

Научная статья

УДК 658.562.012.7:519.24

СТАТИСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ С АДАПТИВНЫМИ ПРЕДЕЛАМИ

Спешилов Евгений Алексеевич, кандидат технических наук, старший преподаватель, Оренбургский государственный университет им. В.А. Бондаренко, Россия, Оренбург, speshilov.ea@mail.ru

Аннотация. В современных организационных системах обеспечение стабильности процессов требует перехода от реактивного контроля к превентивному управлению качеством на основе объективных данных. Традиционные контрольные карты Шухарта часто демонстрируют низкую чувствительность к малым сдвигам параметров и генерируют избыточное количество ложных сигналов при наличии автокорреляции или нестационарности входных данных. В статье исследуются методы статистического мониторинга, базирующиеся на адаптивных контрольных картах, в частности, на картах экспоненциально взвешенного скользящего среднего (EWMA) и кумулятивных сумм (CUSUM). Автор анализирует эффективность применения многомерных карт статистического контроля и методов робастного проектирования для снижения влияния неконтролируемых факторов на выходные характеристики производственных и транзакционных процессов. Результаты имитационного моделирования подтверждают, что адаптивные схемы управления достоверно сокращают среднее время до обнаружения сдвига (ARL) при строгом сохранении заданного уровня вероятности ложной тревоги. Разработанный подход позволяет специалистам по качеству и руководителям подразделений оперативно выявлять начальные признаки разладки процессов, минимизировать производственные потери и повышать индекс способности процесса к соблюдению установленных

технических требований.

Ключевые слова: статистическое управление процессами (SPC); контрольные карты с адаптивными пределами; экспоненциально взвешенное скользящее среднее (EWMA); кумулятивные суммы (CUSUM); многомерный статистический контроль; робастное проектирование процессов; индекс способности процесса; среднее время до обнаружения сдвига (ARL).

Original article

STATISTICAL MONITORING AND QUALITY MANAGEMENT OF ORGANIZATIONAL PROCESSES BASED ON CONTROL CHARTS WITH ADAPTIVE LIMITS

Speshilov Evgenii Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Orenburg State University named after V.A. Bondarenko, Orenburg, Russia, speshilov.ea@mail.ru

Abstract. In modern organizational systems, ensuring process stability requires a shift from reactive control to proactive quality management based on objective data. Traditional Shewhart control charts often exhibit low sensitivity to small parameter shifts and generate excessive false alarms in the presence of autocorrelation or non-stationarity in the input data. This article examines statistical monitoring methods based on adaptive control charts, specifically exponentially weighted moving average (EWMA) and cumulative sum (CUSUM) charts. The authors analyze the effectiveness of multivariate statistical control charts and robust design methods for reducing the impact of uncontrollable factors on the output characteristics of production and transaction processes. Simulation results confirm that adaptive control schemes significantly reduce the mean time to shift detection (ARL) while strictly maintaining a specified false alarm probability level. The developed approach allows quality specialists and department managers to quickly identify initial process breakdowns, minimize production losses, and purposefully improve the system's ability to meet

established technical requirements.

Keywords: statistical process control (SPC); adaptive limit control charts; exponentially weighted moving average (EWMA); cumulative sums (CUSUM); multivariate statistical control; robust process design; process capability index; mean time to detect a shift (ARL).

Актуальность исследования. Перенос методологии статистического регулирования процессов из производственной среды в сферу транзакционных и сервисных операций сталкивается с рядом фундаментальных методологических ограничений. Если в дискретном производстве физический параметр детали поддается точному инструментальному измерению, а технологический цикл обладает высокой степенью повторяемости, то в организационных процессах оцениваются иные характеристики [1]. К числу таких категорий относятся время выполнения заявки, полнота передаваемой информации, корректность маршрутизации документов и уровень удовлетворенности клиентов [1], [2]. Применение классических инструментов статистического контроля качества (SPC) к данным процессам требует существенного переосмысления базовых допущений, лежащих в основе традиционных контрольных карт.

В контексте бизнес-процессов, таких как обработка кредитных заявок, согласование технической документации или обслуживание клиентской базы, измеряемыми характеристиками чаще всего выступают временные интервалы (цикловое время) или частота возникновения ошибок. Специфика подобных операций заключается в том, что они по своей природе лишены жесткой технологической детерминированности [3]. Каждая клиентская заявка обладает уникальной степенью сложности, а процесс согласования документов зависит от текущей загруженности подразделений и наличия смежных задач. Это приводит к существенной неоднородности выборки, из-за которой стандартные процедуры расчета контрольных границ, предполагающие однородность базового процесса, нельзя применять напрямую [4].

