

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 005.6:004
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-105-116



КЛЮЧЕВЫЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЦЕССА СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Запорожцев А. В., Хазова Вер. И., Хазова Вик. И.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Особенностью процессов системы менеджмента качества (СМК) является необходимость соответствовать как общим требованиям стандартов ISO 9000, так и требованиям, предъявляемым к конкретному процессу. Современный уровень развития производства характеризуется широким распространением и использованием цифровых технологий. В связи с этим весьма актуальным становится вопрос о том, как можно использовать цифровые технологии для решения задачи реализации требований стандартов ISO к процессам СМК. **Цель работы и методы исследования.** В статье исследуется применение системного подхода в задаче реализации ключевых положений менеджмента качества в цифровых двойниках процессов СМК. Системный подход дает возможность выявить базовые аспекты рассмотрения цифрового двойника процесса СМК, что позволит реализовать в цифровом двойнике процесса СМК как задачи управления производственным процессом, так и задачи управления улучшениями этого процесса. В качестве рекомендаций к разработке цифрового двойника процесса СМК можно привести необходимость учета вариабельности физических процессов и применение цикла PDSA для реализации научного подхода к улучшениям. **Результаты.** Предлагается использовать цифровой двойник процесса СМК в качестве инструмента реализации основного принципа менеджмента качества «Постоянное улучшение». Разработаны принципиальные положения, являющиеся обязательными при реализации всех процессов СМК и обеспечивающие удовлетворение требований стандартов ISO 9000 к процессам СМК. **Практическая значимость.** Имитационное моделирование, на основе которого изучается поведение процесса, позволяет значительно снизить затраты на тестирование улучшений процессов за счет того, что тестированию подвергается не реальный процесс, а его имитационная модель.

Ключевые слова: процесс СМК, цифровой двойник, цифровизация СМК, цикл PDSA, вариабельность процессов, управление процессом

© Запорожцев А. В., Хазова Вер. И., Хазова Вик. И., 2023

Для цитирования

Запорожцев А. В., Хазова Вер. И., Хазова Вик. И. Ключевые аспекты создания цифрового двойника процесса системы менеджмента качества // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 105-116. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-105-116>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

KEY ASPECTS OF CREATING A DIGITAL TWIN OF THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM PROCESS

Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.I.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). It is typical of quality management system (QMS) processes to comply with both general requirements of standards ISO 9000 and the requirements set for a specific process. The current level of production development is characterized by widespread occurrence and application of digital technologies. In view of this, it is relevant to determine how digital technologies may be used for compliance of QMS processes with ISO standards. **Objective and Methods Applied.** The paper studies a system approach applied to key provisions of quality management in digital twins of QMS processes. The system approach contributes to identifying basic aspects of studying the digital twin of a QMS process to implement in the digital twin of the QMS process both process control and process improvement tasks. Regarding recommendations for developing the digital twin of the QMS process, it is required to factor into variability of physical processes and apply the PDSA cycle to implement a scientific approach to improvements. **Results.** The digital twin of the QMS process is proposed to be used as a tool for complying with a core principle of quality management, namely “continual improvement”. The authors developed fundamental provisions, being mandatory for all the QMS processes and satisfying the requirements of ISO 9000 for QMS processes. **Practical Relevance.** Simulation modeling used as a basis for studying behavior of the process contributes to lower expenses for testing process improvements because testing is attributed to a simulation model, not an actual process.

Keywords: QMS process, digital twin, QMS digitalization, PDSA cycle, process variability, process control

For citation

Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.I. Key Aspects of Creating a Digital Twin of the Quality Management System Process. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 105-116. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-105-116>

Введение

Впервые концепция того, что впоследствии получило название «цифровой двойник», была предложена в 2002 году M.Grievs и J.Vickers. В ее основу была положена идея о том, что весь массив данных о реальной системе представляет собой самостоятельную информационную систему, повторяющую реальный объект в виртуальном пространстве. Реальная и информационная системы за счет наличия между ними обратных связей являются, таким образом, «двойниками» друг друга. Это позволяет исследовать поведение реального объекта по его цифровой модели и принимать на основании полученной информации управленческие решения, эффективные в той или иной ситуации. Современное представление о «цифровом двойнике» сложилось к 2017 году, когда была опубликована основополагающая в этой области работа [1].

Предложенная концепция нашла широкое применение в различных отраслях промышленности, вследствие чего стали появляться научные работы, посвященные разработке и внедрению цифровых двойников в практику работы предприятий. Однако вопросы совершенствования как самих двойников, так и организации взаимодействия между ними на всех стадиях производства нуждаются в дальнейшем изучении [2]. В этой связи перспективным представляется исследование этих проблем с позиций системного подхода,

поскольку он дает возможность рассматривать отдельный цифровой двойник и как систему (здесь появляется возможность исследовать его состав и структуру), и как элемент системы более высокого уровня, изучая его взаимодействие с другими цифровыми двойниками. Пример применения такого подхода к разработке цифрового двойника конкретного процесса изложен в [3]. Несмотря на преимущества, которые дает системный подход, авторы отмечают проблемы, возникшие в процессе разработки цифрового двойника. Связаны они прежде всего с различающимися, а иногда и противоречащими друг другу требованиями стейкхолдеров процесса как к нему самому, так и к его результатам.

Решить эту проблему позволяет использование в процессе создания цифрового двойника системной инженерии. В [4] описан подход к разработке цифровых двойников с применением концепции MBSE (Model-Based System Engineering – системное проектирование на основе моделей). Ее применение упрощает процесс оптимизации системы и способствует росту взаимосвязанности между ее частями. Ключевым фактором успеха в разработке цифрового двойника является начальный этап – этап идентификации требований стейкхолдеров.

Необходимость постоянного отслеживания требований всех стейкхолдеров, а также важность ориентации на потребителя как ключевого стейкхолдера

закреплены в стандарте ISO 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования» [5]. Выполнение требований стандарта реализуется за счет применения процессного подхода ко всем процессам организации, в том числе процессам управления качеством. Однако, чтобы соответствовать изменившимся в ходе цифровой трансформации процессам разработки и производства продукции, процессы управления качеством также должны быть встроены в цифровую среду предприятия.

К сожалению, инновации в этой области оказались отодвинуты на второй план цифровыми технологическими инновациями [6]. Строго говоря, цифровизации подвергаются только технологии производства, в то время как основополагающие концепции, методы, инструменты управления качеством практически не претерпевают изменений. Таким образом, проблемы цифровизации управления качеством и в целом системы менеджмента качества являются очень актуальными, но публикаций по этой теме, особенно в отечественных источниках, недостаточно.

