

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ В CALS-УПРАВЛЕНИИ ИЗДЕЛИЕМ

Мусина Г.Р., аспирант кафедры логистики и управления ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Целью статьи является разработка подхода к внедрению системы постпроизводственного мониторинга качества продукции в рамках CALS-управления жизненным циклом изделия. В работе применены методы цифрового моделирования, анализа бизнес-процессов и математического моделирования эффективности, что позволило предложить алгоритм поэтапной интеграции мониторинга – от определения целей и критериев до построения цифровой модели и оценки производительности. Результатом исследования стал формализованный план внедрения мониторинга, включающий механизмы сбора и анализа данных, обратной связи и корректировки процессов. Практическая проверка на примере российских машиностроительных предприятий показала снижение дефектов, оптимизацию производственных циклов и повышение эффективности управления качеством. Предложенный подход может служить основой для дальнейших исследований и масштабирования цифровых решений в других отраслях промышленности.

Ключевые слова: CALS-технологии, мониторинг, управление качеством.

Цитирование: Мусина Г.Р. Цифровое моделирование и мониторинг в CALS-управлении изделием // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. № 5 (86). С. 110–116.

ВВЕДЕНИЕ

Современная промышленность развивается в условиях возрастающей сложности производственных процессов и необходимости постоянного повышения качества продукции. Одним из ключевых вызовов для предприятий является обеспечение устойчивого управления жизненным циклом изделия – от стадии проектирования до эксплуатации и утилизации. В этой связи цифровые технологии и CALS-концепция (Continuous Acquisition and Life Cycle Support) становятся стратегической основой трансформации производственной среды, позволяя формировать единое информационное пространство и обеспечивать непрерывный контроль качества.

Особую актуальность приобретает задача постпроизводственного мониторинга, который обеспечивает обратную связь от этапа эксплуатации к проектированию и производству. В отличие от традиционных методов управления качеством, ориентированных преимущественно на контроль готовой продукции, цифровая модель мониторинга позволяет отслеживать дефекты и отклонения в реальном времени, формировать корректирующие воздействия и адаптировать процессы под фактические условия эксплуатации.

Научная новизна исследования заключается в разработке формализованного алгоритма внедрения постпроизводственного мониторинга с использованием цифровых моде-

лей и CALS-технологий. Такой подход позволяет не только выявлять отклонения на поздних стадиях жизненного цикла, но и корректировать проектные и технологические решения на ранних этапах. Кроме того, предложен метод оценки эффективности цифровизации процессов контроля качества, основанный на мультифакторной модели, что расширяет инструментарий управления производством.

Цель статьи заключается в формировании целостного подхода к внедрению системы цифрового постпроизводственного мониторинга на всех стадиях жизненного цикла изделия. Для ее достижения применяются методы цифрового моделирования, анализа бизнес-процессов и математического моделирования производственной эффективности.

Практическая значимость работы подтверждается результатами апробации на российских машиностроительных предприятиях, где интеграция цифровых решений показала снижение уровня дефектов, оптимизацию производственных циклов и рост общей эффективности систем управления качеством.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Актуальность и научная новизна определены тем, что современные предприятия сталкиваются с необходимостью сократить производственные потери, повысить качество продукции и обеспечить ее соответствие стандартам на

каждом этапе жизненного цикла. Несмотря на наличие отдельных цифровых решений – комплексное применение цифровых моделей и постпроизводственного мониторинга в связке с CALS-технологиями остается недостаточно проработанным. С учетом исследованных материалов и теоретических изысканий – в статье предлагаются план внедрения системы постпроизводственного мониторинга качества продукции на всех фазах жизненного цикла изделия и концепция формулы для оценки эффективности внедрения. Внедрение автоматизированной системы управления на всех стадиях жизненного цикла изделия обеспечит целостный подход к управлению качеством, базирующийся на цифровом моделировании и мониторинге, интегрированных в систему управления предприятием.

