

РЯЗАНСКИЙ ВАЛЕРИЙ ПАВЛОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДСТВА
ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ**

Специальность 2.5.22. «Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в автономной некоммерческой организации дополнительного профессионального образования «Научно-образовательный центр воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей» им. академика В.П. Ефремова»

Научный руководитель	Юдин Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры экономики и информационных технологий, Тульский филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова»
Официальные оппоненты	Анцев Виталий Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Транспортно-технологические машины и процессы", Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»
	Остапенко Мария Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по учебно-методической работе, Технологический институт, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет»
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет"

Защита состоится 24 марта 2026 года в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.2.385.03 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18, ауд. 437.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна", <https://sutd.ru/nauka/dissertacii/>

Автореферат разослан « » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Вагнер Виктория Игоревна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В соответствии с Указом Президента РФ № 474 от 21.07.2020г. «О национальных целях развития РФ до 2030 года» особое внимание уделяется повышению эффективности производственных процессов и качества отечественной продукции. Национальный проект «Средства производства и автоматизации», реализуемый в рамках данного Указа, ставит задачу развития высокотехнологичного станкостроения и модернизации производственных процессов, что невозможно без совершенствования инструментов контроля качества.

Стабильность и точность производственных процессов в машиностроении определяют качество и надёжность изделий, в частности транспортных средств, которые эксплуатируются в тяжёлых климатических условиях, например, в Арктической зоне. Согласно данным исследований, проведённых для условий эксплуатации транспортной техники, частота отказов узлов и агрегатов грузовых тягачей существенно возрастает при эксплуатации в экстремальных климатических условиях и на некачественных дорогах. В подобных условиях до 65 % отказов связаны с узлами, детали которых изготавливаются посредством высокоточной механической обработки, в том числе шлифованием, такие как шестерни и подшипники трансмиссии.

В условиях реализации Национального проекта «Средства производства и автоматизации» особую значимость приобретает разработка усовершенствованных методов контроля качества механообработки, позволяющих обеспечить требуемый уровень надёжности изделий при эксплуатации в экстремальных условиях.

Несмотря на широкое распространение инструментов статистического управления процессами (SPC), существующие методики контроля в основном ориентированы на массовые стабильные процессы и нормальное распределение выходных параметров. В условиях высокоточной шлифовки, характеризующейся асимметричными, автокоррелированными выборками и жёсткими допусками, традиционные карты Шухарта и CUSUM теряют как чувствительность, так и специфичность: они запаздывают с обнаружением реальных сдвигов и, наоборот, реагируют на «ложный» сигнал. Отсутствие адаптивных критериев напрямую снижает индекс воспроизводимости, что ведёт к росту доли скрытого брака, который проявляется уже в процессе эксплуатации техники.

В связи с этим возникает объективная необходимость разработки и внедрения усовершенствованных контрольных карт, которые позволят более тонко настраивать параметры контроля, что повысит чувствительность к реальным отклонениям и устойчивость к «шумовым» воздействиям. Разработка таких методик, а также обоснование подходов для выбора оптимальных параметров контрольных карт является важнейшей задачей, способствующей росту общей эффективности инструментов SPC. Это в свою очередь приведёт к повышению индекса воспроизводимости процессов механообработки изделий машиностроения, что повысит качество и надёжность техники.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности статистического управления процессами SPC в машиностроении, особенно при производстве ответственных узлов транспортных средств, детали которых подвергаются высокоточной механической обработке.

Степень разработанности темы исследования

Статистические основы управления качеством заложил У. Шухарт, разработав концепцию контроля стабильности процессов и цикл PDCA. Дальнейшее развитие методологии связано с работами Г. Доджа, Х. Роминга, Д. Деминга, Дж. Джурана, А. Фейгенбаума и Ф. Кросби, которые внесли существенный вклад в развитие выборочного контроля, распространение статистического управления качеством (СУК) и создание основ тотального управления качеством.

В период с 1950-х по 1980-е годы японская школа в лице К. Исикавы, Г. Тагути и Х. Кумэ обогатила методологию новыми инструментами, сделав статистические методы доступными для широкого круга работников и связав качество продукции с экономическими показателями. Это способствовало интеграции статистических подходов в международные стандарты ISO 9000.

В СССР развитие управления качеством шло по двум направлениям - нормативному и научно-методическому. Важным шагом стало принятие ГОСТ 15467-79, который создал единую терминологическую базу, а затем ГОСТ 40.9000 адаптировал международные стандарты к условиям плановой экономики.

Российская научная школа внесла существенный вклад в развитие статистических методов благодаря работам Б.А. Дубовикова, Ю.П. Адлера, А.И. Орлова, В.И. Гиссина, А.М. Кузьмина и других исследователей. Их труды позволили перейти от простого контроля к системному процессу управления качеством на основе статистических методов.

Проведённый анализ научной литературы показывает, что, несмотря на значительный теоретический и прикладной вклад отечественных и зарубежных исследователей в развитие SPC, по-прежнему отсутствуют научно-практические методы, которые, с одной стороны, увязывают параметры шлифовального процесса (шероховатость, сила резания, температурные поля) с пороговыми значениями статистических критериев, с другой стороны, позволяет целенаправленно повышать индекс воспроизводимости именно для прецизионной обработки деталей трансмиссий.

Цель работы - разработка научно-практического статистического инструментария контроля качества для повышения индекса воспроизводимости процесса механообработки при производстве изделий машиностроения.

Объектом исследования является статистическое управление процессами механообработки изделий машиностроения.

Предметом исследования выступают методы и модели построения и совершенствования инструментов качества - контрольных карт и карт кумулятивных сумм.