Целью данной статьи является определение аспектов создания цифрового двойника процесса СМК, которые обеспечат соответствие этой модели базовым принципам менеджмента качества, а также обеспечат работу цифрового двойника в условиях вариативности процессов СМК.

Материалы и методы исследования

Для выявления аспектов создания цифрового двойника процесса СМК необходимо построить онтологическую модель этой предметной области. Такая модель позволит в наглядной форме выявить основные объекты (понятия) этой сферы деятельности и их взаимосвязи, что даст возможность учесть наиболее важные аспекты рассматриваемой проблемы.

Предметная область СМК – это совокупность принципов и понятий, большая часть которых изложена в стандарте ISO 9000-2015 «Основные положения и словарь» [7]. Эти понятия являются базовыми в создании СМК на предприятии. Однако создание цифровых двойников процессов СМК существенно изменяет технологическую базу, на которой будет происходить функционирование СМК предприятия, и это требует описания тех общих понятий, на основе которых будут разрабатываться цифровые двойники конкретных процессов.

Процессы СМК – это те процессы организации,

которые рассматриваются в группе стандартов ISO 9000 и для которых установлены требования к процессам в стандарте ISO 9000-2015. К таким процессам относятся как основные производственные процессы (например, процессы подраздела 8.5 Производство продукции и предоставление услуг), так и вспомогательные (например, процессы подраздела 7 Средства обеспечения) и процессы управления (например, процессы подраздела 8.1 Планирование и управление деятельностью на стадиях жизненного цикла продукции и услуг). Соответствие процессов СМК требованиям является необходимым условием достижения целей организацией.

Стандарт ISO 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования» [5] определяет семь принципов организации, ориентированной на качественный менеджмент. Наиболее важными в создании цифрового двойника процесса СМК представляются два принципа: процессный подход и постоянное улучшение процессов. Процессный подход требует рассматривать всю деятельность организации как совокупность взаимосвязанных процессов. Каждый отдельный процесс СМК в цепочке процессов организации (рис. 1) имеет следующие элементы:

- источники входов – предшествующие процессы, которые связаны с данным процессом определенным входом;
- входы – материальные объекты и документы, поступающие в процесс СМК и используемые при выполнении операций процесса;
- продукция – материальные объекты и документы, являющиеся результатом процесса СМК;
- получатели продукции – последующие процессы, в которые поступают результаты процесса СМК.

Для управления процессами стандарт рекомендует использовать методологию «Plan-Do-Check-Act» (PDCA), которая понимается как последовательность следующих этапов: планировать (Plan) – устанавливать цели и планы, обеспечивать ресурсами; выполнять планы (Do); отслеживать (Check) – измерять результаты процессов; предпринимать действия (Act) по улучшению показателей выполнения процесса.

Принцип улучшения рассмотрен не так подробно и включает в себя следующие элементы:

- постоянство улучшений;
- развертывание проектов по улучшению;
- признание подтвержденных улучшений.

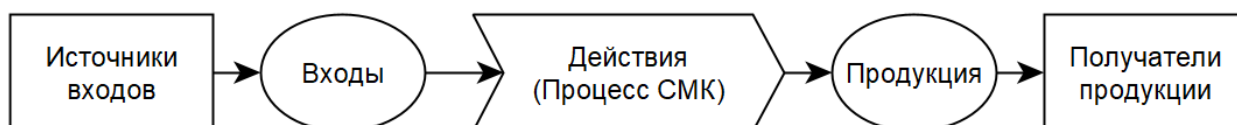


Рис. 1. Схематичное представление элементов отдельного процесса (ISO 9001)

Fig. 1. Schematic representation of the elements of a separate process (ISO 9001)

Более подробно вопросы улучшений рассмотрены в специальной литературе по данной предметной области [8, 9]. Фундамент современного понимания принципов менеджмента, ориентированного на качество, был заложен в работе У. Шухарта [8]. В этой работе признано, что все процессы в природе характеризуются изменчивостью, которая может быть естественной, относительно постоянной, или иметь особые причины, устранение которых должно быть первоочередной задачей менеджмента. Понимание вариабельности является ключевой компетенцией менеджера, обладание которой позволяет избежать многих ошибок при принятии решений. Например, попытки улучшить процесс без оценки его состояния (стабильное или нет) чаще всего не позволяют оценить действенность мероприятий по улучшению. Этот вопрос подробно рассматривается в специальной литературе по статистическому управлению процессами (SPC – Statistical process control) [10].

Э. Деминг [9] рекомендовал в улучшении процесса использовать вариант цикла PDSA, ориентированный на использование научного подхода к улучшениям, в котором улучшение рассматривается как гипотеза, а на третьем этапе (Study) производится сопоставление этой гипотезы с фактическим результатом, полученным на этапе реализации улучшения (Do). Результатом такого сопоставления может быть подтверждение гипотезы или ее опровержение. В том случае, когда гипотеза не подтверждается, цикл PDSA должен быть повторен до получения удовлетворительного соответствия гипотезы (улучшения) объективным данным.

Совокупность базовых принципов СМК, на основе которых предлагается рассматривать задачу создания цифрового двойника процесса СМК, представлена на рис. 2.

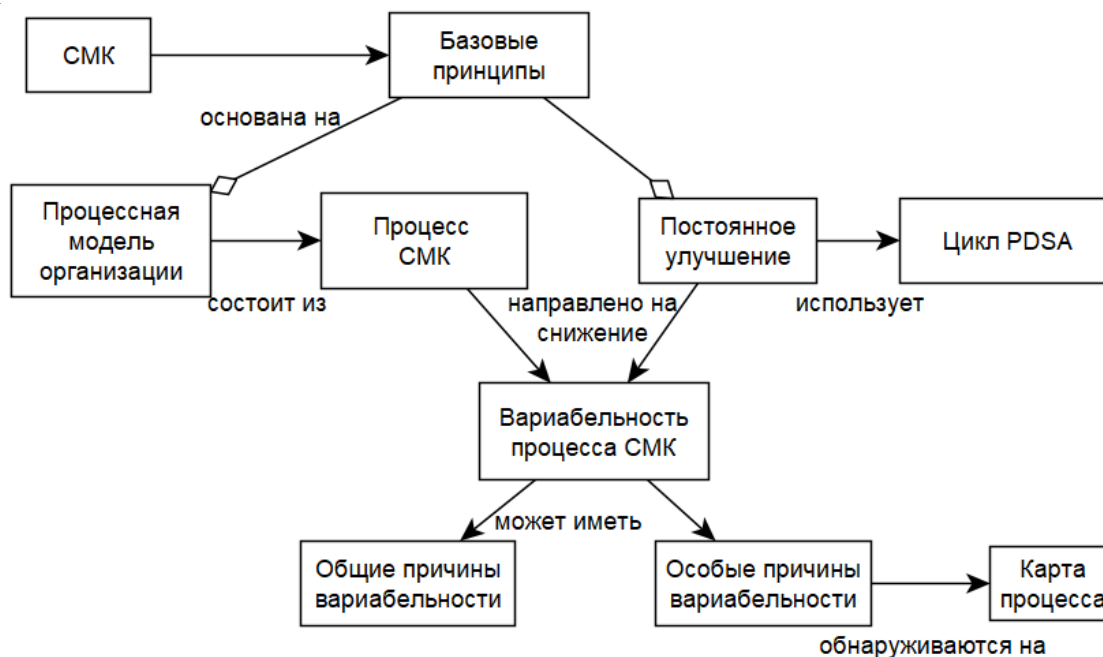


Рис. 2. Модель предметной области процесса СМК
Fig. 2. QMS process subject area model

