



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.562
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-138-148

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ОПЕРАТИВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Бобрышов А.П., Кузьменко В.П., Солёный С.В., Квас Е.С.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Вопрос оценки качества электрических контрольно-измерительных приборов устанавливает необходимость проведения перечня нетривиальных операций, нацеленных на оценку наибольшего числа параметров, характеризующих измерительные устройства. Одним из наиболее распространенных способов анализа в науке являются исследования результатов с точки зрения статистики и вероятности, описывающие возможность возникновения определённого перечня сценариев работы или состояний, а также производящие изучение количественной стороны массовых явлений в числовом формате. На основе полученных результатов возможно производить наиболее точную качественную оценку, отражающую корректность функционирования, особенность и степень годности исследуемого аппарата или процесса. **Цель работы.** Цель исследования заключается в выведении универсальной зависимости ключевого параметра точности электрических контрольно-измерительных приборов от количественной оценки вероятности корректной поверки. **Используемые методы.** В рамках работы используются различные разносторонние методы научного, практического и технического исследования с ссылками на нормативную документацию в областях метрологии и качества продукции и процессов. В исследовании используются различные математические модели и методы, оценивающие соответствие принадлежностей приводимых результатов измерений к нормальному закону распределения. Дополнительно используются программный комплекс и язык программирования для автоматизации расчетов и получения результатов выстраиваемой зависимости. **Новизна.** В работе приводится методика расчёта вероятности корректности поверки электрических контрольно-измерительных приборов на основе результатов прогноза изменения параметра среднеквадратического отклонения в зависимости от точности измерительного устройства, что позволяет получить результаты вероятности с высокой степенью достоверности. **Результат.** Представлена методика построения универсальной оперативной характеристики поверки на основе проведенных результатов исследования закона распределения электрических измерений как случайной величины, а также результатов оценки прогнозирования изменения точности и среднеквадратического отклонения выборки измерений. Полученный результат показывает динамику проявления статистических выбросов с различной степенью как вероятности, так и величины измерений, фальсифицирующих дальнейшие проводимые оценки состояния приборов или систем. **Практическая значимость.** Результатом проводимого исследования является определение и обоснование дополнительного качественного параметра для электрических контрольно-измерительных приборов, применение которого повысит степень достоверности, точности и глубины проводимых качественных оценок измерительной продукции или результатов измерений. На основе представленных исследований возможно сформировать обоснование процедуры изменения паспортной точности приборов или изменение межповерочного интервала по результатам плановой аттестации.

Ключевые слова: электрические контрольно-измерительные приборы, качество, оперативная характеристика поверки, точность, вероятность, статистика, закон распределения

© Бобрышов А.П., Кузьменко В.П., Солёный С.В., Квас Е.С., 2025

Для цитирования

Универсальная оперативная характеристика качественной оценки электрических контрольно-измерительных приборов / Бобрышов А.П., Кузьменко В.П., Солёный С.В., Квас Е.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 138-148. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-138-148>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

UNIVERSAL OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF QUALITY ASSESSMENT OF ELECTRICAL CONTROL AND MEASURING INSTRUMENTS

Bobryshov A.P., Kuzmenko V.P., Solyony S.V., Kvas E.S.

St. Petersburg State University University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

Abstract. Statement of the problem (relevance of the work). The issue of assessing the quality of electrical measuring instruments establishes the need to carry out a list of non-trivial operations aimed at assessing the greatest number of parameters characterizing measuring devices. One of the most common methods of analysis in science is the assessment of results in terms of statistics and probability, describing the possibility of a certain list of operating scenarios or states, as well as assessing the quantitative side of mass phenomena in numerical format. Based on the results obtained, it is possible to produce the most accurate qualitative assessment reflecting the correctness of the functioning, feature and degree of suitability of the device or process under study. **Objectives.** The purpose of the study is to derive a universal dependence of the key parameter of the accuracy of electrical measuring instruments on the quantitative assessment of the probability of correct verification. **Methods Applied.** The work uses various methods of scientific, practical and technical research with references to regulatory documentation in the fields of metrology and quality of products and processes. The study uses various mathematical models and methods that evaluate the compliance of the measurement results with the normal distribution law. Additionally, a software package and programming language are used to automate calculations and obtain the results of the constructed dependence. **Originality.** The paper presents a methodology for calculating the probability of correctness of verification of electrical control and measuring instruments based on the results of predicting the change in the standard deviation parameter depending on the accuracy of the measuring device, which allows obtaining probability results with a high degree of reliability. **Result.** The paper presents a methodology for constructing a universal operational characteristics of verification based on the conducted results of the study of the distribution law of electrical measurements as a random variable, as well as the results of assessing the predicting change in the accuracy and standard deviation of a sample of measurements. The obtained result shows the dynamics of the manifestation of statistical outliers with varying degrees of both probability and measurement value, falsifying further assessments of the state of devices or systems. **Practical Relevance.** The result of the conducted research is the definition and justification of an additional quality parameter for electrical control and measuring instruments, the use of which will increase the degree of reliability, accuracy and depth of the conducted qualitative assessments of measuring products or measurement results. Based on the presented research, it is possible to formulate a justification for the procedure for changing the potential accuracy of devices or changing the inter-verification interval based on the results of scheduled certification.