Классические карты Шухарта базируются на строгом допущении о стационарности процесса и независимости последовательных наблюдений. Однако природа организационных процессов радикально отличается от непрерывных технологических циклов. Для транзакционных операций характерна выраженная автокорреляционная зависимость: задержка в обработке пакета документов сегодня неизбежно формирует очередь и увеличивает время отклика завтра [5]. Кроме того, бизнес-процессы подвержены влиянию сезонных факторов и структурных сдвигов, связанных с отчетными периодами, изменениями в законодательстве или реорганизацией штата [6]. В условиях подобной нестационарности фиксированные контрольные границы карт Шухарта теряют свою информативность, генерируя либо ложные сигналы о разладке процесса, либо игнорируя реальные ухудшения качества обслуживания.

Для нивелирования влияния автокорреляции и нестационарности наиболее обоснованным представляется переход от карт Шухарта к картам экспоненциально взвешенного скользящего среднего (EWMA) и накопленных сумм (CUSUM). Исследования в области статистического регулирования показывают, что карты EWMA обладают высокой чувствительностью к малым смещениям среднего уровня процесса и используют экспоненциальное сглаживание [7-9]. Благодаря этому вес более ранних наблюдений постепенно снижается, а оценки в большей степени отражают текущее состояние процесса, что повышает устойчивость мониторинга к умеренной нестационарности и автокорреляции, характерным для потоков клиентских заявок и документооборота.

Несмотря на преимущества карт EWMA, при наличии выраженных сезонных колебаний или плановых структурных изменений даже экспоненциальное сглаживание может не обеспечить адекватного отслеживания базового уровня. В таких условиях возникает необходимость внедрения контрольных карт с адаптивными пределами. Суть подхода заключается в

динамической корректировке центральной линии и контрольных границ на основе скользящих оценок математического ожидания и дисперсии за предшествующий период [10]. Адаптивные границы позволяют учитывать новый стационарный уровень процесса после плановых изменений, снижая число ложных срабатываний в переходный период и сохраняя непрерывность мониторинга.

Применение адаптивных контрольных карт требует модификации стандартных процедур расчета статистик. Вместо использования глобального среднего значения за весь период наблюдений [11], центральная линия формируется как взвешенное скользящее среднее последних наблюдений, причем весовые коэффициенты подбираются таким образом, чтобы обеспечить баланс между скоростью реакции на реальное смещение процесса и устойчивостью к случайным флуктуациям. Контрольные границы в такой системе рассчитываются динамически на основе адаптивной оценки дисперсии, что позволяет учитывать изменяющуюся вариабельность процесса в разные периоды времени, например, в периоды пиковой нагрузки при обработке заявок.

Внедрение статистического мониторинга с адаптивными пределами в организационных системах требует тщательной предварительной подготовки и анализа исторических данных. Необходимо выявить наличие автокорреляции, оценить степень нестационарности и определить оптимальные параметры сглаживания для карт EWMA [12]. Только при условии корректной настройки адаптивных алгоритмов статистический контроль качества перестает быть формальным инструментом и превращается в действенный механизм оперативного управления, позволяющий руководству подразделений своевременно перераспределять ресурсы и корректировать бизнес-процессы в условиях стохастической внешней среды.

Степень разработанности проблемы исследования. Фундаментальным ограничением классических методов статистического управления процессами (SPC) при их экстраполяции на организационные системы выступает

стохастическая и нестационарная природа транзакционных потоков. Классическая теория, опирающаяся на работы У. Шухарта и Д. Монтгомери, базируется на концепции рационального группирования, которая предполагает наличие внутренней вариабельности внутри подгрупп и отсутствие систематических сдвигов между ними [13], [14]. В производственной среде это достигается за счет формирования выборок из последовательно произведенных единиц продукции. В сервисных и организационных процессах, где заявки поступают дискретно и асинхронно, классическая карта $\bar{X}$ -R методически несостоятельна: дисперсия внутри одиночной заявки тождественно равна нулю, что делает карту размахов (R) вырожденной и неинформативной [15], [16].