Анализ данной модели позволяет сформулировать следующие требования к разработке цифрового двойника процесса СМК:

1. Цифровая модель процесса СМК должна строиться как элемент общей процессной модели организации. Однако на первом этапе создания цифровой СМК предприятия невозможно одновременно перейти на цифровые модели большинства процессов СМК, переход должен происходить постепенно. Для реализации данного требования в цифровой модели процесса СМК необходимо предусмотреть интерфейсные модули взаимодействия совокупности цифровых двойников нескольких процессов СМК. При этом необходимо учитывать, что любой процесс СМК одновременно может участвовать во взаимодействии с другими процессами СМК как «поставщик» и как «клиент».

2. Цифровизация СМК требует создания системы мониторинга СМК, основной задачей которой должен быть сбор и обработка данных о всех процессах СМК. Этот элемент цифровизации СМК должен строиться на основе базовых инструментов цифровизации [11]:

- Big Data или большие данные – это структурированные или неструктурированные массивы данных большого объема. Их обрабатывают при помощи специальных автоматизированных инструментов, чтобы использовать для статистики, анализа, прогнозов и принятия решений.

- Data-driven decision making – культура принятия решений на основе данных.

- Искусственный интеллект (AI) – система, способная действовать как человек и постепенно учиться новому, используя собранную информацию.

3. Интеллектуальные возможности цифровой трансформации позволяют значительно повысить эффективность работы по улучшению процессов. Центральным элементом цифрового двойника любого процесса является имитационная модель процесса [12], в которой реализуется модель преобразования входов процесса в результат процесса. Имитационная модель процесса строится на основе достигнутых знаний о процессе и реализует структуру процесса и правила управления. Улучшения могут касаться изменения структуры процесса и изменения правил управления процессом. В большинстве случаев достаточно будет предлагаемые улучшения процесса проверить на имитационной модели, что резко повысит скорость получения подтверждения положительного результата о предлагаемых улучшениях. Важно отметить, что использование цикла PDSA позволяет создавать новые знания о процессе, использование которых позволит систематизировать процесс улучшений.

Таким образом, построение модели предметной области (онтологической модели) создания цифрового двойника процесса СМК позволяет сделать следующие выводы:

1. При разработке цифрового двойника процесса СМК необходимо провести анализ того, как конкретно необходимо рассматривать процесс СМК, чтобы на основе модели такого процесса можно было разрабатывать цифровую модель процесса СМК. Цифровая модель должна соответствовать и принципам стандарта ISO 90001 и конкретным требованиям к процессам СМК.

2. В разработке цифрового двойника процесса СМК пристальное внимание должно быть уделено вариабельности показателей процесса. Прежде всего потому, что понимание вариабельности реальных процессов является базовым элементом TQM, без которого правильно построить качественный менеджмент невозможно. Кроме того, анализ реальной практики производственной деятельности свидетельствует, что менеджеры не воспринимают вариабельность процессов как важный фактор производства. Создание цифровых двойников процессов открывает возможность менеджерам наглядно увидеть влияние

вариабельности на показатели процесса на основе имитационного моделирования процессов.

Полученные результаты и их обсуждение

Определение процесса СМК как объекта разработки цифрового двойника. При создании цифрового двойника процесса СМК встает вопрос об адаптации ключевых понятий стандарта ISO 9000 к концепции цифровой трансформации. Цифровой двойник процесса СМК должен предоставлять персоналу этого процесса достаточное количество сервисов, реализующих основные задачи управления процессом.

Будем рассматривать процесс СМК на основе модели (рис. 3), в которой центральным элементом является подпроцесс «Производственный процесс СМК», процессы клиента и поставщика, а также подпроцесс «Управление процессом СМК».

Подпроцесс «Управление процессом СМК» представляет собой совокупность операций, ориентированных на выработку улучшений процесса в соответствии с принципом постоянного улучшения. Входами в этот процесс являются показатели процесса и требования клиента, а выходами – регламент процесса и требования к поставщику. Требования клиента относятся к выходу Процесса СМК, а требования к поставщику – ко входу. Эти требования реализуют принцип взаимосвязанности процессов, то есть необходимости рассматривать совокупность процессов, имеющих пересекающуюся сферу деятельности. Выполнение операций «Производственного процесса СМК» производится под руководством операционного менеджера, а «Управление процессом СМК» – под руководством владельца процесса.

Таким образом, задача разработки цифрового двойника процесса СМК разделяется на две составляющие: создание цифровой модели «Производственного процесса СМК» и создание цифровой модели «Управления процессом СМК». Каждая из задач имеет разную сферу деятельности, разные принципы работы и поэтому требует разные методы моделирования. Однако эти два подпроцесса единого процесса СМК тесно взаимосвязаны друг с другом и должны рассматриваться совместно.

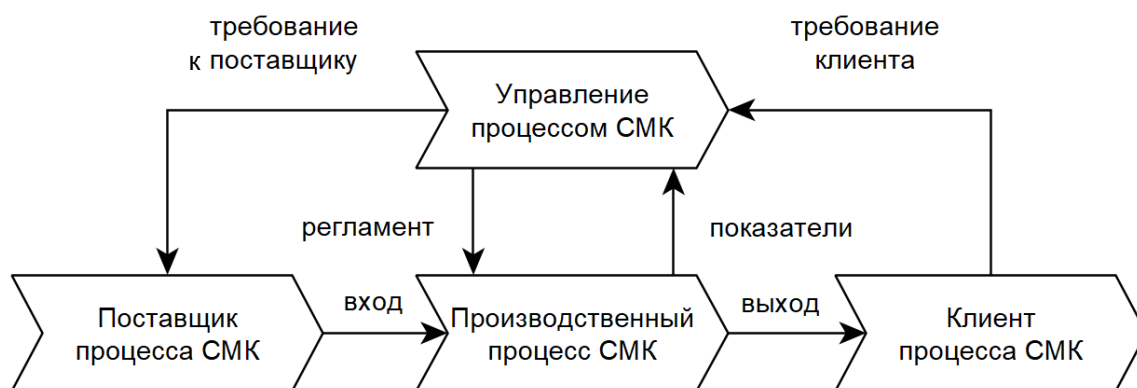


Рис. 3. Модель процесса СМК
Fig. 3. QMS process model

Связь между ними осуществляется через формируемые в «Производственном процессе СМК» Показатели и через вырабатываемый в подпроцессе «Управление процессом СМК» Регламент, который является управлением для «Производственного процесса СМК».

