда могут окупиться. В результате при оценке синергетического эффекта от совместного внедрения цифровизации и бережливого производства следует учитывать ряд ограничительных условий, соблюдение которых позволит не допустить получение отрицательного значения синергетического эффекта.

Во-первых, объем производства изделий должен обеспечивать возврат инвестиций. Для этого годовой объем производства должен превосходить пороговое значение:

$$Q_{\text{год}} \geq Q_{\text{порог}}, \text{ при котором } Q_{\text{порог}} = \frac{FC_{\text{ЦБП}} - FC_{\text{баз}}}{VC_{\text{баз}} - VC_{\text{ЦБП}}}, \quad (12)$$

где $Q_{\text{год}}$ — годовая программа выпуска изделий, шт.; $Q_{\text{порог}}$ — пороговый выпуск изделий шт.; $FC_{\text{ЦБП}}$, $FC_{\text{баз}}$ — постоянные расходы при внедрении цифрового бережливого производства и базовые (до внедрения цифрового бережливого производства) соответственно, ден. ед.; $VC_{\text{ЦБП}}$, $VC_{\text{баз}}$ — переменные расходы при цифровом бережливом производстве и базовые (до внедрения цифрового бережливого производства) соответственно, ден. ед.

Во-вторых, минимальный размер партии серийной продукции $N_{\text{min},i}$ должен обеспечивать экономию, покрывающую затраты на переналадку $C_{\text{настр},i}$, связанную с переналадкой (калибровкой) производственного оборудования при смене выпускаемой номенклатуры продукции (производственной операции):

$$N_{\text{min},i} \geq \frac{C_{\text{настр},i}}{\frac{\Delta C_i}{Q_i}}, \quad (13)$$

где $N_{\text{min},i}$ — минимальный размер i -й производственной партии, шт.; $C_{\text{настр},i}$ — затраты на подготовку к выпуску (переналадку, калибровку оборудования) i -й партии, ден. ед.; ΔC_i — снижение себестоимости вследствие экономии ресурсов i -й партии, ден. ед.; Q_i — количество изделий в партии, шт.

В-третьих, период окупаемости инвестиций должен стремиться к минимуму и быть приемлемым для инвесторов предприятия:

$$РВР_{\text{ЦБП}} = \min n, \text{ при котором } \sum_{t=1}^n (NP_{t,\text{ЦБП}} + A_{t,\text{ЦБП}}) > \sum_{t=1}^n I_{t,\text{ЦБП}}, \quad (14)$$

где $РВР_{\text{ЦБП}}$ — простой период окупаемости инвестиций в проект внедрения цифрового бережливого производства, лет; n — крайний год периода планирования; $NP_{t,\text{ЦБП}}$ — чистая прибыль от внедрения цифрового бережливого производства за период, ден. ед.; $A_{t,\text{ЦБП}}$ — величина амортизации при цифровом бережливом производстве за период ден. ед.; $I_{t,\text{ЦБП}}$ — затраты на внедрение цифрового бережливого производства за период, ден. ед.

В результате целевая экономико-математическая модель оценки синергетического эффекта от совместного внедрения бережливого производства и цифровизации на промышленном предприятии выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \max \sum_{t=1}^n E_{\text{синергия}}(t) = \sum_{t=1}^n ((E_{\text{БП}}(t) + E_{\text{Ц}}(t)) \cdot (K_{\text{синергия}}(t) - 1)), \text{ при } E_{\text{синергия}}(t) > 0; \\ Q_{\text{год}} \geq Q_{\text{порог}}, \text{ при котором } Q_{\text{порог}} = \frac{FC_{\text{ЦБП}} - FC_{\text{баз}}}{VC_{\text{баз}} - VC_{\text{ЦБП}}}; \\ N_{\text{min},i} \geq \frac{C_{\text{настр},i}}{\Delta C_i / Q_i}; \\ PBP_{\text{ЦБП}} = \min n, \text{ при котором } \sum_{t=1}^n (NP_{t,\text{ЦБП}} + A_{t,\text{ЦБП}}) > \sum_{t=1}^n I_{t,\text{ЦБП}}. \end{cases} \quad (15)$$

Отметим, что принципы системной динамики и взаимодействий в сложных системах были адаптированы для создания модели оценки синергетического эффекта от совместного внедрения бережливого производства и цифровизации, так как они обеспечивают реалистичное описание взаимодействий. Использование логистических функций, пороговых значений и динамики обратных связей делает модель более точной и применимой для прогнозирования сложных эффектов, возникающих в результате совместного внедрения.

