



# Математические методы проверки достоверности данных о надёжности локомотивов, их эксплуатации и техническом обслуживании



Игорь ЛАКИН



Виктор МЕЛЬНИКОВ

*Игорь Игоревич Лакин<sup>1</sup>,  
Виктор Александрович Мельников<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ), Москва, Россия.

<sup>2</sup> ООО «Кlover Групп», Москва, Россия.

✉ <sup>1</sup> [i.lakin@tmholding.ru](mailto:i.lakin@tmholding.ru).

✉ <sup>2</sup> [Lordson@yandex.ru](mailto:Lordson@yandex.ru).

## АННОТАЦИЯ

Целью статьи является описание предлагаемого авторами метода контроля достоверности исходных данных для управления надёжностью локомотивов и локомотивным хозяйством в целом. Показано, что вероятностно-статистические методы являются основой теории вариабельности предприятия Эдварда Деминга, позволяющей управлять качеством продукции предприятий, включая их надёжность.

В практике железнодорожного транспорта и локомотивного комплекса используемые среднестатистические данные на практике не являются однородными, что в популярных изданиях принято называть «средней температурой по больнице». Однородность данных определяется их унимодальностью, т.е. наличием в выборке одного процесса. Неудачное формирование выборки приводит к её бимодальности и даже мультимодальности.

Методом исследования, предложенным в статье, является проверка на унимодальность исходных данных на основании следствия закона больших чисел, согласно которому при увеличении числа данных однородные выборки стремятся к одному из законов распределения случайной величины: нормальному, экспоненциальному, логнормальному или другому известному закону. Следовательно, любая унимодальная выборка должна соответствовать критерию согласия, в качестве которого в статье предлагается использовать

критерий Пирсона («хи-квадрат»,  $\chi^2$ ). Унимодальность данных предлагается оценивать через вероятность соответствия выбранному для рассмотрения закону распределения случайной величины, считая достаточной вероятность более 0,3 (30 %).

На примере данных эксплуатации локомотивов и данных бортовых микропроцессорных систем показаны данные, которые действительно не могут быть унимодальными, и указано на наличие данных, требующих изменения правил формирования выборки для достижения унимодальности. Например, при рассмотрении среднесуточных пробегов локомотивов по сериям по конкретным делам приписки при участии в одном виде движения (магистральное движение, вывозная или маневровая работа) достигается их унимодальность. Попытка укрупнить данные (взять несколько серий, несколько полигонов и др.) приводит к потере унимодальности.

В статье рассмотрена унимодальность данных бортовых микропроцессорных систем управления МСУ-ТП тепловозов серии 2ТЭ116У. Ожидаемое время работы по позициям контроллера машиниста оказалось относящимся к мультимодальным данным. Неожиданно унимодальным оказался ток тяговых электродвигателей независимо от ходовой позиции контроллера машиниста.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, локомотивы, надёжность, проверка достоверности.

**Для цитирования:** Лакин И. И., Мельников В. А. Математические методы проверки достоверности данных о надёжности локомотивов, их эксплуатации и техническом обслуживании // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 2 (99). С. 77–82. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-2-8>.

**Полный текст статьи на английском языке, публикуется во второй части данного выпуска.  
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.**



## ВВЕДЕНИЕ

Задача научной организации производства, управления качеством технологических процессов впервые была решена в конце XIX – в начале XX веков Фредериком Тейлором [1]. В начале XX века принципы управления качеством продукции и её себестоимостью научно и практически развил Генри Гант (наиболее известна «диаграмма Ганта», хотя это далеко не единственная и не основная его разработка). Качественно новый этап управления производством в середине XX века связан с именами Уолтера Шухарта и Эдварда Деминга, которые ввели в менеджмент обязательность применения принципа постоянного улучшения (цикл PDCA). Принимая за основу тезис о постоянной изменчивости производственной ситуации, Э. Деминг развил теорию вариабельности предприятий, сделав практику применения вероятностно-статистических методов в управлении обязательной [1].

Развитие теории Э. Деминга применительно к отечественному локомотивному комплексу во второй половине XX века выполнил выдающийся учёный, доктор технических наук (д. т. н.), профессор Игорь Петрович Исаев, который не только адаптировал математический аппарат к условиям транспорта, но и практически реализовал систему в локомотивном депо «Рыбное» [2]. И. П. Исаев разработал теорию применения вероятностно-статистических методов в исследовании надёжности локомотивов, которая развивалась его учениками и последователями [3]. Вероятностно-статистические методы стали обязательной частью учебного процесса [4].