Следовательно, при разработке цифровой модели «Производственного процесса СМК» необходимо обеспечить подготовку необходимых показателей о работе «Производственного процесса СМК», количество и состав которых может меняться в ходе жизненного цикла этого процесса по требованию подпроцесса «Управлять процессом СМК». Эти требования являются составной частью Регламента процесса СМК.

Рассмотрим особенности подпроцесса «Управление процессом СМК» и его основные операции. Основной целью управления процессом СМК является разработка Регламента. Регламент – это совокупность документов, определяющих стандарт выполнения процесса. Концепция У. Шухарта основана на том, что если процесс демонстрирует особые причины вариативности, то такой процесс улучшать невозможно. Необходимо сначала добиться стабильности процесса, когда процесс будет демонстрировать предсказуемость своего поведения. Регламент процесса представляет собой описание нормативных требований к среде выполнения процесса и стандартной работы персонала. Выполнение требований регламента создает условия для стабильной работы процесса.

На рис. 4 представлены основные операции блока «Управлять процессом СМК»:

1. Анализировать процесс СМК (A1). Результатами этого блока являются проблемы процесса, оценка состояния процесса и требования к поставщику. Основными из них являются проблемы процесса – это те нежелательные явления, которые наблюдаются в деятельности процесса и устранение которых должно быть выполнено в первую очередь. Для передачи проблем процесса на выполнение цикла PDSA необходимо добиться стабильного состояния процесса. Одной из причин появления проблем процесса может быть невыполнение требований регламента процесса.

2. Выполнить цикл PDSA (A2). В цифровом двойнике процесса СМК предлагается использовать вариант цикла улучшений, который предложил Деминг.

3. Разработать регламент (A3). Любое улучшение процесса должно быть зафиксировано в регламенте процесса, что создает основу для возможности контролировать реализацию этого улучшения в физическом процессе СМК.

Следовательно, при разработке цифровой модели подпроцесса «Управлять процессом СМК» необходимо обеспечить поддержку работы персонала в повторяющихся циклах PDSA, а также изменений регламента процесса СМК после успешно завершенных циклов PDSA.

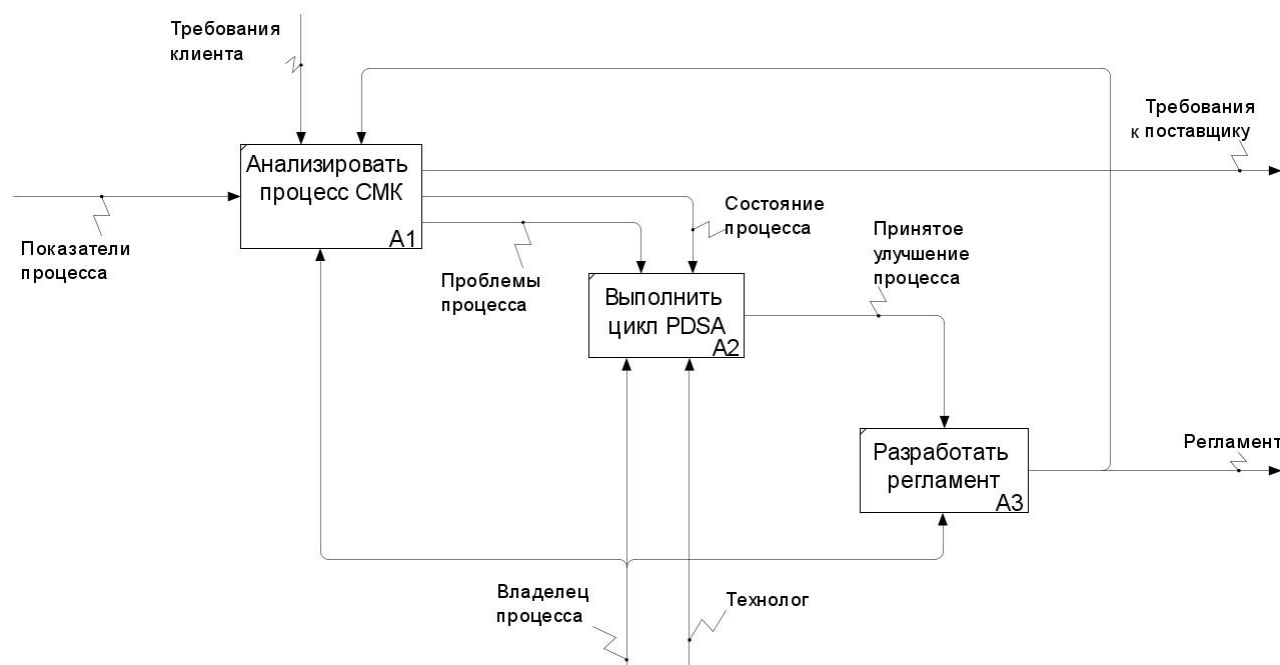


Рис. 4. Декомпозиция функции «Управлять процессом СМК»
Fig. 4. Decomposition of the “QMS process control” function

Проблемы учета вариабельности процессов СМК. Вариабельность (изменчивость) – это общее свойство естественных процессов, которое должно быть учтено при создании цифровой модели процесса СМК. Вариабельность процесса определяется вариабельностью входов в процесс и вариабельностью операций преобразования этих входов в выходы процесса. По выходам процесса судят о состоянии процесса – наиболее важной характеристике процесса. Концепция управления процессами У. Шухарта [8] построена на оценке состояния процесса: стабильного (прогнозируемого) состояния или нестабильного, когда предсказать поведение процесса невозможно. Оценка состояния процесса используется в двух операциях по улучшению процесса [10]: оценке состояния процесса и оценке результатов изменений при реализации улучшений процесса.

Оценка состояния процесса производится на основе мониторинга процесса с использованием карты Шухарта [10] – временной диаграммы изменения показателя процесса. Такими показателями могут быть: численность персонала и его квалификация, используемый материал для процесса, результаты аудитов процесса и другие данные об управлении процессом. По результатам мониторинга процесса дается оценка состояния процесса (стабильное, нестабильное).