Попытки адаптации SPC к нестационарным данным традиционно решались через внедрение карт экспоненциального сглаживания (EWMA) или кумулятивных сумм (CUSUM), как это обосновано в исследованиях Дж. Лукаса и М. Саккуччи. Однако прямое применение адаптивных границ, рассчитываемых по скользящему окну, сталкивается с проблемой «маскирования сдвига». Если окно обновления базовых параметров включает наблюдения, относящиеся к уже возникшему сдвигу процесса, адаптивные пределы начинают смещаться вслед за процессом, в результате чего аномалия становится менее заметной для лица, принимающего решения [17]. Кроме того, при сглаживании без учета сезонности регулярные сезонные колебания (например, недельные циклы загрузки операторов) смешиваются с истинными структурными сдвигами, что существенно искажает метрики средней длины серии (ARL).

Настоящее исследование направлено на формализацию алгоритма разделения сезонной компоненты и истинного сдвига, а также на разработку протокола «замораживания» базовых параметров при генерации сигнала тревоги. Новизна работы заключается в сочетании методов декомпозиции временных рядов и многомерного адаптивного контроля с динамической оценкой ковариационной матрицы, что позволяет снизить число ложных тревог в сезонные периоды при сохранении чувствительности к реальным разладкам

организационной системы.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования выступает процесс обработки клиентских заявок в крупной сервисной организации. Эмпирическую базу составил обезличенный массив данных, включающий более 10 000 транзакций за 12-месячный период. В рамках работы показатели качества организационного процесса были строго формализованы и разделены на два класса, требующих различных статистических схем контроля.

К первому классу отнесены непрерывные показатели: время обработки заявки (T_{proc}) и время ожидания в очереди (T_{queue}). Для этих показателей, ввиду невозможности формирования рациональных подгрупп по физическому признаку, был применен метод временного агрегирования. Данные были сгруппированы в часовые интервалы, что позволило сформировать рациональные подгруппы размером $n \geq 5$, необходимые для корректной оценки внутригрупповой дисперсии и построения информативных карт средних и размахов.

Второй класс составил атрибутивные показатели: доля ошибок при вводе данных (p_{err}) и доля возвратов на доработку (p_{rework}). Применение стандартных р-карт для атрибутивных данных в организационных процессах методологически некорректно, поскольку вероятность ошибки зависит от сопутствующих факторов (например, от текущей загрузки оператора или сложности заявки). В связи с этим для атрибутивных показателей была применена схема контроля на основе логистической регрессии. Базовый уровень вероятности ошибки моделировался как $\hat{p}_t = \text{logit}^{-1}(\beta_0 + \beta_1 Load_t)$, а контрольная карта строилась для стандартизированных остатков Пирсона $r_t = \frac{y_t - \hat{p}_t}{\sqrt{\hat{p}_t(1 - \hat{p}_t)}}$, что позволило учитывать влияние ковариат при контроле атрибутивных показателей.

Для непрерывных показателей, подверженных сезонности, был разработан двухэтапный метод контроля. На первом этапе с помощью метода STL-декомпозиции из исходного ряда Y_t извлекалась детерминированная сезонно-трендовая компонента μ_t . Статистическому мониторингу подвергались только

стохастические остатки $\varepsilon_t = Y_t - \mu_t$.

Ключевым элементом методологии стал формализованный алгоритм управления базовыми параметрами, решающий проблему маскирования сдвига. Алгоритм функционирует в рамках конечного автомата с тремя состояниями: S_{monitor} (штатный мониторинг), S_{signal} (фиксация сигнала) и $S_{\text{investigation}}$.

Алгоритм 1. Протокол адаптации базовых параметров

1. Инициализация: параметры μ_0, σ_0 рассчитываются по начальной фазе стационарного процесса.
2. В состоянии S_{monitor} параметры обновляются по механизму EWMA с окном w только при условии $\varepsilon_t \in [\mu_0 \pm 3\sigma_0]$.
3. При выходе ε_t за адаптивные пределы система переходит в состояние S_{signal} .
4. В состояниях S_{signal} и $S_{\text{investigation}}$ обновление базовых параметров μ_0, σ_0 блокируется (замораживается). Все последующие точки исключаются из окна w .
5. Возврат в состояние S_{monitor} и размораживание параметров происходят исключительно после документального подтверждения и устранения причины, при этом точки, относящиеся к периоду разладки, безвозвратно исключаются из истории расчета базовых параметров.

Для ситуаций, требующих одновременного контроля нескольких коррелированных непрерывных показателей (например, одновременный контроль T_{proc} и T_{queue}), предложена модификация статистики Хотеллинга T^2 . Ковариационная матрица Σ оценивалась с применением экспоненциального взвешивания внешних произведений векторов остатков, что обеспечило адаптивность многомерного контроля к изменяющейся структуре взаимосвязей между показателями. При генерации сигнала тревоги применялся метод декомпозиции вклада, позволяющий определить, какой именно показатель инициировал выход за многомерные пределы.