Современный этап развития теории надёжности локомотивов связан с развитием средств вычислительной техники (IT-технологий). Под руководством д. т. н. Игоря Капитоновича Лакина создана автоматизированная система управления (АСУ) локомотивным хозяйством (АСУТ) [5] – основа системы управления локомотивным комплексом ОАО «РЖД». Как развитие АСУТ И. К. Лакиным и его учениками создана АСУ технического обслуживания и ремонта (ТОиР) локомотивов – АСУ «Сетевой график» (АСУ СГ) для управления ТОиР в 85 сервисных локомотивных депо группы компаний «ЛокоТех» [6; 7]. В АСУ СГ инкапсулированы научные положения менеджмента качества, Lean Production, TQM и др. [13–15], в результате подготовлено

пять кандидатских диссертаций и одна докторская.

С июля 2014 года ОАО «РЖД» перешло на сервисную систему ТОиР локомотивов, при которой сервисные компании (представители заводов-изготовителей) получают доход (выручку) не за выполненный объём ТОиР, а за полезный пробег локомотивов (руб./км). Предусмотрен понижающий коэффициент, если не обеспечен заданный в договоре сервисного обслуживания уровень надёжности (SLA). Все вновь покупаемые ОАО «РЖД» локомотивы поставляются по Контракту жизненного цикла (КЖЦ), где установлены более строгие требования к надёжности локомотивов. Определить на 40 лет вперёд затраты на ТОиР – трудная задача. Переход от бюджетной формы оплаты ТОиР к КЖЦ требует применения вероятностно-статистических методов: необходимо прогнозировать объём ТОиР как в рамках планово-предупредительной системы, так и для сверхцикловых неплановых работ из-за отказов, необходимости модернизации и др. Возрастает роль вариативных методов управления.

В процессе эксплуатации локомотивов, выполненная ими работа (в т·км, кВт·ч, млн км и др.) фиксируется в информационных системах ОАО «РЖД» [5]. Одновременно в бортовых микропроцессорных системах управления (МСУ) локомотива по информации с датчиков регистрируется информация о режимах работы оборудования, производится техническое диагностирование [6; 7]. Эта информация является исходной для организации ТОиР как планово-предупредительного с элементами предиктивного ремонта (с учётом фактического технического состояния локомотивов, выполненной ими работы).

При заходе локомотива в сервисное локомотивное депо (СЛД) на ТОиР выполняется анализ накопленной в процессе эксплуатации информации, производится дополнительное диагностирование при помощи переносных и стационарных систем (вибродиагностирование, измерение профиля бандажа, измерение сопротивления изоляции и др.). Используются также результаты визуального осмотра, замечания машиниста из бортового журнала. Вся информация собирается в электронной диагностической карте, которая является основанием для назначения сверхцикловых работ для устранения отказов

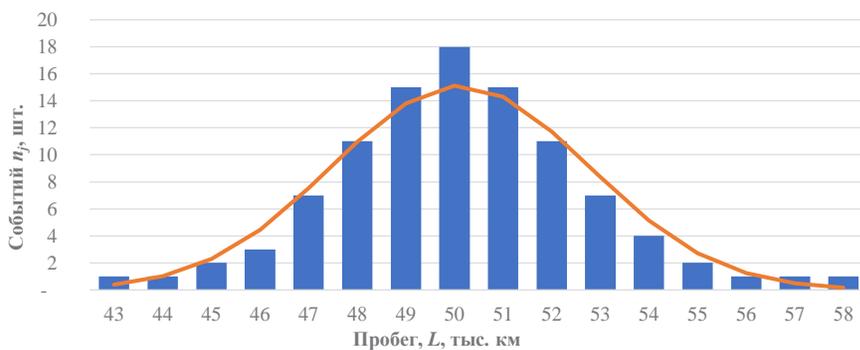


Рис. 1. Пример распределения межремонтного пробега, тыс. км (столбцы – фактические данные, график – теоретическое распределение).

