

УДК 621.9.024

Солонченко М.Е., Санин С.Н.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

ЦИФРОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ В МАШИНОСТРОЕНИИ: ОТ СТАНДАРТОВ ДО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Аннотация: В условиях повышения сложности продукции и ужесточения требований рынка управление качеством в машиностроении трансформируется из преимущественно реактивного управления в интегрированную цифровую экосистему. В статье анализируется эволюция цифровых инструментов в этой области: от автоматизации процессов, регламентируемых международными стандартами качества (ISO 9001, IATF 16949), до использования передовых интеллектуальных систем на основе искусственного интеллекта и машинного обучения. Рассмотрены этапы цифровизации: от внедрения базовых информационных систем (ERP, MES, QMS, SPC) для сбора и автоматизации данных до интеграции данных в реальном времени через Интернет вещей и концепцию цифрового двойника. Особое внимание уделено приложениям AI/ML для предиктивного качества, автоматизированного визуального осмотра и анализа первопричин дефектов. Выявлены основные технические, экономические и организационные проблемы, связанные с цифровой трансформацией. Обозначены перспективы развития, включая полностью автономные системы и использование технологий блокчейн, а также сопутствующие риски. Сделан вывод о критической важности цифровых инструментов для достижения высокого уровня качества, перехода к проактивному управлению и повышения конкурентоспособности, подчеркнута синергия аналитических возможностей ИИ и инженерной интуиции человека.

Ключевые слова: Управление качеством, машиностроение, цифровизация, Индустрия 4.0, ISO 9001, IATF 16949, MES, QMS, SPC, Интернет вещей (IoT), Большие данные, Машинное обучение (ML), Искусственный интеллект (AI), Цифровой двойник, Предиктивное качество.

Solonchenko M.E., Sanin S.N.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR OPERATIONAL CONTROL AND QUALITY ASSURANCE OF PRODUCTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING (DMLS) USING COMPUTER VISION AND MACHINE LEARNING

Abstract: In the context of increasing product complexity and stricter market requirements, quality management in mechanical engineering is transforming from a predominantly reactive management to an integrated digital ecosystem. The article analyzes the evolution of digital tools in this area: from the automation of processes regulated by international quality standards (ISO 9001, IATF 16949) to the use of advanced intelligent systems based on artificial intelligence and machine learning. The stages of digitalization are considered: from the implementation of basic information systems (ERP, MES, QMS, SPC) for data collection and automation to real-time data integration via the Internet of Things and the concept of a digital twin. Particular attention is paid to AI/ML applications for predictive quality, automated visual inspection and defect root cause analysis. The main technical, economic and organizational problems associated with digital transformation are identified. Development prospects, including fully autonomous systems and the use of blockchain technologies, as well as associated risks are outlined. The conclusion is made about the critical importance of digital tools for achieving a high level of quality, transition to proactive management and increasing competitiveness, the synergy of the analytical capabilities of AI and human engineering intuition is emphasized.

Keywords: *Quality management, mechanical engineering, digitalization, Industry 4.0, ISO 9001, IATF 16949, MES, QMS, SPC, Internet of Things (IoT), Big Data, Machine learning (ML), Artificial intelligence (AI), Digital twin, Predictive quality.*

Введение

Актуальность проблемы управления качеством в современном машиностроении обусловлена ростом сложности выпускаемой продукции, ужесточением требований мирового рынка и высокой конкуренцией. В условиях Индустрии 4.0 управление качеством трансформировалось из преимущественно реактивного процесса контроля на конечных стадиях в сложную цифровую экосистему, интегрированную во все этапы жизненного цикла продукции [1].

Традиционные подходы к управлению качеством, основанные на ручных проверках и выборочном тестировании, демонстрируют ограничения по эффективности, полноте данных и возможности выявления скрытых закономерностей, что затрудняет переход к проактивному управлению [2].

Внедрение современных цифровых технологий, в том числе искусственного интеллекта и цифровых двойников, позволяет перейти от обнаружения дефектов к их прогнозированию и предотвращению, что является ключевым фактором повышения эффективности и конкурентоспособности предприятий машиностроения [3].