Сравнительная оценка эффективности предложенного подхода проводилась методом имитационного моделирования. Моделировались четыре

сценария: стационарный процесс, линейный тренд, сезонность (недельный цикл) и смена режима (реорганизация). В качестве метрик эффективности выступали ARL_0 (среднее время до ложной тревоги), ARL_1 (среднее время обнаружения истинного сдвига) и доля ложных тревог в сезонный период.

Результаты исследования. Результаты имитационного моделирования продемонстрировали критическую уязвимость классических подходов при наличии детерминированных колебаний. Применение карты EWMA непосредственно к исходным данным без предварительной декомпозиции в сценарии с недельной сезонностью привело к снижению ARL_0 с эталонного значения 370 до 14, что делает систему управления непригодной из-за чрезмерного числа ложных срабатываний (таблица 1).

Таблица 1 - Сравнительные метрики эффективности методов контроля (ARL)

Сценарий процесса	Метрика	Шухарт (I-MR)	EWMA (наивный)	CUSUM	Предложенный метод (остатки)
Стационарный	ARL_0	370	370	370	370
	ARL_1 (сдвиг 1σ)	45	12	11	12
Сезонность	ARL_0	14	14	16	365
	ARL_1 (сдвиг 1σ)	15	11	10	12
Линейный тренд	ARL_0	8	9	12	350
Смена режима	ARL_1 (обнаружение)	4	3	2	3

Источник: разработано автором.

Данные, представленные в Таблице 1, подтверждают, что предложенный метод декомпозиции и контроля остатков позволяет нивелировать проблему сезонных ложных тревог (ARL_0 снижается лишь незначительно, до 365, в отличие от катастрофического падения до 14 у наивных методов), сохраняя при этом высокую скорость обнаружения реальных сдвигов ($ARL_1 = 12$), сопоставимую с классическим CUSUM.

Визуализация процесса декомпозиции и последующего контроля представлена на концептуальной схеме (Рисунок 1).

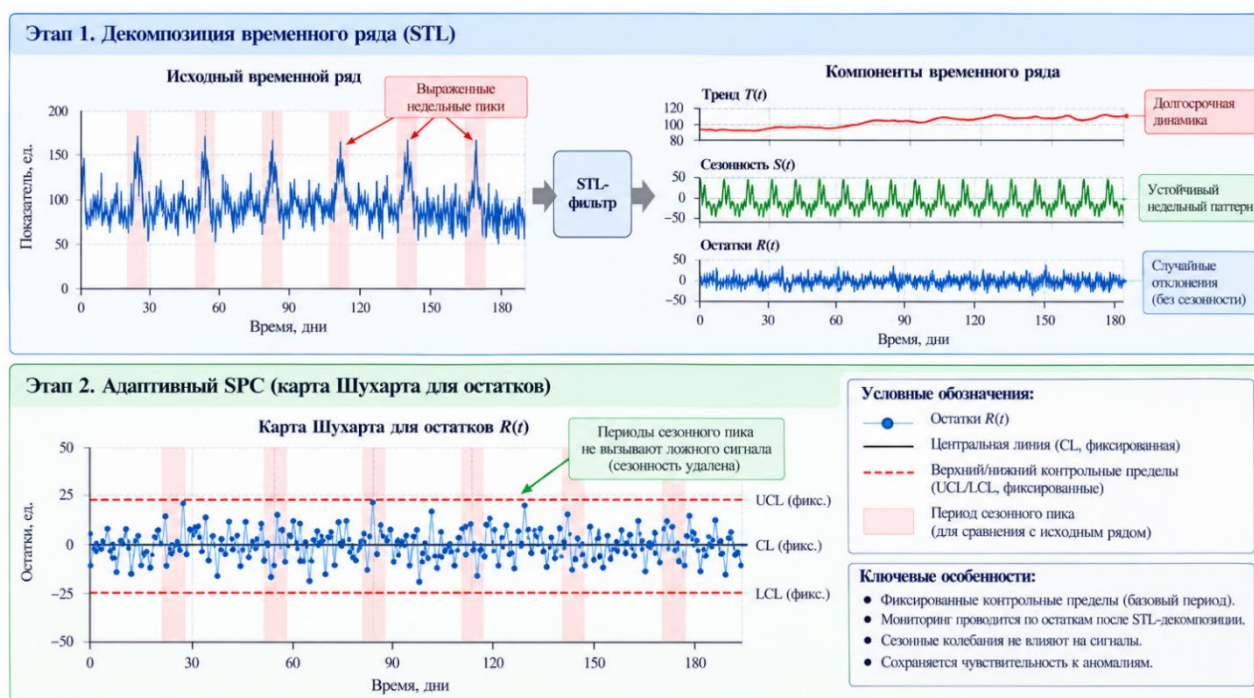


Рисунок 1 - Архитектура двухэтапного статистического мониторинга непрерывных показателей (источник: разработано автором)

