ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ / INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

УДК 658.562.012.7
DOI 10.17073/0368-0797-2024-1-121-131

Оригинальная статья
Original article

Контрольные карты Шухарта – простой, но не лёгкий для применения инструмент анализа данных

В. Л. Шпер[1], С. А. Шеремeтьева[1], В. Ю. Смелов[1, 2], Е. И. Хунузиди[1, 3]

[1] **Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»** (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)
[2] **«ГПБ Комплект» (АО)** (Россия, 11505, Москва, Валовая ул., 6)
[3] **ООО «АтомТехноТест»** (Россия, Москва, 123022, 2-я Звенигородская ул., 13, стр. 37)

el_hun@mail.ru

Аннотация. Контрольные карты Шухарта (ККШ) – мощный и технически весьма простой инструмент анализа вариабельности процессов, но одновременно он не может быть полностью алгоритмизирован и требует глубокого знания процесса в сочетании с дополнительным анализом данных. Хотя сами по себе ККШ известны очень давно, число работ огромно и стандарты на применение карт внедрены в большинстве стран мира, существует несколько принципиально важных проблем их эффективного применения, которые практически не находят своего отражения ни в научно-исследовательской, ни в учебной литературе. Именно этим проблемам и посвящена данная работа. В частности, исследованы два аспекта стандартного допущения о нормальности закона распределения данных. Сначала авторы изучили широко распространенное заблуждение о том, что результаты измерений всегда распределены в соответствии с законом Гаусса. Затем показали, что отклонение реальной функции распределения данных от нормальности может при определенных условиях приводить к существенным изменениям в методике построения и интерпретации контрольных карт. Далее, на примере конкретного процесса, было рассмотрено, как правильно и как неправильно строить и интерпретировать ККШ, после чего исследована принципиально важная проблема операционального определения особых/специальных причин вариаций. Авторы предлагают ввести два типа особых причин: не меняющих (*I*-тип) и изменяющих (*X*-тип) систему. В конце работы рассмотрен вопрос о том, как правильно организовать работу с ККШ. Подчеркнуто, что построение и интерпретация контрольной карты – это всегда системная проблема взаимодействия между процессами и людьми, работающими над улучшением этих процессов.

Ключевые слова: контрольные карты Шухарта, ненормальность, индексы воспроизводимости, построение карт

Для цитирования: Шпер В.Л., Шеремeтьева С.А., Смелов В.Ю., Хунузиди Е.И. Контрольные карты Шухарта – простой, но не легкий для применения инструмент анализа данных. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(1):121–131. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-1-121-131

Shewhart control charts – A simple but not easy tool for data analysis

V. L. Shper[1], S. A. Sheremetyeva[1], V. Yu. Smelov[1, 2], E. I. Khunuzidi[1, 3]

[1] **National University of Science and Technology "MISIS"** (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)
[2] **GPB Complect (JSC)** (6 Valovaya Str., Moscow 11505, Russian Federation)
[3] **LLC "AtomTekhnoTest"** (13 bld. 37 2nd Zvenigorodskaya Str., Moscow 123022, Russian Federation)

el_hun@mail.ru

Abstract. Shewhart control charts (ShCCs) are a powerful and technically simple tool for process variability analysis. However, simultaneously, they cannot be fully algorithmized and require deep process knowledge together with additional data analysis. ShCCs are well known, though, and the number of papers is great, as well as standards on ShCCs work in most countries, there are some serious obstacles for their effective application which are not being discussed in either educational or scientific literature. Just these problems are being considered in this paper. We analyzed two sides of standard assumption about data normality. First, we discuss the widely-spread misconception that measurement data are always distributed according Gauss law. Then, it is shown how the deviation from normality may impact the method of ShCCs' constructing and interpreting. Using a specific process data, we debate on right and wrong ways to build ShCC. Further, the paper describes two new definitions of assignable causes of variation: not changing (*I*-type) and changing (*X*-type) the system. At the end, we discuss how the work with ShCCs should be organized

© В. Л. Шпер, С. А. Шеремeтьева, В. Ю. Смелов, Е. И. Хунузиди, 2024

effectively. It is outlined that creating and analyzing ShCCs is always a system question of interaction between the process and the person who tries to improve this process.

Keywords: Shewhart control charts, non-normality, capability indices, chart construction

For citation: Shper V.L., Sheremetyeva S.A., Smelov V.Yu., Khunuzidi E.I. Shewhart control charts – A simple but not easy tool for data analysis. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(1):121–131. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-1-121-131

Все модели неверны,
Но некоторые полезны.
Джордж Бокс

Введение

Хорошо известно, что контрольные карты Шухарта (ККШ) – это основной инструмент анализа стабильности процессов, используемый практически во всех сферах человеческой деятельности. Они были изобретены Уолтером Шухартом, гением качества, почти 100 лет назад. Две знаменитые книги Шухарта вышли в 1931 и 1939 г. и были переизданы факсимиле Американским Обществом Качества в 1980 и 1986 г. [1; 2]. У. Деминг, друг и соратник Шухарта, написал краткое предисловие к изданию 1939 г., которое заканчивается следующими словами: «*Возможно еще полстолетия пройдет, прежде чем вклад доктора Шухарта в систему образования, науку и промышленность будет полностью признан*» [2]. В данной работе обсуждаются некоторые проблемы на пути к указанной Демингом цели. Прежде всего, кратко рассмотрим, насколько успешно ККШ распространяются по миру. Затем объясним, почему ККШ – это простой, но совсем не легкий для применения инструмент анализа данных. Для этого будут использованы ранее опубликованные работы авторов и только что полученные новые результаты. В конце будут изложены соображения по дальнейшим исследованиям.

Применение ККШ – текущее состояние

На первый взгляд с применением ККШ все хорошо. Они успешно используются практически повсеместно в различных отраслях (например, в металлургии, автомобильной промышленности, при производстве полупроводников, в авиации, сельском хозяйстве, государственных организациях, здравоохранении, образовании, и т. д.).

ККШ как один из методов статистического управления процессами (SPC) достаточно часто упоминается в литературных источниках [3 – 6], которые включают в себя как давно изданные книги, считающиеся классикой в области SPC, так и достаточно новые издания [7 – 10]. Есть и международные стандарты по ККШ, как, например, [11], и множество информационных страниц в Интернете с советами по применению ККШ.