Keywords: electrical control and measuring instruments, quality, operational characteristics of verification, accuracy, probability, statistics, distribution law

For citation

Bobryshov A.P., Kuzmenko V.P., Solyony S.V., Kvas E.S. Universal Operational Characteristics of Quality Assessment of Electrical Control and Measuring Instruments. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 138-148. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-138-148>

Введение

Качество является достаточно сложным понятием, определяющим различный характер описываемого объекта или процесса, чаще всего характеризуясь наличием или отсутствием определённого свойства [1]. Данный параметр может быть описан количественной величиной, определяющей его общее или среднее значение в определенной системе исчисления. Качество продукции или услуги с технической точки зрения определяется способностью и полнотой выполнения заявленных потребностей, соответствующих назначению описываемого продукта или услуги. Для сложных объектов или процессов данный параметр описывается и исчисляется средним значением оценочной характеристики от общего числа каждого отдельного узла объектов или процес-

сов, также отдельно оцениваемых [2]. Ключевой качественной, оценочной характеристикой для электрических контрольно-измерительных приборов (КИП) является параметр точности, описывающий количественно соответствие устройства установленным нормам. Подтверждением данного утверждения являются два отдельных факта.

Первым доказательством является полное соответствие точности как оценочной характеристики пригодности измерительного аппарата при проведении мероприятий поверки или калибровки. Непревышение допустимой паспортной погрешности каждого отдельного и среднего значений отклонений измерений при заданных нормальных условиях определяет возможность устройства корректно функционировать и выполнять заявленный функционал.

Вторым доказательством является связь двух стандартов: РД 50-605-86 «Методические указания по применению стандартов на статистический приемочный контроль» и МИ 187-86 «Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Достоверность и требования к методикам поверки средств измерений».

В первом руководящем документе приводятся методические рекомендации на тему выборочного контроля и оценки качества продукции с применением статистических методов оценки. В стандарте приводится описание вывода дефектности исследуемой партии и связи данного параметра с оперативной характеристикой, являющейся зависимостью вероятности приемки партии продукции от величины, характеризующей его качество [3]. Описываемую вероятность с точки зрения контроля электрических КИП можно охарактеризовать как достоверность соответствия паспортной точности прибора. Чем меньше данный параметр, тем меньше вероятность принятия такого прибора в действительности годным или, что более точно подходит под описание, такой прибор или партия в меньшей степени является качественной продукцией. Об этом можно утверждать, учитывая распределение погрешностей и возможность его выхода за рамки установленного значения при приближении среднего показателя отклонений к граничному.

Второй стандарт достоверности и требований к методикам поверки средств измерений приводит критерии оценки электрических КИП с точки зрения достоверности поверки. Стандарт описывает основную теорию и базовые функциональные зависимости метрологических характеристик в совокупности с теорией вероятности, статистикой и математического анализа для построения оперативной характеристики поверки (ОХП) [4]. Данная характеристика является зависимостью вероятности приёмки исследуемой партии продукции от уровня дефектности.

Учитывая приведенное описание точности как оценочной характеристики пригодности КИП в первом доказательстве и связь двух стандартов руководящего документа о статических методах контроля качества и стандарта достоверности и вероятности поверки во втором доказательстве, а также рассматривая общую связь нормативных документов в виде оперативной характеристики, использующей параметр, определяющий качество продукции, можно сделать вывод, что точность электрического КИП действительно является его количественной оценкой качества. Остается привести корректную математическую форму описания и вывода качества электрических приборов.

Оценка соответствия погрешностей электрических измерений нормальному закону распределения случайной величины

Из рассмотрения достоверности во втором стандарте с точки зрения теории вероятности и статистики устанавливается необходимость определения закона распределения (ЗР) оцениваемой величины погрешности электрических измерений КИП как случайной.

Изначально стоит установить, что большинство оцениваемых величин подчиняются нормальному ЗР или его разновидности, при этом данное распределение в большей степени применимо для непрерывных случайных величин. Такие величины относятся к бесчисленному набору значений в заданном диапазоне, что отражает суть погрешностей измерений электрической величины в рамках заданной паспортной точности. В частных случаях возможно рассматривать такие отклонения как дискретные величины [5].

Для оценки ЗР-величины были взяты результаты измерений-поверки восьми электрических КИП: цифровых и аналоговых вольтметров, амперметров, ваттметров и омметра. Вычисления для оценки ЗР проводились с использованием программного комплекса STATISTICA версии 10.0.1011 и Excel. Программное обеспечение STATISTICA является наиболее распространенным и доступным инструментом с широким списком функций и методов для осуществления анализа, управления, извлечения или определения, а также визуализации данных с использованием статистических методов. Программа достаточно часто используется для проведения различного рода анализа, например в областях науки, медицины, бизнеса, экономики, маркетинга и т.п. [6, 7]. Главная причина выбора именно данного программного комплекса заключается в возможности осуществления всех выбранных критериев оценки нормальности исследуемых выборок.

В качестве основных критериев оценки были выбраны критерии: Пирсона, Колмогорова-Смирнова, Лиллиефорса и Шапиро-Уилка. Критерий Пирсона, или критерий хи-квадрат, является непараметрическим методом, позволяющим осуществить оценку значимости различий между определёнными в результате исследования исходами, качественными характеристиками выборки и теоретическими результатами, подчиняющимися закону нулевой гипотезы. Ключевой особенностью критерия является универсальность, позволяющая применять метод к оценке различных гипотез [8].

Критерий Колмогорова-Смирнова также относится к непараметрическим критериям согласия и предназначен для проверки исследуемых выборок на соответствие некоторому известному теоретическому ЗР. Главной особенностью метода, по сути, является оценка расстояния между эмпирической выборочной функцией распределения и кумулятивной функцией теоретического распределения. Также может применяться для оценки разницы двух распределений [9]. Как и критерий Пирсона, данный метод является наиболее распространенным в статистической оценке.

