

Научная статья

УДК 338

DOI: 10.18384/2949-5024-2025-3-89-100

КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ КАК ФАКТОР ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОТРАСЛИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИНДУСТРИИ 4.0

Микаева С. А., Микаева А. С.*

Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), г. Москва,

Российская Федерация

**Корреспондирующий автор, e-mail: mikaeva_a@inbox.ru*

Поступила в редакцию 02.04.2025

После доработки 18.04.2025

Принята к публикации 30.04.2025

Аннотация

Цель. Выделить элементы (технологии) Индустрии 4.0, которые эффективно применяются в приборостроительном производстве, способствуют повышению качества его продукции и обеспечения экономической безопасности отрасли в целом.

Процедура и методы. Проведённое исследование основывается на анализе зарубежных и отечественных источников литературы, посвящённых вопросам обеспечения экономической безопасности отрасли приборостроения и повышения качества её продукции в рамках развития Индустрии 4.0. Методологической основой работы стали методы анализа, обобщения, системный и аналитический подходы.

Результаты. Выделены группы параметров качества продукции и показатели качества приборов, преимущества от внедрения принципов Индустрии 4.0 на предприятиях отрасли приборостроения, а также вызовы Индустрии 4.0, которые могут привести к существенным рискам. Рассмотрены технологии Индустрии 4.0 и сделано описание их применения в приборостроительном производстве.

Теоретическая и/или практическая значимость заключается в применении рассмотренных технологий в производственном процессе для повышения качества продукции отрасли приборостроения, что выступает в роли фактора, способствующего обеспечению экономической безопасности отрасли и страны в целом, т. к. приборостроение является основой для развития технологического прогресса во многих сферах.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, инструмент, качество продукции, отрасль приборостроения, технологии, экономическая безопасность

Для цитирования:

Микаева С. А., Микаева А. С. Качество продукции как фактор обеспечения экономической безопасности отрасли приборостроения в условиях Индустрии 4.0 // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Экономика. 2025. № 3. С. 89–100. <https://doi.org/10.18384/2949-5024-2025-3-89-100>

Original research article

PRODUCT QUALITY AS A FACTOR IN ENSURING ECONOMIC SECURITY OF THE INSTRUMENT-MAKING INDUSTRY IN THE CONDITIONS OF INDUSTRY 4.0

S. Mikaeva, A. Mikaeva*

Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russian Federation

**Corresponding author, e-mail: mikaeva_a@inbox.ru*

Received by the editorial office 02.04.2025

Revised by the author 18.04.2025

Accepted for publication 30.04.2025

Abstract

Aim. To identify the elements (technologies) of Industry 4.0 that are effectively used in instrument-making production, contribute to improving the quality of its products and ensuring the economic security of the industry as a whole.

Methodology. The study is based on the analysis of foreign and domestic sources of literature devoted to issues of ensuring the economic security of the instrument-making industry and improving the quality of its products within the framework of the development of Industry 4.0. The methodological basis of the work was the methods of analysis, generalization, system and analytical approaches.

Results. Groups of product quality parameters and instrument quality indicators, the benefits of implementing the principles of Industry 4.0 at enterprises in the instrument-making industry, as well as the challenges of Industry 4.0 that can lead to significant risks are identified. The technologies of Industry 4.0 and a description of their application in instrument-making production are considered.

Research implications. Consists in the application of the considered technologies in the production process to improve the quality of products in the instrument-making industry, which acts as a factor contributing to the economic security of the industry and the country as a whole, since instrument-making is the basis for the development of technological progress in many areas.

