

ФАЗНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ИНТЕГРАЦИИ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА И ЦИФРОВИЗАЦИИ

Аннотация. В статье рассматривается процесс формирования синергетического эффекта при совместном внедрении бережливого производства и цифровизации на промышленных предприятиях. Обоснована необходимость применения фазного подхода к моделированию динамики развития синергии, учитывающего нелинейный характер накопления эффектов. Предложена фазная модель, описывающая три ключевых этапа интеграции: начальную адаптацию, фазу ускоренного развития и фазу насыщения. Показано, что синергетический эффект проявляется как эмерджентное явление, зависящее от степени зрелости внедряемых технологий и уровня организационной готовности. Предложенная модель позволяет динамически оценивать эффективность трансформационных процессов и прогнозировать условия максимизации синергии, что обеспечивает практическую ценность для стратегического управления производственными системами в условиях цифровой трансформации.

Ключевые слова: бережливое производство, цифровизация, синергетический эффект, фазная модель, эмерджентность, промышленное предприятие, цифровая трансформация.

VAGIN Mikhail Sergeevich,
Applicant State Marine Technical University

PHASE MODEL OF SYNERGETIC EFFECT FORMATION FROM THE INTEGRATION OF LEAN MANUFACTURING AND DIGITALIZATION

Annotation. The article examines the process of synergetic effect formation during the joint implementation of lean manufacturing and digitalization at industrial enterprises. The necessity of applying a phase-based approach to model the dynamics of synergy development, considering the nonlinear nature of effect accumulation, is substantiated. A phase model describing three key stages of integration – initial adaptation, accelerated development, and saturation – is proposed. It is shown that the synergetic effect emerges as an emergent phenomenon depending on the maturity level of the implemented technologies and the organizational readiness. The proposed model enables dynamic evaluation of the efficiency of transformation processes and forecasting of conditions for maximizing synergy, providing practical value for strategic management of production systems in the context of digital transformation.

Key words: lean manufacturing, digitalization, synergetic effect, phase model, emergence, industrial enterprise, digital transformation.

Формирование синергетического эффекта при совместном внедрении бережливого производства (БП) и цифровизации (Ц) является сложным и многоаспектным процессом. Синергия в данном случае рассматривается, как новое качество, возникающее в результате взаимодействия двух системных преобразований, эффект от которого превышает сумму отдельных вкладов. Понимание синергетических процессов базируется на положениях теории

самоорганизации и сложных систем [1], [2], где развитие системы через нелинейные взаимодействия приводит к возникновению новых, эмерджентных свойств.

Бережливое производство представляет собой структурированный подход к повышению эффективности через минимизацию всех видов потерь, оптимизацию процессов и фокус на создании ценности для клиента. Методология БП была разработана на основе производственной

системы Toyota и получила широкое развитие благодаря работам Вумека и Джонса. В отечественной литературе бережливое производство подробно освещено в работах Давыдовой Н.С., Глухова В.В., Балашовой Е.С. и ряде других авторов [3], [4], [5], акцентирующих внимание на адаптации японского опыта к российским условиям.

Цифровизация промышленности представляет собой комплексное внедрение технологий интернета вещей (IoT), больших данных (Big Data), искусственного интеллекта (AI) и киберфизических систем (CPS) с целью повышения прозрачности процессов, адаптивности производства и оптимизации цепочек создания стоимости. Платформой для научного осмысления цифровизации стало развитие концепции «Индустрии 4.0», которая была инициирована Х. Кагерманном, президентом Немецкой академии технических наук. В российском контексте вопросы цифровизации рассмотрены в ряде работ, Бабкина А.В., Голова Р.С., Плотникова В.А. [6], [7], [8], где подчеркивается необходимость создания инфраструктуры цифровых платформ и кадровой подготовки.

Современные исследования показывают, что простое параллельное внедрение БП и цифровых технологий не гарантирует автоматического получения синергетического эффекта. Необходимость комплексной интеграции подчёркивается в работах [9], [10], где показано, что цифровизация способна усиливать принципы бережливого производства за счёт расширения возможностей мониторинга, анализа и прогнозирования.

Важнейшими условиями достижения синергии являются зрелость производственной системы, готовность персонала к цифровым изменениям и наличие единой стратегической платформы для трансформаций. Кроме того, важно учитывать, что цифровизация без бережливого подхода может привести к «автоматизации хаоса» – тиражированию неэффективных процессов в цифровой форме.

В российской научной среде системное осмысление синергии БП и цифровизации пока только формируется. Выделяется несколько направлений возможной интеграции, включая использование цифровых двойников для оптимизации потоков и применение средств дополненной реальности для развития компетенций сотрудников в бережливых операциях. Однако, большинство существующих работ ограничиваются описанием частных кейсов и не предлагают моделей, учитывающих фазную динамику внедрения и нелинейное развитие эффекта. Тем не менее именно фазный подход позволяет наиболее полно отразить реальный процесс формирования синергии и определить вклад синергетического эффекта в экономическую эффективность деятельности промышленного предприятия. Понимание фаз развития – от начальной адаптации до устойчивой интеграции цифровых и бережливых практик – позволяет прогнозировать достижение максимальных эффектов и оптимизировать процесс управления трансформацией [11].

