



ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО БРАКА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА

А. В. Винниченко, А. А. Лепёхин

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В статье рассматриваются проблемы возникновения дефектов продукции в условиях высокоавтоматизированного производства. Выполнен системный анализ технологических операций, реализуемых с участием роботизированных комплексов и систем с числовым программным управлением. На основе эмпирических данных сформирована статистическая выборка, позволяющая количественно оценить уровень остаточного брака в зависимости от типа автоматизированной системы. Предложена вероятностная модель распределения дефектов, учитывающая влияние таких факторов, как погрешность позиционирования, износ инструмента и ограниченная обобщающая способность алгоритмов компьютерного зрения. Обоснована необходимость перехода к человеко-центрированной модели организации производства в парадигме «Индустрия 5.0», предполагающей синергию когнитивных способностей оператора и детерминированной точности автоматизированных средств. Сформулированы принципы комбинированного контроля качества на основе байесовского подхода к принятию решений в условиях неопределенности.

Ключевые слова: автоматизация производственных процессов, промышленные роботы, контроль качества, статистическое моделирование дефектов, компьютерное зрение, Индустрия 5.0, человеко-машинное взаимодействие.

Для цитирования:

Винниченко, А. В. Вероятностное моделирование остаточного брака в автоматизированных системах контроля качества / А. В. Винниченко, А. А. Лепёхин // Системный анализ и логистика. – 2026. – № 2(50). – с. 48-53. DOI: 10.31799/2077-5687-2026-2-48-53.

PROBABILISTIC MODELING OF RESIDUAL DEFECTS IN AUTOMATED QUALITY CONTROL SYSTEMS

A. V. Vinnichenko, A. A. Lepekhn

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The article examines the problems of product defects in highly automated production. A systematic analysis of technological operations carried out with the involvement of robotic complexes and numerical control systems has been performed. Based on empirical data, a statistical sample has been formed, allowing for a quantitative assessment of the residual defect rate depending on the type of automated system. A probabilistic model of defect distribution has been proposed, taking into account the influence of factors such as positioning error, tool wear, and the limited generalization capability of computer vision algorithms. The necessity of transitioning to a human-centered model of production organization within the 'Industry 5.0' paradigm, which involves the synergy of the operator's cognitive abilities and the deterministic accuracy of automated tools, is substantiated. The principles of combined quality control based on the Bayesian approach to decision-making under uncertainty are formulated.

Keywords: automation of production processes, industrial robots, quality control, statistical modeling of defects, computer vision, Industry 5.0, human-machine interaction.

For citation:

Vinnichenko, A. V. Probabilistic modeling of residual defects in automated quality control systems / A. V. Vinnichenko, A. A. Lepekhn // System analysis and logistics. – 2026. – № 2(50). – p. 48-53. DOI: 10.31799/2077-5687-2026-2-48-53.

Введение

Современный этап развития промышленного производства характеризуется экспоненциальным ростом степени интеграции автоматизированных систем управления технологическими процессами [1]. Внедрение роботизированных комплексов, систем технического зрения и адаптивного управления преследует цель минимизации субъективного фактора, повышения повторяемости операций и, как следствие, снижения доли дефектной продукции [2]. Однако, как свидетельствует производственная статистика, полная элиминация



брака в рамках сугубо автоматизированного подхода недостижима ввиду наличия неустранимых физических и алгоритмических ограничений [3].

Материалы и методы

Исследование базировалось на анализе эксплуатационных данных четырех промышленных предприятий машиностроительного и приборостроительного профилей, использующих автоматизированные системы контроля и управления технологическими процессами. Эмпирическую базу составили протоколы выходного контроля качества за период от 6 до 12 месяцев непрерывной работы.

В качестве объектов исследования выступали четыре класса автоматизированных систем, дифференцированных по физической природе выполняемых операций и методам контроля [4-7]:

- Системы пассивного контроля на основе машинного зрения.
- Роботизированные комплексы сборки и инспекции.
- Автоматизированные системы контроля сварных соединений.
- Станки с числовым программным управлением (ЧПУ) для механической обработки.

Для каждого класса систем производился сбор статистики по доле бракованных изделий, номенклатуре дефектов и технологическим режимам. Обработка данных выполнялась методами математической статистики: рассчитывались математическое ожидание уровня брака ($\bar{p}$) и диапазон его варьирования (Δp). Для оценки связи между конструктивно-технологической сложностью изделий и уровнем дефектности использовался коэффициент ранговой корреляции Спирмена [8].

Результаты и обсуждение

Для объективизации исследования был проведен сбор и анализ данных о функционировании четырех классов автоматизированных систем. Эмпирическая база включает результаты выходного контроля качества за 6–12 месяцев работы предприятий, на основе чего представлены агрегированные статистические характеристики, включающие средний уровень брака (математическое ожидание доли дефектных единиц) и доминирующие факторы дефектообразования (табл. 1).