Keywords: Industry 4.0, instrument-making industry, tool, product quality, technology, economic security

For citation:

Mikaeva S. A. & Mikaeva A. S. (2025). Product quality as a factor in ensuring economic security of the instrument-making industry in the conditions of Industry 4.0. In: *Bulletin of Federal State University of Education. Series: Economics*, 3, 89–100. <https://doi.org/10.18384/2949-5024-2025-3-89-100>

Введение

Инновационная экономика сталкивается с новыми вызовами и возможностями в условиях Индустрии 4.0, характеризующимися активным внедрением цифровых технологий, автоматизацией производства и распространением интеллектуальных систем [2; 3; 6; 7; 10; 11]. Важную роль в данном процессе играет отрасль приборостроения, т. к. разработка и использование приборов для измерения и анализа различных составляющих, материалов и процессов являются основой для формирования нового уровня производственного и технологического потенциала [1; 4; 5]. Для

устойчивого развития данной отрасли особенно важно уделять внимание оценке и повышению качества продукции. Высокое качество продукции приборостроения не только удовлетворяет потребительские запросы, но и значительно влияет на экономическую безопасность предприятий и всей отрасли в целом [8; 17].

Повышение качества существенно влияет на конкурентоспособность предприятий отрасли приборостроения как на национальном рынке производителя, так и на мировом, развитие научно-технического прогресса, повышение производственной эффективности и экономию всех видов ресурсов. Обеспечение качества продукции приборостроения требует реализации комплекса мероприятий и мер, направленных на достижение и поддержание высоких стандартов качества на всех стадиях процесса производства [9; 14].

Следует отметить тот факт, что качество продукции оказывает значительное влияние на репутацию производителя, способствует укреплению доверия клиентов, потребителей продукции, а также снижает риски финансовых потерь, связанных с возвратом товаров и возникновением претензий. В условиях глобальной конкуренции производители приборостроительной продукции вынуждены не только соответствовать строгим стандартам качества, но и предлагать инновационные решения, способные адаптироваться к быстроменяющимся требованиям рынка.

Вопрос о повышении уровня качества продукции становится стратегически важным для обеспечения экономической безопасности отрасли приборостроения в контексте развития высоких технологий [4; 5; 15; 16].

Группы параметров качества продукции и показатели качества приборов

Качество продукции определяется множеством групп параметров, которые представлены на рис. 1.

С учётом обозначенных параметров, показатели качества приборов можно классифицировать по различным признакам. Рассмотрим их с описанием каждой группы:

1. По назначению:

1.1. Показатели назначения характеризуют способность прибора выполнять свои основные функции, к ним относятся: *точность, чувствительность, диапазон измерений, разрешающая способность, быстродействие*.

1.2. Показатели надёжности характеризуют способность прибора сохранять свои функциональные характеристики в течение определенного периода времени, которые включают следующие: *безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость*.

1.3. Эргономические показатели отражают удобство использования прибора, среди них выделяют: *удобство управления, удобство наблюдения, гигиеничность*.

1.4. Эстетические показатели характеризуют внешний вид прибора: *дизайн* (форма, цвет, компоновка элементов прибора); *отделка* (качество поверхности и материалов).

1.5. Показатели технологичности характеризуют сложность и стоимость производства прибора: *трудоемкость изготовления*: затраты труда и времени на производство прибора; *технологическая себестоимость изделия*: затраты средств на изготовление прибора; *коэффициент сборности*: приспособленность к условиям производства; *энергоемкость*.

1.6. Экономические показатели, к ним относятся: *оптовая цена; плановая себестоимость изготовления изделия*: максимальные затраты на изготовление; *фактическая себестоимость изготовления изделия*: затраты на изготовление изделия;

экономический эффект от внедрения единицы изделия: эффективность внедрения изделия.

Группы параметров качества продукции:

назначение;

надёжность (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость);

экономические (затраты на разработку, изготовление, эксплуатацию и утилизацию);

эстетические (информационная выразительность, рациональность формы), совершенство производственного исполнения и товарного вида: качество покрытий и отделки поверхностей, устойчивость к повреждениям);

эргономика (гигиенические, антропологические, физиологические, психофизиологические и др.);

технологичность (коэффициенты технологичности по трудоёмкости, себестоимости, унификации и т.д.);

соответствие стандартам;

патентно-правовые (патентной защиты, патентной чистоты, территориального распространения);

экологические (уровень вредных воздействий на окружающую среду, возникающих при эксплуатации);

безопасность (особенности продукции, обеспечивающие безопасность человека);

транспортабельность (габаритные размеры, масса, требования к условиям транспортирования).