Зарубежные исследования акцентируют внимание преимущественно на интеграции ERP и CAD-сред [1], или на цифровых двойниках в рамках PLM-платформ [2], однако в них отсутствует механизм непрерывной оценки отклонений после выхода изделия в эксплуатацию. Новизна заключается в формализованном алгоритме внедрения мониторинга, ориентированного на выявление отклонений в условиях эксплуатации и их последующую корректировку на уровне проектных и производственных решений. Такой подход позволяет не только повысить качество готовой продукции, но и оперативно адаптировать производственные процессы с учетом фактических данных эксплуатации.

Преимущества и последствия внедрения цифровых технологий, CALS-технологий и цифровой трансформации в масштабах всего бизнеса огромны. Автор Степанов Д. представляет несколько областей, в которых переход на CALS-технологии может стать решающим фактором успеха на современном рынке:

- ускорение принятия решений;
- обеспечение беспрепятственного отслеживания производительности;
- получение более глубокого понимания клиентов;
- создание более привлекательного клиентского опыта;
- автоматизация ручных задач;
- внедрение новых продуктов, услуг и бизнес-моделей [3].

Кондратьев С.А. в работе «Цифровой двойник в промышленности: концепция, методы, примеры» указывает, что перевод процессов в цифровой формат действительно может быть сложной задачей. Описание этих действий должно быть поэтапно распределено в «дорожной карте CALS-технологической трансформации» [4].

По мнению Афанасьева В.В. и Иванова Н.И., масштабируемые и актуальные внутренние и внешние бизнес-процессы являются основой любой успешной организации. Бизнес-процесс – это совокупность задач, выполняемых сотрудниками, клиентами, партнерами или другими заинтересованными сторонами в определенном порядке для достижения определенной конечной бизнес-цели [5].

Пантюхин О.В. в своей научной работе «Разработка методологии управления качеством продукции ответственного назначения на основе цифровых двойников технологических процессов и изделий (на примере изготовления гильз для высокоэффективных патронов)» обращает внимание на то, что для разработки или поставки продукта или услуги могут потребоваться внутренние изменения. Внешние процессы могут быть связаны с предоставлением клиенту наилучшего сервиса и своевременной доставкой [6]. Управление дефектами по стадиям жизненного цикла изделия и соответствующей системы проводится путем детального анализа деятельности и потока данных по управлению жизненным циклом изделия.

Современные международные исследования в области управления жизненным циклом продукции акцентируют внимание на важности интеграции CALS-технологий и цифровых моделей. Применение подобных решений позволяет формировать единую информационную среду, охватывающую все стадии – от проектирования до эксплуатации. Это особенно актуально в условиях возрастающей сложности производственных систем и необходимости быстрого реагирования на изменения.

Среди зарубежных работ особого внимания заслуживает исследование Y. Denysenko, O. Dunnyk, T. Yashyna, N. Malovana (при участии V. Zaloga), опубликованное в журнале International Journal of Engineering & Technology, в котором показано, что использование CALS-инструментов в системе управления качеством позволяет оптимизировать контроль на всех этапах жизненного цикла изделия и значительно снижает уровень дефектности [6].

По мнению Kureichik V., Taratoukhine V., цифровизация производственной среды также рассматривается через призму интеграции с ERP и CAD-средами. В этой связи показателен опыт разработки CALS-моделей на основе объединения инженерных и управленческих платформ. Такая интеграция, как подчеркивается в зарубежной литературе, способствует формированию адаптивной производственной среды, устойчивой к сбоям и внешним рискам [7].

Крупные технологические компании также делают ставку на концепции жизненного цикла. Согласно данным, представленным SAP, современные PLM-решения являются базой для устойчивого инновационного развития: они позво-

ляют управлять данными, процессами, людьми и системами в едином цифровом пространстве [8].