Тем не менее, существуют по меньшей мере две причины, не позволяющие сказать, что в области контрольных карт все в порядке. Первая проблема – это снижение интереса к ККШ среди статистиков и практиков. Об этом свидетельствуют данные, изображенные на рис. 1 и количество публикаций по теме в ведущих

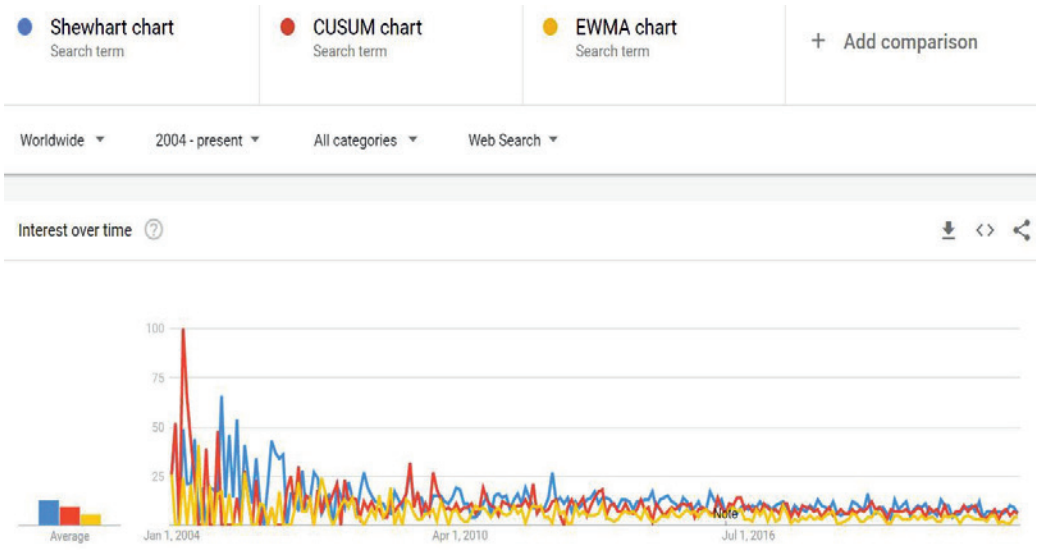

Рис. 1. Динамика интернет-запросов по ККШ и двум конкурирующим с ними инструментам (кумулятивным картам и картам с экспоненциально-взвешенным скользящим средним) в мире с 2004 г.

Fig. 1. Dynamics of internet requests to ShCCs and two its competitors (cumulative charts and charts with exponentially weighted moving average) throughout the World since 2004

журналах. Именно этот вопрос недавно обсуждался в работе [12]. Частично это можно объяснить формально-бюрократическим внедрением ККШ, чего требуют некоторые международные стандарты. Другая проблема – явный недостаток новых исследований в области ККШ, выходящих за рамки традиционных моделей базовых контрольных карт. Речь идет не о разработке новых типов карт, которых и так появляется достаточно много. Имеется в виду расширение областей применения карт за пределы тех допущений, которые традиционно используются в теории ККШ. Вот некоторые редкие примеры таких исследований. В 2011 г. была опубликована работа «Особые причины вариаций и статистические модели: новый подход к старой теме» [13]. Авторы (один из которых является соавтором данной статьи) предложили разделить особые причины вариаций на те, которые вызваны вмешательством, имеющим ту же самую функцию распределения (ФР), что и исходный процесс, и те, которые порождены иной ФР. Первый подход использовался во всех предыдущих публикациях, второй показал, что результирующая оперативная характеристика (вероятность выхода точки за границы карты) может сильно отличаться от описанной во всех учебниках. В 2017 г. была опубликована работа [14], которая поднимала очень важный вопрос о значении порядка следования данных: на самом деле процессов со случайными данными почти не бывает, но вся существующая теория ККШ основана на предположении, что данные процесса полностью случайны. В 2021 г. появилась статья о влиянии кратковременного смещения среднего на поведение ККШ [15]. Было показано, что в условиях кратковременного смещения карта средних может потерять свое преимущество перед картой индивидуальных значений, что противоречит всем руководствам по SPC. Эти три примера – капля в море разнообразных возможностей расширения традиционного подхода к ККШ за счет расширения границ тех допущений, какие уже много десятилетий используются в стандартных моделях.

Настоящая работа продолжает расширять список условий, игнорируемых традиционно. На этот раз откажемся от обычного допущения о нормальном распределении параметров процесса и обсудим ряд последствий этого решения. Кроме того, рассмотрим различные типы особых причин вариабельности и их влияние на применение ККШ.

Влияние отсутствия нормального распределения параметров процесса на работу ККШ

Этот раздел состоит из двух частей. Сначала обсудим, всегда ли результаты измерений распределены нормально. Затем продемонстрируем, как меняются пределы ККШ, когда ФР ненормальна, и опишем наиболее удобный для практиков способ учета этого обстоятельства.

Всегда ли результаты измерений распределены нормально? Таково широко распространенное мнение многих авторов, книг и даже стандартов. Например, в стандарте [11] говорится следующее: «Применение контрольных карт для количественных данных предполагает в данном стандарте, что контролируемая характеристика подчиняется нормальному распределению (распределению Гаусса), причем отклонения от этого распределения влияют на эффективность карт. Коэффициенты, используемые для вычисления контрольных границ, выведены для нормального распределения характеристик. Поскольку обычно контрольные границы используют как эмпирические критерии при принятии решений, *разумно малые отклонения от нормальности* могут иметь место. В соответствии с центральной предельной теоремой, выборочные средние имеют распределение, приближающееся к нормальному, даже когда отдельные наблюдения не подчиняются нормальному закону. Это обосновывает возможность предположения о нормальности для *X*-карт даже при объемах выборок столь малых, как 4 или 5 единиц. Если использовать отдельные наблюдения для изучения возможностей процесса, истинное распределение важно. Распределения размахов и стандартных отклонений не являются нормальными, хотя предположение о нормальности использовано при определении коэффициентов для вычисления контрольных границ карт размаха и стандартного отклонения. *Небольшие отклонения* распределения характеристики процесса от нормального распределения не должны быть препятствием в использовании таких карт, как эмпирической процедуры принятия решений» (курсив авторов).

Но что такое «*разумно малые отклонения от нормальности*» или «*небольшие отклонения*»? Эти фразы не дают никакого операционального определения [16] того, какое изменение закона распределения следует считать существенным. Недавние результаты [17] позволили определить эти фразы операционально и дали возможность предложить алгоритм построения ККШ в условиях очевидного отсутствия нормальности ФР.