Рис. 1 / Fig. 1. Группы параметров качества продукции / Groups of product quality parameters

Источник: данные авторов.

1.7. Другие (показатели транспортабельности, показатели стандартизации и унификации, патентно-правовые показатели и показатели безопасности).

2. По способу выражения:

1.1. Количественные показатели – это измеряемые характеристики продукции, которые позволяют определить её качество, выражаются в виде чисел (например, точность, чувствительность, срок службы). Данные показатели обеспечивают получение объективных данных для оценки и контроля качества продукции отрасли приборостроения.

1.2. Качественные показатели – характеристики, которые описывают свойства и особенности продукта, не поддающиеся количественному измерению. Они акцентируют внимание на субъективных оценках, восприятии и функциональности. Основные аспекты качественных показателей включают: дизайн, эстетические и эргономические характеристики продукта, надёжность, удобство использования и др. Качественные показатели позволяют глубже понять ценность продукта и его соответствие потребительским ожиданиям.

2. По стадии определения:

2.2. Проектные определяются на стадии проектирования прибора.

2.3. Производственные определяются в процессе производства прибора.

2.4. Эксплуатационные определяются в процессе эксплуатации прибора.

Приведённая классификация является достаточно полной, однако в зависимости от специфики и характеристик прибора могут использоваться и другие показатели. Важно понимать, что все показатели качества взаимосвязаны и влияют друг на друга. При производстве продукции отрасли приборостроения необходимо стремиться к оптимальному сочетанию всех показателей для достижения нужного результата и поставленной цели – высокого качества выпускаемой продукции.

Способы повышения качества продукции приборостроения с применением технологий Индустрии 4.0

В настоящее время применительно к приборостроительному производству эффективно внедряются отдельные элементы Индустрии 4.0. Остановимся на них ниже.

Очки дополненной реальности становятся всё более популярными в приборостроительном производстве благодаря своей способности улучшать процессы проектирования, сборки, обслуживания и обучения, используя их, рабочие могут видеть необходимые инструкции по работе, распознавать элементы и выполнять их сборку и соединение, используя цифровые модели изделия. Использование очков дополненной реальности в производстве продукции приборостроения повышает эффективность процессов, снижает время на обучение и обслуживание, а также улучшает качество продукции. Следует отметить, что данный вид технологий продолжает развиваться, и с каждым годом они становятся более доступными и эффективными для интеграции в производственные системы.

Модули моделирования и визуализации играют ключевую роль в современном производстве продукции приборостроения, обеспечивая возможность анализа, оптимизации и управления сложными производственными процессами. В условиях быстрого развития технологий и Индустрии 4.0 использование таких модулей

становится не только целесообразным, но и необходимым для достижения высокой эффективности и качества продукции.

Модули моделирования позволяют создавать виртуальные модели производственных процессов, что даёт возможность осуществлять многовариантное тестирование различных сценариев без необходимости остановки реального производства, что включает в себя моделирование потока материалов, планирование загрузки оборудования и оптимизацию процессов сборки. Важно исследовать процесс поиска материалов, структуры и наиболее удачного процесса производства продукта. В результате предприятия отрасли приборостроения могут прогнозировать возможные варианты развития, например задержки, выявлять узкие места и минимизировать затраты.

Современные системы визуализации данных позволяют легко интерпретировать большие объёмы информации, что критически важно для принятия оперативных и стратегических решений, в наглядной форме, с помощью интерактивных графиков и 3D-моделей, представить производственные процессы, а также помогают выявить ключевые показатели эффективности и отслеживать выполнение задач в режиме реального времени.