Если результаты мониторинга процесса демонстрируют действие особых причин вариабельности, то необходимо такие причины выявить и устранить, так как для процесса, находящегося в нестабильном состоянии, невозможно оценить результаты улучшений, которые разрабатываются на основе цикла PDSA. Шухарт [8] отмечал, что в большинстве случаев выявление этих причин не является трудным, так как эти причины обычно связаны с изменениями в самом управлении процессом. Возникает вопрос: как могут быть выявлены особые причины вариабельности с использованием цифровой модели процесса?

Будем считать, что цифровая модель процесса всегда соответствует стабильному состоянию процесса. Если мониторинг процесса выявил, что на физический процесс действуют особые причины вариабельности, то в цифровом двойнике процесса СМК должен быть модуль, который анализирует данные показателей физического процесса и позволяет владельцу процесса выявить потенциальные особые причины вариабельности. Устранение таких потенциальных причин производится в физическом процессе и контролируется мониторингом процесса. Если действие особых причин вариабельности не было устранено, то цикл выявления потенциальных особых причин вариабельности должен быть повторен.

Для выявления особых причин вариабельности, связанных с изменениями системы, предлагается ориентироваться на те точки карты процесса, в которых поведение процесса меняется. Здесь проблемой является отделение изменений, которые относятся к проявлению вариабельности самого процесса, от изменений, которые связаны с действием особых причин вариабельности. В качестве примера можно привести карту $X - R_m$, построенную авторами по результатам обследования дефектности при производстве деталей на предприятии BORA FASAD (Ставропольский край, г. Лермонтов) (рис. 5).

Анализ карты поведения процесса для индивидуальных значений позволяет сделать вывод, что в первой части рассматриваемого периода действовали особые причины вариабельности – точки процесса в 4 и 5 месяце находятся на верхней границе контрольной карты Шухарта. Во второй части рассматриваемого периода действие этих причин не наблюдается, однако предсказать поведение процесса в следующие периоды невозможно, если особые причины не выявлены и причины их появления не устранены.

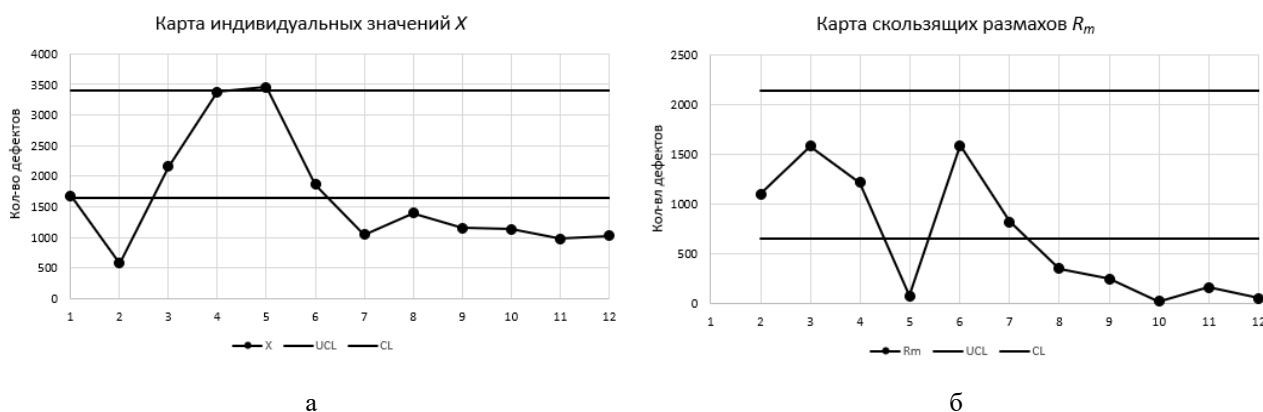


Рис. 5. $X - R_m$ -карта числа дефектов в мебельном производстве: а – индивидуальных значений X ; б – скользящих размахов R_m

Fig. 5. $X - R_m$ chart of the number of defects in furniture manufacturing: а is individual values X ; б is moving range R_m

Одной из проблем создания цифрового двойника процесса СМК является определение методов анализа контрольных карт Шухарта. В настоящее время основным способом анализа карты Шухарта является визуальный анализ, который выполняет владелец процесса. В рамках концепции цифрового двойника процесса появляется возможность существенно повысить результативность SPC за счет автоматизации распознавания признаков действия особых причин вариабельности [13,14].

Если процесс находится в стабильном состоянии, то возможно улучшение процесса на основе цикла PDSA. Для достижения целей улучшения процесса может потребоваться прохождение этого цикла несколько раз. Каждый раз необходимо оценивать действие улучшений на процесс, что требует оценки нового состояния процесса.

С учетом того, что физический процесс является вариабельным, оценка состояния процесса должна иметь статистическую форму описания. В число основных статистических характеристик оценки состояния процесса входят следующие показатели:

- период времени, для которого определена оценка состояния процесса;
- среднее значение показателя состояния процесса;
- распределение случайной величины состояния процесса;
- параметры распределения случайной величины состояния процесса.

Распределение и параметры распределения должны выбираться из множества типовых форм распределения (нормальное, экспоненциальное и т.д.). Для получения оценки состояния процесса необходимо собрать данные о показателях процесса на достаточно длительном отрезке времени и по этим данным рассчитать статистические показатели физического процесса.

Таким образом, выявление текущего состояния процесса, документирование состояний конкретных периодов времени и анализ изменения этих состояний является одной из насущных задач создания цифрового двойника процесса СМК.

Базовые аспекты создания цифровой модели процесса СМК. В предыдущих разделах были рассмотрены аспекты, связанные с особенностями самого процесса СМК и необходимостью учета вариабельности физического процесса, которые должны быть учтены при создании цифрового двойника процесса СМК. Центральным элементом цифрового двойника процесса является его цифровая модель, которая фиксирует текущее стабильное состояние физического процесса, а также представляет основу для анализа улучшений процесса на основе цикла PDSA. Именно в цифровой модели должны быть определены базовые программные элементы, которые обеспечат реализацию ключевых аспектов создания цифрового двойника процесса СМК.

Однако в соответствии с положениями системного подхода к моделированию [4] модель реального процесса (цифровая модель процесса) зависит от цели моделирования, точки зрения на процесс и границ реального процесса, которые определяют набор внутренних элементов модели процесса. Это означает, что в зависимо-

сти от целей моделирования цифровая модель будет включать разные наборы компонентов. В то же время в состав любой цифровой модели процесса обязательно должны входить следующие базовые компоненты:

- 1) показатели процесса;
- 2) состояние процесса;
- 3) управление состоянием процесса.