Таким образом, существующие подходы свидетельствуют о высоком потенциале синергии между бережливым производством и цифровизацией. Однако достижения этого эффекта требуют не просто технической координации, а глубокого системного взаимодействия на уровне процессов, организационной структуры и корпоративной культуры. Разработка моделей, способных количественно описывать образование синергии с учетом временных фаз развития и организационной зрелости, представляет собой актуальное научное направление.

Одной из фундаментальных предпосылок построения модели является признание того, что процессы внедрения бережливого производства и цифровизации развиваются во времени по типичной S-образной траектории, описываемой логистической функцией роста (рисунк 1).

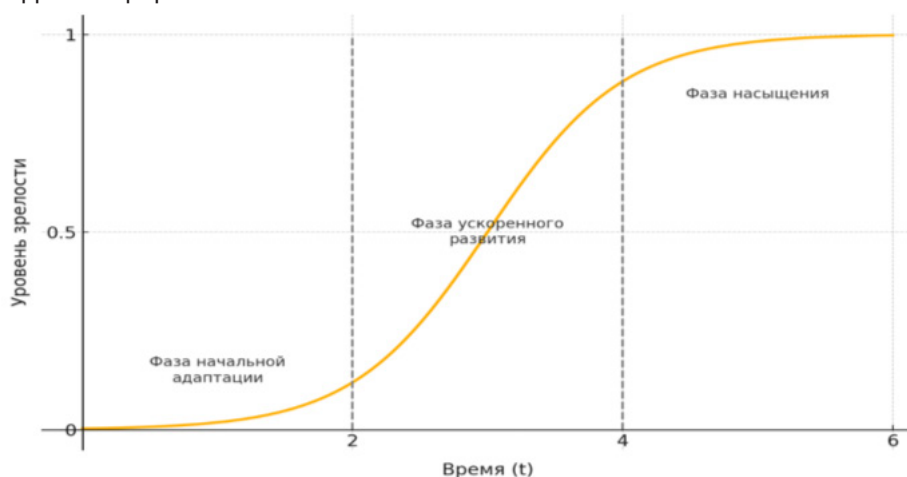


Рисунок 1. Динамика внедрения бережливого производства и цифровизации

Такая динамика отражает нелинейный характер накопления результатов внедрения: от медленного старта через фазу стремительного развития к стадии насыщения.

Фазная структура трансформационных изменений включает три основных этапа:

- фаза начальной адаптации характеризуется низкой результативностью, обусловленной организационной инерцией, необходимостью переобучения персонала, модернизацией инфраструктуры и адаптацией бизнес-процессов. На этом этапе эффекты от внедрения как бережливого производства, так и цифровых технологий проявляются слабо, а их взаимодействие имеет латентный характер.
- фаза ускоренного развития наступает после достижения критического уровня освоения технологий и методик. В этот период наблюдается стремительное нарастание положительных изменений в производственной системе, сопровождаемое взаимным усилением эффектов. Именно здесь начинает формироваться синергетический эффект, порождаемый сочетанием оптимизационных принципов бережливого производства и возможностей цифровизации в области мониторинга, аналитики и адаптивного управления.

- фаза насыщения характеризуется снижением темпов прироста эффективности по мере исчерпания потенциала базовых инноваций. Синергетический эффект стабилизируется, и предприятие достигает нового устойчивого уровня экономической результативности.

Ключевая методологическая особенность предлагаемой модели заключается в явном учете фазного накопления синергетического эффекта как эмерджентного явления, возникающего в результате взаимодействия двух системных преобразований. Модель предоставляет возможность не только описывать текущую динамику трансформационных процессов, но и прогнозировать условия максимизации синергии, что особенно важно для стратегического управления промышленными изменениями.

Предложенный подход позволяет осуществлять динамическую оценку эффективности трансформации, выявлять оптимальные временные интервалы для интенсификации интеграционных усилий и корректировки траектории развития. Тем самым модель представляет собой практический инструмент для промышленных предприятий, стремящихся не просто внедрять отдельные технологические решения, но формировать устойчивые синергетические эффекты, обеспечивающие долгосрочное конкурентное преимущество.

