

В диссертационный совет 24.2.385.03 на базе  
федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Санкт-Петербургский  
государственный университет промышленных  
технологий и дизайна»

**УТВЕРЖДАЮ**

Первый проректор

ФГБОУ ВО

МИРЭА – Российский

технологический университет»,

Н.И. Прокопов /

*Шварц* 2026 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Рязанского Валерия Павловича на тему «Совершенствование контроля качества производства изделий машиностроения на основе разработки научно-практического статистического инструментария», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.22. «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства».

#### **Актуальность темы**

Диссертационная работа В.П. Рязанского посвящена совершенствованию статистического контроля качества в процессах механообработки изделий машиностроения на основе разработки научно-практического статистического инструментария, в том числе на основе контрольных карт Шухарта, карт кумулятивных сумм, а также их робастным и экономически оптимизированным модификациям. Актуальность темы обусловлена ростом требований к точности и

стабильности технологических процессов, повышением доли высокоточных операций, в частности шлифования и необходимостью обеспечения целевых индексов воспроизводимости  $C_p/C_{pk}$  в условиях жестких допусков, неоднородности данных и неидеальности измерений.

В диссертации обосновано, что традиционные схемы SPC, ориентированные на предпосылки нормальности и независимости наблюдений, при контроле прецизионных операций часто демонстрируют недостаточную чувствительность к технологически значимым малым сдвигам и, напротив, избыточно реагируют на одиночные выбросы и «шумовые» воздействия. В результате ухудшается качество управленческих решений в контуре контроля, растут потери от скрытого брака и ложных остановов. В этой связи разработка и регламентация инженерно-применимых процедур настройки карт по метрикам ARL/ATS и по экономическим критериям является своевременной и практически значимой.

**Научная новизна результатов**, полученная соискателем, состоит в следующем:

— разработка статистического инструментария для проектирования CUSUM-карт по выборочному среднему и стандартному отклонению, включающего табулированные зависимости  $ARL(k, h)$  и решения обратной задачи подбора порогов для заданного  $ARL_0$  и целевого сдвига;

— вывод и практическая реализация рекурсивных формул для вычисления начальных моментов длины серии в поглощающей марковской модели дискретизированной CUSUM-статистики, что позволяет рассчитывать дисперсию и квантили длины серии наряду с ARL;

— разработка контрольных карт на основе выборочного среднего и стандартного отклонения с переменными контрольными границами, оптимизированных по критерию минимизации  $ARL_1$  при фиксированном уровне ложных тревог  $ARL_0$ ;

— разработка робастных карт уровня и изменчивости на основе винзоризованного среднего и винзоризованной дисперсии, обеспечивающих устойчивость к выбросам при целевой чувствительности к технологически значимым сдвигам;

— предложение метода выбора оптимальной средней длины серии и метода выбора оптимальной пары карт для уровня и изменчивости на основе многокритериальной и экономико-статистической оптимизации с учетом стоимости брака и ложных остановов.

**Теоретическая значимость полученных соискателем результатов** определяется развитием методологии статистического контроля качества: в работе предложены вычислительные и табличные процедуры проектирования CUSUM-карт в широком диапазоне параметров ( $k$ ,  $h$ ,  $n$ ), получены рекурсивные формулы для начальных моментов длины серии в Марковской постановке, а также разработаны оптимизационные подходы к выбору настроек контрольных карт по заданным рисковому и экономическим профилям. Результаты развивают аппарат оценки эффективности карт не только через ARL, но и через дисперсию длины серии и интегральные показатели чувствительности.

**Практическая значимость** полученных соискателем научных результатов состоит в создании набора инженерных инструментов (таблиц параметров, алгоритмов расчета, регламентов выбора), позволяющих оперативно настраивать контрольные процедуры под конкретный тип операции механообработки и требуемый уровень  $C_p/C_{pk}$ . Полученные результаты могут быть использованы предприятиями машиностроительной отрасли при внедрении SPC в контуры MES/SCADA и в регламенты управления качеством.