Для подтверждения практической применимости модели в рамках обсуждения представлена иллюстрация, демонстрирующая динамику синергетического эффекта от совместного внедрения инструментов бережливого производства и цифровых технологий в типичных сценариях. График, построенный на основе логистических функций для уровней внедрения и пороговых коэффициентов усиления, показывает, как взаимодействие между этими двумя различными подходами приводит к созданию дополнительного экономического эффекта, который невозможно достичь при изолированном внедрении цифровизации или бережливого производства (Рисунок 3).

Для построения графика были использованы следующие исходные данные:

- 1) базовые эффекты:
 - потенциальный эффект бережливого производства $E_{\text{БП,баз}} = 100$ млн руб.;
 - потенциальный эффект цифровизации $E_{\text{Ц,баз}} = 80$ млн руб.
- 2) логистические функции уровней внедрения $L_{\text{БП}}(t)$ и $L_{\text{Ц}}(t)$:
 - скорость роста бережливого производства $\alpha_{\text{БП}} = 3,0$;
 - скорость роста цифровизации $\alpha_{\text{Ц}} = 2,5$;
 - момент половины от максимального уровня зрелости бережливого производства $t_{1/2,\text{БП}}$ — 2 года (конец второй фазы внедрения, начало третьей);
 - момент половины от максимального уровня зрелости цифровизации $t_{1/2,\text{Ц}}$ — 2,5 года.
- 3) синергетический эффект:
 - коэффициент потенциального синергетического эффекта $k = 0,6$;
 - скорость роста синергии $a = 0,1$;
 - порог синергии $b = 1,0$.
- 4) шкала времени:
 - временной интервал: от 0 до 4 лет, где каждый год соответствует фазам внедрения: базовое внедрение, процессная оптимизация, стратегическая интеграция, базисные инновации (в данном примере продолжительность каждой фазы принята 1 год).

График демонстрирует динамику полного эффекта $E_{\text{полный}}(t)$ от внедрения цифровизации и бережливого производства, включая генерируемый ими в результате интеграции синергетический эффект. Представлены также ключевые элементы: эффекты от бережливого производства $E_{\text{БП}}(t)$ и цифровизации $E_{\text{Ц}}(t)$, сумма эффектов без учета синергии ($E_{\text{БП}}(t) + E_{\text{Ц}}(t)$).

На ранних этапах эффект от внедрения растет медленно. Сумма эффектов без учета синергии примерно соответствует индивидуальным вкладам каждого подхода. Синергетический эффект остается практически незаметным, его проявление ограничено низким уровнем интеграции.

По мере увеличения уровня внедрения наблюдается более быстрый рост суммарного эффекта. На фазе зрелости синергетический эффект становится доминирующим. Этот рост объясняется усилением взаимодействия между подходами.

На заключительной фазе синергетический эффект достигает насыщения. Это указывает на то, что синергия достигла своего максимального значения, а оба подхода интегрированы в полном объеме.