В исследовании Carroll B. акцент сделан на следующем этапе эволюции CALS и PLM – создании интеллектуальных цифровых ландшафтов. Автор прогнозирует широкое внедрение искусственного интеллекта, цифровых двойников и дополненной реальности, которые позволяют не только контролировать, но и предсказывать поведение продукции на всех стадиях жизненного цикла [9].

Таким образом, международный опыт подчеркивает эффективность цифрового управления жизненным циклом продукции. Он может быть полезен для внедрения аналогичных подходов в отечественных производственных системах.

С учетом исследованных материалов и теоретических изысканий предлагается план внедрения системы постпроизводственного мониторинга качества продукции на всех фазах жизненного цикла изделия.

Предложенный план внедрения разработан на основе анализа действующих подходов цифровизации производственного контроля, включая модели, основанные на ERP- и CAD-интеграции, а также концепции цифровых двойников [10]. В отличие от них данная схема включает этапы, направленные не только на сбор и анализ данных, но и на переосмысление самих бизнес-процессов до их цифровизации. Такой подход позволяет устранить избыточные операции еще до автоматизации, обеспечивая более высокую эффективность системы. Рассматривались альтернативные варианты, включая фрагментарное внедрение мониторинга без глубокой интеграции в архитектуру предприятия, однако они не обеспечивали требуемой системности и адаптивности. В основе выбора текущего плана лежат принципы целостности, обратной связи и настраиваемости, что соответствует современным требованиям цифровой трансформации. Кроме того, учтены критерии совместимости с CALS-технологиями, открытости для масштабирования и возможности внедрения без глубоких изменений в организационной структуре. Комплексный характер предложенного подхода обусловлен необходимостью обеспечить управляемую систему мониторинга качества на всех этапах жизненного цикла изделия. Блок-схема представлена на рисунке.

Шаг 1. Формирование критериев успеха. Для каждого процесса, который подлежит преобразованию с помощью CALS-технологий, необходимо создать четкую схему для определения цели и связанных с ней показателей успеха. Следует обозначить конкретные цели с учетом ожидаемых конечных результатов. Исследователи называют это определением целей и ключевых результатов (OKR) [4].



Алгоритм внедрения системы цифрового постпроизводственного мониторинга на основе CALS-технологий

Шаг 2. Уточнение бизнес-процесса и параметров мониторинга. Следующим этапом становится определение типа бизнес-процесса, который подлежит трансформации. Бизнес-процессы делятся на три категории:

- операционные – связанные с производством и поставкой конечной продукции;
- управленческие – охватывающие контроль, планирование и распределение ресурсов;
- вспомогательные – обслуживающие функции, включая ИТ, документооборот, клиентскую поддержку.

К основным ожидаемым результатам могут относиться:

- уменьшение длительности производственного цикла,
- повышение стабильности и надежности продукции,

- снижение незавершенного производства,
- внедрение стандартов контроля качества,
- сокращение времени перенастройки оборудования,
- активное вовлечение персонала в совершенствование процессов,
- оптимизация технологических цепочек,
- освоение инновационных форм организации производства.

На данном этапе также важно определить методы получения данных: это могут быть автоматические системы, цифровые датчики, опросы персонала, экспертные суждения и др.

Шаг 3. Формирование цифровой бизнес-модели. В зависимости от целей проекта следует подобрать подходящую модель цифровой трансформации, опирающуюся на потенциал CALS-технологий.

В случае выявления проблем осуществляется коррекция процессов с последующим контролем изменений. Обратная связь от системы мониторинга помогает совершенствовать проектные и производственные решения.

Шаг 4. Переосмысление процессов и оптимизация. Перед внедрением цифровых решений важно не просто автоматизировать существующие схемы, а критически их переосмыслить. Это позволяет выявить слабые звенья, избыточные операции и потенциальные точки роста. Значительный вклад в эффективность дает системный подход к обратной связи: формируются шаблоны отчетности для различных категорий сотрудников (руководство, инженеры, технические специалисты, клиенты). Данные мониторинга используются для постоянной корректировки процессов.