Для достижения поставленной цели поставлены задачи:

1. Провести анализ существующих контрольных карт и определить их влияние на индекс воспроизводимости процесса механообработки изделий машиностроения.
2. Разработать статистический инструментарий контроля качества процесса механообработки при производстве изделий машиностроения для карт кумулятивных сумм на основе выборочного среднего, стандартного отклонения в широком диапазоне параметров карты и объема подгрупп.
3. Разработать контрольные карты на основе выборочного среднего, стандартного отклонения, винзоризованного среднего и винзоризованной дисперсии с минимальной средней длиной серии при заданном сдвиге в процессе механообработки изделий машиностроения.
4. Разработать метод определения оптимальной средней длины контрольной карты на основе многокритериальной оптимизации по стоимости брака и стоимости «ложной тревоги» при производстве изделий машиностроения.
5. Разработать метод выбора оптимальной пары контрольных карт для одновременного контроля уровня и изменчивости процесса механообработки изделий машиностроения.
6. Провести апробацию разработанных научно-практических статистических инструментов контроля качества процесса механообработки.

Научная новизна:

1. Разработан статистический инструментарий контроля качества процесса механообработки при производстве изделий машиностроения для карт кумулятивных сумм на основе выборочного среднего, стандартного отклонения, включающий таблицы для выбора параметров карты, рекурсивные формулы начальных моментов и отличающийся тем, что построен в широком диапазоне параметров карты и объема подгрупп.
2. Разработаны контрольные карты на основе выборочного среднего, стандартного отклонения, винзоризованного среднего и винзоризованной дисперсии, которые в отличие от существующих карт Шухарта обладают минимальной средней длиной серии при заданном сдвиге в процессе механообработки изделий машиностроения.
3. Предложен метод определения оптимальной средней длины контрольной карты, отличающийся тем, что использует многокритериальную оптимизацию по стоимости брака и стоимости «ложной тревоги» при производстве изделий машиностроения.

4. Разработан метод выбора оптимальной пары контрольных карт для одновременного контроля уровня и изменчивости процесса механообработки изделий машиностроения, отличающийся тем, что основан на трех критериях, характеризующих контрольные карты.

Теоретическая значимость работы состоит в обобщении и развитии существующих методов статистического контроля качества производственных процессов механообработки.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанный метод выбора оптимальной пары контрольных карт для одновременного контроля уровня и изменчивости процесса механообработки изделий машиностроения позволяет строить выбор для разных участков производства и может быть практически использован на предприятиях машиностроительной отрасли. Практическое применение предложенных в диссертации методов при механообработке изделий машиностроения позволит улучшить контроль за качеством изделий и оперативно устранять причины отклонений в процессе.

Результаты научной работы внедрены в Акционерном обществе «Брянский автомобильный завод» (АО «БАЗ») (г. Брянск, Брянская область). Результатом внедрения стало повышение индекса воспроизводимости процесса механообработки изделий машиностроения (Акт внедрения результатов диссертации № 334 от 28.11.2025г).

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач использовались: математическая статистика, теория вероятностей, численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений, численные методы для решения стохастических дифференциальных уравнений, методы математического моделирования, метод симуляции Монте-Карло.

Положения, выносимые на защиту.

1. Статистический инструментарий контроля качества для карт кумулятивных сумм на основе выборочного среднего, стандартного отклонения, включающий таблицы для выбора параметров карты, рекурсивные формулы начальных моментов, который позволяет реагировать на небольшие отклонения по уровню и изменчивости, а также повысить индекс воспроизводимости процесса механообработки изделий машиностроения.

2. Разработаны контрольные карты на основе выборочного среднего, стандартного отклонения, винзоризованного среднего и винзоризованной дисперсии, позволяющие снизить уровень дефектов в процессе механообработки изделий машиностроения за счёт переменной средней длины серии контрольных карт.

3. Методы определения оптимальной средней длины контрольной карты и выбора оптимальной пары контрольных карт для одновременного контроля уровня и изменчивости, которые учитывают стоимость брака и стоимость «ложной тревоги» и обеспечивают повышение индекса воспроизводимости процесса механообработки изделий машиностроения.

Область исследований диссертации соответствует пункту 8 паспорта специальности 2.5.22 «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства» 8. Разработка научно-практического статистического инструментария управления качеством. 9. Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов.

Достоверность положений диссертации обеспечивается корректным использованием математических методов и подтверждается результатами статистических испытаний, а также эффективностью применения предложенных решений при внедрении.

Апробация результатов.

Основные положения и выводы диссертации докладывались и получили положительную оценку на семи научно-практических конференциях:

1. Десятый международный аэрокосмический конгресс IAC'2021. – Москва. – 2021.
2. IV Всероссийская научно-техническая конференция «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении». -Тула.- 2023.
3. Всероссийская научно-техническая конференция «От качества инструментов к инструментам качества». - Тула.- 2023.

4. VIII научно-технической конференции «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО». - Москва. – 2023.

5. IX научно-технической конференции «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО». – Москва. – 2024.

6. I научно-практической конференции «Экономика предприятий и интегрированных структур оборонно-промышленного комплекса». - Москва. – 2024.

7. X научно-технической конференции «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО». - Москва. – 2025.

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 17 научных работах, из которых 8 статей - в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по специальности 2.5.22, 2 статья – в прочих изданиях, 6 - в сборниках трудов научных конференций. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024690102.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и выводов, списка литературы из 157 наименований. Работа изложена на 263 страницах машинного текста, содержит 11 рисунков, 35 таблиц и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи, новизна исследования, представлена оценка достоверности, практическая ценность полученных результатов и положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена анализу существующих контрольных карт, их роли в обеспечении стабильности и точности процессов механообработки изделий машиностроения. В первой главе рассматривается историческое развитие, теоретические основы, практическое применение и интеграция различных типов контрольных карт, в частности карт Шухарта и карт кумулятивных сумм.

Детально анализируется эволюция контрольных карт Шухарта, выделены три этапа их развития: от ручного построения до современной интеграции с автоматизированными системами управления (SCADA, MES).