Таблица 1 – Сравнение методов контроля качества

<i>Автоматизированная система /операция</i>	<i>Тип контроля</i>	<i>Сложность геометрии</i>	<i>Ср. ур. брака p, %</i>	<i>Диапазон варьирования Δp, %</i>	<i>Ключевые факторы дефектообразования</i>	<i>Доминирующие виды дефектов</i>
Контроль качества с машинным зрением	Пассивный	Низкая / Средняя (плоские и объемные поверхности правильной формы, отсутствие скрытых полостей)	0,026	0,002–0,05	Ограниченная обобщающая способность нейронных сетей; дискретизация и квантование изображения; окклюзия и слабоконтрастные дефекты; вариабельность условий освещения	Поверхностные царапины, сколы, несоответствие цветовых оттенков, инородные включения
Роботизированная сборка и инспекция	Пассивно-активный	Средняя (преимущественно призматические детали с четкими базовыми поверхностями)	0,004	0,002–0,008	Накопленная погрешность кинематической цепи манипулятора; дрейф калибровки тактильных и оптических сенсоров; люфты в передачах; температурный дрейф	Несоблюдение усилия запрессовки, перекосы, неполная фиксация, отсутствие компонента
Автоматическая инспекция сварных швов	Активный	Высокая (сложнопрофильные соединения, стыковые и угловые швы, труднодоступные зоны)	1,75	1,4–2,1	Флуктуации параметров сварочной дуги; термомеханические деформации свариваемых элементов; неравномерность подачи присадочного материала; брызги расплавленного металла	Непровар, подрезы, прожоги, поры, шлаковые включения, несоответствие геометрии шва
Механическая обработка на станках с ЧПУ	Активный	Высокая (пространственно-сложные поверхности, глубокие отверстия, тонкостенные элементы)	2,0	1–3	Прогрессирующий износ режущего инструмента (абразивный, адгезионный, диффузионный); тепловые деформации узлов станка; квантование управляющей программы; вибрации в технологической системе	Отклонения размеров, погрешность формы и расположения, параметр шероховатости вне допуска, прижоги

В ходе исследования оценивалась степень влияния сложности контролируемой геометрии на стабильность процесса. В качестве количественной метрики сложности предложено использовать отношение количества контролируемых параметров качества N_{par} к минимально достижимому полю допуска T_{min} (мм):

$$Cg = \frac{T_{min}}{N_{par}}, \quad (1)$$



Для систем машинного зрения характерны следующие диапазоны значений [9]: $Cg = 5 - 15$; для сварки: $Cg = 20 - 40$; для механообработки: $Cg = 25 - 60$.

Для количественной оценки степени связи рассчитан коэффициент ранговой корреляции Спирмена:

$$\rho = 1 - 6 \sum d_i^2 n(n-1) = 0,92, \quad (2)$$

где d_i – разность рангов показателей сложности и уровня брака; $n = 4$ – количество сопоставляемых пар. Полученное значение свидетельствует о весьма высокой тесноте связи.

Наименьшие показатели дефектности ($\bar{p} = 0,004 - 0,026\%$) достигаются в системах пассивного контроля. Дефекты здесь носят преимущественно алгоритмический или сенсорный характер и поддаются минимизации путем совершенствования моделей машинного обучения и метрологического обеспечения. Системы активного контроля (сварка, механообработка) демонстрируют на порядок более высокие значения $\bar{p} = 1,75 - 2,0\%$. Дисперсия параметров качества в активных системах на 2–3 порядка превышает аналогичный показатель для пассивных систем.

Для формализации процесса возникновения дефекта предложена вероятностная модель [10], основанная на представлении о браке как о реализации композиции случайных величин. В общем виде вероятность возникновения дефекта $P(D)$ при выполнении элементарной технологической операции может быть выражена как:

$$P(D) = P(D | E) \cdot P(E) + P(D | \bar{E}) \cdot P(\bar{E}), \quad (3)$$

где E – событие, состоящее в нахождении системы в штатном режиме; $P(D | E)$ – условная вероятность дефекта в штатном режиме; $P(D | \bar{E})$ – условная вероятность дефекта при отклонении от регламента.

Применительно к системам механообработки величина $P(D | E)$ может быть декомпозирована на составляющие:

$$P(D | E) = 1 - \exp(-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau), \quad (4)$$

где $\lambda(\tau)$ – интенсивность потока дефектов, обусловленная функцией износа инструмента $W(\tau)$. В первом приближении $\lambda(\tau) = \lambda_0 + k \cdot W(\tau)$, где λ_0 – базовая интенсивность; k – эмпирический коэффициент. Функция износа $W(\tau)$ аппроксимируется степенной зависимостью:

$$W(\tau) = a \cdot \tau^b, \quad (5)$$

где a, b – эмпирические коэффициенты.