Цель – анализ эволюции цифровых инструментов управления качеством в машиностроении от систем, соответствующих базовым стандартам, до использования передовых интеллектуальных систем. В статье будут рассмотрены основы управления качеством, этапы цифровизации, роль интеллектуальных систем, а также ключевые проблемы и перспективы развития отрасли в этой области.

Основы управления качеством в машиностроении

В машиностроении качество продукции определяется многими способами и включает три основных критерия: техническое соответствие конструкторской документации (точность геометрических параметров, надежность соединений, безопасность эксплуатации); удовлетворение эксплуатационных требований заказчика (долговечность, простота обслуживания, стоимость владения); и соответствие действующим стандартам и нормативно-технической документации [4].

Международные и отраслевые стандарты, такие как ISO 9001, а также специализированные стандарты для отдельных секторов машиностроения, такие как AS9100 для аэрокосмической промышленности или IATF 16949 для автомобильной промышленности, играют основополагающую роль в формировании систем менеджмента качества (СМК) [5, 6]. Эти стандарты не только регламентируют процессы, но и выступают инструментом развития культуры качества (например, принципы всеобщего управления качеством (TQM) и бережливого производства, которые ориентированы на постоянное улучшение и вовлечение сотрудников [7]).

Эти стандарты устанавливают жесткие требования к технологической документации, процедурам контроля, управлению несоответствиями и постоянному улучшению, тем самым формируя методологическую и нормативную базу для построения эффективной СМК. Соблюдение этих требований традиционно требовало обширного документооборота.

Этапы цифровизации управления качеством

Переход на первые этапы цифровизации в области качества был тесно связан с необходимостью автоматизации регламентируемых стандартами процессов, в частности, в части документооборота, регистрации результатов контроля и учета несоответствий, что стало предпосылкой для дальнейшего развития цифровых инструментов.

Первые шаги цифровизации управления качеством были связаны с внедрением информационных систем, обеспечивающих автоматизацию сбора и хранения данных. На этом этапе для учета параметров продукции и учета дефектов активно использовались электронные таблицы и специализированные базы данных. Функционал управления качеством начал

интегрироваться в корпоративные ERP-системы, позволяя централизованно вести учет данных о качестве, включая статистику по дефектам и рекламациям.

Были разработаны специализированные информационные системы, такие как Manufacturing Execution Systems (MES), обеспечивающие сбор данных непосредственно с производственного оборудования, и базовые Quality Management Systems (QMS), автоматизирующие процессы управления несоответствиями, аудитами и корректирующими действиями. Электронный документооборот в этих системах позволил оцифровать паспорта и сертификаты качества [8]. Произошла автоматизация инструментов статистического контроля технологических процессов (SPC). Переход от ручного построения контрольных карт к использованию специализированного программного обеспечения позволил автоматизировать сбор данных, расчет статистических показателей (например, индексов пригодности процесса Ср и Срк), оперативный мониторинг стабильности технологических процессов [9].

Достижениями этого этапа стало создание цифровой инфраструктуры сбора и хранения данных о качестве, а также автоматизация рутинных контрольно-учетных операций. Однако ограничения были связаны с преимущественно ретроспективным анализом данных, низкой системной интеграцией и ограниченной способностью выявлять сложные взаимосвязи.

Значительное расширение возможностей управления качеством обусловлено развитием Интернета вещей (IoT) и систем сбора больших данных. Интеграция датчиков, встроенных в производственное оборудование, и измерительных приборов обеспечивает сбор параметров процесса.

Достижения этого этапа связаны с переходом к управлению качеством на основе данных в реальном времени, возможностью проведения комплексного аналитического исследования и реализацией проактивных мер по предотвращению дефектов.

Роль интеллектуальных систем

Использование технологий искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) является следующим этапом эволюции цифрового управления качеством, обеспечивающим переход к предиктивным и предписывающим моделям. Алгоритмы ИИ/МО способны анализировать сложные многомерные данные и выявлять неочевидные закономерности.