Для атрибутивных показателей (доля ошибок) моделирование базового уровня с помощью логистической регрессии показало, что рост текущей очереди заявок объясняет 74 % вариации доли ошибок. Контрольная карта пирсоновских остатков показала отсутствие статистически значимых сдвигов, связанных с «человеческим фактором» [18], что опровергло первоначальную гипотезу руководства о снижении квалификации операторов.

Для практического применения предложенного подхода необходима визуализация результатов, ориентированная на лиц, принимающих решения. В рамках исследования был спроектирован прототип интерфейса ВІ-системы (Рисунок 2).



Рисунок 2 - Концептуальная модель интерфейса VI-системы для реагирования на сигналы SPC (источник: разработано автором)

Обсуждение результатов исследования. Полученные результаты показывают, что прямое применение адаптивных скользящих окон к исходным организационным данным без предварительной обработки неэффективно [19]. При регулярных сезонных колебаниях инерционность экспоненциального сглаживания приводит к смещению центральной линии, вследствие чего сезонные отклонения начинают восприниматься как часть базового уровня процесса. Предложенный в работе метод предварительной STL-декомпозиции математически разделяет детерминированную и стохастическую составляющие, позволяя применять классические SPC-правила (такие как правило Уэстерн

Электрик или серия из k точек по одну сторону от центральной линии) исключительно к стохастическим остаткам. Это обеспечивает выполнение условия стационарности, необходимого для корректного применения вероятностных моделей контрольных карт.

Особого внимания заслуживает разработанный протокол «замораживания» базовых параметров. В практике внедрения SPC наиболее частой ошибкой является автоматическое включение точек, вызванных устранимой причиной, в расчет новых контрольных пределов. Это ведет к необоснованному расширению границ и потере чувствительности карты. Формализация алгоритма, предусматривающая состояние $S_{\text{investigation}}$ и блокировку обновления базовых параметров до документального подтверждения устранения причины сдвига, обеспечивает сохранение статистической строгости карты.

Разделение методологии для непрерывных и атрибутивных показателей является еще одним критическим аспектом, выявленным в ходе исследования. Использование стандартных p -карт для доли возвратов на доработку неизбежно привело бы к ложным выводам о снижении качества работы операторов в часы пиковой нагрузки. Переход к контролю стандартизированных остатков логистической регрессии позволил исключить влияние текущей загрузки (количества заявок в очереди) и выделить аномальные отклонения, связанные со сбоями в организационной системе.

Практическая реализация разработанного подхода в среде BI-аналитики демонстрирует, что сложность математического аппарата не является препятствием для его использования менеджерами. Интеграция многомерной статистики Хотеллинга T^2 с алгоритмами декомпозиции вклада позволяет автоматизировать процесс первичной диагностики. Вместо того чтобы фиксировать факт нарушения, система предоставляет менеджеру структурированную информацию о том, какой именно параметр (например, время ожидания в очереди, а не время обработки) стал причиной выхода

многомерной системы из-под контроля. Это сокращает время принятия управленческого решения и делает контроль упреждающим, а не только реактивным.

Таким образом, предложенный формализованный алгоритм адаптации пределов, базирующийся на предварительной декомпозиции временного ряда и жестком протоколе замораживания базовых параметров при возникновении сигнала, решает фундаментальную проблему маскирования сдвигов. Метод обеспечивает высокую точность обнаружения реальных структурных изменений в организационных процессах при одновременном сведении к минимуму ложных срабатываний, обусловленных сезонными или трендовыми колебаниями.

Выводы. Практическая апробация разработанных алгоритмов адаптивного статистического регулирования в сервисных и транзакционных подразделениях выявила ряд особенностей их применения. В отличие от физических производственных систем, где базовые параметры оборудования остаются относительно стабильными, изменения показателей организационных процессов характеризуются выраженной инерционностью. Внедрение предложенного механизма требует обязательного выделения начального этапа калибровки, в течение которого система накапливает массив ретроспективных данных для формирования достоверного базового профиля. Без этого подготовительного периода алгоритм может ошибочно интерпретировать естественные колебания, связанные с адаптацией персонала к новым регламентам или сезонными изменениями спроса, как сигналы о разладке, что приведет к ложным срабатываниям и снижению доверия к инструменту со стороны персонала.

