



МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ВНЕДРЕНИЯ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ «ОПЕРАТОР-ОБОРУДОВАНИЕ-ПРОЦЕСС»

А. В. Винниченко

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В статье представлена разработанная математическая модель для комплексной оценки уровня внедрения бережливого производства (БП). Модель основана на векторном представлении ключевых элементов производственной системы (ПС) «оператор-оборудование-процесс» (ООП). Каждый элемент оценивается через интегральный индекс, рассчитываемый как взвешенная сумма нормализованных показателей, сгруппированных в три категории: процессные, поведенческие и инструментальные. Интегральный индекс бережливого производства (LPI) вычисляется как взвешенная сумма компонентных индексов. Ключевым преимуществом модели является возможность как общей оценки уровня внедрения БП через LPI, так и детального анализа через вектор состояния $V=(IX, IY, IZ)$, что позволяет выявлять функциональную асимметрию показателей элементов ПС и точно определять «узкие места» производственной системы. Предложены шкалы для интерпретации результатов и описаны характеристики каждого уровня внедрения БП.

Ключевые слова: бережливое производство, интегральный индекс, математическая модель, оператор-оборудование-процесс, уровень внедрения.

Для цитирования:

Винниченко, А. В. Модель оценки уровня внедрения бережливого производства на основе векторного анализа производственной системы «оператор-оборудование-процесс» / А. В. Винниченко // Системный анализ и логистика. – 2025. – № 5(48). – с. 74-79. DOI: 10.31799/2077-5687-2025-5-74-79.

MODEL OF THE LEVEL OF IMPLEMENTATION OF LEAN PRODUCTION BASED ON THE VECTOR ANALYSIS OF THE PRODUCTION SYSTEM «OPERATOR-EQUIPMENT-PROCESS»

A. V. Vinnichenko

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The article presents a developed mathematical model for a comprehensive assessment of the level of implementation of lean production (LP). The model is based on a vector representation of the key elements of the production system (PS) «operator-equipment-process» (OEP). Each element is evaluated using an integral index, which is calculated as a weighted sum of normalized indicators grouped into three categories: process, behavioral, and instrumental. The integral index of lean production (LPI) is calculated as a weighted sum of the component indices. The key advantage of the model is the possibility of both a general assessment of the level of implementation of LP through LPI, and a detailed analysis through the state vector $V=(IX, IY, IZ)$, which allows to identify the functional asymmetry of the indicators of the PS elements and to accurately determine the «bottlenecks» of the production system. Scales for the interpretation of the results are proposed and the characteristics of each level of implementation of LP are described.

Keywords: lean production, integral index, mathematical model, operator-equipment-process, implementation level.

For citation:

Vinnichenko, A. V. Model of the level of implementation of lean production based on the vector analysis of the production system «operator-equipment-process»/ A. V. Vinnichenko // System analysis and logistics. – 2025. – № 5(48). – p. 74-79. DOI: 10.31799/2077-5687-2025-5-74-79.

Введение

Актуальность внедрения принципов и инструментов бережливого производства (БП) для повышения эффективности промышленных предприятий не вызывает сомнений. Однако одной из ключевых проблем остается объективная оценка текущего уровня внедрения БП [1] и зрелости производственной системы [2]. Часто оценка носит субъективный, фрагментарный характер, фокусируясь либо на отдельных финансово-экономических показателях [3], либо на



факте применения конкретных инструментов, без учета системного взаимодействия всех элементов [4].

Существующие методики, [5-7] или модели типа Lean Assessment Tool [8], часто дают обобщенный балл, который не раскрывает внутренних функциональных асимметрий показателей системы. Недостаточно знать, что система «на 60% бережлива», важно понимать, что именно затрудняет развитие: недостаток компетенций персонала, низкая надежность оборудования или неэффективная организация потоков.