**Достоверность и обоснованность основных положений и выводов работы** обеспечивается корректным использованием аппарата математической статистики и теории вероятностей, строгой постановкой задач проектирования контрольных

процедур, применением марковских моделей с поглощающим состоянием для расчета характеристик длины серии, а также верификацией расчетных результатов методом имитационного моделирования Монте-Карло. Обоснованность выводов подтверждается логической связностью исследования, сопоставлением с известными подходами SPC и апробацией предложенных решений на данных производственного контроля и в рамках внедрения на промышленном предприятии.

### **Содержание и структура работы**

Диссертационная работа имеет чёткую логическую структуру и включает введение, четыре основные главы, заключение, список литературы и приложения. Во введении обоснована актуальность исследования в контексте национальных целей развития РФ и национального проекта России «Средства производства и автоматизации», сформулированы цель и задачи работы, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость, определены объект и предмет исследования, методологическая база, а также положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации результатов (7 конференций), публикационной активности (17 работ, из них 8 — в изданиях, рекомендованных ВАК) и практическом внедрении разработок в АО «БАЗ» (Акт № 334 от 28.11.2025).

В первой главе проведён развёрнутый анализ существующих контрольных карт (Шухарта, CUSUM, EWMA), раскрыто их историческое развитие и современное применение в управлении процессами механообработки. Выявлены ключевые ограничения традиционных карт Шухарта - фиксированная средняя длина серии (ARL), повышенная чувствительность к выбросам и недостаточная эффективность при обнаружении малых сдвигов процесса. Обоснована необходимость перехода к адаптивным схемам контроля (CUSUM, винзоризованным картам) для высокоточной обработки. Введены и детализированы основные метрики оценки качества: индексы воспроизводимости и, средняя длина серии, а также модель экономических потерь через ошибки I и II рода.

Во второй главе представлен разработанный статистический инструментарий для карт кумулятивных сумм, включающий таблицы параметров, рекурсивные формулы начальных моментов и процедуру дискретизации пространства накопленной суммы. Сформированы контрольные карты с переменными границами: для выборочного среднего, для стандартного отклонения, а также карты на основе винзоризованного среднего и дисперсии, обеспечивающие робастность к выбросам. Верификация методом Монте-Карло подтвердила высокую точность расчётов с погрешностью не более 1 %.

Третья глава посвящена методам оптимизации контрольных карт по экономическим критериям. Разработан подход к определению оптимальной средней длины серии, основанный на многокритериальной минимизации суммарных затрат. Предложен метод выбора оптимальной пары карт для контроля уровня и изменчивости процесса, базирующийся на трёх интегральных критериях: относительной эффективности (RE), интегральной чувствительности (AUC) и робастности к выбросам (RR). Описан алгоритм взвешенного агрегирования критериев с адаптивными весами, учитывающими характер данных («чистые», «умеренно загрязнённые», «грубые»).

В четвёртой главе представлена апробация разработанных методов на примере процесса шлифования колец подшипников. Экспериментально подтверждено повышение индексов воспроизводимости: по точности вырос с 0,95 до 1,45, что привело к снижению дефектности с 4 650 ppm до 23 ppm, по шероховатости - с 1,02 до 1,70 и при этом дефектность уменьшилась с 2 370 ppm до 0,5 ppm. Статистическая значимость полученных улучшений подтверждена с помощью критерия Манна–Уитни. Даны практические рекомендации по интеграции предложенных инструментов в системы ЧПУ для серийного производства.

В заключении подведены итоги исследования, подтверждены выполнение поставленных задач и достижение цели - разработка статистического

инструментария, обеспечивающего рост индексов воспроизводимости на 0,5–0,7 пунктов и снижение дефектности до 11,8 ppm. Обозначены перспективы дальнейшего совершенствования методов контроля качества в высокоточной механообработке.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов**

Для внедрения в регламенты SPC на машиностроительных предприятиях рекомендуется включить в действующие «Планы статистического контроля» процедуры выбора и настройки контрольных карт, предложенные в диссертации: использование табличного инструментария для подбора параметров CUSUM-карт (порог  $h$ , параметр  $k$ ) под заданные требования  $ARL_0/ARL_1$  и объём подгрупп; применение оптимизированных карт Шухарта (для  $\bar{X}$ ,  $S$ ) и робастных вариантов (винзоризованное среднее и дисперсия) для операций с повышенной вероятностью выбросов. Это позволит стандартизировать настройку контроля без трудоёмких вычислений и повысить воспроизводимость процесса ( $C_p/C_{pk}$ ).