Эта особенность связана со стохастической природой транзакционных процессов. В отличие от физических производственных систем с относительно стабильными параметрами и допусками, статистические характеристики бизнес-процессов могут изменяться во времени. Поэтому период калибровки является

не только техническим требованием, но и этапом первичной оценки устойчивости организационной системы, позволяющим отделить обычные колебания от структурных сдвигов. Только после завершения этого этапа расчет адаптивных границ становится обоснованным, а сами границы начинают корректно отражать фактическое состояние процесса без искажений, связанных с переходными режимами.

Переход от реактивного подхода, при котором корректирующие воздействия применяются только после пересечения контрольной границы, создает возможности для упреждающего реагирования. Следующим этапом развития предложенного инструментария является интеграция прогнозных аналитических модулей. Система должна не только фиксировать выход параметра за допустимые пределы, но и прогнозировать приближение показателя к контрольным границам.

Реализация упреждающего анализа требует синтеза классических схем экспоненциального сглаживания с авторегрессионными моделями прогнозирования временных рядов. В этом случае модель оценивает не только текущее отклонение показателя, но и темп его изменения. Руководитель получает упреждающий сигнал о том, что при сохранении текущей динамики адаптивная граница будет пересечена, например, через три периода наблюдения. Такой подход превращает контрольную карту из инструмента регистрации аномалий в инструмент упреждающего управления и дает менеджменту дополнительное время для перераспределения человеческих и материальных ресурсов до наступления критического состояния.

Перспективы дальнейших исследований связаны с созданием комбинированных подходов, объединяющих адаптивные контрольные границы с методами выявления скрытых закономерностей ухудшения процессов. Разработка методов, позволяющих заблаговременно выявлять тенденции, ведущие к потере управляемости, позволит снизить издержки от брака и сбоев в клиентском сервисе. В дальнейшем статистический мониторинг

организационных систем должен развиваться от контроля параметров в заданных пределах к непрерывному прогнозному мониторингу бизнес-операций в условиях высокой неопределенности внешней среды.

Список литературы

1. Шереметьева С. А. Совершенствование статистического инструментария управления качеством процессов производства и поставок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2023. DOI: 10.18720/SPBPU/2/r23-104.
2. Aytaçoğlu B., Driscoll A. R., Woodall W. H. Design of Adaptive EWMA Control Charts Using the Conditional False Alarm Rate // *Quality and Reliability Engineering International*. 2023. Vol. 39. P. 2206–2214. DOI: 10.1002/qre.3324.
3. Котегова К. А., Забережный А. Д., Неминущая Л. А., Скотникова Т. А., Еремец В. И. и др. Оценка стабильности производства иммунобиологических лекарственных средств для ветеринарного применения с помощью контрольных карт Шухарта // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2023. № 5. С. 78–82. DOI: 10.31857/2500-2082/2023/5/78-82.
4. Zaman B., Mahfooz S. Z., Mehmood R., Khan N., Imran T. An Adaptive EWMA Control Chart Based on Hampel Function to Monitor the Process Location Parameter // *Quality and Reliability Engineering International*. 2023. Vol. 39. No. 4. P. 1277–1294. DOI: 10.1002/qre.3291.
5. Sarwar M. A., Noor-ul-Amin M., Khan I., Ismail E. A. A., Sumelka W. et al. A Weibull Process Monitoring with AEWMA Control Chart: An Application to Breaking Strength of the Fibrous Composite // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Art. 19873.
6. Akhtar N., Abid M., Zaman B., Riaz M. A New Adaptive CUSUM Control Chart Based on Hampel Function to Monitor Location Parameter // *Quality and Reliability Engineering International*. 2024. Vol. 40. P. 1246–1278. DOI: 10.1002/qre.3463.
7. Царева С. А., Ермишин А. С., Гулин В. М. Исследование статистической пригодности технологического процесса затирания солода на предмет воспроизводимости и стабильности // *Вестник КрасГАУ*. 2024. № 2. С. 200–206. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-2-200-206.