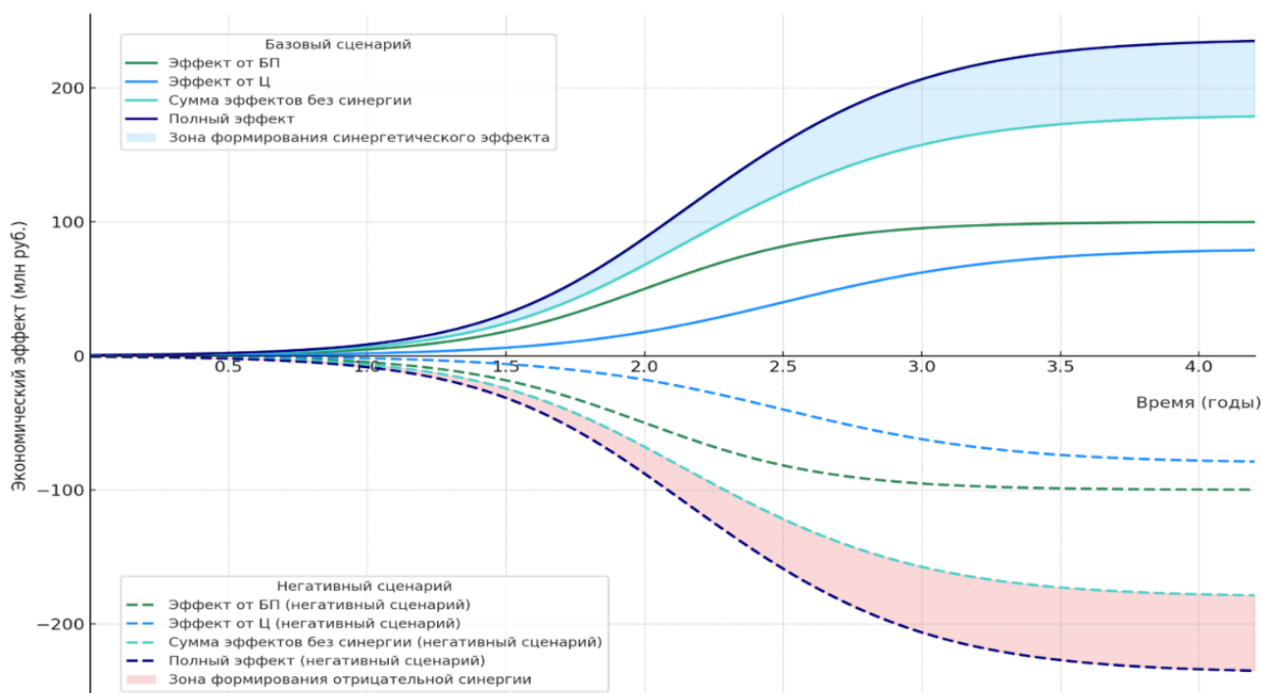


Рисунок 3. Динамика эффектов внедрения и цифровизации⁷

На графике схематично показан также отрицательный синергетический эффект в случае, когда цифровизации подлежат не оптимизированные инструментами бережливого производства процессы, генерирующие потери.

Таким образом, предложенная модель оценки синергетического эффекта от совместного внедрения бережливого производства и цифровизации представляет собой многоаспектный подход, объединяющий учет фазности внедрения, использование пороговых функций, моделирование синергии и статистическую калибровку параметров. Такой подход обеспечивает не только теоретическую корректность модели, но и ее практическую применимость для формирования, обоснования и планирования реализации стратегии внедрения цифрового бережливого производства на предприятии.

Разработанная экономико-математическая модель позволяет количественно оценить синергетический эффект, возникающий при совместном внедрении бережливого производства и цифровизации на промышленном предприятии. Целевая модель направлена на максимизацию положительного синергетического эффекта путем оптимизации уровней внедрения, коэффициентов усиления и коэффициента синергии бережливого производства и цифровизации. При этом максимизация достигается при условии выполнения ограничений, обеспечивающих экономическую целесообразность затрат по внедрению цифрового бережливого производства, таких как период

⁷ Составлено авторами.

окупаемости, объем производства и серийность выпуска продукции. Предложенная модель служит действенным инструментом для оценки, анализа и прогнозирования эффективности системы улучшений в сфере цифрового бережливого производства, позволяя оценить дополнительную экономическую выгоду от интеграции инструментов бережливого производства и цифровых технологий, обеспечить ожидаемую окупаемость инвестиций и принимать обоснованные решения в условиях неопределенности.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана экономико-математическая модель оценки синергетического эффекта от совместного внедрения бережливого производства и цифровизации на промышленном предприятии, отражающая значимость их влияния на экономические результаты деятельности организации. Модель учитывает фазный характер внедрения, асинхронное развитие бережливого производства и цифровизации, а также параметры, задаваемые экспертным методом, что позволяет адаптировать ее к использованию для различных условий и сценариев внедрения.