Критерий Лиллиефорса является доработанной версией метода Колмогорова-Смирнова и в большей степени ориентируется на оценку соответствия исследуемой выборки нормальному ЗР. Ключевыми особенностями являются отсутствие использования поправки Чебышева и значительно низкие значения критических точек в сравнении с методом Колмогорова-Смирнова. Данные отличия устанавливают зависимость точности критерия от размера выборки, но при этом подведение теоретиче-

ской кривой под выборку позволяет снизить значения отклонений отдельных точек [10].

Критерий Шапиро-Уилка использует отношение оптимальной линейной оценки дисперсии к её обычной оценке, используя максимальное правдоподобие. Особенность критерия заключается в наибольшей эффективности при проверке гипотезы о нормальности распределения и одинаковой мощности для выборок малого объема [11]. Для работы с большим набором значений предпочтительней использовать критерий Ройсто-

на, являющийся доработанной версией метода Шапиро-Уилка [12].

Результаты сортировки значений и распределений по вычисленным группам, согласно формуле Стерджесса, составило 6 для 21 значения вычисленных погрешностей. На **рис. 1** представлены гистограммы исследуемых отклонений, на **рис. 2** – гистограммы, построенные в программе STATISTICA.

Результаты оценки погрешностей по выбранным критериям приведены в **таблице**.

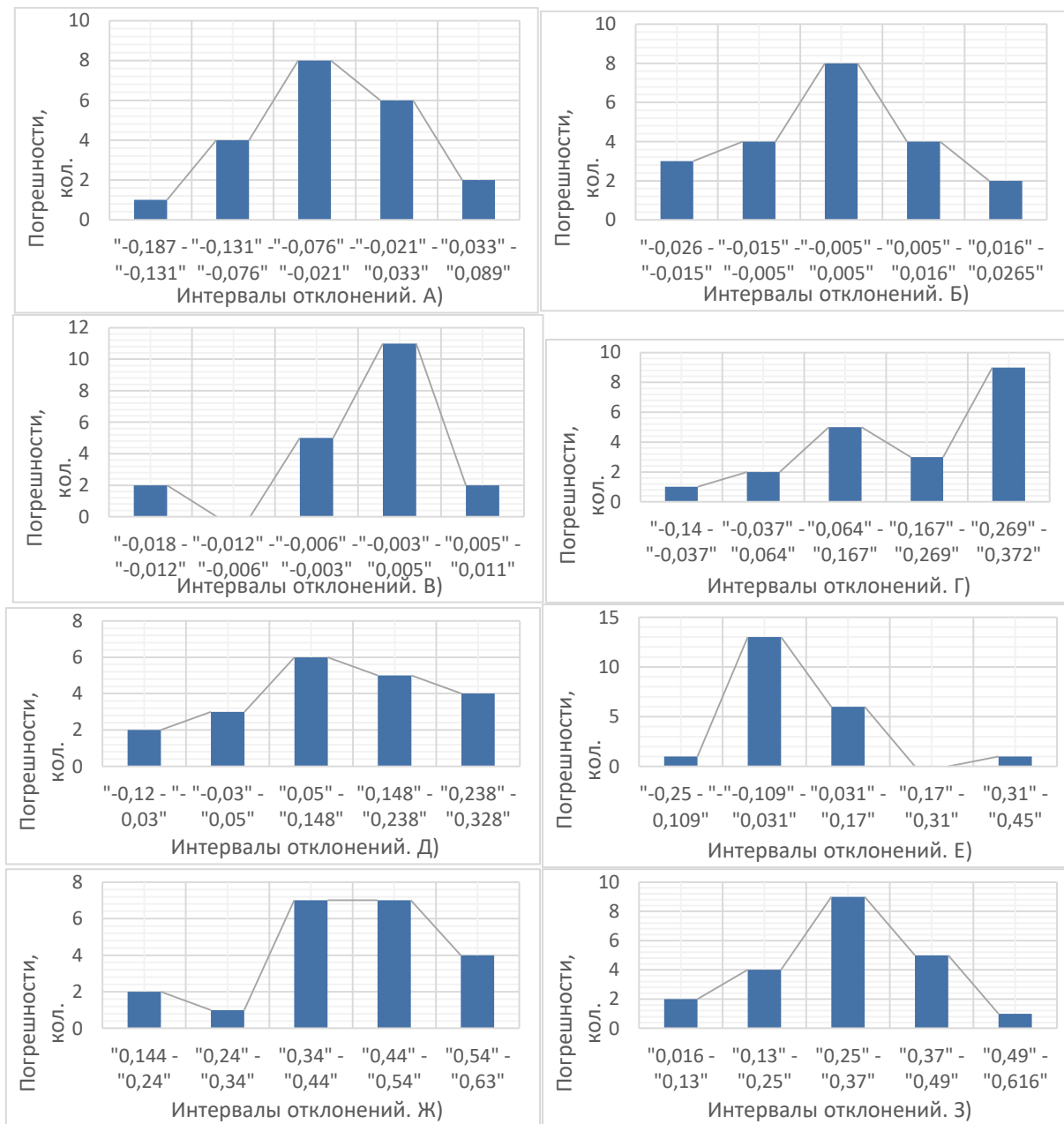


Рис. 1. Гистограммы распределений отклонений измерений электрических КИП:

А – цифровой ваттметр; Б – цифровой амперметр; В – цифровой омметр; Г – стрелочный вольтметр;

Д – цифровой вольтметр; Е – цифровой амперметр; Ж – стрелочный вольтметр; З – цифровой вольтметр

Fig. 1. Histograms of measurements deviations distributions of electrical control and measuring instruments:

A is digital wattmeter; Б is digital ammeter; В is digital ohmmeter; Г is pointer voltmeter; Д is digital voltmeter;