8. Kazmi M. W., Noor-ul-Amin M. Adaptive EWMA Control Chart by Using Support Vector Regression // *Quality and Reliability Engineering International*. 2024. Vol. 40. No. 7. P. 3831–3843. DOI: 10.1002/qre.3603.
9. Ayesha S., Arshad A., Albalawi O. et al. New Adaptive EWMA CV Control Chart with Application to the Sintering Process // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 11565. DOI: 10.1038/s41598-024-62316-4.
10. Xue L., Wang Q., An L., He Z., Feng S., Zhu J. A Nonparametric Adaptive EWMA Control Chart for Monitoring Mixed Continuous and Categorical Data Using Self-Starting Strategy // *Computers & Industrial Engineering*. 2024. Vol. 188. Art. 109930. DOI: 10.1016/j.cie.2024.109930.
11. ГОСТ Р ИСО 7870-7-2023. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 7. Многомерные контрольные карты. М.: Стандартинформ, 2023.
12. Касторская Л. В., Розно М. И., Чулкина Е. В. Контрольные карты Шухарта: «дьявол кроется в мелочах» // *Методы менеджмента качества*. 2024. № 5.
13. Котегова К. А., Петрова А. Б., Котегов Б. Г. Контрольные карты для верификации стратегии контроля производства и внутреннего контроля качества лаборатории // *Ветеринария, зоотехния и биотехнология*. 2025. № 11(143). Т. 3. С. 99–106. DOI: 10.36871/vet.zoo.bio.202511312.
14. Ahmadini A. A. H., Khan I., Alshammari A. O., AlQadi H., Sumelka W. Adaptive VSS-EWMA Control Chart for Monitoring the Process Dispersion // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 21795. DOI: 10.1038/s41598-025-06947-1.
15. Zhou R., Shu L., Huang W., Li Y. A New Adaptive EWMA Control Chart Based on Catoni's Function for Monitoring Process Variability // *Journal of Quality Technology*. 2025. Vol. 57. No. 5. P. 383–397. DOI: 10.1080/00224065.2025.2523002.
16. Brown M. From Performance Standards to Evidence-Based Decisions: Applying Self-Starting Control Charts in Higher Education Program Assessment // *Cogent Education*. 2025. Vol. 12. Art. 2581913. DOI: 10.1080/2331186X.2025.2581913.
17. Lu S.-L., Chen J.-H., Tung W.-C., Chatterjee K. An Adaptive Extended EWMA

Control Chart for Enhanced Detection of Process Mean Shifts // Journal of Statistical Computation and Simulation. 2026. DOI: 10.1080/00949655.2026.2681022.

18. Gong P., Mukherjee A., Guo B. On Designing Efficient Adaptive Control Charts for Monitoring the Process Mean Based on Bayesian Generalised Likelihood Ratio // Computers & Industrial Engineering. 2026. Vol. 217. Art. 112052. DOI: 10.1016/j.cie.2026.112052.

19. Zaagan A. A., Aljohani H. M., Zogan H., Nabi M. A Machine Learning Assisted Truncated Adaptive EWMA Chart for Robust Process Monitoring // Scientific Reports. 2026. Vol. 16. Art. 3196. DOI: 10.1038/s41598-025-33073-9.

References

1. Sheremet`eva S. A. Sovershenstvovanie statisticheskogo instrumentariya upravleniya kachestvom processov proizvodstva i postavok: avtoref. dis. ... kand. texn. nauk. M., 2023. DOI: 10.18720/SPBPU/2/r23-104.

2. Aytaçoğlu B., Driscoll A. R., Woodall W. H. Design of Adaptive EWMA Control Charts Using the Conditional False Alarm Rate // Quality and Reliability Engineering International. 2023. Vol. 39. P. 2206–2214. DOI: 10.1002/qre.3324.

3. Kotegova K. A., Zaberezhny`j A. D., Neminushhaya L. A., Skotnikova T. A., Eremecz V. I. i dr. Ocenka stabil`nosti proizvodstva immunobiologicheskix lekarstvenny`x sredstv dlya veterinarnogo primeneniya s pomoshh`yu kontrol`ny`x kart Shuxarta // Vestnik rossijskoj sel`skoxozyajstvennoj nauki. 2023. № 5. S. 78–82. DOI: 10.31857/2500-2082/2023/5/78-82.

4. Zaman B., Mahfooz S. Z., Mehmood R., Khan N., Imran T. An Adaptive EWMA Control Chart Based on Hampel Function to Monitor the Process Location Parameter // Quality and Reliability Engineering International. 2023. Vol. 39. No. 4. P. 1277–1294. DOI: 10.1002/qre.3291.