Следует отметить тот факт, что модули моделирования и визуализации могут интегрироваться с устройствами Интернета вещей (IoT) и системами больших данных, обеспечивая сбор и обработку информации, что позволяет повысить эффективность мониторинга состояния оборудования, спрогнозировать возможные поломки и проводить профилактическое техническое обслуживание, что снижает время простоев и затраты на ремонт [8; 13].

Использование модулей моделирования позволяет проводить анализ качества на различных этапах производства. Системы могут отслеживать параметры, влияющие на качество, и автоматически корректировать параметры процесса для достижения необходимых стандартов, что способствует снижению дефектов и повышению общей удовлетворённости клиентов.

Модули моделирования способны использоваться для обучения сотрудников, предоставляя им возможность взаимодействовать с виртуальными моделями производственных процессов. Данный фактор позволяет лучше подготовить рабочие команды к реальным условиям, минимизируя риски и предотвращая угрозы, и тем самым повышая квалификацию персонала.

Таким образом, модули моделирования и визуализации являются мощными инструментами, позволяющими обеспечить эффективное, безопасное и качественное производство продукции приборостроения. Их применение позволяет не только улучшить текущие процессы, но и закладывает основу для внедрения инноваций и адаптации к различным актуальным изменениям на рынке.

Отметим, что одним из важных моментов ведения деятельности для современного предприятия отрасли приборостроения, при котором оно может быть конкурентоспособным и успешным, занимать свою нишу на рынке, будет соответствие трём условиям:

- минимизация сроков подготовки производства и вывода продукции на рынок;
- более низкая себестоимость продукции по сравнению с основными конкурентами;
- обеспечение высокого качества продукции и поддержание его уровня.

Достижение обозначенных условий возможно благодаря обеспечению технологического развития и необходимого уровня технологического потенциала, использованию современного оборудования, достижений науки и техники. Одной из

ключевых составляющих данного процесса является применение станков с ЧПУ и мощной программной среды – CAM/CAD-систем (автоматизированная система, либо модуль автоматизированной системы, предназначенный для подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ).

Программное объединение станков в единую систему позволяет повысить гибкость и эффективность производственных процессов изготовления продукции приборостроения, систематизировать данные о работе оборудования, автоматически сигнализировать о простоях и перегрузках, вибрациях и износах узлов, оптимизировать время работы в машинном режиме, осуществлять контроль за выполнением операций и снизить затраты.

Приведём несколько основных направлений и преимуществ такого подхода: все станки подключаются к единой цифровой платформе, которая позволяет собирать, хранить и анализировать данные о производственном процессе (может включать в себя обработку данных о производительности, времени работы, потреблении ресурсов и др.); интеграция оборудования позволяет оптимизировать маршруты обработки деталей; программные решения могут адаптировать режимы работы станков в зависимости от изменений в производственном процессе или изменений в спросе, что повышает гибкость производства. Например, в ответ на изменение объёмов заказа в силах изменяться скорость или направление обработки; могут включать модули контроля качества, которые автоматически анализируют результаты обработки и вносят коррективы в процесс, если это необходимо, что обеспечивает достаточно высокий уровень качества продукции и уменьшает количество изделий с браком.

Самодиагностика оборудования – это процесс автоматического мониторинга состояния машин и механизмов, который позволяет выявлять неисправности и отклонения от нормального функционирования. В рамках производства продукции приборостроения данная технология имеет ключевое значение для обеспечения надёжности и эффективности.

Автоматический заказ компонентов – процесс, который позволяет оптимизировать управление запасами и поставками, снижая затраты и повышая эффективность производства. Он обеспечивает подачу на сборку изделия необходимых комплектующих согласно схемам сборки и плановым заданиям. Автоматизированные системы для заказа компонентов часто интегрируются с ERP (Enterprise Resource Planning) и MRP (Material Requirements Planning) системами.