Е is digital ammeter; Ж is pointer voltmeter; З is digital voltmeter

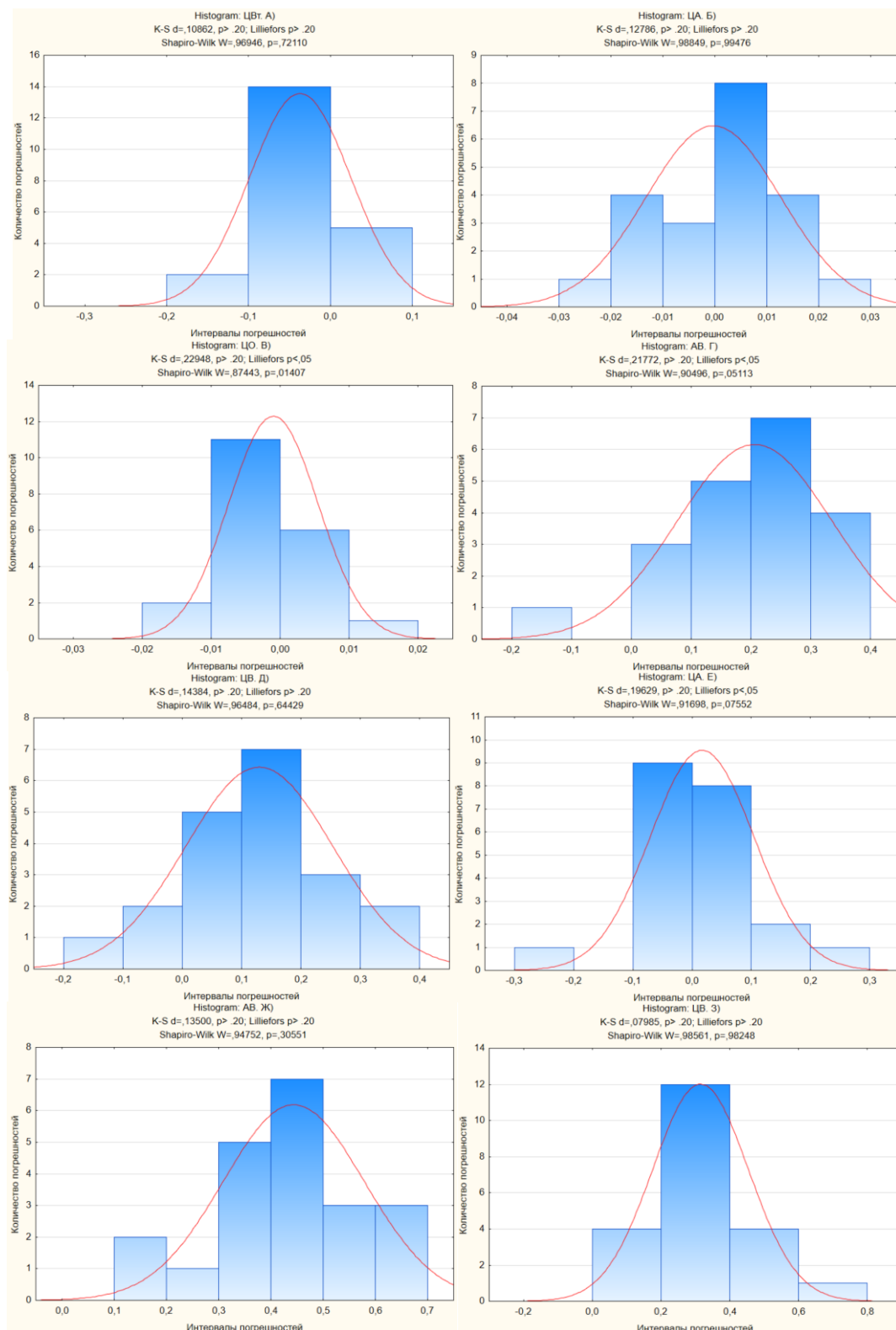


Рис. 2. Гистограммы распределений отклонений измерений электрических КИП в STATISTICA:
 А – цифровой ваттметр; Б – цифровой амперметр; В – цифровой омметр; Г – стрелочный вольтметр;
 Д – цифровой вольтметр; Е – цифровой амперметр; Ж – стрелочный вольтметр; З – цифровой вольтметр
 Fig. 2. Histograms of measurements deviations distributions of electrical control and measuring instruments in
 STATISTICA: А is digital wattmeter; Б is digital ammeter; В is digital ohmmeter; Г is pointer voltmeter;
 Д is digital voltmeter; Е is digital ammeter; Ж is pointer voltmeter; З is digital voltmeter

Таблица. Итоги расчетов критериев принятия нулевой гипотезы нормальности распределения погрешностей электрических КИП

Table. Results of calculations of criteria for accepting the null hypothesis of normality of the errors distribution in electrical control and measuring instruments

Прибор	Критерий			
	Пирсона ($\chi^2 = 11,3$)	Колмогорова-Смирнова	Лиллиефорса	Шапиро-Уилка ($p > 0,05$)
Цифровой ваттметр «А»	0,389	$P > 0,20$	$P > 0,20$	$P = 0,721$
Цифровой амперметр «Б»	1,904	$P > 0,20$	$P > 0,20$	$P = 0,994$
Омметр цифровой «В»	11,819	$P > 0,20$	$P < 0,05$	$P = 0,014$
Стрелочный вольтметр «Г»	9,585	$P > 0,20$	$P < 0,05$	$P = 0,05$
Цифровой вольтметр «Д»	2,429	$P > 0,20$	$P > 0,20$	$P = 0,644$
Цифровой амперметр «Е»	14,24	$P > 0,20$	$P < 0,05$	$P = 0,075$
Стрелочный вольтметр «Ж»	4,47	$P > 0,20$	$P > 0,20$	$P = 0,305$
Цифровой вольтметр «З»	1,016	$P > 0,20$	$P > 0,20$	$P = 0,982$

Для оценки нулевой гипотезы соответствия распределения экспериментальных значений нормальному ЗР по критерию Пирсона число степеней свободы составляло 3, что определяет оценочную величину равной 11,3 по таблице критических точек распределения для значимости в 0,01. Средние погрешности всех представленных измерительных приборов укладываются в показатель паспортной точности устройства.