Показатели процесса. Реальный (физический) процесс необходимо рассматривать как динамическую систему, поведение которой зависит от времени. Под поведением будем понимать изменение параметров процесса во времени. Цифровая модель процесса должна демонстрировать поведение, которое по определенным критериям соответствует поведению физического процесса.

Основной целью разработки цифровой модели процесса является возможность получения параметров реального процесса с определенной точностью и возможность управлять процессом – изменять параметры процесса для достижения большей эффективности функционирования процесса. Характеристики цифровой модели процесса определяются структурой математической модели процесса. Наиболее простой математической моделью процесса является функциональная зависимость вектора выходных параметров процесса Y от вектора входных параметров X :

$$Y = f(X, t), \quad (1)$$

где X – вектор входных параметров процесса; t – время.

Функциональные зависимости могут быть определены в явном виде, и в этом случае они соответствуют действию определенных законов в реальном процессе, например действию закона Ома в электрической цепи. Однако при разработке цифровой модели процесса чаще всего явные функциональные зависимости между входом и выходом неизвестны.

В этом случае используют статистический подход на основе выявления корреляции между вектором выходных параметров и вектором входных параметров. Этот подход активно используется в методологии 6 Сигм [15].

Большими возможностями описания процесса обладают математические модели следующего типа:

$$Y = f(X, Z, t), \quad (2)$$

где Z – вектор внутренних параметров, под которыми понимаются параметры взаимодействия отдельных операций процесса друг с другом.

Данная математическая модель содержит дополнительный параметр Z . Введение вектора внутренних параметров Z , с одной стороны, усложняет модель, а с другой – позволяет разделить функциональную взаимосвязь между входными параметрами X и выходными показателями Y , что поможет точнее описать процесс преобразования. Такая форма математической модели позволяет учесть сложный характер преобразования входных параметров в выходные через совокупность внутренних преобразований:

$$Z = f(X), \quad Y = f(Z). \quad (3)$$

Рассмотрение изменения выходного параметра от времени позволяет в максимальной степени приблизиться к получению решений математической модели, наиболее соответствующих поведению реального процесса.

Для моделирования случайного характера изменения всех параметров процесса необходимо, чтобы все параметры были представлены случайными величинами. Например, входной параметр X должен быть представлен следующей функцией:

$$X = f(M_x, \sigma_x^2, t). \quad (4)$$

Аналогичную форму математической модели будут иметь вектор внутренних параметров Z и вектор параметров результата процесса Y . Таким образом, цифровая модель реального процесса должна включать: вектор входных случайных параметров X и вектор случайных внутренних параметров Z . Использование статистических параметров модели (1) в программах имитационного моделирования будет основано на генерации набора случайных чисел параметров модели, на основании которых по функциональным связям будут получены временные характеристики всех зависимых параметров, которые по форме будут соответствовать реальному процессу. Однако целесообразен ли такой подход к моделированию результата процесса с экономической точки зрения? На этот вопрос можно ответить только на основе анализа реальной задачи разработки цифрового двойника производственного процесса.

Состояние процесса. Альтернативным подходом в разработке цифровой модели процесса является переход к контролю состояния процесса.

$$Y = f(X, Z, Q, t). \quad (5)$$

Введение в модель вектора состояний Q рассматривается как способ снижения размерности математической модели, так как каждое состояние системы соответствует некоторой области изменений входных, внутренних и выходных параметров модели.

Например, параметр процесса может изменяться в широких пределах, однако в модели состояний эти изменения будут соответствовать изменению состояний Q_1 на Q_3 , затем изменению состояний Q_3 на Q_2

и Q_2 на Q_3 . Каждое изменение состояния будет происходить в определенный момент времени. В итоге изменение состояний будет описываться последовательностью моментов времени:

$$T1: Q_1 - Q_3;$$

$$T2: Q_3 - Q_2;$$

$$T3: Q_2 - Q_3.$$

Вектор состояний Q формируется от соотношений между внутренними параметрами Z и некоторыми граничными значениями Z^* , при переходе через которые состояние процесса изменяется. Например, если параметр $Z < Z^*$, то процесс соответствует состоянию Q_1 , если параметр $Z > Z^*$, то процесс соответствует состоянию Q_2 и т.п.

На графике **рис. 6, а** изменение показателя процесса наблюдается в диапазоне от 0 до 45. Так как показатель процесса является случайной величиной, то в каждый момент времени показатель процесса имеет значение, отличающееся от значений показателя в другие моменты времени. Введение характеристики состояния процесса потребует определить граничные значения между разными состояниями (**табл. 1**).

Тогда график изменения состояния процесса будет иметь продолжительные периоды времени, когда состояние процесса не будет изменяться (**рис. 6, б**). Такая форма представления результата моделирования поведения процесса обладает несомненным преимуществом, так как показывает только существенные изменения состояния процесса. Предполагается, что данный способ моделирования поведения процесса упростит разработку управляющих воздействий.

Таблица 1. Граничные значения показателя процесса для разных состояний процесса
Table 1. Boundary values of a process indicator for different process states

Граничные значения показателя процесса		Состояние процесса
Нижняя граница	Верхняя граница	
0	15	1
15	30	2
30	45	3

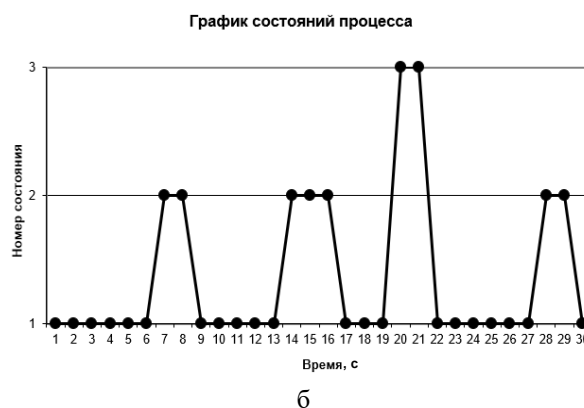


Рис. 6. Временной график изменений: а – параметра процесса; б – состояний процесса
Fig. 6. Timeline of changes: a is a process parameter; б is process states

Состояния процесса должны определяться особенностями поведения каждого процесса и теми целями, которые ставятся в области управления процессом. Например, при управлении производственным потоком могут быть введены три состояния объема незавершенного производства (НЗП): ниже оптимального, оптимальное значение НЗП, выше оптимального.

Управление состоянием процесса. Управление состоянием процесса предполагает изменение его состояния за счет выполнения следующих операций: устранение особых причин вариабельности процесса и улучшение процесса.