Чипизация в производстве продукции приборостроения – внедрение микросхем и других полупроводниковых устройств в конструкции приборов для улучшения их функциональности, управления и мониторинга. Основные аспекты чипизации в данном контексте включают: интеграция приборов с Интернетом вещей (IoT), что представляет возможность удалённого мониторинга, управления и сбора данных; с использованием микросхем создаются решения, позволяющие минимизировать размеры и вес приборов, что особенно важно для разработки портативных и мобильных устройств; значительно сокращается время на разработку новых приборов.

Технологическое оборудование производственных систем (линий, ячеек) считывает с микрочипов необходимые данные для автоматической организации технологических операций.

Технологическое оборудование производственных систем играет одну из ключевых ролей в создании высококачественной продукции приборостроения, оно обеспечивает автоматизацию процессов, повышает точность и эффективность, а также интеграцию различных этапов производства, что является критически важным

в условиях современных рыночных требований. Правильный выбор и настройка оборудования способствуют не только оптимизации производственных процессов, но и повышению конкурентоспособности предприятия.

Автоматическое перемещение заготовок и деталей с автоматизированных складов и между рабочими местами, преимуществами которого являются: уменьшение риска наличия ошибок при транспортировке; экономия времени: быстрое перемещение заготовок и деталей между этапами производства; более рациональное использование складских площадей и рабочих зон; повышение уровня безопасности. Таким образом, внедрение автоматических систем перемещения помогает достичь высоких показателей эффективности и снизить эксплуатационные затраты.

При внедрении принципов Индустрии 4.0 на предприятиях отрасли приборостроения основное внимание уделяется следующим преимуществам, которые представлены в табл. 1, однако, следует учитывать и вызовы Индустрии 4.0, которые создают существенные риски (табл. 2).

Таблица 1 / Table 1

Преимущества внедрения Индустрии 4.0 / Advantages of implementing Industry 4.0

Наименование преимущества	Описание
Интеграция данных	Все этапы производства, включая планирование и виртуальное моделирование образуют единую систему
Умные технологии	Использование IoT для мониторинга и управления оборудованием в режиме реального времени
Управление инструментами	Автоматизация процесса управления инструментами для повышения точности и снижения отходов.
Техническое обслуживание	Предиктивное обслуживание, которое позволяет заранее выявлять проблемы и минимизировать время простоя

Источник: по данным авторов.

Выделенные выше преимущества позволяют обеспечить повышение эффективности и производительности, гибкость и адаптивность, качество продукции, сокращение времени и снижение затрат, что является основополагающей целью Индустрии 4.0 [12].

Улучшение качества товаров отрасли приборостроения представляет собой важную задачу для функционирования предприятий данной отрасли и обеспечения их конкурентоспособности, а также удовлетворения потребностей потребителей.

Таблица 2 / Table 2

Вызовы Индустрии 4.0 / Challenges of Industry 4.0

Наименование вызова	Описание
Кибератаки, несанкционированный доступ, утечка конфиденциальной информации, нарушение производственных процессов могут нанести значительный ущерб	Увеличение числа подключённых устройств и объёмов передаваемых данных создаёт новые уязвимости. Необходимым условием является защита данных и систем
Технологическая зависимость	Зависимость от производителей и поставщиков комплектующих, материалов, программного обеспечения, особенно иностранных, может привести к снижению качества выпускаемой продукции и стать угрозой экономической безопасности отрасли приборостроения

Окончание таблицы 2 / Table 2

Наименование вызова	Описание
Быстрое устаревание технологий	С учётом быстрого развития технологий, их циклы обновления достаточно коротки в рамках Индустрии 4.0. Необходимость постоянной модернизации требует значительных инвестиций и может привести к технологическому отставанию предприятий приборостроения, неспособных адаптироваться к изменениям
Сложность интеграции	Интеграция новых технологий с существующими системами может быть сложной и дорогостоящей, что создаёт барьеры для предприятий
Нехватка высококвалифицированных кадров	Необходимость в специалистах, владеющих новыми технологиями, с высокой степенью квалификации для внедрения и обслуживания систем

Источник: по данным авторов.