Проводя анализ представленных гистограмм, можно заметить явное сходство с графиком распределения нормального закона. Данное замечание также подтверждают 24 критерия из 32 представленных, что составляет 75% от общей оценки. Можно отметить явно выделяющийся исследуемый КИП – омметр цифровой «В», поскольку критерии оценки Пирсона, Лиллиефорса и Шапиро-Уилка по данному прибору показали отклонение нулевой гипотезы. Проводя анализ гистограмм, можно отметить сходство формы графика с классическим колоколом: на **рис. 1** данная форма имеет левостороннюю асимметрию, при этом **рис. 2** показывает наиболее близкую форму к колоколу, хоть и с небольшой асимметрией вправо. Разница графиков обуславливается округлением исследуемых значений программой STATISTICA при построении графиков. Было проведено сравнение ручного вычисления и программного, при которых оценочные величины имели незначительные расхождения, например вычисленное значение критерия Шапиро-Уилка программой 0,848 и в ручном формате 0,785, что говорит о едином результате, несмотря на различия в вычисленных значениях. Стоит отметить, что критерий Пирсона достаточно близок к принятию нулевой гипотезы, при этом, если провести статистические операции исключения выбросов или увеличения интервалов построения гистограммы, значение данного критерия снизится до 9,76, а диаграмма распределения визуально приблизится к колоколообразной форме [13, 14]. Критерий Лиллиефорса также будет соответствовать принятию нулевой гипотезы, но по Шапиро-Уилка значение хоть и окажется близким к принятию, но составит 0,046.

В свою очередь, стрелочный вольтметр «Г» и цифровой амперметр «Е» при оценке распределения по-

грешностей, в которых по 2 критерия показали отклонение нулевой гипотезы, гистограммы на **рис. 1** отражают левостороннюю и правостороннюю асимметрию соответственно. При этом графики на **рис. 2** для стрелочного вольтметра «Г» также показывает левостороннюю асимметрию, а гистограмма для цифрового амперметра «Е» приближена к симметричному колоколу. Проводя схожие статистические операции, как и для цифрового омметра «В», описанные критерии согласия снижаются до принятия нулевой гипотезы и нормальности распределения [13, 14].

Оценочные критерии о нормальности распределения для КИП «А», «Б», «Д», «Ж» и «З» полностью принимают нулевую гипотезу. При этом сравнение графиков на **рис. 1** и **2** показывают общее соответствие соответствующих зависимостей как между собой, так и между гистограммой нормального распределения.

Подводя краткий итог, учитывая изменение значений критериев при применении статистических приемов корректировки выборки, можно сказать, что при оценке погрешностей электрических измерительных устройств (ИУ) с точки зрения вероятности, достоверности и статистики возможно принимать ЗР Гаусса как общий. Полученный вывод подтверждает исследования ученых в данном вопросе [15, 16]. Полученные результаты открывают возможности использования методик, законов и выражений, свойственных нормальному ЗР, для оценки и анализа электрических погрешностей измерений.

Оценка характера изменения значений, необходимых для построения оперативной характеристики поверки качественной оценки электрических контрольно-измерительных приборов

Для осуществления расчета и построения ОХП необходимо произвести определение таких ключевых параметров, как среднее квадратическое отклонение (СКО), дисперсия, математическое ожидание и вероятность точности. В описанном ранее стандарте на достоверность и требования к методике поверки приводятся зависимости, используемые при построении ключевой зависимости:

$$L(x) = \int_{-y}^y \varphi(\bar{x} / x) d\bar{x}. \quad (1)$$

$L(x)$ является определяющим выражением ОХП, которая характеризуется как условная плотность распределения вероятностей нормализованной оценки \bar{x} , где значение x является отношением контролируемой характеристики к модулю её предельного значения [4].

В научном труде [17] осуществляется фактическое сравнение автоматизированного процесса поверки и классической аттестации вручную оператором. В качестве сравнительных величин и зависимостей приводятся классические формулы вычисления статистических и вероятностных значений, используемых для графического представления ОХП. В статье представленные результаты получены с учетом принятия соответствия нормальности распределения погрешностей измерений, о чем было сказано выше в тексте настоящего труда. Общая методика вычислений величин для анализа и выявления ключевых параметров для построения ОХП взяты из материалов научного труда об оценке влияния автоматизации на поверку, а также методических указаний к проведению практических исследований на тему метрологической аттестации и поверки [17, 18].