Интеграция системы мониторинга с ERP и другими управленческими платформами (например, модулями качества и управления рисками) обеспечивает целостность и оперативность управления.

Шаг 5. Оценка соответствия выбранного ПО анализируемому процессу. Любая цифровизация невозможна без программных решений. Важную роль играют платформы, которые позволяют без навыков программирования настраивать и масштабировать бизнес-процессы. После внедрения цифровой системы проводится ее оценка по ранее установленным метрикам: анализируется уровень брака, затраты времени, уровень удовлетворенности и т. д. Кроме того, осуществляется прогнозирование возможных эффектов на основе анализа накопленных данных.

Шаг 6. Разработка дорожной карты внедрения CALS-технологий. На этом этапе создается стратегический план перехода, отражающий цели, сроки, ответственных исполнителей и ожидаемые результаты. Такая карта служит навигацией по этапам цифровой трансформации и помогает всем участникам понимать, в каком направлении движется организация.

Шаг 7. Постоянное тестирование и обратная связь. Чтобы цифровая трансформация была устойчивой, необходимо применять подходы, основанные на циклической проверке и адаптации. Использование принципов бережливого производства и итерационного подхода (с быстрым запуском и регулярными корректировками) позволяет снизить риски и максимально адаптировать систему под реальные условия эксплуатации [6].

При уже реализованных CALS-технологиях рекомендуется масштабирование. На начальном этапе трансформации целесообразно выбрать простое направление и развивать его поступательно. Каждое преобразование начинается с первого шага.

Цифровая модель позволяет осуществлять эвристическую работу с соответствующим процессом управления целями путем виртуального исполнения. Цифровая модель как виртуальная платформа имеет функции и алгоритмы, которые работают с различными входными данными фактических данных, в конечном итоге проверяют входную информацию. Все процессы управления дефектами по стадиям жизненного цикла изделия при применении цифровой модели анализируются в реальном времени.

Каждый целевой процесс управления дефектами сопоставляется с ключевыми показателями эффективности уровня склада, завода и технологического задания.

В процессе производства необходимо виртуализировать критически важные объекты, требующие внимательного обращения, путем более детального моделирования. Аналогичным образом можно смоделировать отдельную производственную линию, ресурс объекта или работу.

Все вышеупомянутые этапы являются основными этапами внедрения системы постпроизводственного мониторинга на фазах жизненного цикла предприятия или изделия, которые включают процессы, начиная от планирования и сбора данных для анализа до корректировки процессов по результатам постпроизводственного мониторинга, оценки их эффективности и принятия управленческих решений на основании результатов внедрения постпроизводственного мониторинга на всех фазах жизненного цикла изделия.

В рамках исследования цифровая модель представлена как поэтапная система постпроизводственного мониторинга,

включающая сбор, анализ и обратную передачу данных для оперативной корректировки технологических процессов.

Оценку эффективности внедрения цифрового мониторинга на всех стадиях жизненного цикла изделия рекомендуется осуществлять с помощью математической модели расчета итоговой эффективности цифровизации производственных процессов контроля качества:

$$P = P_0 \times (1 + \sum n_i = 1 \alpha_i \times F_i),$$

где P – итоговая производительность системы; P_0 – базовая (начальная) производительность системы без учета влияния факторов; n – количество факторов, влияющих на производительность; α_i – коэффициент влияния i -го фактора на производительность. Этот коэффициент определяет степень влияния конкретного фактора на итоговый результат; F_i – значение i -го фактора, влияющего на производительность (например, уровень дефектов, степень перепроизводства и т.д.).

Теперь можно выразить итоговую производительность P в зависимости от базовой эффективности цифровизации производственных процессов контроля качества P от P_0 с учетом влияния факторов.

