

Научная статья
https://doi.org/10.24412/2220-2404-2024-10-4
УДК 338.3



ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИНСТРУМЕНТОВ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Вагин М.С.

Балтийский государственный технический университет Военмех имени Д. Ф. Устинова

Аннотация. Целью данного исследования является анализ развития инструментов бережливого производства в эпоху цифровой трансформации экономики. В статье анализируется один из ключевых инструментов бережливого производства — всеобщее обслуживание оборудования (TPM). Рассматривается эволюция обслуживания оборудования от реактивного до предсказательного.

Методология исследования основана на диалектическом подходе, включая методы анализа, синтеза, обобщения и систематизации научных источников.

Результаты исследования показывают, что цифровизация значительно усиливает возможности TPM, позволяя в реальном времени отслеживать состояние оборудования, прогнозировать поломки и оптимизировать графики технического обслуживания. Это приводит к сокращению простоев, повышению производительности и снижению затрат. Анализ показывает, что интеграция математических моделей с цифровыми технологиями повышает эффективность предсказательного обслуживания, улучшает точность прогнозов и общую надежность производственных систем.

Вывод. Бережливые технологии в эпоху индустрии 4.0 не только не теряют своей актуальности, но и расширяют свои возможности. Дополненные цифровыми инновациями, становятся мощным инструментом для адаптации к новым условиям, улучшения производственных процессов и создания большей ценности для клиента.

Ключевые слова: бережливое производство, всеобщее обслуживание оборудования, цифровизация экономики, эффективность, предсказательное обслуживание.

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF LEAN MANUFACTURING TOOLS

Mikhail S. Vagin

Baltic State Technical University of Military Engineering named after D. F. Ustinov

Abstract. The aim of this study is to analyze the development of lean manufacturing tools in the era of digital transformation of the economy. The article examines one of the key tools of lean manufacturing — Total Productive Maintenance (TPM). The evolution of equipment maintenance from reactive to predictive is considered.

The research methodology is based on a dialectical approach, including methods of analysis, synthesis, generalization, and systematization of scientific sources.

The results of the study show that digitalization significantly enhances the capabilities of TPM, enabling real-time monitoring of equipment condition, predicting failures, and optimizing maintenance schedules. This leads to reduced downtime, increased productivity, and cost reduction. The analysis shows that the integration of mathematical models with digital technologies enhances the efficiency of predictive maintenance, improves the accuracy of forecasts, and increases the overall reliability of production systems.

Conclusion. In the era of Industry 4.0, lean technologies not only retain their relevance but also expand their capabilities. Supplemented by digital innovations, they become a powerful tool for adapting to new conditions, improving production processes, and creating greater value for customers.

Keywords: lean manufacturing, Total Productive Maintenance, digital economy, efficiency, predictive maintenance.

Введение

Современное бережливое производство развивается сразу по нескольким ключевым направлениям, каждое из которых играет важную

роль в повышении эффективности и конкурентоспособности производственных процессов.

Одной из важнейших тенденций является цифровизация и внедрение концепции Индустрии

4.0. При этом иногда можно слышать мнение о том, что бережливые технологии утратили свою актуальность, а цифровые технологий в ближайшее время их заменят. Однако это не совсем верно. В действительности, цифровые технологии и бережливое производство не противопоставляются, а скорее дополняют и усиливают друг друга.

Цифровые технологии открывают новые возможности для оптимизации производственных процессов. Они позволяют собирать и анализировать данные в реальном времени, что значительно улучшает возможности для быстрого выявления и устранения потерь.

Таким образом, бережливые технологии получают мощный инструмент для более эффективного выполнения своих задач.

Бережливое производство является методологией организации производства своего рода философией, направленной на минимизацию потерь и максимизацию ценности для клиента. Оно включает в себя принципы и практики, такие как непрерывное улучшение, вовлечение всех сотрудников, устранение всех видов потерь и создание потоков, ориентированных на потребности клиента. В этом контексте, цифровые технологии выступают как инструменты, открывающие новые и расширенные возможности для более оперативного и глубокого применения методов бережливого производства [1].