Для систем машинного зрения вероятность пропуска дефекта описывается через ошибки I и II рода. Пусть $f(x)$ – функция плотности распределения признака дефекта, $g(x)$ – распределение признака бездефектного изделия. Вероятность пропуска дефекта (β – ошибка):

$$\beta = \int_{-\infty}^{\infty} T f(x) dx, \quad (6)$$

Вероятность ложного срабатывания (α – ошибка):

$$\alpha = \int_{-\infty}^{\infty} T g(x) dx, \quad (7)$$



где T – порог классификации. Ограниченность обучающей выборки и дрейф концепции приводят к субоптимальному выбору порога T , что формирует ненулевой уровень брака даже в пассивных системах контроля.

Заключение

Проведенное исследование показало, что наличие остаточного брака при автоматизированном производстве является не следствием недостаточной точности оборудования, а имманентным свойством замкнутых детерминированных систем, функционирующих в открытой (непредсказуемой) среде. Предложенный математический аппарат позволяет перевести описание проблемы дефектообразования из качественной плоскости в количественную, обосновав необходимость интеграции человека в производственный цикл.

Выявленная корреляционная зависимость между сложностью контролируемой геометрии изделия и уровнем остаточного брака ($\rho = 0,92$) подтверждает гипотезу о принципиальных различиях систем пассивного и активного контроля. Системы активного контроля генерируют на порядок более высокие уровни дефектности и требуют приоритетного внедрения человеко-машинных интерфейсов.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку алгоритмов адаптивного перераспределения функций между автоматикой и оператором на основе байесовского оценивания состояния технологического процесса, а также на создание специализированных модулей компьютерного зрения для детекции дефектов в условиях высокой вариабельности производственной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ведомости. Рынок промышленной автоматизации в России вырастет вдвое к 2030 году [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2025/03/26/1100515-rinok-promishlennoi-avtomatizatsii> (дата обращения: 23.02.2026).
2. Рубин А. В. Оптимизация процессов управления качеством в производстве с применением ИИ / А. В. Рубин, Д. С. Серезлеев // МОЛОДОЙ УЧЁНЫЙ: сборник статей XVII Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2025. – С. 65-71.
3. Нелепов Р. А. Обзор и анализ существующих программных решений, выявление их достоинств и недостатков для систем автоматизированного выявления бракованной продукции с использованием компьютерного зрения или искусственного интеллекта [Электронный ресурс] // Парадигма. – 2025. – №5-5. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-i-analiz-suschestvuyuschih-programmnyh-resheniy-vyyavlenie-ih-dostoinstv-i-nedostatkov-dlya-sistem-avtomatizirovannogo> (дата обращения: 23.02.2026).
4. Моргунов В. В. Применение машинного зрения в области контроля качества / В. В. Моргунов // Международный студенческий научный вестник. – 2019. – № 2. – С. 30.
5. How Robotic Inspection Can Resolve 3D Quality Control Challenges [Электронный ресурс] // metrology.news. – URL: <https://metrology.news/how-robotic-inspection-can-resolve-3d-quality-control-challenges/#main> (дата обращения: 23.02.2026).
6. Выборнов И. И. К Вопросу об автоматизации контроля сварных соединений с использованием ультразвукового контроля и методов машинного обучения / И. И. Выборнов, Д. Л. Пиотровский // Журнал Современные наукоемкие технологии. – 2025. – №. 1. – С. 17-23.
7. Никмурзиев Р. Р. Станки с числовым программным управлением (ЧПУ) / Р. Р. Никмурзиев // The Way of Science. – 2014. – С. 26.



8. *Корнилова А. С. Метод ранговой корреляции и его применение / А. С. Корнилова, Р. А. Никонова, Д. Р. Дрягина // Современные инновации: теоретический и практический взгляд: сборник научных трудов по материалам VIII Междунар. науч.-практ. Конференции. – Москва, 2018. – С. 21-22.*
9. What Machine Vision Actually Does on a Production Line [Электронный ресурс]. – URL: <https://amdmachines.com/blog/introduction-to-machine-vision-for-manufacturing> (дата обращения: 25.02.2026).
10. ScienceDirect. Probabilistic Model [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/probabilistic-model> (дата обращения: 23.02.2026).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Винниченко Александра Валерьевна

Доцент, кандидат технических наук

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А

E-mail: alex23rain@guap.ru

Лепёхин Артем Андреевич

Студент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А

E-mail: artem040106@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vinnichenko Alexandra Valeryevna

Associate Professor, PhD

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: alex23rain@guap.ru

Lepekhin Artem Andreevich

Student

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: artem040106@mail.ru

Дата поступления: 12.05.2026

Дата принятия: 22.05.2026