В рамках исследования уровень автоматизации рассматривается как совокупный показатель степени цифровой интеграции процессов, охватывающий как технические, так и управленческие аспекты. Аналогичные подходы встречаются в работах Denysenko и соавторов, где уровень автоматизации определяется по числу замкнутых цифровых контуров управления [7].

Что касается представленной формулы эффективности внедрения $P = P_0 \times (1 + \sum \alpha_i \times F_i)$, то коэффициенты α_i отражают вклад каждого фактора цифровизации (F_i) в общую эффективность. На практике значения этих коэффициентов определяются экспертно либо на основании статистического анализа исторических данных. Подобный метод используется в зарубежных исследованиях по цифровой трансформации производств, где α_i интерпретируются как весовые коэффициенты на основе значимости фактора в конкретной отрасли [8]. Например, фактор F_1 может отражать снижение брака, фактор F_2 – повышение стабильности процессов, F_3 – сокращение времени переналадки оборудования и т.д. Подход к построению формулы базируется на принципах мультифакторного моделирования и используется для предварительной оценки целесообразности цифровых инвестиций [10].

Эта модель позволяет оценить влияние различных факторов на прогнозируемую эффективность организации технологических систем машиностроительного производства и предложить рекомендации для управления их воздей-

ствием на рабочий процесс с целью повышения эффективности и результативности производственных процессов контроля качества.

Практическая эффективность комплексного подхода к автоматизации и постпроизводственному мониторингу подтверждается рядом реализованных проектов на российских машиностроительных предприятиях.

Так, на ПАО «Тяжмаш» (г. Сызрань) внедрена автоматизированная система мониторинга и управления производственной деятельностью на базе технологии OPC (OLE for Process Control). Это позволило повысить достоверность информации о ходе выполнения заказов, сократить время отклонений от графика и на 15% улучшить показатели производительности труда. Кроме того, был снижен уровень внеплановых простоев оборудования на 12%, а количество дефектов на сборочных операциях уменьшилось на 9% [11].

Еще один успешный кейс реализован на ОАО «КамАЗ». Здесь внедрена информационная система отслеживания этапов сборки узлов и агрегатов на базе RFID-меток и встроенных терминалов идентификации. Данная система обеспечивает полную прослеживаемость каждого элемента на всех стадиях технологического процесса. Как указывают исследователи, применение данной технологии позволило сократить среднее время простоев при сборке на 18%, а также снизить долю возвратов по качеству с 3,6% до 2,1% за один год эксплуатации. Существенным результатом стало сокращение незавершенного производства на 11%, что повлияло на оборачиваемость складских запасов и плановую дисциплину [12].

Оба примера демонстрируют практическую реализацию идей, заложенных в концепцию цифровой модели и постпроизводственного мониторинга, а также подтверждают их экономическую и организационную эффективность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило, что внедрение CALS-технологий и систем постпроизводственного мониторинга открывает новые возможности для управления качеством продукции и оптимизации жизненного цикла изделий. Рассмотренные этапы процесса – от формирования критериев успеха и уточнения бизнес-процессов до построения цифровой модели и разработки дорожной карты – демонстрируют необходимость системного подхода к цифровой трансформации.

Практическая значимость полученных результатов проявляется в том, что предложенный алгоритм внедрения обеспечивает целостность управления, позволяет своевременно выявлять узкие места в производственных цепочках и снижать издержки за счет автоматизации контроля и

интеграции с ERP-системами. Особое внимание уделено цикличности мониторинга и обратной связи, что гарантирует устойчивость внедряемых решений и их адаптацию к реальным условиям эксплуатации.

Таким образом, использование CALS-технологий в сочетании с современными средствами информационного мониторинга не только способствует повышению надежности и стабильности продукции, но и формирует основу для внедрения инновационных моделей управления. Полученные выводы подтверждают актуальность выбранного направления исследований и создают предпосылки для дальнейшего развития методик цифровизации производственных процессов.