Список литературы:

- [1] Хакен Г. Синергетика: пер. с англ. / Г. Хакен; пер. В.И. Емельянова; под ред. Ю.Л. Климонтовича, С.М. Осовца. – Москва : Мир, 1980. – 405 с.
- [2] Nicolis G., Prigogine I. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations* / G. Nicolis, I. Prigogine. – New York: Wiley, 1977. – 491 p.
- [3] Давыдова Н.С. Бережливое производство: монография / Н.С. Давыдова; ГОУВПО «Удмуртский государственный университет», Институт экономики и управления. – Ижевск: Изд-во Института экономики и управления УдГУ, 2012. – 138 с.
- [4] Глухов В.В. Организация бережливого производства: учебное пособие / В.В. Глухов, Е.С. Балашова; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – 2-е изд., доп. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2014.
- [5] Сидоров А.С. Бережливое производство: российский опыт / А.С. Сидоров, О.В. Вершинина // Вестник МГЭИ. – 2022. – № 4. – С. 129–135.
- [6] Цифровизация экономических систем: теория и практика: монография / под ред. д-ра экон. наук, проф. А. В. Бабкина. - Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. - 796 с.
- [7] Голов Р.С. Прикладные основы формирования киберфизических систем на высокотехнологичных промышленных предприятиях в условиях цифровой трансформации промышленности / Р.С. Голов, А.В. Мыльник // Научные труды Вольного экономического общества России. – 2023. – Т. 239, № 1. – С. 291–306. – DOI: 10.38197/2072-2060-2023-239-1-291-306
- [8] Плотников В.А. Цифровизация производства: теоретическая сущность и перспективы развития в российской экономике / В.А. Плотников // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2018. – № 4 (112). – С. 16–24
- [9] Фадеев С.В. Инструменты бережливого производства как фактор цифровой трансформации компании // Вестник Волгоградского государственного университета. Экономика. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 147–157. – DOI: <https://doi.org/10.15688/ek.volsu.2024.2.12>

- [10] Вагин М.С. Применение бережливых и цифровых технологий для повышения эффективности производственных процессов / М.С. Вагин // *Инновации и Инвестиции*. - 2024. - №10. - С. 122-126.
- [11] Ивченко Б.П., Вагин М.С., Классификация инструментов бережливого производства // *Актуальные вопросы современной экономики Материалы V Международной научно-практической конференции Санкт-Петербург – Витебск – Астана – Донецк 17-18 октября 2024 года* – СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2024. - С. 157-160.

Spisok literatury:

- [1] Khaken G. *Sinergetika: per. s angl. / G. Khaken; per. V.I. Emel'ianova; pod red. Iu.L. Klimontovicha, S.M. Osovtsa*. - Moskva : Mir, 1980. - 405 s.
- [2] Nicolis G., Prigogine I. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations / G. Nicolis, I. Prigogine*. - New York: Wiley, 1977. - 491 p.
- [3] Davydova N.S. *Berezhlivoe proizvodstvo: monografiia / N.S. Davydova; GOUVPO «Udmurtskii gosudarstvennyi universitet», Institut ekonomiki i upravleniia*. - Izhevsk: Izd-vo Instituta ekonomiki i upravleniia UdGU, 2012. - 138 s.
- [4] Glukhov V.V. *Organizatsiia berezhlivogo proizvodstva: uchebnoe posobie / V.V. Glukhov, E.S. Balashova; Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi politekhnicheskii universitet*. - 2-e izd., dop. - Sankt-Peterburg: Izd-vo Politekh. un-ta, 2014.
- [5] Sidorov A.S. *Berezhlivoe proizvodstvo: rossiiskii opyt/ A.S. Sidorov, O.V. Vershinina // Vestnik MGEI*. - 2022. - № 4. - С. 129-135.
- [6] Tsifrovizatsiia ekonomicheskikh sistem: teoriia i praktika: monografiia / pod red. d-ra ekon. nauk, prof. A. V. Babkina. - Sankt-Peterburg: POLITEKh-PRESS, 2020. - 796 s.
- [7] Golov R.S. *Prikladnye osnovy formirovaniia kiberfizicheskikh sistem na vysokotekhnologichnykh promyshlennykh predpriatiiakh v usloviakh tsifrovoi transformatsii promyshlennosti / R.S. Golov, A.V. Myl'nik // Nauchnye trudy Vol'nogo ekonomicheskogo obshchestva Rossii*. - 2023. - T. 239, № 1. - С. 291-306. - DOI: 10.38197/2072-2060-2023-239-1-291-306
- [8] Plotnikov V.A. *Tsifrovizatsiia proizvodstva: teoreticheskai sushchnost' i perspektivy razvitiia v rossiiskoi ekonomike / V.A. Plotnikov // Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta*. - 2018. - № 4 (112). - С. 16-24
- [9] Fadeev S.V. *Instrumenty berezhlivogo proizvodstva kak faktor tsifrovoi transformatsii kompanii // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika*. - 2024. - T. 26, № 2. - С. 147-157. - DOI: <https://doi.org/10.15688/ek.jvolsu.2024.2.12>
- [10] Vagin M.S. *Primenenie berezhlivykh i tsifrovyykh tekhnologii dlia povysheniia effektivnosti proizvodstvennykh protsessov / M.S. Vagin // Innovatsii i Investitsii*. - 2024. - №10. - С. 122-126.
- [11] Ivchenko B.P., Vagin M.S., *Klassifikatsiia instrumentov berezhlivogo proizvodstva // Aktual'nye voprosy sovremennoi ekonomiki Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Sankt-Peterburg – Vitebsk – Aстана – Donetsk 17-18 oktiabria 2024 goda* – SPb.: BGTU «VOENMEKh» im. D.F. Ustinova, 2024. - С. 157-160.