Основными инструментами и мерами по обеспечению качества продукции приборостроения являются:

- *внедрение новых технологий*: применение технологии автоматизации производственных процессов помогает снизить количество погрешностей, ошибок и улучшить точность при изготовлении продукции отрасли приборостроения;
- *контроль и оценка качества*: создание многоуровневой системы контроля качества на всех этапах производства, начиная с этапа проектирования и заканчивая постпродажным обслуживанием, включает входной контроль материалов, инспекцию промежуточных изделий, а также окончательную проверку готовой продукции;
- *подбор сырья и материалов*: использование высококачественных сырьевых материалов, соответствующих международным стандартам, для увеличения надёжности и долговечности изделий.
- *анализ и наблюдение за производственными процессами* с целью их оптимизации и выявления потенциальных рисков и угроз;
- *стандарты и сертификация*: следование международным стандартам, таким как ISO, для обеспечения единых требований к качеству и повышения доверия со стороны потребителей;
- *обучение персонала*: проведение регулярного обучения сотрудников современным методам контроля качества и внедрению новых технологий;
- *инновации и НИОКР*: инвестирование в научные исследования и разработки для создания новых, более качественных продуктов и улучшения существующих;
- *устойчивое развитие*: применение принципов устойчивого развития и экологичности в производственных процессах влияет на общий уровень качества и репутацию компании;
- *обратная связь от потребителей*: установление эффективных каналов связи с клиентами для получения отзывов и рекомендаций, что поможет выявить и исправить имеющиеся недостатки.

Заключение

На основании проведённого исследования сформулированы следующие выводы.

Обеспечение высокого качества продукции является ключевым фактором для экономической безопасности отрасли приборостроения в эпоху четвёртой промышленной революции. Индустрия 4.0 предполагает радикальную трансформацию производственных процессов, основанную на интеграции физических и цифровых

технологий, что не просто добавляет новые инструменты, а меняет саму парадигму производства, создавая «умные» и адаптивные производственные системы.