С помощью интернета вещей (IoT) можно собирать данные в реальном времени с различных датчиков, установленных на оборудовании и в производственных линиях, что позволяет оперативно выявлять и устранять потери [2]. Аналитические инструменты и большие данные дают возможность глубже анализировать производственные процессы, находить скрытые паттерны и принимать более обоснованные решения.

Таким образом, бережливые технологии не только не потеряли свою актуальность, но и значительно усилились благодаря интеграции с цифровыми технологиями. Вместе они создают мощный симбиоз, который позволяет предприятиям более эффективно адаптироваться к новым вызовам, улучшать производственные процессы и создавать большую ценность для клиентов.

Основные инструменты бережливого производства.

Бережливое производство использует различные инструменты и методы для минимизации потерь и повышения эффективности. Одним из

ключевых принципов является кайдзен - философия непрерывного улучшения, которая предполагает постоянное совершенствование процессов с участием всех сотрудников. Этот подход вовлекает работников в процесс поиска и реализации улучшений на своих рабочих местах, создавая культуру постоянного совершенствования.

Методология 5S направлена на создание чистой, организованной и безопасной рабочей среды через пять этапов: сортировка, самоорганизация, уборка, стандартизация и улучшение. Канбан — визуальная система управления процессами, использующая карточки или мониторы для отслеживания статуса работы, что помогает минимизировать запасы и устранить узкие места. Система "Точно вовремя" (Just-in-Time, JIT) сокращает время цикла и запасы, поставляя материалы и производя продукцию к моменту их необходимости [3]. Картирование потока создания ценности (Value Stream Mapping, VSM) анализирует и оптимизирует все шаги создания продукта или услуги.

Система предотвращения ошибок (Poka-Yoke) разрабатывает процессы для предупреждения дефектов, что повышает качество продукции.

Общее управление качеством (Total Quality Management, TQM) — подход, направленный на постоянное улучшение качества при участии всех сотрудников.

Метод быстрой переналадки (SMED) сокращает время настройки оборудования, что уменьшает простой и увеличивает гибкость производства [4].

Всеобщее обслуживание оборудования (TPM) повышает эффективность использования оборудования через предупреждение и устранение потерь, вовлекая всех работников.

Эти инструменты помогают улучшать процессы, минимизировать потери и увеличивать ценность для клиентов, а в сочетании с цифровыми технологиями они становятся еще более мощными, позволяя предприятиям адаптироваться к современным вызовам и достигать устойчивых улучшений.

На примере TPM проанализируем эффект объединения методик бережливого производства и цифровых технологий.

Всеобщий уход за оборудованием (TPM).

Всеобщий уход за оборудованием (Total Productive Maintenance) — концепция менеджмента производственного оборудования, нацеленная на

повышение эффективности технического обслуживания. Бесперебойная работа оборудования является залогом стабильного функционирования производства, образует основу для гарантированного выполнения заказов и достижения запланированных показателей результативности предприятия в целом.

До внедрения ТРМ управление техническим обслуживанием оборудования на производственных предприятиях, таких как Toyota, было менее структурированным и менее эффективным. Преобладало реактивное обслуживание, при котором обслуживание оборудования проводилось только после его поломки или выхода из строя. Такой подход приводил к незапланированным простоям, перебоям в производстве и увеличению затрат на ремонт. Внезапные поломки вызывали значительные задержки в производстве, так как ремонтные работы занимали много времени и требовали значительных ресурсов для восстановления оборудования. Плановое профилактическое обслуживание, при котором проводилось регулярное обслуживание и замена частей оборудования по заранее установленному графику, было более эффективным, чем реактивное, но все еще не решало всех проблем. Оно часто приводило к замене еще работоспособных деталей и проведению ненужных обслуживаний, что увеличивало затраты. Операторы оборудования редко вовлекались в процессы технического обслуживания, и обслуживание осуществлялось исключительно специалистами по ремонту, что ограничивало знания и участие операторов в поддержании работоспособности оборудования. Процессы обслуживания и ремонта не были стандартизированы и документированы, что приводило к несоответствиям и низкой эффективности работ.