Одна из самых распространенных ошибок относительно универсальности нормального закона – мнение о том, что результаты измерений всегда распределены в соответствии с кривой Гаусса. Чтобы проверить эту гипотезу на практике, были взяты три детали и измерены каждая 150 раз одним и тем же инструментом. Результаты показаны на рис. 2. Все три детали взяты из одного процесса, но из разных точек интервала допуска. ККШ для деталей показали, что у первой и второй детали процессы стабильны, а у третьей число различимых категорий равно трем. Все гистограммы оказались явно ненормальными, и проверка гипотезы о нормальности с помощью процедуры, представленной в работе [18], подтвердила этот вывод. Таким образом, можно утверждать, что результаты повторных

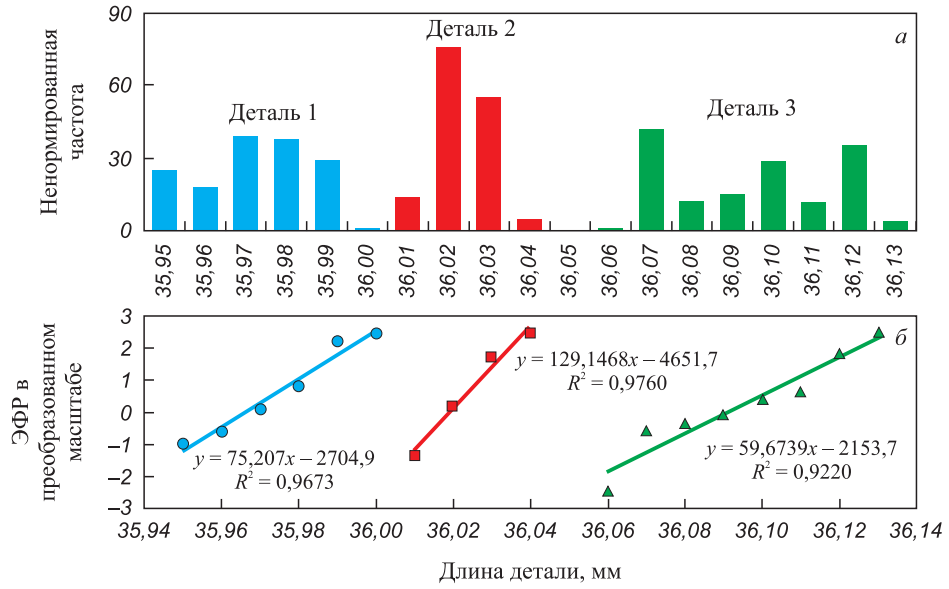

Рис. 2. Гистограммы и эмпирические ФР для многократных повторных замеров

Fig. 2. Histograms and empirical distribution functions (DFs) for many repeated measurements

измерений могут не подчиняться нормальному закону, как и результаты измерения любых объектов.

Как отсутствие нормальности ФР влияет на коэффициенты ККШ? Существует множество процессов с ФР, заметно отличных от закона Гаусса. Как следует анализировать стабильность таких процессов, учитывая, что единственный инструмент определения стабилен ли процесс – это контрольная карта? Подробный обзор литературы и результаты моделирования асимметричных данных, полученные авторами, приведены в работе [17]. Здесь рассмотрены результаты сравнительного анализа ненормальных данных с помощью традиционного подхода и на базе предложенного в работе [17] алгоритма действий. Традиционный подход основан на процитированном выше утверждении из стандарта [11]. Однако, что скажут факты?

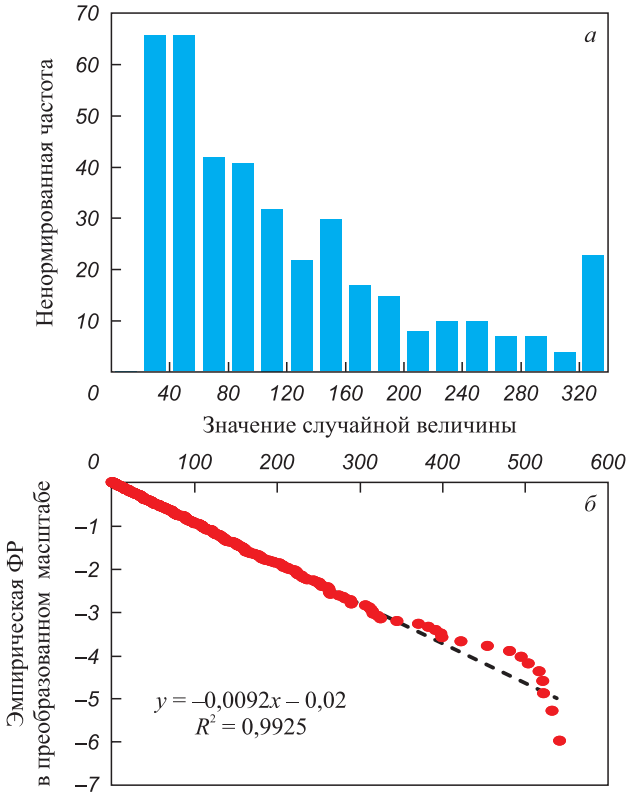

Рис. 3. Гистограмма (*а*) и эмпирическая ФР (*б*) для смоделированных случайных данных

Fig. 3. Histogram (*a*) and empirical DF (EDF) (*б*) for simulated random data

Для начала, были сгенерированы 400 выборок случайных чисел, подчиняющихся экспоненциальному распределению с параметром $\lambda = 0{,}01$ (каждая выборка состояла из 400 точек). Для этого с помощью Excel генерировали случайные числа из равномерной ФР и умножали их логарифмы на (–100), что и дало экспоненциально распределенную выборку данных.

Гистограмма одной из полученных выборок показана на рис. 3, *а*. На рис. 3, *б* приведена эмпирическая ФР на вероятностной сетке экспоненциального распределения. Обе части рис. 3 демонстрируют, что распределение точек в выборке близко к экспоненциальному[1]. Параметры описательной статистики: среднее = 105,5; стандартное отклонение = 105,0; асимметрия = 1,82; эксцесс = 3,78 (*Внимание:* Excel 2013 вычисляет избы-

[1] Примечание для практиков. Анализируя свои данные, мы никогда не знаем, какой ФР их можно описать, если можно. Что же делать? Ответ: построить гистограмму (если число точек больше 50) или ящик-с-усами (если точек меньше 50). Во многих случаях картинка подскажет, можно ли использовать нормальное приближение. Иногда применение вероятностных сеток (нормальной, лог-нормальной, вейбулловской) может помочь.