Значительное внимание уделено картам кумулятивных сумм, которые отличаются высокой чувствительностью к малым устойчивым изменениям процессов.

Приведён исторический обзор их развития, описаны теоретические основы и параметры настройки (k , h), а также подробно рассмотрена связь CUSUM-карт с последовательным тестом отношения правдоподобий. В работе приведены конкретные рекомендации по их практическому внедрению, включая алгоритмы реагирования на сигналы и контроль характеристик процесса шлифования, таких как диаметр, шероховатость.

На основе сравнения карт CUSUM с другими методами статистического контроля, такими как карты Шухарта, EWMA и GLR-карты выявлены условия предпочтительности использования CUSUM-карт, особенно при высокоточных операциях с небольшими допустимыми отклонениями и высокими затратами на дефекты.

В работе представлена подробная методика оценки индексов воспроизводимости процессов C_p и C_{pk} , раскрывающих количественную оценку качества обработки.

Индекс воспроизводимости, определяемый как

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma},$$

отражает «потенциальную» способность процесса при идеальном центрировании.

Для учёта смещения среднего используют индекс способности C_{pk} , определяемый иначе:

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \right\}$$

Средняя длина серии при $\delta=0$ ARL_0 и $ARL_1(\delta)$ при сдвиге $\delta \sigma$, выраженного в единицах стандартного отклонения, используются в качестве метрик эффективности контрольной карты. Они позволяют напрямую оценить ошибки I и II рода:

$$\alpha = \frac{1}{ARL_0}, \beta = 1 - \frac{1}{ARL_1}.$$

Экономически потери могут быть оценены через ошибки I и II рода, и, следовательно, через ARL_0 и $ARL_1(\delta)$:

$$\text{Потери} = C_f \cdot \alpha + C_d \cdot \beta = \frac{C_f}{ARL_0} + C_d \left(1 - \frac{1}{ARL_1}\right),$$

где C_f — стоимость ложной остановки, C_d — ущерб от брака одного изделия. Анализ формулы потерь приводит к выводу: чем выше ARL_0 при неизменном ARL_1 , тем дешевле контроль.

В заключительной части главы анализируются вклад усовершенствованных контрольных карт и экономико-статистической оптимизации, предложенных в последующих главах, в повышение показателей C_p и C_{pk} . Показано, что применение таких подходов существенно снижает изменчивость процессов и отклонения среднего, обеспечивая значительное повышение качества и экономическую эффективность производства.

Действующие карты Шухарта и карты кумулятивных сумм не предлагают методик выбора средней длины серии, параметров h , k , учёта дисперсии длины серии, что ограничивает чувствительность и устойчивость SPC-процедур.

Традиционные методы статистического управления процессами (SPC), основанные на контрольных картах Шухарта, имеют ряд принципиальных ограничений. В частности, фиксированная средняя длина серии ограничивает гибкость настройки контрольных процедур, что приводит либо к увеличению числа ложных тревог, либо к пропуску реальных нарушений в процессе. Кроме того, используемые статистики демонстрируют низкую эффективность и недостаточную устойчивость к выбросам. Так, контрольные карты средних значений базируются на статистиках, чувствительных к выбросам. Контрольные карты медиан используют статистики с пониженной эффективностью. Контрольные карты размахов характеризуются одновременно низкой эффективностью и неустойчивостью. Контрольные карты стандартного отклонения также подвержены сильному влиянию выбросов.

Существующие подходы по применению карт кумулятивных сумм не описывают методик для выбора параметров карты размахов и карты стандартных отклонений. Средняя длина серии при построении контрольных карт является ее важнейшим параметром. Не существует надежных методик для выбора средней длины серии при отсутствии сдвига для различных типов механообработки изделий машиностроения.

Для описания длины серии, как случайной величины, также важна ее дисперсия. При этом отсутствует информации о дисперсии длины серии для карты среднего, карты размахов и карты стандартных отклонений.

Критический анализ показал ограниченность традиционных карт Шухарта. Переход к адаптивным картам Шухарта и CUSUM-картам является необходимым условием для достижения целевых индексов $C_p/C_{pk} \geq 1,33$ в процессах высокоточной механообработки изделий машиностроения.

Анализ научной литературы выявил отсутствие научно-практических методов, которые бы связывали параметры шлифовального процесса с пороговыми значениями статистических критериев и одновременно повышали индекс воспроизводимости процесса механообработки при производстве изделий машиностроения. Актуальность исследования определяется необходимостью создания научно-практического статистического инструментария контроля качества процесса механообработки.

В главе 2 разработан научно-практический статистический инструментарий для повышения эффективности управления качеством с применением карт кумулятивных сумм и модифицированных карт Шухарта.

Разработан статистический инструментарий контроля качества процесса механообработки при производстве изделий машиностроения для карт кумулятивных сумм на основе выборочного среднего, стандартного отклонения, включающий таблицы для выбора параметров карты, рекурсивные формулы начальных моментов и отличающийся тем, что построен в широком диапазоне параметров карты и объема подгрупп.

Подход для построения инженерного инструментария базируется на Марковской модели с поглощающим состоянием, где ключевой характеристикой выступает средняя длина серии ARL .

Расчёт ARL включает дискретизацию пространства накопленной суммы с шагом Δ , определение переходных вероятностей под гипотезами H_0/H_1 и вычисление математического ожидания через фундаментальную матрицу. Справочный аппарат состоит из трёх компонентов: таблиц $ARL(k, h)$ для оценки устойчивости процесса ARL_0 и задержки обнаружения ARL_1 ; таблиц $h(k, ARL)$ для решения обратной задачи подбора порога h ; таблиц порогов h при фиксированном сдвиге ϵ . Верификация методом Монте-Карло показала согласование расчётов с относительной погрешностью порядка 1 %. Практическая значимость заключается в обеспечении баланса точности и оперативности настройки, интеграции в системы *SPC*, универсальности применения при механообработке изделий машиностроения.