Погрешность электрических измерений возможно оценить как вероятность попадания вычисленного отклонения в заданный паспортный диапазон точности. В общем смысле при проведении поверки электрических КИП всегда вычисляется среднее значение отклонения. В теории вероятности существует распространенная формула определения вероятности попадания случайной величины в заданный интервал. Для нормального распределения данная зависимость математически похожа на ключевую формулу ОХП, приведенную в стандарте МИ 187-86, и выглядит следующим образом:

$$P(x_1 \leq \Delta \leq x_2) = \Phi\left(\frac{x_2 - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - \mu}{\sigma}\right). \quad (2)$$

Для обеспечения оценки отклонений измерений, согласно представленным соотношениям, необходимо произвести вычисление средних показателей отклонения, характеризующих распределение полученных погрешностей. Ключевым в данном случае является среднеквадратическое отклонение, характеризующее, насколько могут отклоняться исследуемые величины от ожидаемого результата. Для вычисления данных показателей необходимо произвести вычисление математического ожидания:

$$\Delta x_{\text{откл.}} = |x_{\text{э.}} - x_{\text{изм.}}|, \quad (3)$$

$$\mu_{\text{откл.}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \Delta x_{\text{откл.}}}{n}. \quad (4)$$

В данных выражениях ключевыми параметрами являются сами погрешности, как модуль разницы между эталонным измерением и исследуемым. Модуль взят по причине исключения влияния отрицательных значений

на оценку отклонения, поскольку в таком учете наиболее ожидаемым результатом может получиться ноль. Дополнительными доводами является то, что для расчета дисперсии используется квадрат разности и рассмотрение ОХП как вероятностной исключительно в положительных значениях.

Определив математическое ожидание как наиболее предполагаемую величину и зная каждое вычисленное отклонение, возможно вычислить дисперсию, являющуюся мерой разброса оцениваемых значений. В свою очередь вычислив квадратный корень из дисперсии, получается среднеквадратическое отклонение, являющееся стандартным отклонением проводимых измерений или мерой разброса погрешностей от математического ожидания:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (\Delta x_{\text{откл.}} - \mu_{\text{откл.}})^2}{n - 1}, \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{D}. \quad (6)$$

Далее возможно воспользоваться формулой (2) для определения вероятности попадания исследуемого значения в заданный интервал, при этом не будут учтены особенности анализируемого электрического КИП, такие как точность прибора в прямой зависимости с его статистическими величинами. Для этого необходимо конкретизировать оценочные параметры, влияющие на расчет вероятности корректности определения годности ИУ. Учитывая опорные величины из формулы (1), необходимо уточнить математическое ожидание и СКО.

Числитель зависимости возможно рассмотреть как отношение средней приведенной погрешности измерений к пределу допускаемого отклонения. Данная величина характеризует, насколько сильно исследуемый электрический КИП отклоняется от паспортной точности, чем ближе значение к 1, тем больше значение погрешности отражает ИУ.

$$\Delta x_{\text{прив.}} = \frac{|x_{\text{э.}} - x_{\text{изм.}}| \cdot 100}{x_{\text{норм.}}}, \quad (7)$$

$$\Delta x_{\text{прив.ср.}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \Delta x_{\text{прив.}}}{n}, \quad (8)$$

$$b = \frac{\Delta x_{\text{прив.ср.}}}{\Delta x_{\text{паспорт.}}}. \quad (9)$$

Полученное значение b в данном случае принимается как наиболее ожидаемое значение отклонения прибора с учетом паспортной точности исследуемого КИП, являясь оценочным значением как математическое ожидание. Также параметр b укладывается в выражение ОХП из стандарта МИ 187-86, где числителем является отношение оценки контролируемой характеристики к модулю предельного значения, что точно отражает выведенная величина [4].

Полученное ранее СКО исследуемой погрешности является контролируемой характеристикой как разброс

значений относительно средней. Отношение данной величины к предельно допустимому значению паспортной точности является знаменателем выражения ОХП согласно зависимости из МИ 187-86 [4]. СКО необходимо представить в процентном эквиваленте для возможности вывода отношения нормирующей величины, при этом выводимый параметр должен коррелировать с паспортной точностью, как с предельно допустимым значением. Для этого необходимо определиться с максимально возможной величиной СКО в формате измерений. Учитывая связь и вычисление приведенной погрешности с учетом нормирующей величины КИП, а также необходимость установки связи между паспортной точностью, логично выбрать именно нормирующую величину в качестве максимально возможного СКО, поскольку оно является максимально возможным 100%-м отклонением при выключенном приборе. В данном случае возможность получения наиболее неадекватных величин, не учитывая конструктивные особенности прибора, не рассматривается. Таким образом, получим формулы представления полученной СКО погрешностей измерений в процентном эквиваленте относительно паспортной точности, а также отношение полученной величины к паспортной точности прибора:

$$\sigma_{\%} = \frac{\sigma \cdot 100}{x_{\text{норм.}}}, \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{относ.}} = \frac{\sigma_{\%}}{\Delta x_{\text{паспорт.}}}. \quad (11)$$

Поскольку паспортная точность электрических КИП подразумевает возможность проявления как отрицательной, так и положительной величины, устанавливается интервал допустимых погрешностей от $-\Delta x_{\text{паспорт.}}$ до $\Delta x_{\text{паспорт.}}$. Таким образом, произведем вывод итоговой зависимости ОХП, с учетом выведенных статистических значений, характеризующих отклонения исследуемого КИП с учетом паспортных данных.

$$P_{\text{год.}}(-\Delta x_{\text{паспорт.}} \leq x \leq \Delta x_{\text{паспорт.}}) = \Phi\left(\frac{\Delta x_{\text{паспорт.}} - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{-\Delta x_{\text{паспорт.}} - \mu}{\sigma}\right), \quad (12)$$

$$P_{\text{год.}} = \Phi\left(\frac{\Delta x_{\text{паспорт.}} - \mu}{\sigma}\right) - \left(1 - \Phi\left(\frac{\Delta x_{\text{паспорт.}} + \mu}{\sigma}\right)\right), \quad (13)$$

$$P_{\text{год.}} = \Phi\left(\frac{\Delta x_{\text{паспорт.}} - \mu}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{\Delta x_{\text{паспорт.}} + \mu}{\sigma}\right) - 1, \quad (14)$$

$$P_{\text{год.}} = \Phi\left(\frac{1-b}{\sigma_{\text{относ.}}}\right) + \Phi\left(\frac{1+b}{\sigma_{\text{относ.}}}\right) - 1. \quad (15)$$

В формуле (13) используется свойство нечетной функции Лапласа, а в (15) вводится математическое ожидание и СКО с учетом отношения к паспортной точности прибора, при этом исключается данное значение

из левой части числителя функции через сокращение дроби.