и предотказных состояний. На каждую плановую и сверхцикловую работу выписывается электронный наряд, в котором фиксируются трудозатраты, полученные со склада материалы и запасные части, а в будущем – использованный при ТОиР инструмент и оборудование. Регистрируется простой локомотива на различных операциях. В результате в процессе эксплуатации и ТОиР локомотивов формируется комплексная база данных на протяжении всего жизненного цикла локомотивов по безбумажной технологии. Важно, что данные являются результатом процессов эксплуатации и ТОиР, а не вводятся вручную.

Информация жизненного цикла локомотивов нужна не только для управления производственными процессами ТОиР, но и для анализа эффективности организации эксплуатации и ТОиР локомотивов. Современная интероперабельная система АСУ конструирования, производства, эксплуатации и ТОиР локомотивов создаёт большой объём данных (Big Data), анализ которого не возможен без программируемых алгоритмов анализа. Но автоматизированная обработка данных имеет риск получения ложных заключений.

Марк Твен в книге «Главы моей биографии» процитировал премьер-министра Великобритании «Существуют три вида лжи: ложь, наглая ложь и статистика». Это широко известное выражение подчёркивает наличие рисков при формальной математической обработке данных. Один из них известен как «средняя температура по больнице»: смешивание разнородных данных. Со средней температурой ошибка очевидна. В практике локомотивного комплекса часто пользуются усреднёнными значениями для оценки эффективности эксплуатации и ТОиР локомотивов: участковая скорость, время простоя на ТОиР

и его ожидании, интенсивность отказов по видам оборудования, необходимая периодичность ТОиР по видам оборудования и др. Проверка на унимодальность при этом не производится. Поэтому, целью проводимого исследования работы является автоматизация процесса проверки статистических данных на достоверность.

В качестве метода исследования выбрана проверка распределения исследуемой величины на унимодальность, которая возможна по свойству закона больших чисел [4]: при увеличении выборки вероятность появления того или иного значения приближается к устойчивому значению.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Унимодальный процесс принимает вид стандартного распределения случайной величины: нормального, экспоненциального, логнормального или др.: оценить унимодальность можно по критерию согласия проверки гипотез. Рассмотрим пример распределения пробега локомотива  $L$  между ТР-1 (рис. 1 и табл. 1).

Сформировано четыре выборки с одинаковой пропорцией распределения, но с различным числом данных  $N = \{100, 1000, 10\,000, 100\,000\}$ . У распределений одинаковое математическое ожидание  $L_n = 50,12$  тыс. км и почти одинаковое среднеквадратичное отклонение  $\sigma_n$  [4]:

$$L_n = \frac{1}{N_n} \sum_{i=1}^{N_n} L_{ni}, \quad (1)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{N_{n-1}} \sum_{i=1}^{N_{n-1}} (L_n - L_{ni})^2}, \quad (2)$$

где  $L_n$  – математическое ожидание выборки  $n \in N = \{100, 1000, 10\,000, 100\,000\}$ ;

$L_{ni}$  –  $i$ -й пробег выборки  $n \in N = \{100, 1000, 10\,000, 100\,000\}$ ;





Таблица 1

Примеры распределений межремонтного пробега [выполнена авторами]

i	L <sub>i</sub> , тыс. км	Объём выборки фактический N				Теоретический объём выборки N <sub>T</sub>				
		100	1 000	10 000	100 000	f(L <sub>i</sub> )	100	1 000	10 000	100 000
1	43	1	10	100	1 000	0,0040	0	4	40	395
2	44	1	10	100	1 000	0,0102	1	10	102	1 024
3	45	2	20	200	2 000	0,0230	2	23	230	2 298
4	46	3	30	300	3 000	0,0446	4	45	446	4 465
5	47	7	70	700	7 000	0,0751	8	75	751	7 513
6	48	11	110	1 100	11 000	0,1095	11	110	1 095	10 951
7	49	15	150	1 500	15 000	0,1382	14	138	1 382	13 823
8	50	18	180	1 800	18 000	0,1511	15	151	1 511	15 111
9	51	15	150	1 500	15 000	0,1431	14	143	1 431	14 308
10	52	11	110	1 100	11 000	0,1173	12	117	1 173	11 733
11	53	7	70	700	7 000	0,0833	8	83	833	8 333
12	54	4	40	400	4 000	0,0513	5	51	513	5 126
13	55	2	20	200	2 000	0,0273	3	27	273	2 731
14	56	1	10	100	1 000	0,0126	1	13	126	1 260
15	57	1	10	100	1 000	0,0050	1	5	50	503
16	58	1	10	100	1 000	0,0017	0	2	17	174
	L <sub>n</sub>	50,12	50,12	50,12	50,12					
	σ	2,64	2,63	2,62	2,6					