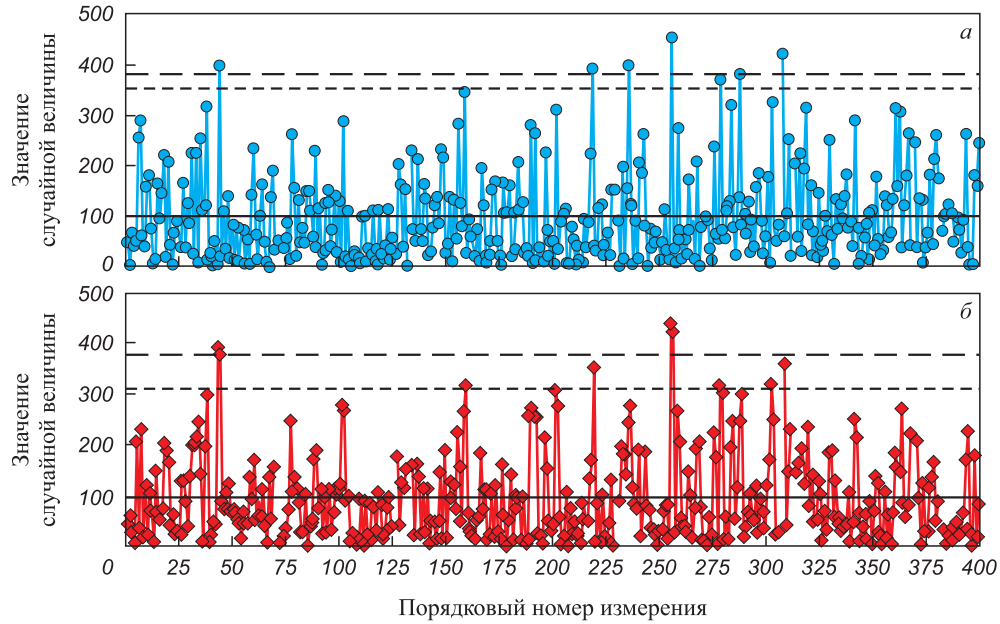

Рис. 4. Карта *x-mR* для смоделированных данных:
а – *x* карта; *б* – *mR* карта

Fig. 4. *x-mR* chart for simulated data:
а – *x* chart; *б* – *mR* chart

точный эксцесс); минимальное значение = 0,51; максимальное = 541,4; медиана = 73,9; первая квартиль = 31,1; третья = 142,8; верхний предел жестких выбросов равен 477,87, что позволило выявить восемь точек жестких выбросов (ЖВ)[2] (они очевидны на рис. 3, *б*).

После исключения ЖВ была построена контрольная карта индивидуальных значений и скользящих размахов (*x-mR*), используя стандартные значения коэффициентов ККШ [19]: $E_2 = 2{,}66$; $D_4 = 3{,}27$. Полученная *x-mR* карта приведена на рис. 4. Контрольные пределы этой карты показаны пунктирными линиями. Процесс нестабилен, так как семь точек (1,8 % общего числа) на карте индивидуальных значений (*x*) и девять точек (2,2 %) на карте скользящих размахов (*mR*) лежат выше верхнего контрольного предела (ВКП). Однако, согласно результатам работы [17], для экспоненциальной ФР коэффициент d_2 должен быть равен 2,99 вместо 2,66. Рассчитанный по модифицированным коэффициентам предел показан на рис. 4 длинными штрихами. Видно, что теперь на карте *x* есть только шесть точек, лежащих выше ВКП. Аналогично на карте *mR* вместо девяти точек имеем только четыре – уменьшение числа сигналов почти вдвое. Таким образом, в данном случае число ложных сигналов уменьшилось на 14 % для карты индивидуальных значений и на 44 % для карты скользящих размахов. Если бы была использована карта не средних, а медиан, результаты были бы такими же.

В качестве второго примера в таблице приведены ежемесячные данные о числе нарушений технологии на большом горно-обогатительном комбинате.

Вопрос: *повышенное значение в сентябре – это особая причина вариаций или нет? Или, другими словами, стабилен ли процесс?*

Чтобы ответить на этот вопрос, нужно построить карту *x-mR*. При использовании традиционного подхода к построению ККШ получаем следующие параметры карты: центральная линия (ЦЛ) = 20,7; средний скользящий размах (ССР) = 13,2; ВКП = 55,7. Следовательно, сентябрьское значение лежит выше ВКП. Исходя из этого, можно утверждать, что процесс нестабилен и нужно искать причину вмешательства. Однако этот результат был получен в рамках традиционного похода. Оправдано ли его использование в данном случае?

[2] Для обнаружения ЖВ использован метод Тьюки с заменой коэффициента 1,5 на 3,0.

Нарушения технологической дисциплины на комбинате

Violations of technological discipline at the plant

Динамика нарушений технологии за год											
Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
13	14	8	11	14	8	33	24	60	15	22	26

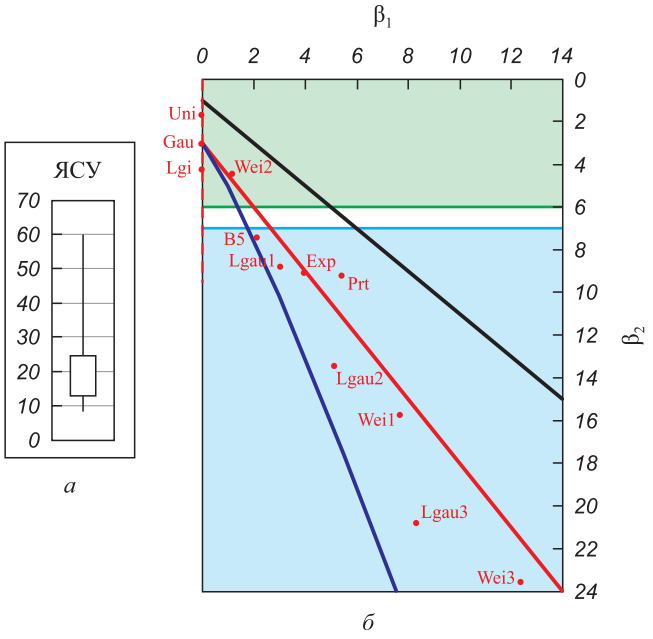

Рис. 5. Ящик-с-усами для данных таблицы (*а*) и плоскость кривых Пирсона из работы [17] (*б*)

Fig. 5. Box-and-whisker plot for Table data (*а*) and Pearson curve plane from [17] (*б*)

Поскольку объем выборки слишком мал, чтобы строить гистограмму, был построен ящик-с-усами (рис. 5). Из него видно, что данные явно асимметричны. Но значимо ли такое отличие от нормальности? Один из способов ответить на этот вопрос состоит в том, чтобы вычислить значения асимметрии и эксцесса. Excel дает значения 2,0 для асимметрии и 4,7 для эксцесса. Но Excel вычисляет избыточный эксцесс, так что реальное значение эксцесса равно 7,7. В работе [17] для значений эксцесса больше 7,0 в тех случаях, когда не известно, какая ФР соответствует нашим данным, предлагается брать значение коэффициента для ближайшей точки на плоскости кривых Пирсона (рис. 5, *б*). Для данных из таблицы ближайшая точка – это B5 (ФР Барра). Значение E_2 для этой ФР = 2,81 и скорректированный ВКП = 57,7 [17]. Следовательно, сентябрьское значение остается выше ВКП, и вывод о стабильности процесса не меняется. Но если бы, например, данные были ближе к экспоненциальному распределению (если бы эксцесс оказался вблизи значения 9), то тогда скорректированный коэффициент равнялся бы 2,99, скорректированный ВКП был бы равен 60,1 и процесс оказался бы стабильным (т. е. нет специальных причин вариации на карте).