Таблица 1

$ARL_0 \setminus k$	0.25	0.5	...	2
100	4.418	2.849	...	0.328
200	5.597	3.502	...	0.583
500	7.267	4.389	...	0.892
750	8.034	4.787	...	1.02
1000	8.585	5.071	...	1.11

Таблица 2

$ARL(\delta) \setminus k$	0.2	0.3	...	1
2	0.21	0.32	...	1.25
3	0.74	0.89	...	2.26
...
15	4.02	4.95	...	14.25
20	5.13	6.48	...	19.25

Разработанные таблицы позволяют инженерам оперативно подбирать параметры CUSUM без трудоёмких вычислений.

Разработана и описана рекурсивная формула для вычисления начальных моментов длины серии, что упрощает практическую настройку карт.

$$(I - R)\mu^{(n)} = R \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n}{k} \mu^{(k)} + \mathbf{1}, n \geq 1, \mu^{(0)} \equiv \mathbf{1}$$

где R — матрица переходов дискретизированной CUSUM-цепи.

В отличие от классических результатов Брука–Эванса, где даны выражения для факториальных моментов, предложен вывод именно для начальных моментов, что существенно упрощает интерпретацию и применение в инженерных таблицах для дисперсии и квантилей длины серии. Основой служит дискретизация интервала допустимых состояний CUSUM-статистики $[0, h]$ с шагом Δ и построение матрицы переходов P с единственным поглощающим состоянием при уровне h ; её непоглощающая часть R удовлетворяет условию $\rho(R) < 1$, что обеспечивает сходимость моментных рядов и корректность рекуррентных вычислений.

Корректность подтверждена имитационным моделированием по методу Монте-Карло: расхождения по ARL не превышают единиц процентов. Результаты формируют воспроизводимый инструмент настройки CUSUM-карт, связывающий теорию с механообработкой изделий машиностроения.

Статистический инструментарий контроля качества для карт кумулятивных сумм позволяет реагировать на небольшие отклонения по уровню и изменчивости, а также повысить индекс воспроизводимости процесса механообработки изделий машиностроения.

Разработана контрольная карта выборочных средних с переменными контрольными границами, обеспечивающими минимальную среднюю длину серии при заданном критическом

смещении среднего процесса. Проектирование контрольной карты выборочного среднего с переменным коэффициентом контрольных границ k , ориентировано на минимизацию средней длины серии при технологически значимом сдвиге уровня процесса. Постановка задачи предполагает одновременное соблюдение целевого уровня устойчивости ARL_0 и снижение задержки обнаружения, что критично для операций финишного шлифования с жёсткими допусками. Предполагается нормальная модель с независимыми подгруппами размера n : $N(\mu, \sigma^2)$, статистика \bar{X} стандартизуется как $Z = (\bar{X} - \mu)/\sigma/\sqrt{n}$, а двусторонние контрольные границы задаются в форме $[\mu - k\sigma/\sqrt{n}, \mu + k\sigma/\sqrt{n}]$. Оптимизационная задача формулируется как минимизация ARL_1 при ограничении $ARL_0 = ARL_0^{target}$. Вероятности сигнала от карты под H_0 и H_1 выражаются через стандартное нормальное распределение; для независимых подгрупп $ARL = 1/p_{signal}$, что позволяет решать обратную калибровочную задачу: по целевому ARL_0 найти k , затем на рабочем δ оценить ARL_1 и выполнить одномерный поиск по k , поддерживая ARL_0 постоянным. Практическая последовательность шагов включает: 1. выбор n и ARL_0^{target} с учётом класса операции; 2. задание δ в долях σ по экономическому порогу заметности; 3. калибровку k ; 4. вычисление ARL_1 ; δ, n и поиск минимума; 5. документирование итоговых параметров и эксплуатационных метрик ARL_0, ARL_1 и ожидаемой частоты ложных тревог. Разработанная карта сохраняет интерпретируемость классической X-карты и совместимость с регламентами, при этом повышая чувствительность к технологически значимым смещениям.

Разработана контрольная карта изменчивости процесса на основе выборочного стандартного отклонения с переменной длиной серии, которая в отличие от существующих карт Шухарта обладает минимальной средней длиной серии при заданном сдвиге в процессе механообработки изделий машиностроения. На основе мультипликативной модели сдвига изменчивости процесса предложен новый подход к построению контрольных границ с переменным коэффициентом. Разработанная S-карта Шухарта для мониторинга изменчивости процесса, оптимизирована по критерию минимальной средней длины серии ARL_1 при заданном технологически значимом росте дисперсии ε и фиксированном уровне устойчивости ARL_0^{target} . В основе - строгая вероятностная модель с явным выражением вероятности сигнала через квантили распределения χ^2 ; задача сводится к одномерной оптимизации по коэффициенту ширины зоны k . Для подгруппы объёма n границы задаются как $L(k) = \max(0, \mu_s - k\sigma_s)$ и $U(k) = \mu_s + k\sigma_s$, где μ_s и σ_s - моменты выборочного стандартного отклонения S под контролем. Алгоритм включает: расчёт μ_s и σ_s , перебор k с вычислением $p(1; k)$ и $p(\varepsilon; k)$; выбор k , минимизирующего ARL_1 при соблюдении $ARL_0 \geq ARL_0^{target}$. Верификация проведена аналитически (граничные режимы) и методом Монте-Карло; расхождения в пределах статистической погрешности. Предложенная карта обеспечивает выигрыш по ARL_1 относительно классических констант B_3, B_4 для построения контрольных границ при равном ARL_0 , особенно в диапазоне $\varepsilon \in [1,3; 1,8]$, критичном для финишного шлифования. Результаты табулируются для практических n и ARL_0^{target} , обеспечивая простое и воспроизводимое проектное правило: границы минимальны при заданной частоте ложных тревог.