Таблица 2

Вероятность соответствия нормальному закону по χ<sup>2</sup> [выполнена авторами]

	Объём выборки фактический N			
N <sub>n</sub>	100	1 000	10 000	100 000
χ <sup>2</sup>	7	73	732	7 325
P <sub>n</sub>	0,3	0	0	0

N<sub>n</sub> – максимальное число данных в выборке n ∈ N.

По критерию согласия Пирсона вычисляется «хи-квадрат» χ<sup>2</sup><sub>n</sub> для каждой выборки n ∈ N:

$$\chi^2_n = \sum_{i=1}^{N_n} \frac{(L_{ni} - L_{теор i})^2}{L_{теор i}}, \quad (3)$$

где L<sub>теор i</sub> – теоретическое число попаданий в диапазон для нормального закона распределения случайной величины, вычисляемую по функции плотности распределения f(x) [4] (см. табл. 1):

$$L_{теор} = \int_{x_{n1}}^{x_{n2}} f(x) dx. \quad (4)$$

Вероятность соответствия нормальному закону P<sub>n</sub> определяется по таблице Пирсона. В табл. 2 приведены результаты расчёта: только для N = 100 есть значимая вероятность соответствия нормальному закону P<sub>100</sub> = 0,3.

Четыре одинаковых распределения имеют совершенно разную вероятность соответствия закону: вероятность соответствия край-

не чувствительна к объёму выборки. В практике локомотивного хозяйства выборки всегда будут разного объёма и зашумлённые даже при больших выборках. Ориентация на минимальную из них снизит объём полезной информации. Критерий Пирсона эффективен и чувствителен для строго унимодальных выборок и для инкапсуляции в АСУ не подходит.

Рассмотренный пример проверен по критерию согласия Колмогорова–Смирнова, согласно которому надо найти максимальное различие фактического L<sub>ni</sub> и теоретического L<sub>теор i</sub> распределений:

$$\Delta_{max} = \text{Max}(f_{\phi i} - f_{\tau i}), \quad (5)$$

где f<sub>φi</sub> = N<sub>i</sub> / N;

$$f_{\tau i} = N_{\tau i} / N_{\tau};$$

N<sub>i</sub> – число фактических попаданий в диапазон i;

N – размер эмпирической выборки;

N<sub>τi</sub> – число теоретических попаданий в диапазон i;

N<sub>τ</sub> – размер контрольной выборки (N<sub>τ</sub> = N).

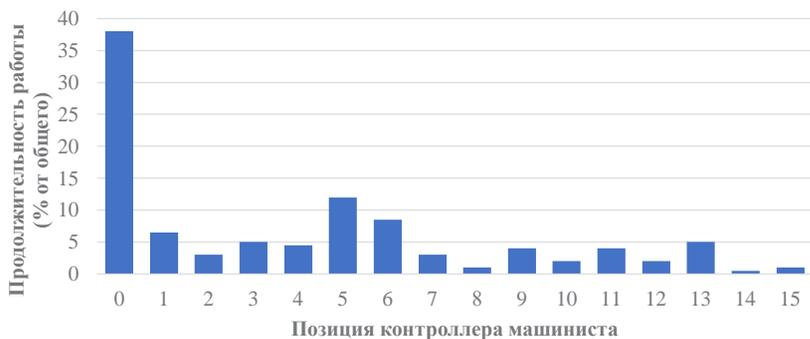


Рис. 2. Распределение времени работы ДГУ тепловоза по позициям [выполнено авторами].