Построение универсальной оперативной характеристики поверки

Стоит отметить, что полученная зависимость устанавливает вероятность для одной определенной точки вычисленной точности, поскольку изменение данного параметра напрямую зависит от изменения погрешности, что также сказывается на математическом ожидании и СКО. Согласно результатам проведенного моделирования, в случае изменения точек измерений при одной и той же средней приведенной точности вероятность и соответствующая ей точка в начале графика ОХП не изменяется, при этом примерно в центре устанавливается диапазон разброса значений с дальнейшим сведением в точку 50%. Несмотря на выявленный диапазон разброса значений, такая характеристика может применяться для приборов одинаковой паспортной точности, что говорит об универсальности характеристики. Но поскольку представленное вычисление учитывает точность прибора, то есть приведенную погрешность, устанавливается зависимость от максимального значения шкалы, что говорит о невозможности применения одной ОХП для КИП одного класса точности, но разного диапазона измерений, ввиду разных максимальных значений. Данный факт также подтверждается конструктивными различиями в механизме отображения электрической величины таких ИУ. В результате моделирования были получены значения вероятности и построена ОХП для прибора класса точности 2,5% и максимальным значением шкалы 250 вольт (рис. 3).

Моделирование результатов отклонений проводилось с учетом установленной ранее принадлежности погрешностей электрических измерений нормального ЗР. В имитации погрешностей и расчете вероятностей учитывалось требование, что в случае превышения заявленной паспортной точности хотя бы одного измерения из выборки в результате проведения поверки такой электрический КИП признается негодным. Такое ложное принятие относится ко 2-му роду статистических ошибок. На рис. 3 видны все отдельные значения, расположенные под средней кривой, именно данные величины относятся к измерениям с минимум одной погрешностью, превышающей точность прибора. Разницу между полученными вероятностями в одной и той же точке отношения средней погрешности к паспортной точности возможно объяснить математическим округлением программы при расчете и автоматическим подбором функции Лапласа из таблицы, что может в некоторой степени исказить вычисления. Также не стоит забывать про особенность моделирования и статистические выбросы, то есть в некоторых имитациях погрешностей получалось одно или более значений, превышающих паспортную точность, а также многие величины могли быть достаточно близки к допустимому граничному значению. Изменяющееся значение СКО также может оказывать свое влияние на округления и выбор значений из таблицы Лапласа, поскольку незначительно в одной точке данный параметр может отклоняться.

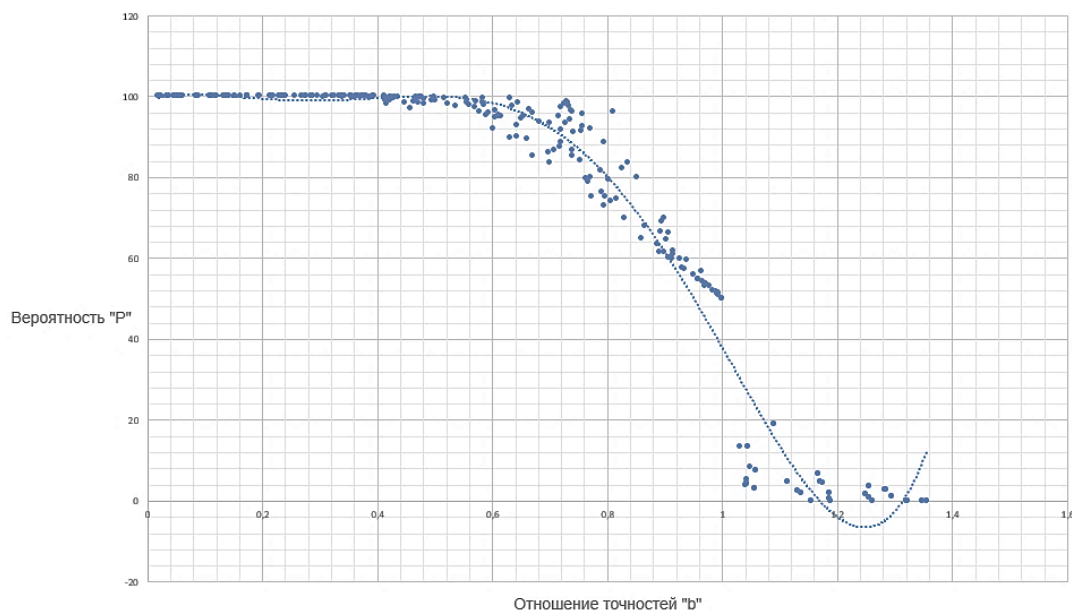


Рис. 3. Универсальная оперативная характеристика поверки для прибора класса точности 2,5
 Fig. 3. Universal operational verification characteristics for a device of accuracy class 2.5

Стоит отметить, что нельзя учитывать только значения с минимальной расчетной вероятностью в полученной точке, поскольку в таком случае возможно проявление ошибки 1-го рода, то есть отклонение в действительности годного КИП. Учитывая среднее превышение вероятности в точках повышенной концентрации возникновения выбросов, предлагается установить область достоверности в максимум 5% от минимальных расчетных вероятностей и принимать приборы с таким значением в действительности годными для приведения статистических ошибок 1-го и 2-го рода в равновесную точку. Дополнительно необходимо уточнить корректировку межповерочного интервала или возможное изменение класса точности такого КИП. Начало данного допустимого интервала предлагается принять со значений отношения средней погрешности к паспортной точности 0,6 до 0,85, поскольку именно в данном диапазоне максимальное количество разбросанных значений.