Цель исследования – разработать математическую модель, которая не только обеспечивает общую количественную оценку уровня внедрения БП, но и позволяет проводить детальный анализ по основным элементам производственной системы (ПС) через концепцию векторов состояния.

Материалы и методы

Оценка каждого элемента ПС «оператор-оборудование-процесс» осуществляется через три взаимодополняющих типа показателей: процессные, поведенческие и инструментальные, обеспечивая комплексность диагностики и преодолевая ограничения фрагментарного подхода. Трёхмерная оценка необходима для выявления первопричин проблем, формирования сбалансированной стратегии улучшений, обеспечения устойчивости внедрения бережливого производства и управления развитием производственной системы.

Таким образом, состояние каждого элемента ООП описывается своим вектором, показатели которого, нормализованные оценки по ключевым направлениям. Вектора для элементов «оператор» (X), «оборудование» (Y), «процесс» (Z) (1):

$$\begin{aligned} X &= [X_1, X_2, X_3, \dots, X_n]^T \in [0, 1]^n \\ Y &= [Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n]^T \in [0, 1]^n, \\ Z &= [Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n]^T \in [0, 1]^n \end{aligned} \quad (1)$$

где показатели (X_n , Y_n , Z_n) определяются через функции нормализации [9]: линейная нормализация, для процентных показателей (2а), нормализация по шкале Ликерта [10] (2б), обратная нормализация, для инверсных показатели по типу «меньше = лучше» (2в) и нормализация относительно целевого значения (2г). Функции нормализации преобразуют исследуемые показатели в нормализованную оценку от 0 до 1 для включения в вектор показателей элементов ПС.

$$\begin{aligned} а. \quad N(x) &= x/\max, \\ б. \quad N(x) &= (x-1)/4, \quad x \in \{1, \dots, 5\}, \\ в. \quad N(x) &= 1 - (x - \min)/(\max - \min), \\ г. \quad N(x) &= (x - x_{\text{факт}})/(x_{\text{план}} - x_{\text{факт}}). \end{aligned} \quad (2)$$

где, x - исходное значение показателей (X_n , Y_n , Z_n), $N(x)$ - нормализованное значение в диапазоне [0, 1].

Для каждого элемента ПС рассчитывается интегральный индекс (I_X , I_Y , I_Z) как взвешенная сумма его нормализованных показателей. (3):



$$\begin{aligned} I_X &= \sum_{i=1}^n w_{X_i} \cdot X_i, & \sum_{i=1}^n w_{X_i} &= 1 \\ I_Y &= \sum_{i=1}^n w_{Y_i} \cdot Y_i, & \sum_{i=1}^n w_{Y_i} &= 1, \\ I_Z &= \sum_{i=1}^n w_{Z_i} \cdot Z_i, & \sum_{i=1}^n w_{Z_i} &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

где $w_{X_i} = [w_{X_1}, w_{X_2}, w_{X_3}, \dots, w_{X_n}]^T$ - вектор весов показателей элемента «оператор», $w_Y = [w_{Y_1}, w_{Y_2}, w_{Y_3}, \dots, w_{Y_n}]^T$ - вектор весов показателей элемента «оборудование», $w_Z = [w_{Z_1}, w_{Z_2}, w_{Z_3}, \dots, w_{Z_n}]^T$ - вектор весов показателей элемента «процесс».

Веса (w) назначаются экспертным путем в зависимости от отраслевой специфики и стратегических приоритетов предприятия.