Toyota, стремясь повысить эффективность своего производства и минимизировать потери, разработала концепцию всеобщего обслуживания оборудования. Целью было максимизировать производительность оборудования, сократив простои, повысив производительность и улучшив качество продукции. ТРМ направлен на переход от реактивного к проактивному и профилактическому обслуживанию, что включает регулярное плановое обслуживание и использование данных для прогнозирования и предотвращения потенциальных проблем. Важным фактором стало вовлечение всех сотрудников в процессы обслуживания, что повысило уровень ответственности и вовлеченности операторов. Автономное обслужива-

ние, при котором операторы оборудования активно участвуют в его обслуживании и поддержке в рабочем состоянии, способствует быстрому выявлению и устранению проблем. Стандартизация и документирование процессов обеспечили единообразие и высокое качество выполнения работ, что также способствовало лучшему обучению сотрудников и передаче знаний.

Внедрение ТРМ принесло Toyota множество преимуществ. Регулярное и проактивное обслуживание значительно уменьшило количество внезапных поломок и простоев оборудования. Оптимизация работы оборудования и сокращение времени на его обслуживание увеличили общую производительность. Поддержание оборудования в оптимальном состоянии снизило вероятность дефектов и улучшило качество выпускаемой продукции. Предотвращение поломок и оптимизация графиков обслуживания позволили снизить затраты на ремонт и запасные части. Активное участие операторов в обслуживании оборудования повысило их вовлеченность и ответственность за результаты работы.

В итоге, формирование концепции бережливого производства и в частности методики всеобщего обслуживания оборудования стало важным шагом для Toyota в стремлении к повышению эффективности и конкурентоспособности, позволив оптимизировать процессы технического обслуживания, сократить потери и создать культуру непрерывного улучшения.

Влияние цифровых технологий на ТРМ.

Из выше изложенного следует, что развитие методов технического обслуживания и ремонта оборудования проходила поступательными шагами. В настоящее время с развитием искусственного интеллекта, интернета вещей, больших данных, цифровых двойников подходы бережливого производства в части всеобщего обслуживания оборудования приобретают дополнительное развитие в виде предсказательного обслуживания. Наглядно эволюцию технического обслуживания можно представить следующим образом.

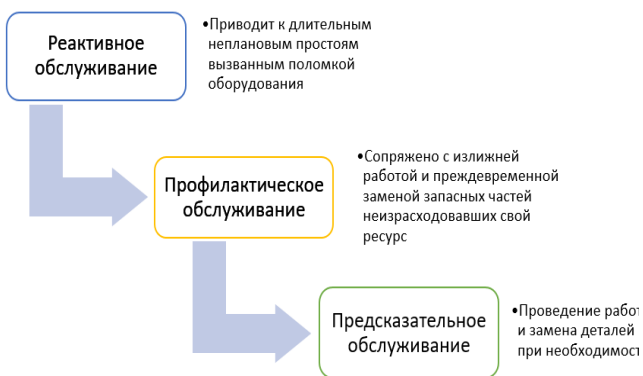


Рис. 1 Эволюция организации технического обслуживания.

В качестве преимуществ предсказательного технического обслуживания выделяют [5]:

- Сокращение эксплуатационных затрат на 12-25%.
- Повышение качества продукции или услуг до 14%.
- Сокращение простоев оборудования на 35-50%.
- Продление жизненного цикла основных средств до 20%.

Интернет вещей и датчики играют ключевую роль в современном производстве, позволяя в реальном времени отслеживать состояние оборудования, включая вибрации, температуру, давление и другие параметры. Это позволяет своевременно выявлять признаки износа или неисправности и проводить профилактическое обслуживание до возникновения серьезных проблем. Внедрение IoT уменьшает количество незапланированных простоев и увеличивает общее время работы оборудования. Данные в реальном времени поступают в систему управления, которая анализирует их и сигнализирует о необходимости проведения технического обслуживания.

Анализ больших данных позволяет выявлять закономерности и тенденции, которые

Таблица 1

Основные модели предсказательного анализа.

Группа моделей	Описание	Сильные стороны	Слабые стороны
Регрессионные модели	Включают линейную и логистическую регрессии. Линейная регрессия используется для прогнозирования непрерывных значений на основе линейной зависимости между независимыми переменными. Логистическая регрессия прогнозирует вероятность наступления бинарного события на основе набора предикторов.	Простота, легкость интерпретации, подходящая для линейных и бинарных данных.	Ограничены линейными отношениями и бинарными событиями, чувствительны к мультиколлинеарности.
Модели временных рядов	Включают ARIMA и методы экспоненциального сглаживания. ARIMA используется для анализа и прогнозирования временных рядов данных. Методы экспоненциального сглаживания применяются для краткосрочных прогнозов на основе сглаживания временных рядов.	Эффективны для временных рядов, хороши для краткосрочных прогнозов.	Требуют стационарности данных, менее точны для долгосрочных прогнозов.