В целях экономико-статистической настройки рекомендуется применять предложенный метод выбора оптимального  $ARL_0$  по критерию минимизации ожидаемых затрат (стоимость ложной тревоги и стоимость дефекта) при разработке/актуализации нормативов предприятий: «Порядок остановки линии по сигналам SPC», «Порядок реагирования на несоответствия». Метод обеспечивает обоснованный компромисс между частотой ложных остановов и риском позднего выявления сдвигов.

Результаты диссертации целесообразно реализовать в виде программных модулей для автономного инструмента инженера по качеству: расчёт и автоматический подбор параметров карт по входным требованиям ( $n$ , целевой  $ARL_0$ , критичный сдвиг  $\delta$  или  $\varepsilon$ ); формирование «паспорта настройки контрольной карты» (параметры, ожидаемые  $ARL_0/ARL_1$ , частота сигналов, правила реагирования). Это

повышает воспроизводимость решений и снижает зависимость настройки SPC от индивидуального опыта специалиста.

Рекомендуется масштабировать предложенный инструментарий на процессы, в которых качество критично к малым смещениям и изменчивости: шлифование, финишное точение, хонингование, операции обработки посадочных поверхностей и беговых дорожек. Для каждого участка целесообразно формировать типовой набор «пара карт» (уровень + изменчивость) по методике многокритериального выбора (RE/AUC/RR), учитывая «профиль данных» (чистые/умеренно, загрязнённые/сильно загрязнённые).

Рекомендуется включить материалы диссертации в образовательные модули по дисциплинам «Управление качеством», «Статистические методы контроля и управления процессами»: практикумы по настройке CUSUM и оптимизированных карт Шухарта по табличным данным; лабораторные работы по оценке эффективности через *ARL*, *SDRL*, экономические критерии; кейсы по выбору пар карт для контроля уровня и изменчивости и по интерпретации сигналов.

Полученные результаты соответствуют пунктам 8 и 9 паспорта научной специальности 2.5.22.: пункт 8. Разработка научно-практического статистического инструментария управления качеством; пункт 9. Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов.

### **Замечания по диссертации**

При общей положительной оценке диссертационной работы следует сделать следующие замечания:

1. В работе недостаточно обоснован выбор характеристик качества при шлифовании изделий машиностроения. Следует показать, как их контроль влияет на процент брака и эксплуатационные характеристики. Важно также подчеркнуть

практическую значимость выбранных параметров, указав, как их соблюдение отражается на ключевых эксплуатационных свойствах ответственных узлов.

2. В работе недостаточно подробно обоснован выбор врезного шлифования деталей трансмиссий в качестве объекта исследования - следует более детально раскрыть, чем обусловлен приоритет этого типа шлифования перед другими. Необходимо показать, как специфика геометрии и материалов обрабатываемых деталей в сочетании с жёсткими эксплуатационными требованиями и технологическими особенностями процесса обуславливают неэффективность традиционных методов SPC и диктуют необходимость разработки новых подходов.

3. Выводы диссертации нуждаются в более весомом обосновании: необходимо проиллюстрировать каждый элемент новизны (инструментарий для CUSUM-карт, винзоризованные карты, оптимизация ARL) конкретными примерами с числовыми результатами, наглядно показав, как применение методов ведёт к росту индекса воспроизводимости и снижению брака. Следует чётче обозначить практическую ценность разработок, а также проанализировать их ограничения и сопоставить с результатами аналогичных исследований, подчеркнув преимущества предложенного подхода.