Далее, определяются вектора состояния бережливой производственной системы (БПС) (4):

$$V = [I_X, I_Y, I_Z]^T \in [0, 1]^3, \quad (4)$$

А также общего индекса БП (5), рассчитываемый как взвешенная сумма интегральных индексов (I_X, I_Y, I_Z).

$$LPI = \alpha \cdot I_X + \beta \cdot I_Y + \gamma \cdot I_Z = \omega \cdot V, \quad (5)$$

где $\omega = [\alpha, \beta, \gamma]^T$ - вектор стратегических весов, $\|\omega\|_1 = \alpha + \beta + \gamma = 1$

Для выявления функциональной асимметрии показателей вводятся дополнительные метрики – мера сбалансированности и коэффициент асимметрии. Эти показатели позволяют не просто оценить общий уровень внедрения БП через индекс LPI , но и провести диагностику производственной системы: выявить структурные перекосы, определить «слабые звенья» и установить обоснованные приоритеты для улучшений. Такой подход трансформирует оценку из констатации фактов в инструмент стратегического управления развитием.

Мера сбалансированности определяется через энтропию вектора V (6):

$$B = 1 - \sqrt{[(I_X - \mu)^2 + (I_Y - \mu)^2 + (I_Z - \mu)^2] / \mu \sqrt{3}}, \quad (6)$$

где $\mu = (I_X + I_Y + I_Z)/3$ - среднее значение компонент, $B \in [0, 1]$, $B \rightarrow 1$: система сбалансирована, улучшения нужны во всех направлениях, $B \rightarrow 0$: сильный перекося, есть критически отстающий элемент.

Коэффициент асимметрии (7):

$$K_{асим} = \max(|I_X - I_Y|, |I_Y - I_Z|, |I_Z - I_X|), \quad (7)$$

Где, $K_{асим} \in [0, 1]$, $K_{асим} \rightarrow 0$: элементы развиты равномерно, $K_{асим} \rightarrow 1$: катастрофический разрыв между элементами.

Данное математическое представление обеспечивает формальную строгость модели, воспроизводимость расчетов и возможность алгоритмической реализации для автоматизированной оценки уровня бережливого производства.



Результаты

Для верификации разработанной модели и обеспечения единообразия оценки были разработаны шкалы интерпретации (табл. 1-2), позволяющие перевести количественные значения индексов в качественные характеристики состояния производственной системы.

Таблица 1 – Шкала интерпретации компонентных индексов (I_x , I_y , I_z)

<i>Уровень</i>	<i>Диапазон</i>	<i>Характеристики элемента системы</i>
Критический	0.00 - 0.19	Полное отсутствие практик БП. Хаос, реактивное управление.
Начальный	0.20 - 0.39	Единичные попытки внедрения. Результаты нестабильны.
Развивающийся	0.40 - 0.59	Локальное внедрение инструментов. Появление первых результатов.
Системный	0.60 - 0.79	Инструменты интегрированы в работу. Улучшения регулярны и измеримы.
Передовой	0.80 - 1.00	Культура непрерывных улучшений стала нормой. Самообучающаяся система.

Таблица 2 – Шкала интерпретации общего индекса LPI

<i>Уровень внедрения БП</i>	<i>Диапазон LPI</i>	<i>Характеристики производственной системы ООП</i>
Отсутствует / Хаос	0.00 - 0.24	Система не управляется. Преобладают потери.
Локальные инициативы	0.25 - 0.44	«Островки бережливости» не связаны между собой.
Становление системы	0.45 - 0.64	Элементы ООП начинают работать согласованно.
Интегрированная система	0.65 - 0.84	БП – стандартный способ управления. Синергия элементов.
Бережливый эталон	0.85 - 1.00	Минимизированы все виды потерь. Высокая гибкость.

Для наглядного представления динамики развития и взаимодействия элементов производственной системы, а также визуализации переходных процессов между уровнями внедрения БП, была разработана комплексная диаграмма, отражающая траекторию совершенствования (рис. 1).