Применение инновационных технологий и систем управления помогает предприятиям данной отрасли успешно выдерживать давление со стороны конкурентов, укреплять свои рыночные позиции, вносить существенный вклад в развитие экономики страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойцов А. Г. Обеспечение качества на всех этапах производства [Электронный ресурс] // РИТМ машиностроения. 2022. № 2. URL: <https://ritm-magazine.com/ru/public/obespechenie-kachestva-na-vseh-etapah-proizvodstva> (дата обращения: 10.07.2025).
2. Галимова М. П. Готовность российских предприятий к цифровой трансформации: организационные драйверы и барьеры // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. 2019. № 1. С. 27–37.
3. Желтенков А. В., Сертакова О. В., Васильева И. А. Инновационные подходы цифровой трансформации промышленных предприятий // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Экономика. 2025. № 1. С. 61–68. DOI: 10.18384/2949-5024-2025-1-61-68
4. Микаева А. С. Экономическая безопасность отрасли приборостроения: вызовы, тренды и пути их решения // Развитие и безопасность. 2025. № 1. С. 47–57.
5. Микаева А. С., Пенчукова Т. А. Вызовы и угрозы экономической безопасности отрасли приборостроения // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2024. № 4. С. 105–109.
6. A Review of Industry 4.0 Assessment Instruments for Digital Transformation / Z. M. Iribarren, C. L. Garay-Rondero, I. Lemus-Aguilar, R. E. Peimbert-García // Applied Sciences. 2024. Vol. 14. Publication No. 1693. DOI: 10.3390/app14051693
7. Assessing the Uptake of Industry 4.0 Technologies: Barriers to Their Adoption and Impact on Quality Management Aspects / I. Laskurain-Iturbe, G. Arana, B. Landeta, R. Jimenez-Redal // International Journal of Quality & Reliability Management. 2023. Vol. 40. No. 10. P. 2420–2442. DOI: 10.1108/IJQRM-10-2022-0292
8. Brettel M., Klein M., Friederichsen N. The Relevance of Manufacturing Flexibility in the Context of Industrie 4.0 // Procedia CIRP. 2016. Vol. 41. P. 105–110. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.047
9. Collaboration Mechanisms to Increase Productivity in the Context of Industrie 4.0 / G. Schuh, T. Potente, C. Wesch-Potente, A. R. Weber // 2nd CIRP Robust Manufacturing Conference. 2014. Vol. 19. P. 51–56.
10. Exploring the Influence of Industry 4.0 Technologies on the Circular Economy / I. Laskurain-Iturbe, G. Arana, B. Landeta, N. Uriarte-Gallastegi // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 321. No. 4. Publication No. 128944. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128944
11. Ghobakhloo M. Industry 4.0, Digitization, and Opportunities for Sustainability // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 252. Publication No. 119869. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119869
12. Industry 4.0 – Current Status and Future Trends / Ed. by O. J. Hamilton. Rijeka: IntechOpen, 2020. 132 p. DOI: 10.5772/intechopen.86000
13. Mohammadi J., Khozein A., Zarmehri A. Cost of Quality and Quality Optimization in Manufacturing // European Online Journal of Natural and Social Sciences. 2013. Vol. 2. P. 1070–1081.
14. Oliveira D., Alvelos H., Rosa M. J. Quality 4.0: Results from a Systematic Literature Review // The TQM Journal. 2024. Vol. 37. Iss. 2. DOI: 10.1108/TQM-01-2023-0018

15. Sousa S., Nunes E. Framework to Determine the Quality Cost and Risk of Alternative Control Plans in Uncertain Contexts // *International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice*. 2021. Vol. 27. No. 5. P. 747–759.
16. Quality Costs and Industry 4.0: Inspection Strategy Modelling and Reviewing / A. M. Reis, A. Dall-Orsoletta, E. Nunes et al. // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. Vol. 136. P. 3883–3897. DOI: 10.1007/s00170-024-13184-9
17. Zhou Z., Xie S., Chen D. Management of Technology in Digital Manufacturing Science // *Fundamentals of Digital Manufacturing Science: Springer Series in Advanced Manufacturing*. L.: Springer, 2011. DOI: 10.1007/978-0-85729-564-4_7