трудно заметить вручную. Это помогает предсказать возможные поломки и оптимизировать графики технического обслуживания. Интеграция с аналитическими инструментами улучшает планирование и повышает эффективность профилактических мероприятий.

Цифровые двойники (Digital Twins) представляют собой виртуальные копии физического оборудования, которые обновляются в реальном времени на основе данных, поступающих с датчиков. Они позволяют моделировать и прогнозировать поведение оборудования в различных условиях, оптимизировать обслуживание и улучшать производственные процессы.

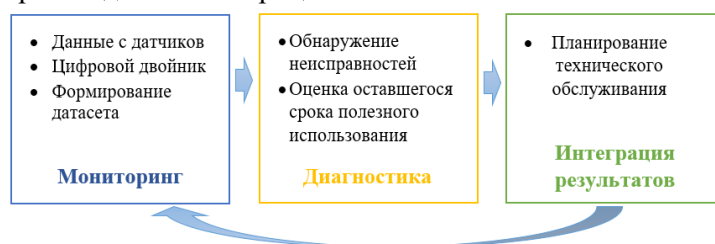


Рис. 2 Схема работы системы предсказания технического обслуживания.

Математические модели для прогнозирования отказов.

Прогнозирование отказов оборудования с применением математических моделей является эффективным подходом для определения вероятности отказа. К числу распространенных моделей, можно отнести различные виды регрессий, стохастические модели, модели временных рядов и машинного обучения.

Эта упрощенная таблица содержит основные инструменты предсказательного анализа, используемые для прогнозирования отказов оборудования.

Стохастические модели	Включают Марковские цепи и процессы Пуассона. Марковские цепи моделируют вероятности переходов между состояниями системы. Процессы Пуассона применяются для моделирования случайных событий, происходящих в определенные моменты времени.	Хорошо подходят для систем с четкими состояниями и редких событий.	Ограничены дискретными состояниями и предположением независимости событий.
Модели машинного обучения	Включают метод опорных векторов (SVM), случайные леса и нейронные сети. Эти модели используют различные методы и алгоритмы для прогнозирования на основе данных и выявления сложных зависимостей.	Высокая точность, способны выявлять сложные нелинейные зависимости, устойчивы к выбросам (в зависимости от модели).	Сложны в интерпретации, требуют значительных вычислительных ресурсов и данных, склонны к переобучению.

Составлено автором по материалам источников [6; 7; 8; 9].

Использование множества датчиков для мониторинга состояния сложных технических систем значительно повышает точность анализа и прогнозирования возможных поломок. Марковские цепи могут быть адаптированы для работы с данными от множества датчиков, что позволяет более точно моделировать состояние системы и принимать обоснованные решения по техобслуживанию и ремонту.

Предположим, что у нас есть система с тремя основными состояниями, определенными на основе показаний датчиков:

- S1: Нормальная работа (все датчики в пределах нормы).
- S2: Предупреждение (один или несколько датчиков показывают отклонение от нормы).
- S3: Неисправность (один или несколько датчиков показывают критическое отклонение).

Датчики собирают данные о различных параметрах системы (температура, давление, вибрация и т.д.). С помощью алгоритмов машинного обучения и статистических методов анализируются данные для определения вероятностей переходов между состояниями.

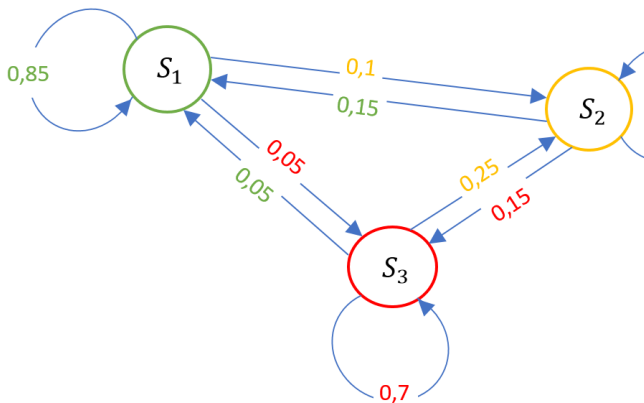


Рис. 3 Марковский процесс.