Таблица 3

Вероятность соответствия нормальному закону по  $D_\phi$  [выполнена авторами]

N	100	1000	10000	100000
$\Delta_{max}$	0,029	0,029	0,029	0,029
D	0,2910	0,9139	2,8885	9,1341
$P_n$	0,9999	0,3791	0,00000018	0

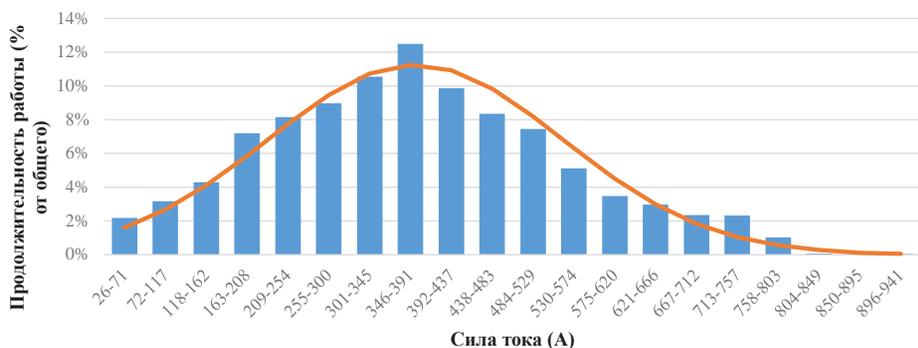


Рис. 3. Распределение тока ТЭД у тепловозов серии 2ТЭ116У [выполнено авторами].

Далее следует рассчитать показатель  $D$ , который для нормального закона:

$$D_\phi = \Delta_{max} \cdot (N^{0,5} - 0,01 + 0,85 / N^{0,5}). \quad (6)$$

В табл. 3 приведены результаты расчёта: при увеличении выборки вероятность соответствия уменьшается медленнее, чем по критерию согласия Пирсона: при выборках менее 1000 проверка унимодальности по  $D_\phi$  эффективна.

Проверка унимодальности данных внедрена авторами в практику их работы. Приведём примеры полученных на практике данных.

Один из важных показателей эксплуатации локомотивов – средняя участковая скорость движения. Анализ данных бортовых микропроцессорных систем управления (МСУ) показал наличие как минимум двух пиков. Например, у тепловозов серии 2ТЭ116У на Октябрьской ж.д. есть три пика – в диапазонах 18–25 км/ч, 34–41 км/ч и 50–

57 км/ч, на Приволжской – два: 42–49 км/ч и 58–65 км/ч, на Свердловской ж.д.: 26–31 км/ч, 68–73 км/ч.

Интересные данные получены авторами по работе дизель-генераторной установки тепловозов серии 2ТЭ116У за 3164 суток эксплуатации (рассмотрено 120 секций локомотивов на трёх полигонах эксплуатации). Распределение времени работы по позициям ожидаемо оказалось мультимодальным (рис. 2), но при этом ток тяговых электродвигателей оказался унимодальным (рис. 3).

В заключении следует отметить, что анализ мировых публикаций показывает, что в статистических материалах по железнодорожному транспорту уделяется недостаточно внимания проверке унимодальности данных, что снижает их достоверность [8–12]. Однако в целом задаче проверки достоверности данных посвящено большое число публикаций [13–15].



## ВЫВОДЫ

1. Автоматизация процесса управления жизненным циклом локомотивов в целом и их техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) в частности позволяет инкапсулировать в программное обеспечение математические методы управления, включая вероятностно-статистические согласно теории вариабельности Эдварда Деминга.

2. При вероятностно-статистической обработке данных об эксплуатации локомотивов и их ТОиР перед принятием управляющих решений необходимо проверить данные на унимодальность как принадлежащие одному процессу. При бимодальном или мультимодальном процессе данные следует разделить на группы, добившись тем самым унимодальности.

3. Проверку на унимодальность в автоматизированных системах управления (АСУ) предлагается производить через проверку согласия гипотезы об унимодальном распределении как наличия значимой вероятности соответствия распределения рассматриваемого параметра одному из законов распределения случайной величины. Предпочтительным является критерий согласия Колмогорова–Смирнова.

4. Комплексный анализ данных эксплуатации и ТОиР параметров дизель-генераторных установок и тяговых электродвигателей локомотивов показал, что унимодальностью обладают данные одной серии локомотивов одного депо приписки при участии в одном виде движения (магистральное движение, вывозная или маневровая работа): местные условия эксплуатации, весовые нормы, профиль и скоростной режим приводят к потере унимодальности при попытке обобщить данные.