Конкретные приложения ИИ/МО для повышения качества в машиностроении включают:

- Разработка моделей МО для прогнозирования вероятности возникновения дефектов на основе анализа исторических и текущих данных о процессе, оборудовании, материалах и условиях окружающей среды.
- Использование компьютерного зрения и глубокого обучения для автоматического обнаружения и классификации поверхностных дефектов деталей (трещин, царапин, пор, отклонений формы) по изображениям или видеопотоку [12]. Примером может служить система контроля сварных швов Bosch или роботизированный осмотр кузова в Tesla.
- Использование МО для определения оптимальных режимов работы оборудования, минимизирующих риск возникновения дефектов при сохранении производительности.
- Использование ИИ для выявления скрытых зависимостей и факторов, влияющих на возникновение дефектов или сбоев в технологических процессах.

Примеры внедрения демонстрируют высокую эффективность. Системы компьютерного зрения на основе ИИ способны обнаруживать дефекты сварных швов со скоростью, значительно превышающей возможности человека-оператора. Использование алгоритмов ИИ для анализа данных с роботизированных манипуляторов, управляющих геометрией кузовов автомобилей, исключает субъективность оценки. Использование цифровых двойников в сочетании с анализом данных (в том числе на основе ИИ) позволяет прогнозировать износ и планировать техническое обслуживание (например, в Siemens для газовых турбин), сокращая количество внеплановых остановок. Такие системы, как «Андон» в Toyota, интегрированные с цифровыми системами, позволяют оперативно реагировать на проблемы с качеством в режиме реального времени.

Проблемы внедрения цифровых инструментов

Внедрение цифровых инструментов управления качеством сопряжено с рядом сложностей. К техническим сложностям относятся: сложность контроля микроструктурных особенностей (например, пористости в изделиях, изготовленных методом аддитивной обработки); обеспечение требуемой точности в мелкосерийном производстве, где статистическая отладка процессов ограничена; интеграция современных цифровых систем с устаревшей ИТ-инфраструктурой предприятий, включая использование устаревших систем документооборота.

Перспективы развития цифрового управления качеством включают: создание высокоавтономных систем управления и принятия решений на основе ИИ; расширенное использование цифровых двойников для предиктивного управления в реальном времени; использование технологии блокчейн для обеспечения прозрачности и прослеживаемости происхождения материалов и компонентов по всей цепочке поставок (актуально, например, для устранения контрафакта в аэрокосмической отрасли); глубокая интеграция ИИ в процессы планирования, анализа и оптимизации качества.

Наряду с перспективами существуют и риски, такие как этические аспекты использования ИИ (вопросы ответственности в случае пропуска алгоритмом критического дефекта) и вопросы кибербезопасности (защита критически важных данных о качестве и производственных процессах от несанкционированного доступа или манипуляций).

Заключение

Проведенный анализ показывает, что управление качеством в машиностроении прошло путь от соблюдения базовых стандартов и автоматизации рутинных операций до глубокой цифровизации и интеграции интеллектуальных систем. Качество стало неотъемлемой частью «цифровой ДНК» современного предприятия.

Цифровые инструменты и использование ИИ играют решающую роль в достижении высокого уровня качества и сохранении конкурентоспособности машиностроительных компаний, позволяя им выходить за рамки традиционных подходов и получать измеримые выгоды, такие как сокращение дефектов и ускорение выхода на рынок.

Цифровизация способствует существенному сдвигу парадигмы управления качеством — от реактивного обнаружения и детективного анализа к проактивному предотвращению, предиктивному прогнозированию и, в перспективе, предписывающему управлению, при котором система сама генерирует рекомендации по корректирующим действиям.

Для успешного развития в этом направлении рекомендуется: активно инвестировать в подготовку и переподготовку инженерно-технических кадров, формируя специалистов с компетенциями в области цифровых технологий и анализа данных; начинать цифровую трансформацию с ограниченных pilotных проектов для апробации решений и минимизации рисков; наладить тесное сотрудничество с академическим сообществом и стартапами для внедрения прорывных технологий, таких как квантовые датчики или передовые методы неразрушающего контроля. Несмотря на стремительное развитие ИИ, полностью исключить человеческий фактор в управлении качеством пока не удается, наиболее эффективным является создание симбиотических систем, объединяющих аналитические возможности машин и инженерную интуицию специалистов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Санин С. Н., Пелипенко Н. А. Настройка мобильного станкоробота на обработку крупногабаритной кольцевой детали / Санин С. Н., Пелипенко Н. А. // СТИН. — 2022. — № 3. — С. 2-4.
2. Oakland J. S. Total Quality Management and Operational Excellence. – [London]: Routledge, 2014. – [X] с.