REFERENCES

1. Boytsov, A. G. (2022). Quality Assurance at All Stages of Production. In: *RHYTHM of Mechanical Engineering*, 2. URL: <https://ritm-magazine.com/ru/public/obespechenie-kachestva-na-vseh-etapah-proizvodstva> (accessed: 10.07.2025) (in Russ.).
2. Galimova, M. P. (2019). Readiness of Russian Enterprises to Digital Transformation: Organizational Drivers and Barriers. In: *Bulletin USPTU. Science, Education, Economy. Series Economy*, 1, 27–37 (in Russ.).
3. Zheltenkov, A. V., Sertakova, O. V. & Vasilyeva, I. A. (2025). Innovative Approaches to Digital Transformation of Industrial Enterprises. In: *Bulletin of the State University of Education. Series: Economics*, 1, 61–68. DOI: 10.18384/2949-5024-2025-1-61-68 (in Russ.).
4. Mikaeva, A. S. (2025). Economic Security of the Instrument Engineering Industry: Challenges, Trends, And Solution Paths. In: *Development and Security*, 1, 47–57 (in Russ.).
5. Mikaeva, A. S. & Penchukova, T. A. (2024). Challenges and Threats to the Economic Security of the Instrument Industry. In: *RISK: Resources, Information, Supply, Competition*, 4, 105–109 (in Russ.).
6. Iribarren, Z. M., Garay-Rondero, C. L., Lemus-Aguilar, I. & Peimbert-García, R. E. (2024). A Review of Industry 4.0 Assessment Instruments for Digital Transformation. In: *Applied Sciences*, 14, 1693. DOI: 10.3390/app14051693
7. Laskurain-Iturbe, I., Arana, G., Landeta, B. & Jimenez-Redal R. (2023). Assessing the Uptake of Industry 4.0 Technologies: Barriers to Their Adoption and Impact on Quality Management Aspects. In: *International Journal of Quality & Reliability Management*, 40, 10, 2420–2442. DOI: 10.1108/IJQRM-10-2022-0292
8. Brettel, M., Klein, M., Friederichsen, N. (2016). The Relevance of Manufacturing Flexibility in the Context of Industrie 4.0. In: *Procedia CIRP*, 41, 105–110. DOI: 10.1016/j.procir.2015.12.047
9. Schuh, D., Potente, T., Wesch-Potente, C. & Weber, A. R. (2014). Collaboration Mechanisms to Increase Productivity in the Context of Industrie 4.0. In: *2nd CIRP Robust Manufacturing Conference*, 19, 51–56.
10. Laskurain-Iturbe, I., Arana, G., Landeta, B. & Uriarte-Gallastegi N. (2023). Exploring the Influence of Industry 4.0 Technologies on the Circular Economy. In: *Journal of Cleaner Production*. 2023, 321, 4, 128944. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128944
11. Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, Digitization, and Opportunities for Sustainability. In: *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119869
12. Hamilton, O. J. (ed.) (2020). *Industry 4.0 – Current Status and Future Trends*. Rijeka: IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.86000
13. Mohammadi, J., Khozein, A. & Zarmehri, A. (2013). Cost of Quality and Quality Optimization in Manufacturing. In: *European Online Journal of Natural and Social Sciences*, 2, 1070–1081.
14. Oliveira, D., Alvelos, H. & Rosa, M. J. (2024). Quality 4.0: Results from a Systematic Literature Review. In: *The TQM Journal*, 37, 2. DOI: 10.1108/TQM-01-2023-0018
15. Sousa, S., Nunes, E. (2021). Framework to Determine the Quality Cost and Risk of Alternative Control Plans in Uncertain Contexts. In: *International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice*, 27, 5, 747–759.

16. Reis, A. M., Dall-Orsoletta, A., Nunes E. et al. (2025). Quality Costs and Industry 4.0: Inspection Strategy Modelling and Reviewing. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 136, 3883–3897. DOI: 10.1007/s00170-024-13184-9
17. Zhou, Z., Xie, S. & Chen, D. (2011). Management of Technology in Digital Manufacturing Science. In: *Fundamentals of Digital Manufacturing Science: Springer Series in Advanced Manufacturing*. London: Springer. DOI: 10.1007/978-0-85729-564-4_7

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Микаева Светлана Анатольевна (г. Москва) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электротехнических систем Российского технологического университета (РТУ МИРЭА);

<https://orcid.org/0000-0002-8266-9757>; e-mail: mikaeva_a@inbox.ru

Микаева Ангела Сергеевна (г. Москва) – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры финансового учёта и контроля Российского технологического университета (РТУ МИРЭА);

<https://orcid.org/0000-0002-8872-6783>; e-mail: mikaeva_a@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Svetlana A. Mikaeva (Moscow) – Dr. Sci. (Technology), Prof., Electrical Engineering Systems Department, Russian Technological University (RTU MIREA);

<https://orcid.org/0000-0002-8266-9757>; e-mail: mikaeva_a@inbox.ru

Angela S. Mikaeva (Moscow) – Cand. Sci. (Economics), Assoc. Prof., Financial Accounting and Control Department, Russian Technological University (RTU MIREA);

<https://orcid.org/0000-0002-8872-6783>; e-mail: mikaeva_a@inbox.ru