**Рецензент: Бурый Алексей Сергеевич, доктор технических наук, эксперт РАН, заместитель начальника отдела ФГБУ «Институт стандартизации», г. Москва, Российская Федерация.
E-mail: a.s.burji@gostinfo.ru**

Список использованных источников и литературы

1. Kureichik V.M., Kureichik V.V., Taratukhin V.V., et al. Continuous acquisition and life-cycle support (CALS) simulation models on the basis of the ERP and CAD technologies integration // In Emerging Trends In Information Systems: Recent Innovations, Results And Experiences. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 11–19.
2. Carroll B. Next Generation PLM: Intelligent Virtual Landscape [Electronic resource] // LinkedIn. – 2024. – URL: <https://www.linkedin.com/pulse/next-generation-plm-intelligent-virtual-landscape-brion-carroll-ii-> (дата обращения: 19.05.2025).
3. Степанов Д.Ю. Интеграция ERP и MES-систем: взгляд сверху [Электронный ресурс]. – URL: https://stepanovd.com/documents/science/2016/1_erpmes/erpmes1.pdf (дата обращения: 02.05.2025). Степанов Д.Ю. Публикации автора [Электронный ресурс] // eLibrary. – URL: https://www.elibrary.ru/author_items.asp?authorid=701455 (дата обращения: 02.05.2025).
4. Кондратьев С.А. Цифровой двойник в промышленности: концепция, методы, примеры. – М.: Инфра-Инженерия, 2021. – 248 с. ISBN 978-5-9729-0532-0.
5. Афанасьев В.В., Иванов Н.И. Управление жизненным циклом изделия: концепции и технологии. – СПб.: Питер, 2020. – 320 с. ISBN 978-5-4461-1703-5.
6. Пантюхин О.В. Разработка методологии управления качеством продукции ответственного назначения на основе цифровых двойников технологических процессов и изделий (на примере изготовления гильз для высокоэффективных патронов): специальность 05.02.23 «Стандартизация и управление качеством продукции»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – 2021. – 272 с.
7. Denysenko Yu., Dynnyk O., Yashyna T., Malovana N. Implementation of CALS-Technologies in Quality Management of Product Life Cycle Processes // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, No. 4.3. – Pp. 373–377.
8. Интеллектуальная система мониторинга и управления техническим состоянием мехатронных технологических объектов / А.К. Тугенгольд, Е.А. Лукьянов, Р.Н. Волошин, В.Ф. Бонилья // Вестник Донского государственного технического университета. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 188–195.
9. SAP. What Is Product Lifecycle Management (PLM)? [Electronic resource]. – URL: <https://www.sap.com/products/scm/plm-r-d-engineering/what-is-product-lifecycle-management.html> (дата обращения: 19.05.2025).
10. Петров А.С., Кузнецов И.А. Неразрушающий контроль: современные методы и технологии. – М.: Академия, 2019. – 304 с. ISBN 978-5-4468-0181-5.
11. Шевяков С.А., Бочкарев С.В. Построение автоматизированной системы мониторинга и управления производственной деятельностью промышленного предприятия // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 1. – С. 63–66. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-avtomatizirovannoy-sistemy-monitoringa-i-upravleniya-proizvodstvennoy-deyatelnosti-promyshlennogo-predpriyatiya> (дата обращения: 19.05.2025).
12. Кузиванов С.Д. Информационная система отслеживания этапов производства и стыковки сборочных единиц в рамках машиностроительного предприятия // Актуальные исследования. 2024. № 8-1 (190). С. 30–36.