Для практического использования были построены таблицы. Ниже представлена таблица для $n=9$.

Таблица 3 - Значения $ARL_1(k_{opt})$ в зависимости от сдвига ε при целевых значениях ARL_0 .

ARL_0	k_{opt}	ε									
		1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3
100	2.57	13.16	4.27	2.31	1.64	1.34	1.2	1.12	1.07	1.05	1.03
200	2.82	19	5.37	2.68	1.8	1.43	1.25	1.15	1.09	1.06	1.04
300	2.97	23.95	6.21	2.94	1.91	1.49	1.28	1.17	1.1	1.07	1.04
500	3.16	32.52	7.55	3.34	2.08	1.57	1.33	1.2	1.12	1.08	1.05
1000	3.41	49.73	9.92	3.99	2.34	1.7	1.4	1.24	1.15	1.1	1.06

Построена контрольная карта средних на основе винзоризованного среднего, которая в отличие от существующих карт Шухарта обладает минимальной средней длиной серии при заданном сдвиге в процессе механообработки изделий машиностроения. Обоснована и разработана робастная карта, в которой в качестве статистики используется винзоризованное среднее, определяемое следующим образом:

$$\bar{W} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i$$

где

$$W_i = \begin{cases} X_{(r+1)}, i \leq r \\ X_{(i)}, r+1 \leq i \leq n-r, (\gamma = \frac{r}{n}) \\ X_{(n-r)}, i \geq n-r+1 \end{cases}$$

Требуется найти оптимальное значение $k_{opt} = \operatorname{argmin}_{k>0} ARL(k, \delta)$ при условии $ARL(k, 0) = ARL_0^{target}$. То есть так, чтобы при сохранённом уровне ложных тревог карта максимально быстро обнаруживала заранее заданный технологически значимый относительный сдвиг δ , выраженный в единицах σ .

Таблица 4 - Значения $ARL_1(k_{opt})$ в зависимости от сдвига δ при целевых значениях ARL_0 для $n=12, r=1$.

$ARL_{0, \text{целевое}}$	k_{opt}	δ				
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
100	2.58	5.0	1.74	1.17	1.04	1.01
250	2.88	7.9	2.13	1.27	1.07	1.02
370	3.00	9.9	2.35	1.33	1.09	1.03
500	3.10	12.0	2.59	1.38	1.11	1.03
750	3.21	14.9	2.89	1.45	1.13	1.04
1000	3.30	16.9	3.08	1.49	1.14	1.04

Пример. Для параметров $n=12, r=1, \delta=1.5$ находим $k_{opt}=3.0$, что обеспечивает сокращение задержки обнаружения на примерно 18 % по сравнению с классической схемой « $\pm 3\sigma$ » при том же уровне ложных сигналов $ARL_0 = 370$.

Практические преимущества предложенной карты: карта сфокусирована на экономически критичном сдвиге так, что минимальная задержка именно там, где убытки максимальны; карта устойчива к одиночным выбросам за счёт винзоризации, карта обеспечивает требуемый ARL_0 , сохраняя неизменной частоту ложных тревог. При этом внедрение карты остается простым, меняется только множитель k , процедуры интерпретации остаются привычными.

Разработанная карта винзоризованного среднего позволяет одновременно гарантировать стабильность процесса (фиксированный ARL_0), повысить скорость реагирования на критический сдвиг и уменьшить чувствительность к аномальным наблюдениям.

Разработана контрольная карта изменчивости на основе винзоризованной дисперсии $S_{W,r}^2$, обеспечивающая робастность к выбросам и целенаправленную чувствительность к технологически значимым сдвигам дисперсии. Для нормального процесса $X \sim N(\mu, \sigma_0^2)$ (при $\mu = 0, \sigma_0 = 1$) после изменения $\sigma = \varepsilon \sigma_0$ формируется винзоризованная выборка W_i объёмом n с заменой r крайних значений. Оценка дисперсии вычисляется как

$$S_{W,r}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2.$$

На основе аналитических выражений для $E[S_{W,r}] = c_4(n, r)$ и $\text{Var}[S_{W,r}] = 1 - c_4^2(n, r)$ вводится «эффективное» число степеней свободы $\nu_r = \frac{2c_4^2(n, r)}{1 - c_4^2(n, r)}$, что позволяет аппроксимировать распределение статистики

$$Y = \frac{(n-1)}{c_{r,n}\sigma^2} S_{W,r}^2$$

где $c_{r,n} = c_4^2(n, r) + \text{Var}[S_{W,r}]$ распределением $\chi_{\nu_r}^2$ с погрешностью $\leq 2\%$ при $5 \leq n \leq 25, r \leq 3$. Контрольные границы LCL и UCL задаются симметрично через k и переводятся в квантили $\chi_{\nu_r}^2$ для расчёта $ARL(\varepsilon)$. Оптимизация по k минимизирует $ARL_1(k, \varepsilon^*)$ при условии $ARL_0(k) \geq ARL_{0,\text{целевое}}$. Практическая ценность: устойчивость к выбросам, ускоренное обнаружение экономически критичных сдвигов ε^* , совместимость с классическими картами и простота внедрения через готовые таблицы k . Метод рекомендован для механообработки изделий машиностроения, где стабильность дисперсии критична для качества.

ARL_0^{target}	k_{opt}	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.4	2.8	3
n=6									
100	3.06	10.47	3.39	1.9	1.	1.2	1.06	1.02	1.01
250	3.36	18.36	4.75	2.33	1.59	1.29	1.08	1.03	1.02
500	3.56	27.68	6.1	2.72	1.75	1.37	1.11	1.04	1.02
750	3.66	34.36	6.97	2.95	1.84	1.41	1.12	1.04	1.02
1000	3.74	41.06	7.78	3.16	1.92	1.45	1.13	1.04	1.03
n=9									
100	3.28	7.19	2.27	1.39	1.13	1.05	1.01	1	1
250	3.56	11.79	2.93	1.57	1.2	1.08	1.01	1	1
500	3.76	17.44	3.62	1.75	1.27	1.1	1.02	1	1
750	3.86	21.46	4.05	1.86	1.3	1.12	1.02	1	1
1000	3.94	25.49	4.45	1.95	1.34	1.13	1.02	1	1

Разработанная карта изменчивости на основе винзоризованной дисперсии и процедура оптимизации k позволяют одновременно держать стабильный уровень ложных сигналов и ускорять обнаружение заданного роста σ , сохраняя при этом робастность оценки.