5. Выявленная унимодальность тока тяговых электродвигателей (ТЭД) тепловозов в режиме тяги по совокупности работы на всех тяговых позициях дизель-генераторной установки позволяет учитывать этот факт при конструировании ТЭД.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лакин И. К., Супрун В. Н. История создания систем менеджмента качества (СМК) и особенности их внедрения на железнодорожном транспорте. – Красноярск: КФ ИрГУПС, 2006. – 91 с.
2. Стрельников В. Т., Исаев И. П. Комплексное управление качеством технического обслуживания и ремонта электровозов. – М.: Транспорт, 1980. – 207 с.
3. Горский А. В., Воробьев А. А. Надёжность электроподвижного состава. – М.: Маршрут, 2005. – 303 с.
4. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. – М.: Академия, 2000. – 464 с.
5. Лакин И. К., Смирнов Ю. В., Тимченко А. Ю. и др. Автоматизированная система управления локомотивным хозяйством. АСУТ. – М.: Отраслевой центр внедрения новой техники и технологий, 2002. – 516 с.
6. Липа К. В., Пустовой В. Н., Лянгасов С. Л., Лакин И. К., Аболмасов А. А., Лакин И. И., Мельников В. А. и др. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика. – М.: ЛокоТех, 2015. – 212 с.
7. Лакин И. К., Пустовой В. Н., Аболмасов А. А. Автоматизированная система управления эксплуатационным жизненным циклом локомотивов // Тр. Всероссийской научно-практ. конференции с международным участием «Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава». – Красноярск: ДЦВ Красноярской ж.д., 2020. – С. 223–242. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42908916>. Доступ 24.03.2022.
8. Bonadero, A. Statistical methods and dynamic railway. *Ingegneria Ferroviaria*, December 2011, Vol. 66 (12), pp. 1087–1107.
9. Ghosh, Saptarshi; Banerjee, Avishek; Sharma, Naveen; Ganguly, Niloy; Bhattacharya, Saurav; Mukherjee, Animesh. Statistical Analysis of the Indian Railway Network: a Complex Network Approach. *Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement*, 2011, Vol. 2, pp. 123–137. DOI: 10.5506/APhysPolBSupp.4.123.
10. Railway Statistics. Indian Railways. 108 p. [Электронный ресурс]: <http://122.252.243.98/ZRT11/statistics.pdf>. Доступ 24.03.2022.
11. Reference Manual in Rail transport statistics. Eurostat. January 2021. [Электронный ресурс]: [https://ec.europa.eu/eurostat/documents/29567/3217334/Reference\\_manual\\_for\\_rail\\_transport\\_statistics%2E%80%93version\\_10.4\\_%282021\\_edition%29.pdf/b152c85c-11d6-cff4-a1a8-d34bd4cac839?t=1610708187248](https://ec.europa.eu/eurostat/documents/29567/3217334/Reference_manual_for_rail_transport_statistics%2E%80%93version_10.4_%282021_edition%29.pdf/b152c85c-11d6-cff4-a1a8-d34bd4cac839?t=1610708187248). Доступ 24.03.2022.
12. Rail transportation occurrences in 2020. Transportation Safety Board of Canada. [Электронный ресурс]: <https://www.bst-tsb.gc.ca/eng/stats/rail/2020/sser-ssro-2020.html>. Доступ 24.03.2022.
13. Yi, Mike. A Complete Guide to Histograms. Chartio. [Электронный ресурс]: <https://chartio.com/learn/charts/histogram-complete-guide/>. Доступ 24.03.2022.
14. Unimodal Distribution: Overview. Statistics How To. [Электронный ресурс]: <https://www.statisticshowto.com/unimodal-distribution-2/>. Доступ 24.03.2022.
15. What Is Statistical Process Control? Infinity QS. [Электронный ресурс]: <https://www.infinityqs.com/resources/what-is-spc>. Доступ 24.03.2022. ●

### Информация об авторах:

**Лакин Игорь Игоревич** – кандидат технических наук, руководитель направления по техническому управлению АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ), Москва, Россия, [i.lakin@tmholding.ru](mailto:i.lakin@tmholding.ru).

**Мельников Виктор Александрович** – специалист, старший эксперт, ООО «Кlover Групп», Москва, Россия, [melnikov.viktor@corp.itclover.ru](mailto:melnikov.viktor@corp.itclover.ru).

Статья поступила в редакцию 01.03.2022, одобрена после рецензирования 24.03.2022, принята к публикации 31.03.2022.