Устранение особых причин вариабельности процесса как компонент цифровой модели процесса СМК представляет собой информационную поддержку работы персонала процесса СМК с целью выявления в физическом процессе отклонений от регламента процесса, которые приводят к изменениям в поведении процесса. Однако возможны случаи, когда регламент процесса (все его требования) выполняется, но процесс демонстрирует действие особых причин вариабельности. В этом случае особая причина находится не в действиях персонала, а в физической среде, которая используется в данном процессе СМК. Например, это может быть оборудование, используемое в процессе.

Информационная поддержка операции выявления особых причин вариабельности заключается в генерировании потенциальных причин и рекомендаций по выявлению и подтверждению того, что эта причина действительно оказывает негативное воздействие на стабильность поведения процесса. Данный компонент цифровой модели целесообразно строить как

реализацию функции диагностирования процесса, которая должна быть основана на концепции искусственного интеллекта [16]. Это позволит накапливать знания о причинах, нарушающих стабильное состояние процесса СМК, фиксировать эти случаи в базе знаний и систематически работать над устранением этих причин.

Улучшение процесса СМК как компонент цифровой модели процесса СМК представляет собой алгоритм реализации цикла PDSA, представленного на рис. 7. Важнейшим элементом цикла Деминга PDSA являются знания о процессе. На основе текущих знаний разрабатывается предложение по улучшению. На основе имеющихся знаний можно предсказать результат предложения по улучшению. Результат реализации предложения по улучшению на этапе Study изучается для выявления его соответствия предсказанным результатом. Если соответствие не выявлено, цикл повторяется и разрабатывается новое предложение по улучшению. Если соответствие подтверждено, это означает, что появились новые знания о процессе, на основе которых следующий цикл улучшения будет более успешным.

Таким образом, цифровой двойник процесса СМК становится инструментом реализации основного принципа менеджмента качества «Постоянное улучшение» за счет использования имитационного моделирования поведения процесса СМК в разработке улучшений процесса. Использование имитационного моделирования значительно снижает затраты на проведение проверок улучшений, так как эти проверки проводятся не на реальном процессе, а на его имитационной модели.

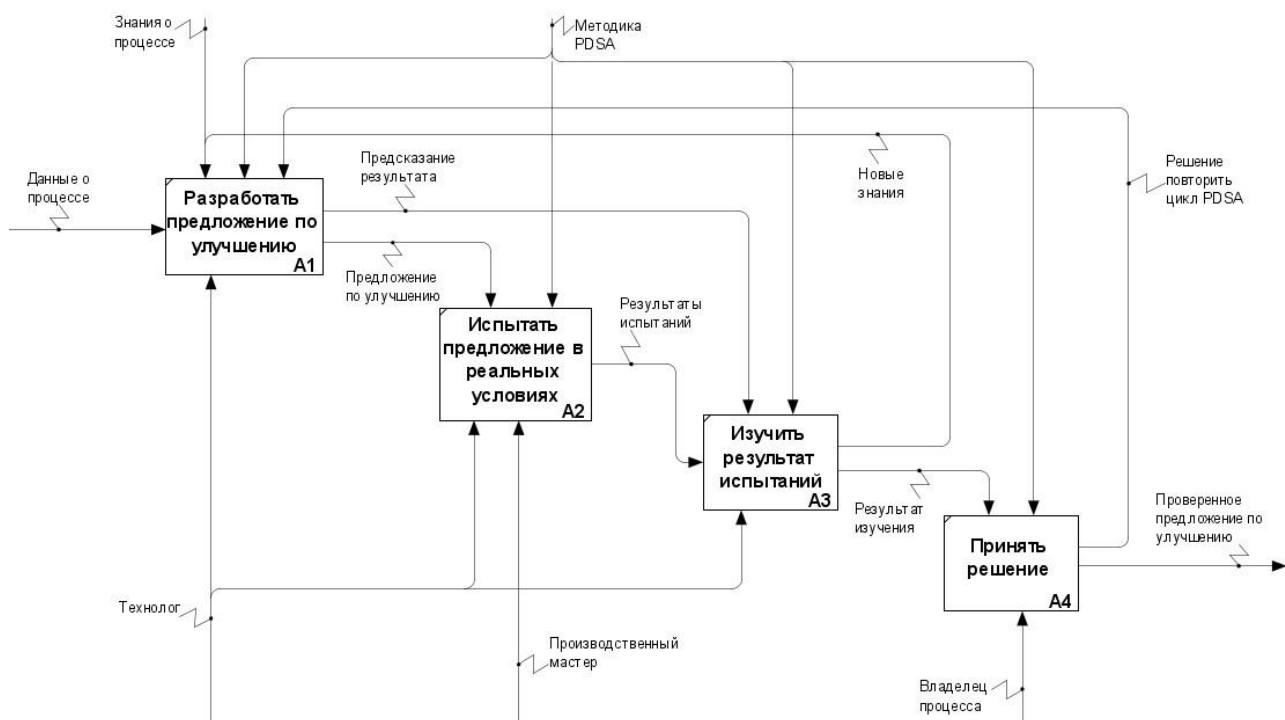


Рис. 7. Взаимосвязь этапов выполнения цикла PDSA
Fig. 7. Relationship between stages of the PDSA cycle

Заклучение

В результате проведенного исследования было выработано несколько принципиальных положений, обеспечивающих удовлетворение требований стандартов ISO 9000 к процессам СМК. Наиболее важными положениями являются следующие:

1. Цифровые двойники процессов СМК предприятия должны образовывать сеть процессов, что реализует ключевой подход ISO 9000 – представление организации как совокупности взаимодействующих процессов.

2. Цифровой двойник процесса СМК должен осуществлять мониторинг совокупности как внешних, так и внутренних показателей процесса для оценки его состояния. В том случае, когда процесс СМК находится в нестабильном состоянии, цифровой двойник процесса должен обеспечить владельца процесса достаточной информацией для выявления действия особых причин вариабельности.

3. Цифровой двойник процесса СМК должен обеспечивать интеллектуальную поддержку процесса улучшения процесса на основе цикла PDSA для реализации научного подхода к улучшениям и для управления заданиями в области улучшений.

4. Перечисленные принципиальные положения относятся к подсистеме «Управление процессом СМК» и являются обязательными при реализации всех процессов СМК.