Эти примеры демонстрируют важную черту ККШ, которую часто упускают многие авторы, и которая редко бывает понята практиками: контрольная карта Шухарта – это инструмент, требующий тесного взаимодействия человека и процесса. Построение ККШ не может быть полностью алгоритмизировано [20]. Правильное применение ККШ требует глубокого понимания специфики процесса и, одновременно, знания теории контрольных карт. Авторы уверены, что отсутствие такого симбиоза может быть главной причиной большого числа неудачных применений столь мощного инструмента на практике.

Некоторые мысли о стабильности процессов и сопутствующем анализе

Как уже было отмечено выше, контрольная карта Шухарта – единственный инструмент определения стабильности процесса. Однако могут существовать различные типы нестабильности, которые требуют различной реакции. Рассмотрим процесс, показанный на рис. 6. Это реальный процесс с данными, полученными от одного из машиностроительных заводов РФ. Технология изготовления рассматриваемой детали была постоянна все время наблюдения. Система производства тоже не менялась. Из рис. 6 видно, что процесс производит детали, находящиеся внутри допусков (брак отсутствует), так что потребитель удовлетворен.

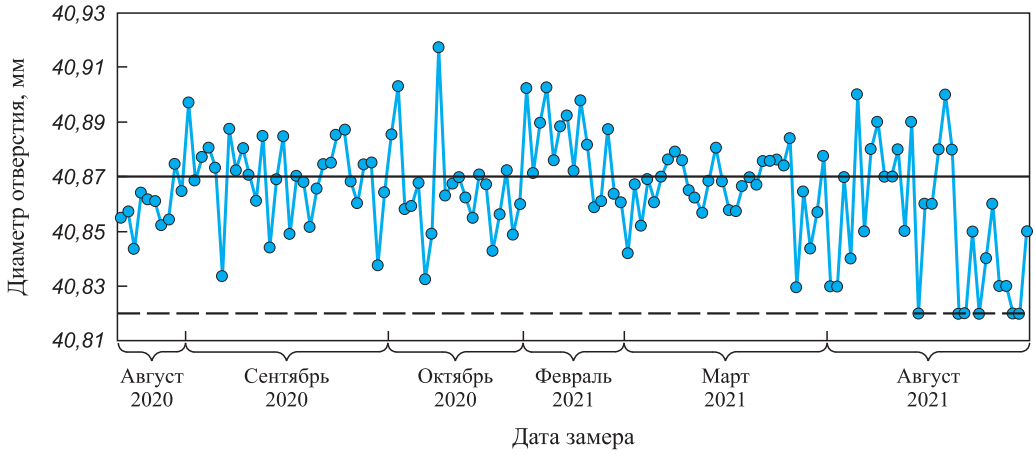

Рис. 6. Карта хода процесса для отверстия диаметром 40,87 ± 0,05

Fig. 6. Run chart for the hole diameter 40,87 ± 0,05

Но что можно сказать о стабильности процесса? Обсудим ответ сначала с точки зрения инженера, малознакомого с процедурой SPC (будем называть его новичком), а затем с точки зрения опытного в методах SPC пользователя (эксперт).

Новичок возьмет все данные без каких-либо сомнений и получит карту *x-mR*, показанную на рис. 7. ЦЛ будет равна 40,865, ВКП = 40,913, нижний контрольный предел (НКП) = 40,817. Эта карта говорит, что процесс нестабилен (одна точка над ВКП и четыре точки над ВКПсР на карте *mR*). Или процесс был стабилен в августе и сентябре 2021 г. и в марте 2022 г., но стал нестабилен в октябре 2021 г. и в марте 2022 г. Никаких проблем у новичка не возникнет и с расчетом индекса воспроизводимости процесса (ИВП): C_p будет равно 1,04 (0,1 делим на 6 сигм, сигма = (средний скользящий размах)/d_2). Значение C_p, равное 1,04, соответствует потенциальному уровню несоответствий (УН), равному 0,18 % или выходу годных (РУ) = 99,82 %.

Эксперт скажет, что процесс явно неоднороден и его следует стратифицировать на однородные сегменты. Такая стратификация показана на рис. 8. Видны четыре участка с различными значениями ЦЛ и разными контрольными пределами:

Участок 1: август – октябрь 2020 г.

ЦЛ = 40,8665; ЦЛ*mR* = 0,0173; ВКП = 40,9124; НКП = 40,8206; ВКП*mR* = 0,0564.

Участок 2: февраль 2021 г.

ЦЛ = 40,8830; ЦЛ*mR* = 0,0189; ВКП = 40,9331; НКП = 40,8329; ВКП*mR* = 0,0616.

Участок 3: март 2021 г.

ЦЛ = 40,8662; ЦЛ*mR* = 0,0123; ВКП = 40,8990; НКП = 40,8334; ВКП*mR* = 0,0403.

Участок 4: конец марта и август 2021 г.

ЦЛ = 40,8537; ЦЛ*mR* = 0,0256; ВКП = 40,9218; НКП = 40,7856; ВКП*mR* = 0,0837.

Значения ИВП для каждого участка будут следующими: участок 1: C_p = 1,09; участок 2: C_p = 1,00; участок 3: C_p = 1,53; участок 4: C_p = 0,73. Если вычислить УН для каждого участка, то полученные значения будут меняться от 4,7 до 27 525 ppm. Разброс очень широкий, поэтому вопросы очевидны:

– какой способ анализа лучше подходит для совершенствования процесса;

– как следует интерпретировать стабильность такого процесса.

Начнем со второго вопроса.