Проведена количественная оценка влияния разработанного научно-практического инструментария на показатели воспроизводимости процессов шлифования, выраженные через коэффициенты C_p и C_{pk} . На основе проведённых исследований сформулированы практические рекомендации по выбору схем контроля в зависимости от этапов обработки и требований к воспроизводимости процесса: оптимизированные \bar{X} - и σ -карты для финишного шлифования, динамическая карта CUSUM для промежуточной обработки и адаптивной карты Шухарта для черновой проходки.

Сделан вывод о том, что предложенный научно-практический статистический инструментарий управления качеством для карт кумулятивных сумм статистически значимо ($p < 0.01$) улучшает показатели C_p/C_{pk} .

Глава 3 посвящена разработке метода определения оптимальной средней длины контрольной карты, который использует многокритериальную оптимизацию по стоимости брака и стоимости «ложной тревоги» при производстве изделий машиностроения.

Предложен метод определения оптимальной средней длины серии для \bar{X} -карты с переменными контрольными границами в задачах контроля уровня процессов механообработки. Метод предназначен для определения оптимальной средней длины контрольной карты,

минимизирующей суммарные затраты на контроль при заданных экономических параметрах и характеристиках процесса.

Выявлена двойственная природа задачи оптимизации ARL_0 : минимизация потерь от ложных срабатываний и сокращение затрат, связанных с поздним обнаружением дефектов. Сформулированы экономико-статистические критерии, отражающие потери от частых ложных тревог и от задержек обнаружения реальных сдвигов процесса.

Предложена интегральная функция потерь, учитывающая стоимость ложных срабатываний и дефектов продукции. Метод основан на минимизации целевой функции ожидаемых затрат:

$$E(C) = E(C_f) + E(C_d) = \frac{C_f}{ARL_0} + C_d \cdot n \cdot \frac{ARL(\delta)}{\lambda},$$

где

$E(C_f)$ — ожидаемые затраты на «ложные» тревоги,

$E(C_d)$ — ожидаемые затраты на брак,

C_f — стоимость ложной тревоги,

C_d — стоимость единицы брака,

n — размер подгруппы,

λ — среднее число подгрупп между реальными сдвигами,

δ — целевой сдвиг в σ -единицах,

$ARL(\delta)$ — средняя длина серии при заданном сдвиге.

Обоснованы ключевые допущения: редкость и независимость сдвигов (поток Пуассона), линейность стоимости брака и применимость табличных ARL -значений к реальным производственным условиям.

Определены основные параметры, влияющие на оптимизацию: критичный сдвиг уровня (δ^*), стоимостные коэффициенты потерь от ложных тревог (C_f) и дефектов (C_d), интервал между выборками (τ) и размер выборки (n).

Поиск оптимального значения ARL_0 проводится на основе перебора табличных значений и выбора решения, доставляющего минимум интегральных потерь.

Реализация поиска включает следующие этапы. Выбор профиля данных: пара карт $\bar{mean} + S$ для чистых данных, $X_W + S_W$ для умеренно/грязных данных. Задание исходных параметров (C_f , C_d , n , λ , δ). Оптимизационный процесс: формирование сетки значений ARL_0 , расчет $E(C_f)$, определение $ARL(\delta)$, расчет $E(C_d)$, суммирование затрат. Определение оптимума: выбор значения ARL_0^* , при котором $E(C)$ минимальна, и соответствующего множителя контрольных границ k .

Проанализирована чувствительность решения к вариациям исходных параметров, продемонстрировав стабильность оптимального ARL_0 при умеренных изменениях стоимостных и частотных характеристик процесса.

Метод позволяет эффективно управлять затратами на контроль качества, обеспечивая оптимальное соотношение между затратами на ложные тревоги и брак.

Разработан метод выбора оптимальной пары контрольных карт для одновременного контроля уровня и изменчивости процесса механообработки изделий машиностроения, отличающийся тем, что основан на трех критериях, характеризующих контрольные карты.

Данный метод базируется на трёх интегральных критериях: относительной эффективности (RE), интегральной чувствительности (AUC) и робастности к выбросам (RR). Критерий RE показывает снижение дисперсии статистики по сравнению с выборочным средним, что позволяет быстрее и точнее обнаруживать отклонения. AUC отражает суммарный риск задержки сигнализации на малых и средних смещениях. RR характеризует устойчивость карт к выбросам и неидеальным распределениям данных.

Корреляционный анализ показал значительную отрицательную корреляцию между RE и AUC ($\rho = -0,81$), подтверждая взаимодополняющий характер критериев. Нормализация критериев по единой шкале от 0 до 1 позволяет использовать взвешенную сумму для интегральной оценки.

Предложен адаптивный подход к выбору весовых коэффициентов на основе экспертного анализа иерархий, позволяющий учитывать различные сценарии качества данных: от «чистых» до «сильно загрязненных». В результате анализа чувствительности методики подтверждена устойчивость интегрального ранжирования карт при варьировании весов на $\pm 20\%$.

Выбор оптимальной пары проходит следующие шаги.

Шаг 1. Формирование матрицы решений карт уровня, формирование матрицы решений карт изменчивости.

Шаг 2. Нормировка показателей к интервалу (0, 1) с помощью min-max-преобразования.