Динамика улучшений БП: устойчивые состояния и переходные процессы с учетом стохастических флуктуаций

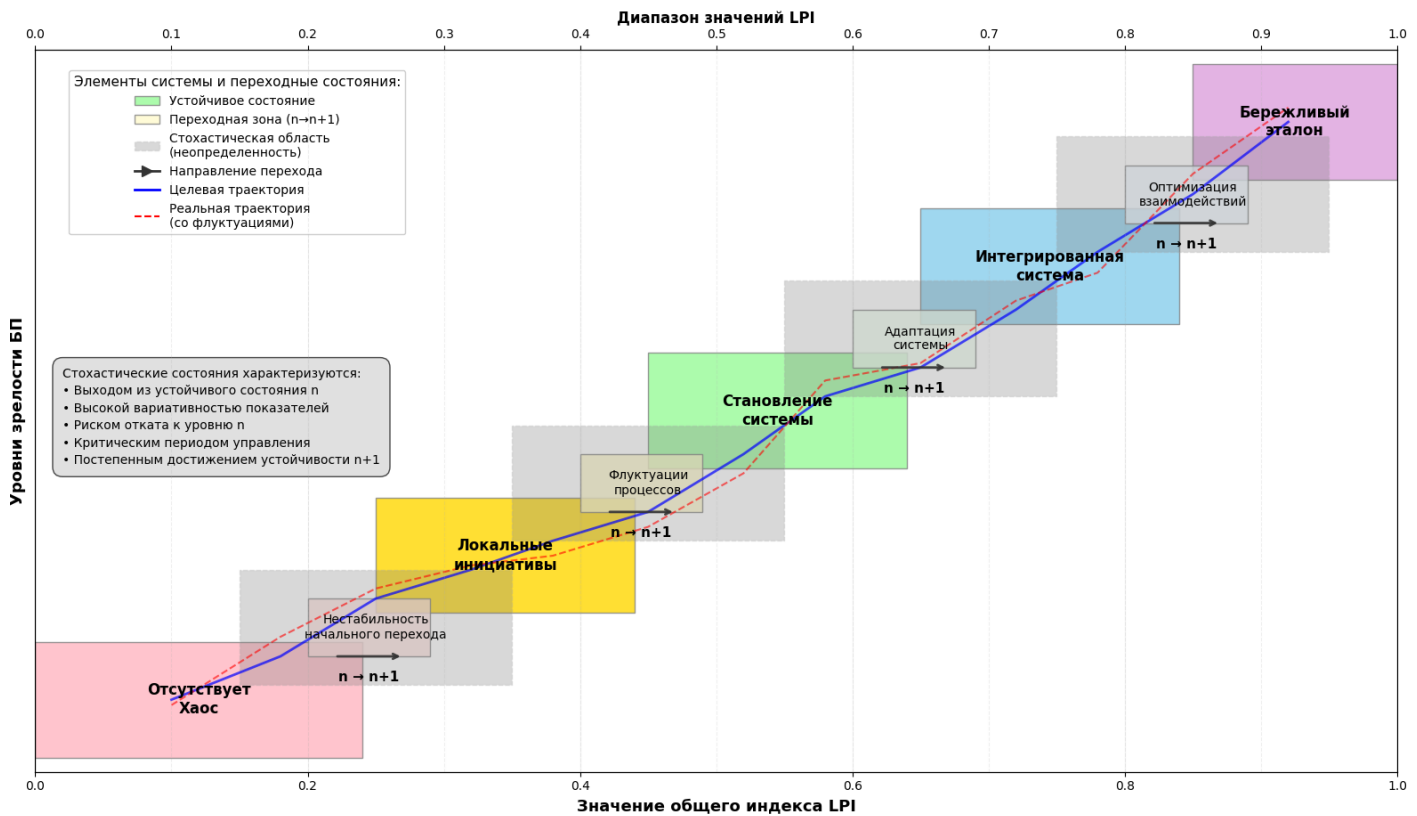


Рис. 1. Динамика улучшений организации бережливых производственных систем

Заключение

Разработанная математическая модель представляет собой комплексный инструмент для оценки уровня внедрения бережливого производства, учитывающей ключевые элементы производственной системы, обеспечивая целостность оценки. Применение векторного анализа позволяет не только констатировать общий уровень внедрения БП в производственной системе, но и проводить диагностику функциональной асимметрии элементов производственной системы, выявляя целевые области для адресного внедрения.