3. Artificial Intelligence and Digital Twin for Smart Manufacturing Quality Control / L. Wang, R. Li // International Journal of Production Research. – 2021. – Vol. 59, no. 12. – P. 3601–3618.
4. Deming W. E. Out of the Crisis. – Cambridge, MA: MIT Press, 2000. – [X] c.
5. ISO 9001:2015. Quality management systems – Requirements. – [Geneva]: International Organization for Standardization, 2015. – [X] c.
6. IATF 16949:2016. Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations. – [Southfield, MI]: International Automotive Task Force, 2016. – [X] c.
7. The Machine That Changed the World / J. P. Womack, D. T. Jones, D. Roos. – New York: Harper Perennial, 1990. – [X] c.
8. MES/MOM Functionality & Standards White Paper / MESA International. – Tempe, AZ: MESA International, 2019. – [X] c.
9. Montgomery D. C. Introduction to Statistical Quality Control. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012. – [X] c.
10. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems / J. Lee, B. Bagheri, H. A. Kao // Manufacturing Letters. – 2015. – Vol. 3. – P. 18–23.
11. The Digital Twin Paradigm for Future NASA Missions / E. Glaessgen, D. Stargel. – Moffett Field, CA: NASA Ames Research Center, 2012. – [X] c.
12. Deep Learning for Industrial Visual Inspection: A Survey / Y. Luo, X. Li // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2020. – Vol. 16, no. 2. – P. 779–792.

REFERENCES

1. Sanin S. N., Pelipenko N. A. Setting up a mobile robotic machine tool for processing a large-sized ring part / Sanin S. N., Pelipenko N. A. // STIN. - 2022. - No. 3. - P. 2-4.
2. Oakland J. S. Total Quality Management and Operational Excellence. – [London]: Routledge, 2014. – [X] c.
3. Artificial Intelligence and Digital Twin for Smart Manufacturing Quality Control / L. Wang, R. Li // International Journal of Production Research. – 2021. – Vol. 59, no. 12. – P. 3601–3618.
4. Deming W. E. Out of the Crisis. – Cambridge, MA: MIT Press, 2000. – [X] c.
5. ISO 9001:2015. Quality management systems – Requirements. – [Geneva]: International Organization for Standardization, 2015. – [X] c.
6. IATF 16949:2016. Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations. – [Southfield, MI]: International Automotive Task Force, 2016. – [X] c.
7. The Machine That Changed the World / J. P. Womack, D. T. Jones, D. Roos. – New York: Harper Perennial, 1990. – [X] c.
8. MES/MOM Functionality & Standards White Paper / MESA International. – Tempe, AZ: MESA International, 2019. – [X] c.

9. Montgomery D. C. Introduction to Statistical Quality Control. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012. – [X] c.
10. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems / J. Lee, B. Bagheri, H. A. Kao // Manufacturing Letters. – 2015. – Vol. 3. – P. 18–23.
11. The Digital Twin Paradigm for Future NASA Missions / E. Glaessgen, D. Stargel. – Moffett Field, CA: NASA Ames Research Center, 2012. – [X] c.
12. Deep Learning for Industrial Visual Inspection: A Survey / Y. Luo, X. Li // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2020. – Vol. 16, no. 2. – P. 779–792.

Информация об авторах

Солонченко Михаил Евгеньевич – студент второго курса магистратуры кафедры «Управление качеством», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, e-mail: solonchenko.01@mail.ru

Санин Сергей Николаевич – к. т. н., доцент кафедры «Стандартизация и управление качеством», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, vk.com: <https://vk.com/saninsergej>

Information about the authors

Solonchenko Mikhail Evgenievich – second-year master's student of the Department of Quality Management, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, e-mail: solonchenko.01@mail.ru

Sanin Sergey Nikolaevich – PhD, Associate Professor of the Department of Standardization and Quality Management, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, vk.com: <https://vk.com/saninsergej>