Шаг 3. Назначение веса каждому критерию. Разные типы механообработки требуют разных весовых коэффициентов

Шаг 4. Расчет интегрального балла L_i карт уровня процесса и интегрального балла V_k - карт изменчивости

$$\begin{aligned} L_i &= wE \cdot E_{norm} + wA \cdot A_{norm} + wR \cdot R_{norm} \\ V_k &= wE \cdot E_{norm} + wA \cdot A_{norm} + wR \cdot R_{norm} \end{aligned}$$

Шаг 5. Расчет интегрального балла пары S_j

$$S_j = wL \cdot L_i + wV \cdot V_k, \text{ где } wL = wV = 0.5.$$

В методе выбора оптимальной пары контрольных карт используется совместная оптимизация пары контрольных карт, обеспечивающая выполнение условий по допустимому уровню ложных тревог ($\alpha \leq 1\%$) и скорости обнаружения заданных сдвигов. Экспериментальная валидация на основе метода Монте-Карло подтвердила эффективность предложенной методики.

Разработанный метод выбора оптимальной пары контрольных карт позволяет обоснованно устанавливать оптимальные контрольные границы \bar{X} -карт, минимизировать суммарные экономические потери и обеспечивая при этом оперативное выявление дефектов при производстве ответственных узлов транспортных средств, детали которых подвергаются высокоточной механической обработке.

В главе 4 проведена апробация разработанных научно-практических статистических инструментов контроля качества процесса механообработки, а также практическое подтверждение эффективности предлагаемых методов.

В главе представлена практическая реализация разработанного в диссертации метода выбора оптимальной средней длины контрольной карты на основе многокритериальной экономико-статистической минимизации ожидаемых потерь от «ложных тревог» и задержанного выявления реальных сдвигов процесса. Метод опирается на интегральную функцию затрат $E(C) = C_f / ARL_0 + C_d \cdot n \cdot ARL(\delta) / \lambda$, где первое слагаемое отражает цену ложных остановов (ошибка I рода), а второй - ожидаемые потери от выпуска дефектной продукции до момента обнаружения критичного сдвига (ошибка II рода).

Теоретическое обоснование двойственной природы оптимизации ARL_0 , допущения о редких независимых сдвигах (поток Пуассона) и алгоритм перебора табличных ARL -значений с выбором параметра k , обеспечивающего минимум $E(C)$ при заданных экономических коэффициентах, изложены в главе 3 и методических разделах работы. Это обеспечивает согласованный выбор настроек \bar{X} -карты с переменными контрольными границами под реальные условия механообработки, увязывая статистическую чувствительность со стоимостью принятия решений в производстве.

В главе 4 представлено практическое применение разработанного в диссертации метода выбора оптимальной пары контрольных карт для совместного мониторинга уровня и изменчивости технологического процесса механообработки. Метод основан на трёх интегральных критериях - относительной эффективности RE , интегральной чувствительности AUC и робастности RR - и использует нормированные шкалы с последующим взвешенным агрегированием. Выбор весов осуществляется адаптивно: для «чистых» измерений при

сверхточном шлифовании придаётся больший удельный вес эффективности и чувствительности $w_E = 0,50$; $w_A = 0,40$; $w_R = 0,10$, при «умеренно загрязнённых» данных акцент смещается в сторону баланса между всеми тремя компонентами (0,40; 0,30; 0,30), а для «грубых» измерений с множественными выбросами на первый план выводится робастность (0,25; 0,25; 0,50). Эта настройка отражает практическую логику: чем выше вероятность отклонений от нормальности и появления выбросов, тем существеннее вклад RR в итоговое решение.

Практическая значимость для операций шлифования и родственных видов механообработки изделий машиностроения заключается в том, что метод обеспечивает не просто выбор отдельной карты, а согласованную пару для уровня и изменчивости, оптимизированную под реальные рискованные профили данных. Это снижает суммарные экономические потери за счёт более быстрого и устойчивого реагирования на технологически значимые сдвиги при контролируемой частоте ложных остановов. А также упрощает регламент настройки (через веса и таблицы ARL) и повышает надёжность мониторинга без усложнения процедур ввода в эксплуатацию.

Проведен анализ влияния внедрения статистических методов контроля на индекс воспроизводимости процесса шлифования - C_p . В качестве основных характеристик качества выбраны геометрическая точность и шероховатость поверхности R_a беговых дорожек колец подшипников.

Методика оценки воспроизводимости основана на расчёте C_p и последующего пересчёта вероятности дефектности в ppm-метрику (число дефектов на миллион изделий). Выполнено сравнение воспроизводимости процесса до и после интеграции пар контрольных карт.

Таблица 6 - Значения индекса воспроизводимости «до» и «после» внедрения усовершенствованных контрольных карт

Характеристика	«до» внедрения пар усовершенствованных контрольных карт		«после» внедрения пар усовершенствованных контрольных карт	
	C_p	ppm	C_p	ppm
Точность (диаметр D)	0,95	4 650	1.45	23
Шероховатость R_a	1,02	2 370	1.70	0.5

Непараметрический критерий Манна–Уитни с уровнем значимости $p < 0,001$ подтверждает статистическую значимость улучшений; прирост C_p на 0,5–0,7 единиц.

Приведены практические рекомендации по интеграции разработанных стохастических моделей и контрольных карт в систему управления шлифовальным станком с ЧПУ для серийного производства колец подшипников.

Таким образом, доказано, что внедрение инструментов контроля качества процессов механообработки изделий машиностроения обеспечивает значимое повышение индекса воспроизводимости процесса, снижая дефектность и существенно повышая стабильность характеристик качества. Предложенная схема интеграции аналитических и статистических методов подтверждает эффективность и перспективность применения на практике, закладывая основу для дальнейшего масштабирования на другие процессы высокоточной механообработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель диссертации, разработка научно-практического статистического инструментария контроля качества для повышения индекса воспроизводимости процесса механообработки при производстве изделий машиностроения, достигнута за счет решения поставленных задач.