Вероятность перехода из одного состояния в другое можно отобразить в матрице переходов, подобно приведенной ниже:

$$P = \begin{bmatrix} 0,85 & 0,15 & 0,05 \\ 0,1 & 0,7 & 0,25 \\ 0,05 & 0,15 & 0,7 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Модель используется для прогнозирования вероятностей нахождения системы в различных состояниях через определенные промежутки времени, что позволяет предсказывать возможные поломки и планировать профилактическое обслуживание.

Применение различных математических моделей позволяет более точно предсказывать вероятность отказов оборудования и разрабатывать эффективные стратегии технического обслуживания. Выбор конкретной модели зависит от характера данных, доступных параметров и специфики оборудования. Интеграция этих моделей с цифровыми технологиями, такими как IoT и большие данные, значительно улучшает точность прогнозов и помогает предприятиям снижать затраты, минимизировать простои и повышать общую надежность производственных систем.

Заключение.

Внедрение бережливого производства в России привело к значительному улучшению операционной эффективности, снижению затрат, повышению качества и созданию культуры непрерывных инноваций. В эпоху цифровизации эти инструменты не только сохраняют свою актуальность, но и расширяют возможности благодаря интеграции с новейшими цифровыми технологиями.

Интернет вещей, большие данные и машинное обучение существенно усиливают потенциал взятого примера по всеобщему обслуживанию оборудования. Установленные IoT-датчики позволяют в реальном времени отслеживать ключевые

чевые параметры оборудования, такие как вибрация, температура, давление и т.д. Системы больших данных анализируют эти данные, выявляя скрытые закономерности и тенденции. Машинное обучение прогнозирует будущие события, такие как поломки, позволяя планировать профилактическое обслуживание и избегать незапланированных простоев.

Важным элементом становится использование цифровых двойников, которые создают виртуальные модели оборудования, обновляемые в реальном времени. Это позволяет моделировать

и прогнозировать поведение оборудования, оптимизируя его обслуживание и повышая надежность производственных процессов.

Таким образом, цифровые технологии не только поддерживают, но и значительно усиливают эффективность инструментов бережливого производства. Интеграция этих технологий позволяет предприятиям прогнозировать и предотвращать проблемы, улучшая общую производительность и снижая затраты на обслуживание и ремонт.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование в формате double-blind peer review (рецензенту неизвестны имя и должность автора, автору неизвестны имя и должность рецензента). Рецензия может быть предоставлена заинтересованным лицам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are reviewed in the double-blind peer review format (the reviewer does not know the name and position of the author, the author does not know the name and position of the reviewer). The review can be provided to interested persons upon request.

Литература:

1. Ведмидь П.А. Бережливое производство в эпоху цифрового производства [Электронный ресурс] // Управление производством. URL: https://up-pro.ru/library/information_systems/automation_production/lean-cyfra-plm/ (дата обращения: 26.03.2024)
2. Лазарев С.В. Цифровые инструменты при внедрении бережливого производства. IV международная научно-практическая конференция молодых ученых «Роль технического регулирования и стандартизации в эпоху цифровой экономики» // Электронный научный архив УрФУ. <http://elar.urfu.ru/handle/10995/119528> (дата обращения: 26.03.2024)
3. Фейгенсон Н.Б., Мацкевич И.С., Липецкая М.С. Бережливое производство и системы менеджмента качества: серия докладов (зеленых книг) в рамках проекта «Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации» / Н.Б. Фейгенсон, И.С. Мацкевич, М.С. Липецкая; Фонд «Центр стратегических разработок «Северо-Запад» — СПб., 2012. — Вып. 1 — 71 с.
4. Сахнович Т.А. Инструменты бережливого производства *Lean production tools* // Наука – образованию, производству, экономике [Электронный ресурс]: сборник материалов 19-й Международной научно-технической конференции, секция «Инженерная экономика» - Минск: БНТУ, 2022. – С.150-155.
5. Лесничая А., Гладков Д. О развитии предсказательного обслуживания на примере диагностики трансформатора // ЦИТМ Экспонента [Электронный ресурс] URL: https://habr.com/ru/companies/etmc_exponenta/articles/744174/ (дата обращения: 24.06.2024)
6. Петрусевич Д.А. Анализ математических моделей, используемых для прогнозирования эконометрических временных рядов // Российский технологический журнал 2019 Том7 №2 DOI:10.32362/2500-316X-2019-7-2-61-73
7. Аверин Г.В., Звягинцева А.В., Швецова А.А. О подходах к предсказательному моделированию Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика 2018. Том 45, № 1, С.140-148.
8. Помогаев В.М., Редреев Г.В., Ревакин П.И., Басакина А.С. Возможности использования данных электронных систем сельскохозяйственных машин для построения предсказательных моделей // Вестник Омского ГАУ. 2022. № 2 (46). С.153–166. DOI 10.48136/2222-1.0364_2022_2_153.
9. Баганов В.Ю. Основные аспекты принятия решений. Азимут научных исследований: экономика и управление. 2019. Т. 8. № 2(27), С.54-58 DOI: 10.26140/anie-2019-0802-0013

References:

1. Vedmid P.A. *Lean Manufacturing in the Era of Digital Production* [Electronic resource] // *Production Management*. URL: https://up-pro.ru/library/information_systems/automation_production/lean-cyfra-plm/ (accessed: 26.03.2024)

2. Lazarev S.V. *Digital Tools in the Implementation of Lean Manufacturing. IV International Scientific and Practical Conference of Young Scientists "The Role of Technical Regulation and Standardization in the Era of Digital Economy"* // *Electronic Scientific Archive of UrFU*. <http://elar.urfu.ru/handle/10995/119528> (accessed: 26.03.2024)

3. Feigenson N.B., Matskevich I.S., Lipetskaya M.S. *Lean Manufacturing and Quality Management Systems: a series of reports (green books) within the framework of the project "Industrial and Technological Foresight of the Russian Federation"* / N.B. Feigenson, I.S. Matskevich, M.S. Lipetskaya; Foundation "Center for Strategic Research "North-West" — SPb., 2012. — Issue 1 — 71 p.

4. Sakhnovich T.A. *Lean Production Tools* // *Science - Education, Production, Economy [Electronic resource]: collection of materials of the 19th International Scientific and Technical Conference, section "Engineering Economics"* - Minsk: BNTU, 2022. — P.150-155.

5. Lesnichaya A., Gladkov D. *On the Development of Predictive Maintenance on the Example of Transformer Diagnostics* // *CITM Exponenta [Electronic resource]* URL: https://habr.com/ru/companies/etmc_exponenta/articles/744174/ (accessed: 24.06.2024)

6. Petrushevich D.A. *Analysis of Mathematical Models Used for Predicting Econometric Time Series* // *Russian Technological Journal 2019 Volume 7 No 2* DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-2-61-73

7. Averin G.V., Zvyagintseva A.V., Shvetsova A.A. *On Approaches to Predictive Modeling* *Scientific Bulletins of Belgorod State University. Series: Economics. Informatics 2018. Volume 45, No 1, P.140-148.*

8. Pomogaev V.M., Redreev G.V., Revyakin P.I., Basakina A.S. *Possibilities of using the data of electronic systems of agricultural machinery for building predictive models. Vestnik of Omsk SAU. 2022;2(46):153-166, DOI 10.48136/2222-0364_2022_2_153.*

9. Baganov V.Yu. *Key Aspects of Decision Making. Azimuth of Scientific Research: Economics and Management. 2019. Vol. 8. No. 2(27), pp.54-58 DOI: 10.26140/anie-2019-0802-0013*

Информация об авторе:

Вагин Михаил Сергеевич, соискатель кафедры Р4 "Экономика, организация и управление производством", Балтийский государственный технический университет Военмех имени Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия, vaginms@yandex.ru

Mikhail S. Vagin, Candidate of the Department P4 "Economics, Organization and Production Management" Baltic State Technical University of Military Engineering named after D. F. Ustinov, St. Petersburg.