Приведенный пример использования модели позволил продемонстрировать, как ее параметры влияют на динамику экономического эффекта от внедрения цифрового бережливого производства. Визуализация полного эффекта и синергетического вклада на различных этапах внедрения инструментов бережливого производства и цифровых технологий подчеркивает значимость их интеграции. Исследование показало, что максимальный результат достигается только при совместном и согласованном внедрении обоих подходов, что определяет практическую значимость модели.

Предложенная модель оценки обладает гибкостью, позволяя учитывать специфические условия функционирования предприятия, варьировать параметры внедрения и прогнозировать эффект в результате реализации различных сценариев стратегического развития. Она может быть использована для планирования и обоснования стратегий цифровой трансформации, оптимизации бизнес-процессов и представляет собой действенный инструмент повышения экономической эффективности деятельности промышленного предприятия в условиях цифровой экономики.

Список литературы:

Бабосов Е.М. Синергетическое взаимоусиление цифровизационных процессов и человеческой креативной деятельности // Экономика. Социология. Право. 2023. № 2(30). С. 33–39. DOI: [10.22281/2542-1697-2023-02-02-33-39](https://doi.org/10.22281/2542-1697-2023-02-02-33-39)

Болдыревский П.Б., Игошев А.К. и Кистанова Л.А. Исследования синергетических эффектов и цикличности современных экономических систем // Экономический анализ: теория и практика. 2018. Т. 17. № 11. С. 2166–2178. DOI: [10.24891/ea.17.11.2166](https://doi.org/10.24891/ea.17.11.2166)

Вагин М.С., Ивченко Б.П. Классификация инструментов бережливого производства // Актуальные вопросы современной экономики. Материалы V Международной научно-практической конференции. СПб: Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2024. С. 157–160.

Геворкян Г.А. Механизм оценки синергетического эффекта // Экономика и социум. 2023. № 6–1(109). С. 664–674.

Дамодаран А. Инвестиционная оценка. Инструменты и методы оценки любых активов. М.: Альпина Паблишер, 2020.

Ижгузина Н.Р. Синергетический эффект крупных городских агломераций региона: методология исследования // Наука Красноярья. 2016. Т. 5. № 5. С. 111–131. DOI: [10.12731/2070-7568-2016-5-111-131](https://doi.org/10.12731/2070-7568-2016-5-111-131)

Королькова М.В. Сравнительный анализ методов оценки эффективности комплекса взаимосвязанных инвестиционных проектов // Актуальные вопросы экономики и социологии: сборник статей по итогам XIV Осенней конференции в Новосибирском Академгородке. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2018. С. 204–209.

Козенкова Т.А. Методические подходы к оценке синергетического эффекта финансово-экономической интеграции // Стратегии бизнеса. 2014. № 1(3). С. 51–62.

Колычев В.Д., Белкин И.О. Интеграция бережливого производства и цифровых технологий в управление операционной деятельностью промышленных предприятий // Известия Высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2023. № 3(57). С. 45–58. DOI: [10.6060/ivecofin.2023573.653](https://doi.org/10.6060/ivecofin.2023573.653)

Кондрашова А.В., Сироткин В.А., Паремузова М.Г., Седова В.Д. Актуальность применения технологии бережливого производства в сельскохозяйственных и промышленных предприятиях // Вестник Академии знаний. 2024. № 5(64). С. 227–230.

Щеглов Д.К., Сайбель А.Г. Формализованный подход к прогнозированию сроков и стоимости разработки военно-технических систем // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2022. № 3(155). С. 33–44. DOI: [10.52190/1729-6552_2022_3_33](https://doi.org/10.52190/1729-6552_2022_3_33)

Левенцов В.А., Левенцов А.Н. Бережливое производство и проблемы его цифровизации // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 1. С. 20–25. DOI: [10.17513/snt.39493](https://doi.org/10.17513/snt.39493)

Шевырев М.М. К методологии определения синергетического эффекта инновационных региональных кластеров // Экономика и управление. 2010. № 3(53). С. 36–40.