Проведён анализ существующих контрольных карт на предмет эффективности статистик, на которых они основаны, а также на предмет устойчивости данных статистик к «выбросам». Анализ показал, что традиционные методы SPC, основанные на контрольных картах Шухарта, имеют ряд ограничений, в частности, фиксированная средняя длина серии ограничивает гибкость настройки контрольных процедур, что приводит либо к увеличению числа ложных тревог, либо к пропуску реальных нарушений в процессе механообработки изделий машиностроения.

Разработан статистический инструментарий контроля качества для карт кумулятивных сумм на основе выборочного среднего, стандартного отклонения, включающий таблицы для выбора параметров карты, рекурсивные формулы начальных моментов и отличающийся тем, что построен в широком диапазоне параметров карты и объема подгрупп и позволяет реагировать на небольшие отклонения по уровню и изменчивости, а также повысить индекс воспроизводимости процесса механообработки изделий машиностроения.

Разработаны контрольные карты на основе выборочного среднего, стандартного отклонения, винзоризованного среднего и винзоризованной дисперсии, которые в отличие от существующих карт Шухарта обладают минимальной средней длиной серии при заданном сдвиге, что позволяет снизить уровень дефектов в процессе механообработки изделий машиностроения.

Разработан метод определения оптимальной средней длины контрольной карты, метод выбора оптимальной пары контрольных карт для одновременного контроля уровня и изменчивости процесса, обеспечивающие повышение индекса воспроизводимости процесса механообработки изделий машиностроения.

Разработанный научно-практический статистический инструментарий контроля качества обеспечил повышение индекса воспроизводимости процесса шлифования на 0.5 пунктов по точности и 0.7 пунктов по шероховатости, что привело к снижению дефектности с 3 510 ppm до 11,8 ppm процесса производства изделий машиностроения.

Предложены рекомендации и перспективы дальнейшей разработки вопросов, связанных с совершенствованием инструментов контроля качества процессов механообработки изделий машиностроения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по специальности 2.5.22.

1. Рязанский В.П. Оптимизация пары контрольных карт для одновременного контроля уровня и изменчивости процесса механообработки изделий машиностроения. // Справочник. Инженерный журнал. – 2025. – №12. – с. 41-53.

2. Научно-практический статистический инструментарий управления качеством при производстве изделий машиностроения / Рязанский В.П., Юдин С.В. // Наука и бизнес: пути развития. – 2025. – № 10. – с. 64-69.

3. Совершенствование системы управления качеством высокотехнологичной продукции/ Рязанский В.П. [и др.] //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. –2025. – №5. – с.107-116.

4. Методика определения параметров контрольной карты усиленного размаха карт / Рязанский В.П. [и др.] //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – №8. – с.179-185.

5. Методика определения параметров контрольных карт / Рязанский В.П., Юдин С.В. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – №4. – с.83-90.

6. Развитие статистических методов управления качеством изделий оборонной продукции на основе двумерной модели распределения / Рязанский В.П. [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. –2023. – №5. – с. 453-463.

7. Гамма-функция как основа трехпараметрического распределения параметров точности и надежности изделий оборонной промышленности / Рязанский В.П., Юдин С.В. //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – №2.– с.603-612.

8. Совершенствование статистических методов исследования в системе управления качеством и надёжностью продукции предприятия / Рязанский В.П. [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. –2021. – №6. – с. 294-302.

Объекты интеллектуальной собственности:

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024690102 Российская Федерация. Программа АСКАП. № 2022683101: дата поступления 25.11.2024: Дата регистрации: 12.12.2024 / правообладатель АО «ГосНИИП», авторы: Афанасьев В.Б., Калинин Е.А., Рязанский В.П.

Публикации в других изданиях и материалах конференций:

10. Способ подтверждения нижней доверительной границы безотказности изделий однократного применения / Рязанский В.П. [и др.] // X научно-техническая конференция «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО». -Москва. – 2025. С.15-16.

11. К вопросу о затратах на обеспечение качества и надежности продукции оборонно-промышленного комплекса / Рязанский В.П. [и др.] // I научно-техническая конференция «Экономика предприятий и интегрированных структур оборонно-промышленного комплекса», - Москва. – 2024. - С.9-11.

12. Развитие математических и программных методов анализа результатов измерительного контроля продукции / Рязанский В.П. [и др.] // IX научно-техническая конференция «Математическое моделирование, инженерные расчеты и программное обеспечение для решения задач ВКО», - Москва. – 2024. - С.5-6.

13. Развитие статистических методов управления качеством изделий оборонной продукции на основе двумерной модели распределения / Рязанский В.П., Афанасьев В.Б. // Всероссийской научно-технической конференции «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (18-20 апреля 2023г.) Тула: Сборник докладов Издательство ТулГУ. - 2023. С.192-196.

14. Развитие статистических методов управления качеством изделий оборонной продукции на основе двумерной модели распределения / Рязанский В.П., Афанасьев В.Б. // Всероссийской научно-технической конференции «От качества инструментов к инструментам качества» Тула: Сборник докладов. Издательство ТулГУ. - 2023. С.192-196.

15. Повышение точности и надежности показателей качества продукции посредством улучшения оценок параметров равномерного распределения / Рязанский В.П., Юдин С.В. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. –2022. – №12. – С.668-678.

16. Особенности информационного обеспечения статистического контроля качества оборонной продукции однократного применения при мелкосерийном производстве. / Рязанский В.П. [и др.] // Научный вестник Оборонно-промышленного комплекса России, спецвыпуск. – 2022. – с. 46-57.

17. К вопросу оценки качества и надёжности продукции при мелкосерийном производстве / Рязанский В.П. [и др.] // Десятый международный аэрокосмический конгресс IAS'2021. Москва. – 2021. – С.146-149.