Различные типы нестабильности процессов

Представляется очевидным, что существуют разные типы нестабильности. Вот как обычный тип был описан доктором Демингом в предисловии к книге Шухарта 1939 г. [2]: «Главная задача контрольных карт – разделить рациональным образом вариацию на две составляющие: (1) собственно системную (доктор Шухарт называл это «случайными причинами»), ответственность менеджмента; и (2) особые причины, которые Деминг назвал «специальными», конкретные для некоторого эфемерного (мимолетного, непродолжительного)

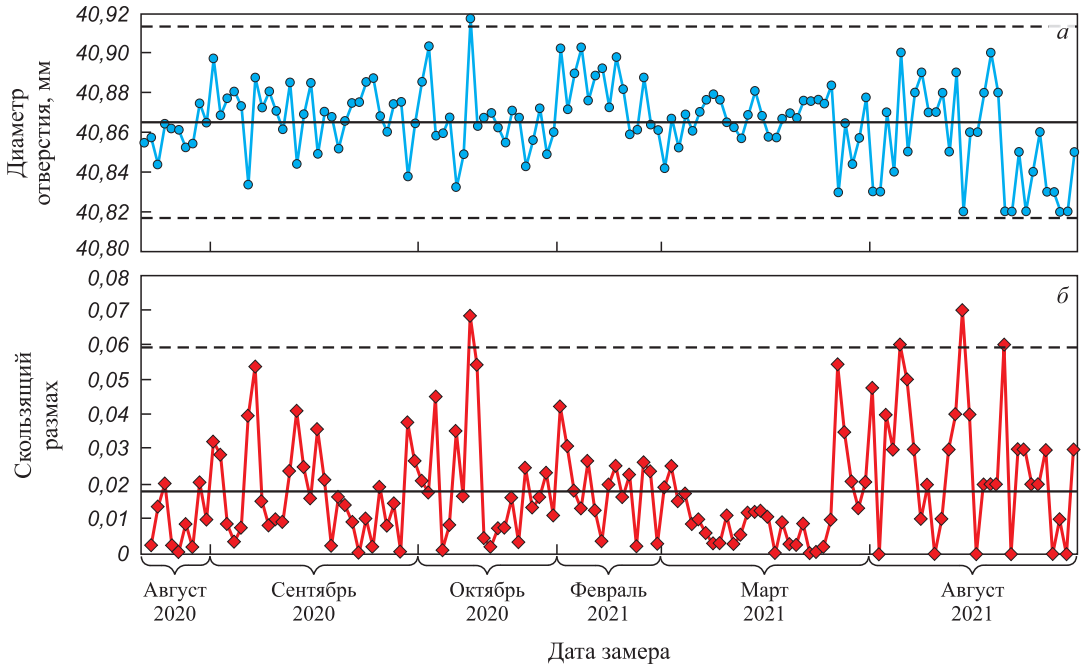

Рис. 7. Карта *x-mR*, построенная новичком:
а – не стратифицированная *x* карта; *б* – не стратифицированная *mR* карта

Fig. 7. *x-mR* chart constructed by a novice:
а – not stratified *x* chart; *б* – not stratified *mR* chart

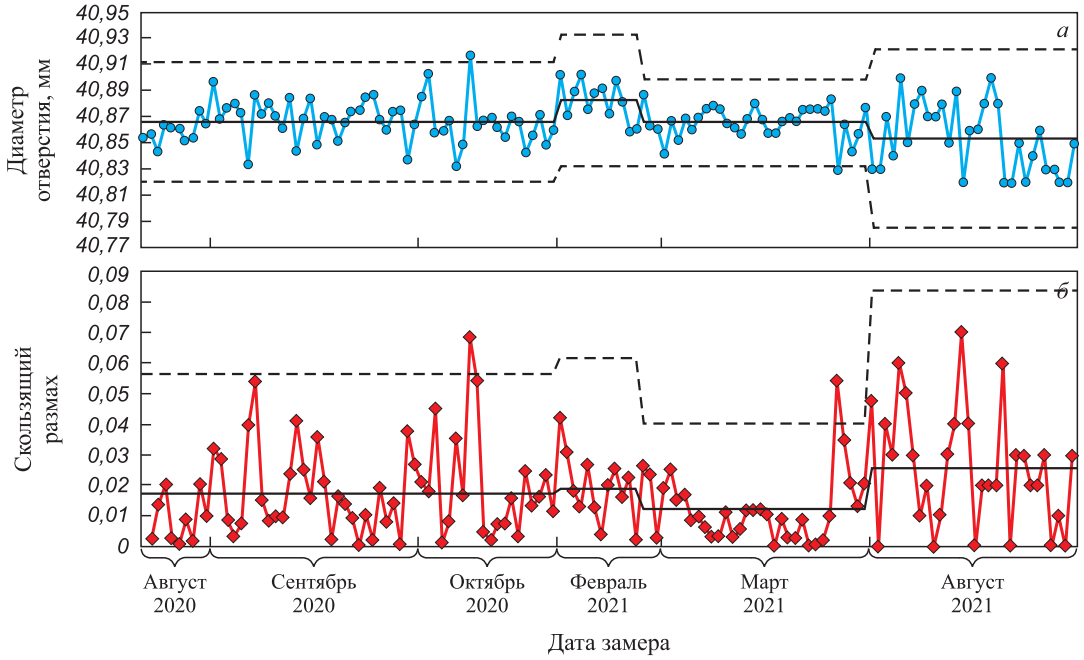

Рис. 8. Карта *x-mR*, построенная экспертом:
а – стратифицированная *x* карта; *б* – стратифицированная *mR* карта

Fig. 8. *x-mR* chart constructed by an expert:
а – stratified *x* chart; *б* – stratified *mR* chart

события, которые обычно можно выявить и устранить. Процесс находится в статистически управляемом состоянии, когда на него более не влияют специальные причины. Работа процесса, находящегося в статистически управляемом состоянии, предсказуема»[3]. Рис. 9 воспроизведен из работы [21], где авторы обсуждали различные типы особых причин вариаций, существующие в разных процессах. В трех из четырех картинок можно видеть скачок среднего процесса, выбросы и дрейф среднего. Однако только рисунок с выбросами соответствует «эфемерному событию», которое упоминал Деминг в вышеприведенной цитате. И это не только точка зрения Деминга. В работе [22] У. Вудал дает следующее определение: «Считается, что “общие причины” вариаций возникают благодаря внутренней природе процесса и не могут быть изменены без изме-

[3] Перевод авторов.