Список источников

- Grievies M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. Springer International Publishing, 2017, pp. 85-113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
- The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing / Bao Jinsong, Dongsheng Guo, Jie Li, Jie Zhang. // *Enterprise Information Systems*. 2018, vol. 13, no. 4, pp. 534-556. DOI: 10.1080/17517575.2018.1526324
- Herkes M.C., Oversluisen G. Using a system approach to model a process digital twin // *IFAC-PapersOnLine*. 2022, vol. 10, no. 55, pp. 1906-1911. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.677
- Aditya Akundi, Viviana Lopez. A conceptual model-based Systems Engineering (MBSE) approach to develop Digital Twins // *IEEE International Systems Conference (SysCon)*. Montreal, QC, Canada, 2022, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SysCon53536.2022.9773869.
- ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2020. 32 с.
- Technology and Quality Management: a review of concepts and opportunities in the Digital Transformation / Carvalho A., Sampaio P., Rebentisch E., Oehmen J. // *International Conference on Quality Engineering and Management 2020*. Braga, Portugal, 2020, pp. 698-714.
- ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2018. 53 с.
- Walter A. Shewhart. *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. American Society for Quality Control, Milwaukee, Wisconsin, 1980, 501 p.
- Деминг У. Эдвардс. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами: пер. с англ. М.: Альпина Паблишер, 2014. 620 с.: 121 ил.
- Уилер Д., Чамберс Д. *Статистическое управление процессами: Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта*: пер. с англ. М.: Альпина Паблишер, 2020. 410 с.
- Кешелова А.В., Хагет И.Л. Предмет цифровой экономики и роль цифровых инструментов // Сайт С.П. Курдюмова. URL: https://spkurdyumov.ru/%20digital_economy/predmet-cifrovoj-ekonomiki-i-rol-cifrovyyh-instrumentov/ (дата обращения 15.05.2023)
- Boschert S. and Rosen R. Digital Twin – The Simulation Aspect. *Mechatronic Futures*, 2016, pp. 59-74. DOI: 10.1007/978-3-319-32156-1_5
- Ruey-Shiang Guh. Integrating artificial intelligence into on-line statistical process control // *Quality and Reliability Engineering*. 2003, vol. 19, no. 1, pp. 1-20. DOI: 10.1002/qre.510
- Adnan Hassan. An improved scheme for online recognition of control chart patterns // *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*. 2011, vol. 3, no. 3, pp. 309-321. DOI: 10.1504/IJCAET.2011.040050
- The Lean Six SIGMA Pocket Toolbook: A Quick Reference Guide to Nearly 100 Tools for Improving Process Quality, Speed, and Complexity / George L.M., Maxey J., Rowlands D., Price M. N.Y.: McGraw-Hill, 2005. 282 p.
- Управление бизнес-процессами в муниципальных образованиях на основе искусственного интеллекта / Д.В. Скульский, В.Ф. Шуршев, М.И. Шиккульский, Т.И. Гайрабекова // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2022. №3. С. 71-79. DOI: 10.24143/2072-9502-2022-3-71-79

References

- Grievies M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*. Springer International Publishing, 2017, pp. 85-113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4
- Bao Jinsong, Dongsheng Guo, Jie Li, Jie Zhang. The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing. *Enterprise Information Systems*. 2018;13(4):534-556. DOI: 10.1080/17517575.2018.1526324
- Herkes M.C., Oversluisen G. Using a system approach to model a process digital twin. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;10(55):1906-1911. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.677

4. Aditya Akundi, Viviana Lopez. A conceptual model-based systems engineering (MBSE) approach to develop digital twins. IEEE International Systems Conference (SysCon). Montreal, QC, Canada, 2022, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SysCon53536.2022.9773869
5. State Standard GOST R ISO 9001-2015. Quality Management Systems. Requirements. Moscow: Standardinform, 2020, 32 p. (In Russ.)
6. Carvalho A., Sampaio P., Rebentisch E., Oehmen J. Technology and quality management: a review of concepts and opportunities in the digital transformation. International Conference on Quality Engineering and Management 2020. Braga, Portugal, 2020, pp. 698-714.
7. State Standard GOST R ISO 9000-2015. Quality Management Systems. Fundamentals and vocabulary. Moscow: Standardinform, 2018, 53 p. (In Russ.)
8. Walter A.Sh. Economic control of quality of manufactured product. American Society for Quality Control, Milwaukee, Wisconsin, 1980, 501 p.
9. Deming W.E. *Vykhod iz krizisa: Novaya paradigma upravleniya lyudmi, sistemami i protsessami* [Out of the crisis: A new paradigm of managing people, systems and processes]. Moscow: Alpina Publisher, 2014, 620 p. (In Russ.)
10. Wheeler D.J., Chambers D.S. *Statisticheskoe upravlenie protsessami: Optimizatsiya biznesa s ispolzovaniem kontrolnykh kart Shukharta* [Understanding statistical process control]. Moscow: Alpina Publisher, 2020, 410 p. (In Russ.)
11. Keshelava A.V., Haet I.L. The subject of the digital economy and the role of digital tools. Available at: https://spkurdyumov.ru/%20digital_economy/predmet-cifrovoj-ekonomiki-i-rol-cifrovyyh-instrumentov/ (Accessed on May 15, 2023).
12. Boschert S., Rosen R. Digital twin – The simulation aspect. *Mechatronic Futures*, 2016, pp. 59-74. DOI: 10.1007/978-3-319-32156-1_5
13. Ruey-Shiang Guh. Integrating artificial intelligence into on-line statistical process control. *Quality and Reliability Engineering*. 2003;19(1):1-20. DOI: 10.1002/qre.510
14. Adnan Hassan. An improved scheme for online recognition of control chart patterns. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*. 2011;3(3):309-321. DOI: 10.1504/IJCAET.2011.040050
15. George M.L., Maxey J., Rowlands D., Price M. The lean Six Sigma pocket toolbook: A quick reference guide to nearly 100 tools for improving process quality, speed, and complexity. New York: McGraw-Hill, 2005, 282 p.
16. Skulsky D.V., Shurshev V.F., Shikulsky M.I., Gairabekova T.I. Management of business processes in municipalities by using artificial intelligence. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Astrakhan State Technical University]. 2022;(3):71-79. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2022-3-71-79

Поступила 28.07.2023; принята к публикации 16.09.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 28/07/2023; revised 16/09/2023; published 25/12/2023

Запорожцев Александр Валерьевич – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: wing10@yandex.ru. ORCID 0009-0001-9768-1433

Хазова Вероника Ивановна – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: viverha@gmail.com. ORCID 0009-0000-6069-9966

Хазова Виктория Ивановна – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: diplomla@mail.ru. ORCID 0009-0003-2338-1635

Aleksandr V. Zaporozhtsev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: wing10@yandex.ru. ORCID 0009-0001-9768-1433

Veronika I. Khazova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: viverha@gmail.com. ORCID 0009-0000-6069-9966

Viktoriya I. Khazova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: diplomla@mail.ru. ORCID 0009-0003-2338-1635