DIGITAL MODELING AND MONITORING IN CALS-PRODUCT MANAGEMENT

Musina G.R., Post-graduate student Department of Logistics and Management, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education KNRTU, Kazan

The aim of this article is to develop an approach for implementing a post-production monitoring system within CALS-based product lifecycle management. The study applies methods of digital modeling, business process analysis, and mathematical modeling of efficiency, which made it possible to propose a step-by-step algorithm for monitoring integration – from defining objectives and criteria to building a digital model and evaluating performance. The results demonstrate a formalized implementation plan that incorporates mechanisms of data collection, analysis, feedback, and process adjustment. Practical verification at Russian engineering enterprises confirmed defect reduction, optimization of production cycles, and improved quality management efficiency. The proposed approach can serve as a basis for further research and scaling of digital solutions in other industrial sectors.

Keywords: product lifecycle, digital model, CALS-technologies, monitoring, quality management.

For citation: Musina G.R. Digital modeling and monitoring in CALS-product management. Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation. 2025; 5 (86): 110–116. (In Russ.).

References

1. Kureichik V.M., Kureichik V.V., Taratukhin V.V., et al. Continuous acquisition and life-cycle support (CALS) simulation models on the basis of the ERP and CAD technologies integration // In: Emerging Trends in Information Systems: Recent Innovations, Results and Experiences. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 11–19.
2. Carroll B. Next Generation PLM: Intelligent Virtual Landscape [Electronic resource] // LinkedIn. – 2024. – URL: <https://www.linkedin.com/pulse/next-generation-plm-intelligent-virtual-landscape-brion-carroll-ii-> (accessed: 19.05.2025).
3. Stepanov D.Yu. Integration of ERP and MES-systems: a top view [Electronic resource]. – URL: https://stepanovd.com/documents/science/2016/1_erpmes/erpmes1.pdf (accessed: 02.05.2025). Stepanov D.Yu. Author's publications [Electronic resource] // eLibrary. – URL: https://www.elibrary.ru/author_items.asp?authorid=701455 (accessed: 02.05.2025).
4. Kondratyev S.A. Digital Twin in Industry: Concept, Methods, Examples. Moscow: Infra-Engineering, 2021. – 248 p. ISBN 978-5-9729-0532-0.
5. Afanasyev V.V., Ivanov N.I. Product Lifecycle Management: Concepts and Technologies. Saint Petersburg: Piter, 2020. – 320 p. ISBN 978-5-4461-1703-5.
6. Pantyukhin O.V. Development of a Methodology for Quality Management of Critical Products Based on Digital Twins of Technological Processes and Products (on the Example of the Manufacture of Sleeves for High-Performance Cartridges): Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Specialty 05.02.23 «Standardization and Product Quality Management». – 2021. – 272 p.
7. Denysenko Yu., Dynnyk O., Yashyna T., Malovana N. Implementation of CALS-Technologies in Quality Management of Product Life Cycle Processes // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, No. 4.3. – Pp. 373–377.
8. Tugengold A.K., Lukyanov E.A., Voloshin R.N., Bonilla V.F. Intelligent system for monitoring and managing the technical condition of mechatronic technological objects // Bulletin of Don State Technical University. – 2020. – Vol. 20, No. 2. – Pp. 188–195.
9. SAP. What Is Product Lifecycle Management (PLM)? [Electronic resource]. – URL: <https://www.sap.com/products/scm/plm-r-d-engineering/what-is-product-lifecycle-management.html> (accessed: 19.05.2025).
10. Petrov A.S., Kuznetsov I.A. Nondestructive Testing: Modern Methods and Technologies. Moscow: Akademiya, 2019. – 304 p. ISBN 978-5-4468-0181-5.
11. Shevyakov S.A., Bochkarev S.V. Building an automated system for monitoring and managing the production activities of an industrial enterprise // Modern High Technologies. – 2021. – No. 1. – Pp. 63–66. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-avtomatizirovannoy-sistemy-monitoringa-i-upravleniya-proizvodstvennoy-deyatelnosti-promyshlennogo-predpriyatiya> (accessed: 19.05.2025).
12. Kuzivanov S.D. Information system for tracking production stages and assembling units within a mechanical engineering enterprise // Actual Research. – 2024. – No. 8-1(190). – Pp. 30–36.