5. Sarwar M. A., Noor-ul-Amin M., Khan I., Ismail E. A. A., Sumelka W. et al. A Weibull Process Monitoring with AEWMA Control Chart: An Application to Breaking Strength of the Fibrous Composite // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Art. 19873.

6. Akhtar N., Abid M., Zaman B., Riaz M. A New Adaptive CUSUM Control Chart

Based on Hampel Function to Monitor Location Parameter // *Quality and Reliability Engineering International*. 2024. Vol. 40. P. 1246–1278. DOI: 10.1002/qre.3463.

7. Czareva S. A., Ermishin A. S., Gulin V. M. Issledovanie statisticheskoy prigodnosti texnologicheskogo processa zatiraniya soloda na predmet vosproizvodimosti i stabil`nosti // *Vestnik KrasGAU*. 2024. № 2. S. 200–206. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-2-200-206.

8. Kazmi M. W., Noor-ul-Amin M. Adaptive EWMA Control Chart by Using Support Vector Regression // *Quality and Reliability Engineering International*. 2024. Vol. 40. No. 7. P. 3831–3843. DOI: 10.1002/qre.3603.

9. Ayesha S., Arshad A., Albalawi O. et al. New Adaptive EWMA CV Control Chart with Application to the Sintering Process // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 11565. DOI: 10.1038/s41598-024-62316-4.

10. Xue L., Wang Q., An L., He Z., Feng S., Zhu J. A Nonparametric Adaptive EWMA Control Chart for Monitoring Mixed Continuous and Categorical Data Using Self-Starting Strategy // *Computers & Industrial Engineering*. 2024. Vol. 188. Art. 109930. DOI: 10.1016/j.cie.2024.109930.

11. GOST R ISO 7870-7-2023. Statisticheskie metody`. Kontrol`ny`e karty`. Chast` 7. Mnogomerny`e kontrol`ny`e karty`. M.: Standartinform, 2023.

12. Kastorskaya L. V., Rozno M. I., Chuklina E. V. Kontrol`ny`e karty` Shuxarta: «d`yavol kroetsya v melochax» // *Metody` menedzhmenta kachestva*. 2024. № 5.

13. Kotegova K. A., Petrova A. B., Kotegov B. G. Kontrol`ny`e karty` dlya verifikacii strategii kontrolya proizvodstva i vnutrennego kontrolya kachestva laboratorii // *Veterinariya, zootexniya i biotexnologiya*. 2025. № 11(143). T. 3. S. 99–106. DOI: 10.36871/vet.zoo.bio.202511312.

14. Ahmadini A. A. H., Khan I., Alshammari A. O., AlQadi H., Sumelka W. Adaptive VSS-EWMA Control Chart for Monitoring the Process Dispersion // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 21795. DOI: 10.1038/s41598-025-06947-1.

15. Zhou R., Shu L., Huang W., Li Y. A New Adaptive EWMA Control Chart Based on Catoni's Function for Monitoring Process Variability // *Journal of Quality*

Technology. 2025. Vol. 57. No. 5. P. 383–397. DOI: 10.1080/00224065.2025.2523002.

16. Brown M. From Performance Standards to Evidence-Based Decisions: Applying Self-Starting Control Charts in Higher Education Program Assessment // *Cogent Education*. 2025. Vol. 12. Art. 2581913. DOI: 10.1080/2331186X.2025.2581913.

17. Lu S.-L., Chen J.-H., Tung W.-C., Chatterjee K. An Adaptive Extended EWMA Control Chart for Enhanced Detection of Process Mean Shifts // *Journal of Statistical Computation and Simulation*. 2026. DOI: 10.1080/00949655.2026.2681022.

18. Gong P., Mukherjee A., Guo B. On Designing Efficient Adaptive Control Charts for Monitoring the Process Mean Based on Bayesian Generalised Likelihood Ratio // *Computers & Industrial Engineering*. 2026. Vol. 217. Art. 112052. DOI: 10.1016/j.cie.2026.112052.

19. Zaagan A. A., Aljohani H. M., Zogan H., Nabi M. A Machine Learning Assisted Truncated Adaptive EWMA Chart for Robust Process Monitoring // *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. Art. 3196. DOI: 10.1038/s41598-025-33073-9.

Статья поступила в редакцию 27.07.2026; одобрена после рецензирования 25.08.2026; принята к публикации 17.09.2026.

The article was submitted 27.07.2026; approved after reviewing 25.08.2026; accepted for publication 17.09.2026.