Гибкость модели проявляется в возможности адаптации весовых коэффициентов и состава показателей к отраслевой специфике и стратегическим приоритетам конкретного предприятия. Динамический характер инструмента обеспечивает возможность отслеживания прогресса во времени и оценки эффективности реализуемых программ улучшений.

Практическая ценность модели заключается в ее способности трансформировать традиционные субъективные оценки в объективный, количественно обоснованный механизм управления развитием производственной системы. Внедрение данного подхода в практику промышленных предприятий позволит перейти от фрагментарных оценок к системному управлению непрерывными улучшениями, обеспечивая обоснованность принимаемых управленческих решений и повышая эффективность производственной деятельности в долгосрочной перспективе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сергеева Т. Л.* Практическое применение lean-подхода для оптимизации бизнес-процессов предприятия / Т. Л. Сергеева, М. Н. Угрюмова, Ю. В. Лазич // Beneficium. – 2025. – № 1(54). – С. 142-149. – DOI 10.34680/BENEFICIUM.2025.1(54).142-149.



2. *Пытьев Н. Н.* Особенности оценки зрелости операционной системы предприятия на принципах бережливого производства / Н. Н. Пытьев, Г. И. Яковлев // *Лидерство и менеджмент*. – 2025. – Т. 12, № 4. – С. 845-860. – DOI 10.18334/lim.12.4.122984.
3. *Власенко К. А.* Разработка алгоритма оценки результативности финансирования инструментов бережливого производства на отечественных предприятиях // К. А. Власенко // *Финансовые Исследования*. – 2023. – № 1 (78). – 79-87.
4. *Криворотов В. В., Калина А. В., Трушков Т. А.* Повышение конкурентоспособности компании за счет внедрения инструментов бережливого производства как основы ее инновационного развития // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент»*. 2023. Т. 17, № 4. С. 62–75. DOI: 10.14529/em230406
5. *Момот, Р. А.* Особенности имплементации инструментов бережливых технологий в условиях обеспечения устойчивого развития малого и среднего бизнеса / Р. А. Момот // *Экономика, предпринимательство и право*. – 2025. – Т. 15, № 1. – С. 101-116. – DOI 10.18334/epp.15.1.122517.
6. *Родионова В. Н.* Методический подход к анализу производственных систем на этапе внедрения концепций бережливого производства // *Экономинфо*. – 2024. Т. 19, № 3. С. 34-41.
7. *Палкина Е.С.* Методика оценки влияния цифровизации бережливого производства на экономическую эффективность деятельности промышленного предприятия / Е. С. Палкина, М. С. Вагин // *π-Economy*. – 2025. – 18 (4). – С.173–185. DOI: 10.18721/JE.18410
8. *Omogbai O., Salonitis K.* A Lean Assessment Tool Based on Systems Dynamics // *Procedia 26th CIRP Design Conference*. – Bedfordshire, 2016. – p.106 – 111.
9. *Старовойтов В. В.* Нормализация данных в машинном обучении / В. В. Старовойтов, Ю. И. Голуб // *Информатика*. – 2021. – Т. 18, № 3. – С. 83–96.
10. *Joshi A.* Likert Scale: Explored and Explained / A. Joshi, S. Kale, S. Chandel, D. Pal // *British Journal of Applied Science & Technology*. – 2015. – № 7(4). – P. 396-403. DOI: 10.9734/BJAST/2015/14975

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Винниченко Александра Валерьевна

Старший преподаватель, кандидат технических наук

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А

E-mail: alex23rain@guap.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vinnichenko Alexandra Valeryevna

Senior lecturer, PhD

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: alex23rain@guap.ru

Дата поступления: 26.11.2025

Дата принятия: 26.11.2025