Bortolotti T., Boscari S., Danese P. Successful Lean Implementation: Organizational Culture and Soft Lean Practices // International Journal of Production Economics. 2015. Vol. 160. P. 182–201. DOI: [10.1016/j.ijpe.2014.10.013](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.10.013)

Buer S.V., Semini M., Strandhagen J.O., Sgarbossa F. The Complementary Effect of Lean Manufacturing and Digitalisation on Operational Performance // International Journal of Production Research. 2021. Vol. 59. Is. 7. P. 1976–1992 DOI: [10.1080/00207543.2020.1790684](https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1790684)

Marcondes G.B., Rossi A.H.G., Pontes J. Digital Technologies and Lean 4.0: Integration, Benefits, and Areas of Research // Industrial Engineering and Operations Management. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics. 2023. Vol. 431. P. 197–209. DOI: [10.1007/978-3-031-47058-5_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-47058-5_16)

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. Is. 9. P. 239–259 DOI: [10.1108/JMTM-12-2020-0467](https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2020-0467)

Shah R., Chandrasekaran A., Linderman K. In Pursuit of Implementation Patterns: The Context of Lean and Six Sigma // International Journal of Production Research. 2008. Vol. 46. Is. 23. P. 6679–6699. DOI: [10.1080/00207540802230504](https://doi.org/10.1080/00207540802230504)

Shcheglov D.K. Express Method for Determining Deadlines and Costs of Project Design Works by Defense Industry Enterprises // Инновации в менеджменте. 2024. № 1(39). С. 46–54.

Tortorella G.L., Fettermann D. Implementation of Industry 4.0 and Lean Production in Brazilian Manufacturing Companies // International Journal of Production Research. 2018. Vol. 56. Is. 8. P. 2975–2987. DOI: [10.1080/00207543.2017.1391420](https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1391420)

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](https://doi.org/10.3390/su151713151)

Zaytseva T.V. Human Resource Management in Russia // Global Encyclopedia of Public Administration, Public Policy, and Governance / ed. by A. Farazmand. Cham: Springer, 2018. P. 3120–3128. DOI: [10.1007/978-3-319-31816-5_2944-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-31816-5_2944-1)

References:

- Babosov E.M. (2023) Synergetic Mutual Reinforcement of Digitalization Processes and Human Creative Activity. *Ekonomika. Sotsiologiya. Pravo*. No. 2(30) P. 33–39. DOI: [10.22281/2542-1697-2023-02-02-33-39](https://doi.org/10.22281/2542-1697-2023-02-02-33-39)
- Boldyrevskii P.B., Igoshev A.K., Kistanova L.A. (2018) Researching the Synergistic Effects and Cyclicity of Modern Economic Systems. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika*. Vol. 17. Is. 11. P. 2166–2178. DOI: [10.24891/ea.17.11.2166](https://doi.org/10.24891/ea.17.11.2166)
- Bortolotti T., Boscari S., Danese P. (2015) Successful Lean Implementation: Organizational Culture and Soft Lean Practices. *International Journal of Production Economics*. Vol. 160. P. 182–201. DOI: [10.1016/j.ijpe.2014.10.013](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.10.013)
- Buer S.V., Semini M., Strandhagen J.O., Sgarbossa F. (2021) The Complementary Effect of Lean Manufacturing and Digitalisation on Operational Performance. *International Journal of Production Research*. Vol. 59. Is. 7. P. 1976–1992 DOI: [10.1080/00207543.2020.1790684](https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1790684)
- Damodaran A. (2020) *Investment Valuation. Tools and Techniques for Determining the Value of Any Asset*. Moscow: Al'pina Publisher.
- Gevorgyan G.A. (2023) Assessment of Synergetic Effect. *Ekonomika i sotsium*. No. 6–1(109) . P. 664–674.
- Izhguzina N.R (2016) The Synergistic Effect of Region's Large Urban Agglomerations: Research Methodology. *Nauka Krasnoyars'ya*. Vol. 5. No. 5. P. 111–131. DOI: [10.12731/2070-7568-2016-5-111-131](https://doi.org/10.12731/2070-7568-2016-5-111-131)
- Kolychev V.D., Belkin I.O. (2023) Integration of Lean Manufacturing and Digital Technologies in the Operational Activity Management of Industrial Enterprises. *Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Ekonomika, finansy i upravlenie proizvodstvom*. No. 3(57). P. 45–58. DOI: [10.6060/ivecofin.2023573.653](https://doi.org/10.6060/ivecofin.2023573.653)
- Kondrashova A.V., Sirotkin V.A., Paremuzova M.G., Sedova V.D. (2024) The Relevance of the Application of Lean Manufacturing Technology in Agricultural and Industrial Enterprises. *Vestnik Akademii Znaniy*. No. 5(64). P. 227–230.
- Korolkova M.V. (2018) Comparative Analysis of the Approaches to the Efficiency Evaluation for the Complex of Interrelated Investment Projects. *Aktual'nye voprosy ekonomiki i sotsiologii: Sbornik statey po itogam XIV Osenney konferentsii v Novosibirskom Akademgorodke*. Novosibirsk: IEOPP SO RAN. P. 204–209.
- Kozenkova T.A (2014) Methodologies for Assessing the Synergistic Effect of Financial and Economic Integration. *Strategii biznesa*. No. 1(3). P. 51–62.
- Leventsov V.A., Leventsov A.N. (2023) Lean Production and Problems of Its Digitalization. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. No. 1. P. 20–25. DOI: [10.17513/snt.39493](https://doi.org/10.17513/snt.39493)
- Marcondes G.B., Rossi A.H.G., Pontes J. (2023) Digital Technologies and Lean 4.0: Integration, Benefits, and Areas of Research. *Industrial Engineering and Operations Management. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*. Vol. 431. P. 197–209. DOI: [10.1007/978-3-031-47058-5_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-47058-5_16)
- Rossini M., Dafne Cifone F., Kassem B., Costa F., Portioli-Staudacher A. (2021) Being Lean: How to Shape Digital Transformation in the Manufacturing Sector. *Journal of Manufacturing Technology Management*. Vol. 32. Is. 9. P. 239–259 DOI: [10.1108/JMTM-12-2020-0467](https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2020-0467)
- Shah R., Chandrasekaran A., Linderman K. (2008) In Pursuit of Implementation Patterns: The Context of Lean and Six Sigma. *International Journal of Production Research*. Vol. 46. Is. 23. P. 6679–6699. DOI: [10.1080/00207540802230504](https://doi.org/10.1080/00207540802230504)
- Shcheglov D.K. (2024) Express Method for Determining Deadlines and Costs of Project Design Works by Defense Industry Enterprises. *Innovatsii v menedzhmente*. No. 1(39). P. 46–54.
- Shcheglov D.K., Saybel A.G. (2022) Formalized Approach to Forecasting the Time and Cost of the Development of Military Technical Systems. *Oboronnnyy kompleks — nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii*. No. 3(155). P. 33–44. DOI: [10.52190/1729-6552_2022_3_33](https://doi.org/10.52190/1729-6552_2022_3_33)

Shevyrev M.M. (2010) K metodologii opredeleniya sinergeticheskogo effekta innovatsionnykh regional'nykh klasterov [On the method of innovation regional clusters' synergy effect identification]. *Ekonomika i upravlenie*. No. 3(53). P. 36–40.

Tortorella G.L., Fettermann D. (2018) Implementation of Industry 4.0 and Lean Production in Brazilian Manufacturing Companies. *International Journal of Production Research*. Vol. 56. Is. 8. P. 2975–2987. DOI: [10.1080/00207543.2017.1391420](https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1391420)

Treviño-Elizondo B.L., García-Reyes H., Peimbert-García R.E. (2023) A Maturity Model to Become a Smart Organization Based on Lean and Industry 4.0 Synergy. *Sustainability* Vol. 15. DOI: [10.3390/su151713151](https://doi.org/10.3390/su151713151)

Vagin M.S., Ivchenko B.P. (2024) Classification of Lean Production Tools. *Aktual'nye voprosy sovremennoy ekonomiki. Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Saint Petersburg: Baltiyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet "VOENMEKh" im. D.F. Ustinova. P. 157–160.

Zaytseva T.V. (2018) Human Resource Management in Russia. In: Farazmand A. (ed.) *Global Encyclopedia of Public Administration, Public Policy, and Governance*. Cham: Springer. P. 3120–3128. DOI: [10.1007/978-3-319-31816-5_2944-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-31816-5_2944-1)