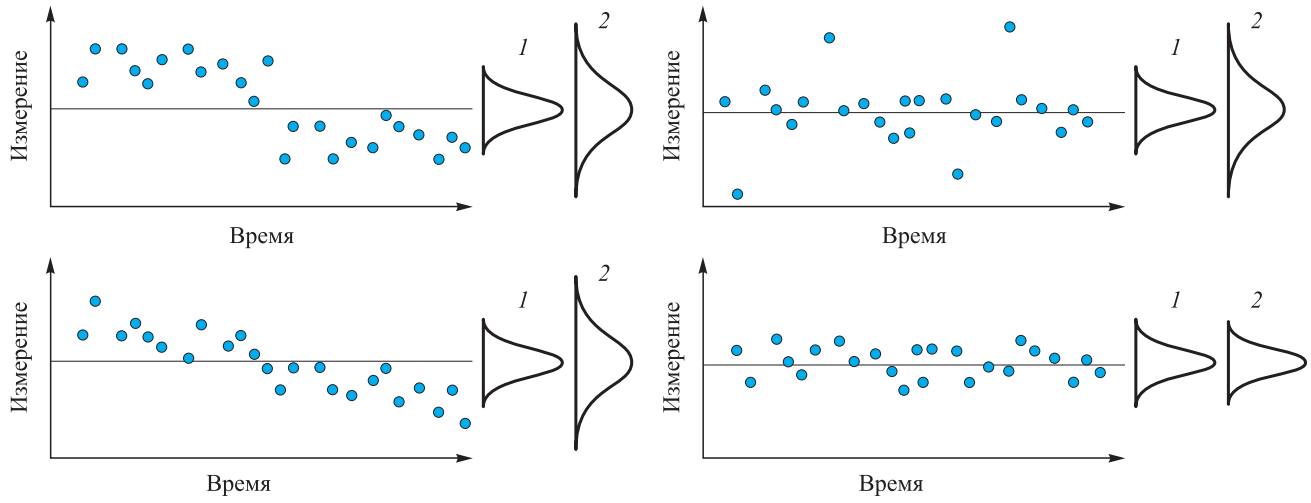

Рис. 9. Различные типы вариаций:
1 – кратковременная; *2* – долговременная

Fig. 9. Different types of variation:
1 – short-term; *2* – long-term

нения самого процесса. “Особые причины” вариаций – это необычные удары (толчки, сотрясения) или другие нарушения (сбои, срывы), причины которых можно и нужно устранить».

Очевидно, две левые картинки на рис. 9 демонстрируют изменения процесса вследствие какой-то причины. Но как она называется? Общая или особая? Поскольку общие причины принято считать чем-то «постоянным» (именно этот термин использовал Шухарт в своих книгах [1; 2]) и внутренне присущим собственно процессу, то причины изменения процесса на рис. 9 слева следует считать особыми. Однако они явно отличаются от выбросов и других эфемерных (кратковременных) событий. Поэтому видится целесообразным ввести в рассмотрение различные типы особых (специальных) причин. В работе [13] авторы предложили ввести два типа особых причин вариаций. Слегка изменив формулировки работы [13], авторы предлагают следующие определения:

Определение 1. Особая причина вариаций типа *I* (*Intrinsic* внутренняя) не меняет систему, в которой работает процесс (например, не меняет тип основополагающей ФР). Как следствие, вполне естественно считать, что этот тип особых причин принадлежит системе (хотя это не есть необходимое условие).

Определение 2. Особая причина типа *X* (*eXtrinsic* – внешняя) изменяет систему, в которой работает процесс (например, изменяет тип основополагающей ФР). Как следствие, вполне естественно считать, что этот тип особой причины не принадлежит системе (хотя это тоже не есть необходимое условие).

Если научное сообщество согласится с предложением авторов, то разница между новичком и экспертом сведется к пониманию разницы между различными типами особых причин. В любом случае, рассматриваемый процесс нестабилен. Однако разные типы нестабильности отличаются друг от друга принципиально. Нестабильность типа *I* требует поиска коренных причин вмешательства внутри системы. Этот поиск должен осуществляться командой процесса, поскольку именно они досконально и лучше, чем кто-либо другой знают и процесс, и систему в целом. Нестабильность типа *X* требует поиска коренной причины вне системы. Доктор Деминг часто повторял: «Системой нужно управлять. Система не может управлять сама собой» [23]. Поиск коренных причин в этом случае должно выполнять высшее руководство, ответственное за систему в целом.

Какой вариант анализа более пригоден для улучшения процесса

Ответ понятен – это зависит от цели и состояния процесса. Оба подхода могут оказаться верными для одной ситуации и неверными для другой. Такое заключение возвращает к началу статьи. По сути, ККШ очень просты технически и совсем не просты для реального применения. Формулы, на которых основаны расчеты параметров карт, доступны ученику начальной школы. Однако правильное применение ККШ требует глубокого понимания как анализируемого процесса, так и хорошего знания многочисленных допущений и ограничений, используемых на практике. Кроме того, нужно уметь объединять знания из различных областей деятельности в своей практике. Вот почему возможно наилучший подход к правильному использованию ККШ – командная работа. Авторы согласны с выводом работы [12]: «Чтобы начать движение в сторону реализации мечты Г. Уэллса – “Статистическое мышление когда-нибудь станет такой же необходимостью, как умение читать и писать” – нужно начать внедрение идей статистического мышления в программу начальной школы». Это означает, что обучение базовым основам построения ККШ должно быть включено в школьную программу.

Выводы

Проанализировано текущее состояние дел в области применения ККШ и обнаружено, что несмотря на их повсеместное применение во всем мире, существует много проблем, препятствующих более эффективному использованию этого мощного инструмента на практике. Чтобы уменьшить число таких проблем, предлагается следующее:

– отказаться от допущения о нормальности данных при анализе измерительных систем;

– использовать новые константы при расчете контрольных пределов на ККШ, если данные процесса явно ненормальны;

– использовать новый подход при определении особых причин вариаций.

Эти идеи, при условии их внедрения, будут иметь глубокое влияние на применение ККШ практиками. Они позволят существенно уменьшить число ошибочных решений при анализе реальных данных, т. е. улучшить качество управления соответствующими процессами.

Возможно, самая далеко идущая идея, вытекающая из результатов исследования, может быть сформулирована следующим образом – правильное применение ККШ не может быть полностью алгоритмизировано. Такие операции, как выбор однородных участков процесса, выбор типа карты, выбор длительности фазы 1, выбор правильных коэффициентов для расчета контрольных пределов требуют глубокого знания специфики процесса и дополнительного анализа, например, ФР или порядка следования данных и др. Это знание не может быть встроено в статистические программы заранее, оно рождается в процессе взаимодействия человека, который управляет процессом, и, собственно, самим процессом.

Авторы надеются, что данная статья поможет продвижению простой мысли: контрольная карта Шухарта кажется очень простым инструментом SPC, но это впечатление обманчиво, так как она не может быть использована эффективно без глубокого понимания самого процесса и знания основ теории вариабельности.