4. В работе недостаточно чётко прописана интеграция разработанного инструментария в систему управления качеством предприятия. Необходимо последовательно описать, как предложенные методы внедряются на разных уровнях управления - от оперативного контроля на станке с ЧПУ до стратегического планирования, указав конкретных исполнителей и периодичность использования инструментов. Следует также разъяснить, каким образом применение таблиц ARL и критериев RE/AUC/RR влияет на производственные показатели и как рост индекса  $C_p$  соотносится с ключевыми показателями эффективности предприятия.

5. В работе недостаточно подробно раскрыт механизм влияния разработанных методов на рост индекса воспроизводимости  $C_p$ . Необходимо

выделить ключевые факторы воздействия, чтобы наглядно связать технические решения с конечными результатами.

6. В разделе, посвященном дискретизации пространства состояний CUSUM-статистики и построению матрицы переходов, желательно более подробно обосновать выбор шага дискретизации  $\Delta$  и оценить влияние  $\Delta$  на точность табулированных ARL и моментов длины серии (компромисс «точность/вычислительная трудоемкость»).

7. При проектировании робастных карт на основе винзоризации требуется яснее регламентировать выбор параметра  $g$  (или доли  $\gamma=g/n$ ) в зависимости от ожидаемой загрязненности данных и требований к эффективности; полезно добавить краткую процедуру настройки  $g$  по историческим данным.

8. Экономико-статистическая оптимизация средней длины серии опирается на допущения о редкости и независимости сдвигов и на линейную модель стоимости дефекта. Целесообразно дополнить обсуждение анализом чувствительности решения к нарушению этих предпосылок и к нелинейным моделям потерь.

9. Практический раздел апробации можно усилить расширением набора производственных примеров для разных типов деталей и операций, а также сопоставлением с альтернативными современными процедурами (EWMA) на одинаковом уровне  $ARL_0$ .

Отмеченные замечания носят рекомендательный характер и не снижают научной новизны и практической ценности результатов диссертации.

### **Заключение**

Автореферат полностью отражает содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту. Результаты диссертационного исследования достаточно полно апробированы и опубликованы: по теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 8 статей в рецензируемых изданиях,

рекомендованных ВАК, а также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и выводов, списка литературы из 157 наименований, приложений. Основной текст диссертации изложен на 223 страницах, содержит 11 рисунков и 35 таблиц. Материал изложен последовательно, выводы по главам логически следуют из результатов исследования, оформление и стиль изложения соответствуют требованиям к научно-квалификационным работам.

Диссертационная работа Рязанского Валерия Павловича на тему «Совершенствование контроля качества производства изделий машиностроения на основе разработки научно-практического статистического инструментария» по актуальности, научной новизне, объему и обоснованности научных результатов соответствует всем требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями и дополнениями), предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, так как является самостоятельной и законченной научно-квалификационной работой, в которой, на основании выполненного автором исследования, предложены новые научно-обоснованные технические решения по разработке и практическому использованию научно-практического статистического инструментария управления качеством для карт кумулятивных сумм с рекурсивными формулами и учётом дисперсии длины серии, контрольных карт на основе выборочного среднего, размаха и стандартного отклонения, контрольных карт на основе винзоризованного среднего и на основе винзоризованной дисперсии, метода оптимизации контрольных карт по экономическим критериям, метода выбора оптимальной пары контрольных карт для одновременного контроля уровня и изменчивости процесса механообработки изделий машиностроения, которые имеют важное хозяйственное значение и вносят

существенный вклад в развитие высокотехнологичного станкостроения и модернизацию производственных процессов.

Автор диссертационной работы, Рязанский Валерий Павлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.22. «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства».

Отзыв утвержден и одобрен на заседании кафедры «Промышленной информатики» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет». Протокол № 9 от « 29 » января 2026 г.

Заведующий кафедрой

Промышленной информатики

кандидат технических наук, доцент

Холопов Владимир Анатольевич

Данные об организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

Адрес: 119454, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78

Тел.: +7 (499) 215-65-65,

E-mail: mirea@mirea.ru

29.01.2026г.