Список литературы / References

1. Shewhart W. Economic Control of Quality of Manufactured Product. Milwaukee: ASQ Quality Press.; 1980:501.
2. Shewhart W. Statistical Methods from the Viewpoint of Quality Control. N.Y.: Dover Publications, Inc.; 1986:163.
3. Kume H. Statistical Methods for Quality Improvement. The Association for Overseas Technical Scholarship (AOTS); 1985:231.
4. Wheeler D. Advanced Topics in Statistical Process Control. Knoxville: SPC Press, Inc.; 1995:484.
5. Alwan L.C. Statistical Process Analysis. Irwin: McGrow-Hill series in operations and decision sciences; 2000:768.
6. Rinne H., Mittag H-J. Statistische Methoden der Qualitätssicherung. Fernuniversität-Gesamthochschule-in-Hagen, Deutschland, Fachbereich Wirtschaftswissenschaft; 1993: 615. (In Germ.).
7. Schindowski E., Schürz O. Statistische Qualitätskontrolle. Berlin: Veb Verlag Technik; 1974:636. (In Germ.).
8. Murdoch J. Control Charts. The Macmillan Press, Ltd; 1979:150.
9. Montgomery D.C. Introduction to Statistical Quality Control. 6th ed. John Wiley & Sons; 2009:752.
10. Balestracci D. Data Sanity: A Quantum Leap to Unprecedented Results. Medical Group Management Association; 2009:326.
11. ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 2. Контрольные карты Шухарта. М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»; 2016:46.
12. Шереметьева С.А., Шпер В.Л. Бизнес и теория вариабельности: дружба или непонимание. *Стандарты и качество*. 2022;(2):92–97. http://doi.org/10.35400/0038-9692-2022-2-72-21

    Sheremetyeva S.A., Shper V.L. Business and variation: friendship or misunderstanding. *Standards and Quality*. 2022;(2):92–97. (In Russ.). http://doi.org/10.35400/0038-9692-2022-2-72-21
13. Adler Y., Shper V., Maksimova O. Assignable causes of variation and statistical models: Another approach to an old topic. *Quality and Reliability Engineering International*. 2011;27(5):623–628. https://doi.org/10.1002/qre.1207
14. Shper V., Adler Y. The importance of time order with Shewhart control charts. *Quality and Reliability Engineering International*. 2017;33(6):1169–1177. http://doi.org/10.1002/qre.2185
15. Shper V., Gracheva A. Simple Shewhart control charts: Are they really so simple? *International Journal of Industrial and Operations Research*. 2021;4(1):010. http://doi.org/10.35840/2633-8947/6510
16. Deming W. Out of Crisis. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press; 1987:524.
17. Shper V., Sheremetyeva S. The impact of non-normality on the control limits of Shewhart's charts. *Тяжелое машиностроение*. 2022;(1–2):16–29.

    Shper V., Sheremetyeva S. The impact of non-normality on the control limits of Shewhart's charts. *Tyazheloye Mashinostroyeniye*. 2022;(1–2):16–29.
18. Ryan T.A, Joiner B.L. *Normal Probability Plots and Tests for Normality*. Available at: https://www.additive-net.de/de/component/jdownloads/send/70-support/236-normal-probability-plots-and-tests-for-normality-thomas-a-ryan-jr-bryan-l-joiner
19. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами. Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта. Москва: Альпина Бизнес Букс; 2009:409.
20. Адлер Ю.П. Алгоритмически неразрешимые задачи и искусственный интеллект. *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2018;7/77(5):17–24.

    Adler Yu.P. Algorithmically unsolvable problems and artificial intellect. *Economics and management: problems, solutions*. 2018;7/77(5):17–24. (In Russ.).
21. Jensen W., Szarka J. III, White K. A better picture. *Quality Progress*. 2020;53(1):41–49.
22. Woodall W. Controversies and contradictions in statistical process control. *Journal of Quality Technology*. 2000;32(4):341–350. https://doi.org/10.1080/00224065.2000.11980013
23. Deming W. The Essential Deming. Leadership Principles from the Father of Quality. Orsini J. ed. N.Y.:McGrow-Hill; 2013:336.

Сведения об авторах / Information about the Authors

Владимир Львович Шпер, *к.т.н., доцент кафедры сертификации и аналитического контроля,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
E-mail: vlad.shper@gmail.com

Светлана Алексеевна Шереметьева, *аспирант кафедры сертификации и аналитического контроля,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
E-mail: prosto_sveta92@mail.ru

Владимир Юрьевич Смелов, *к.т.н., доцент кафедры сертификации и аналитического контроля,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; *технический директор,* «ГПБ Комплект» (АО)
ORCID: 0000-0002-9438-4054
E-mail: b.c.21@mail.ru

Vladimir L. Shper, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Certification and Analytical Control,* National University of Science and Technology "MISIS"
E-mail: vlad.shper@gmail.com

Svetlana A. Sheremetyeva, *Postgraduate of the Chair of Certification and Analytical Control,* National University of Science and Technology "MISIS"
E-mail: prosto_sveta92@mail.ru

Vladimir Yu. Smelov, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Certification and Analytical Control,* National University of Science and Technology "MISIS"; *Technical Director,* GPB Complect (JSC)
ORCID: 0000-0002-9438-4054
E-mail: b.c.21@mail.ru

Елена Ивановна Хунузиди, *к.т.н., доцент кафедры сертификации и аналитического контроля,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»; *руководитель отдела по обеспечению качества*, ООО «АтомТехноТест»
ORCID: 0000-0002-2396-6911
E-mail: el_hun@mail.ru

Elena I. Khunuzidi, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Certification and Analytical Control,* National University of Science and Technology "MISIS"; *Head of Division of Quality Assurance,* LLC "AtomTekhnoTest"
ORCID: 0000-0002-2396-6911
E-mail: el_hun@mail.ru

Вклад авторов / Contribution of the Authors

В. Л. Шпер – формирование основной концепции, цели и задачи исследования, формирование выводов.
С. А. Шереметьева – планирование и выполнение численного моделирования, проведение сопутствующих расчетов, доработка текста.
В. Ю. Смелов – подготовка текста, оформление графических материалов, обсуждение выводов.
Е. И. Хунузиди – научное руководство, анализ результатов исследований, корректировка выводов.

V. L. Shper – formation of the basic concept, research goal and objectives; formulation of conclusions.
S. A. Sheremetyeva – planning and making simulation, calculations, revision of the text.

V. Yu. Smelov – writing the text, graphic design, discussion of conclusions.
E. I. Khunuzidi – scientific guidance, analysis of results, correction of conclusions.

Поступила в редакцию 04.03.2023
После доработки 20.11.2023
Принята к публикации 11.12.2023

Received 04.03.2023
Revised 20.11.2023
Accepted 11.12.2023