Полученную ОХП можно назвать универсальной для ИУ одного класса точности и максимального значения нормируемой величины и применять её для оценки качества производства или поверки электрических цифровых или стрелочных КИП без необходимости нового вычисления вероятности для отдельного устройства. Достаточно оценить отношение средней приведенной погрешности к паспортной точности прибора и установить соответствие с кривой ОХП.

Заключение

Качество электрического КИП характеризует его способность корректно выполнять заявленные функции, а именно с наибольшей степенью точности отображать измеряемую электрическую величину. Выведенная ОХП помогает произвести оценку вероятности отображения ИУ корректных значений, при этом область

ошибки демонстрирует возможность проявления комбинации таких отклонений, при которых средняя величина погрешностей будет меньше, чем паспортная точность. В рамках исследования было введено понятие 5% области достоверности, отображающее комбинации значений, при которых ни одно измерение не превысило паспортную точность, несмотря на близость погрешности такого измерения к граничной величине. В результате проводимого моделирования удалось установить диапазон с концентрацией подобных выбросов, начинающийся приблизительно от 0,6 до 0,83. Далее не имеет смысла сравнивать значения, поскольку по результатам ОХП такие КИП являются негодными, несмотря на меньшую величину средней приведенной погрешности, чем паспортная точность исследуемого ИУ, по причине нахождения в выборке единичных отклонений, превышающих граничные значения.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что пороговое значение годности по отношению точностей электрического КИП к паспортной точности для прибора максимальной погрешности в 2,5 является 0,75. Аттестация такого КИП должна сопровождаться сокращением межповерочного интервала, поскольку с наибольшей вероятностью точность такого прибора будет падать намного быстрее. При этом сам ИУ стоит отнести к отдельной категории годности или понизить его значение паспортной точности. В контексте качества проводимых мероприятий поверки полученное значение возможно трактовать как качественную границу годности электрического КИП.

Как описывалось в материалах научного исследования, универсальность представленной ОХП заключается в возможности ее применения к ИУ подобной точности и максимального значения при разных величинах средней погрешности приборов. Примером также явля-

ются цифровые и стрелочные КИП с одинаковыми паспортными значениями.

Список источников

- Лисюткина А.И. Качество продукции: понятие и характеристики качества // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. №3. С. 282-285.
- ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. Введ. 1979-07-01. М.: Стандартинформ, 2009. 21 с.
- РД 50-605-86. Методические указания по применению стандартов на статистический приемочный контроль. Введ. 1987-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1986. 44 с.
- МИ 187-86. Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Достоверность и требования к методикам поверки средств измерений. Введ. 1987-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1987. 12 с.
- Метрологические аспекты распределений вероятностей непрерывных и дискретных величин в электрических измерениях / Савкова Е.Н., Лагунов Д.В., Науменко М.В., Бороденок И.М. // Материалы Республиканской научно-практической конференции. Минск, 2021. С.145-151.
- Гржибовский А.М., Иванов С.В., Горбатова М.А. Описательная статистика с использованием пакетов статистических программ STATISTICA и SPSS // Наука и здравоохранение. 2016. №1. С. 7-23.
- Боровиков В.П. Популярное введение в программу STATISTICA. М.: КомпьютерПресс, 1998. 267 с.
- Критерий Пирсона: сущность и применение метода на практике / Светличная В.Б., Матвеева Т.А., Зотова С.А., Стецкова В.В. // Материалы IX Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». М., 2017.
- Орлов А.И. Непараметрические критерии согласия Колмогорова, Смирнова, омега-квадрат и ошибки при их применении // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 97.
- Кайда А.Ю., Рыбаченко И.А. Проверка согласованности атрибутов набора данных с нормальным законом распределения // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Томск, 2021. С. 351–352.
- Precision statistics: neuroet networking of Chi-square test and Shapiro-Wilk test in the analysis of small selections of biometric data / Ivanov A.I., Vjatchanin S.E., Malygina E.A., Lukin V.S. // Надежность и качество сложных систем. 2019. №1. С. 27–34.
- Лемешко Б.Ю., Рогожников А.П. О нормальности погрешностей измерений в классических экспериментах и мощности критериев, применяемых для проверки отклонения от нормального закона // Метрология. 2012. № 5. С. 3–26.
- Гапеева В.Д., Цыбенко В.А., Фаюстов А.А. Отсевание грубых погрешностей результатов измерений с помощью различных критериев в среде Excel // Молодой ученый. 2021. № 49. С. 20–27.
- Миронычев В.Н., Титов П.Л. Метрология, стандартизация и сертификация. Владивосток: ДФУ, 2015. 141 с.
- Pender P. A. Law of ordinal random error: The Rasch measurement model and random error distributions of ordinal assessments // Measurement. 2019, pp. 771-781.
- Simkin G.S. Normal law of measurement error distribution // Measurement Techniques. 2024, pp. 271-271.
- Теоретическая оценка влияния автоматизации на производственный процесс поверки контрольно-измерительных приборов / Бобрышов А.П., Солёный С.В., Сержантова М.В., Кузьменко В.П., Создательева М.Э., Рудаков Р.В. // Ядерная физика и инжиниринг. 2023. № 6. С. 571–577.
- Баринаова О.А., Назаров В.Н. Метрологическая аттестация и поверка погрешности. Поверки измерительных приборов. Влияние погрешности поверки на оценку годности. Построение оперативной характеристики поверки. Критерии качества поверки средств измерений: методические указания по выполнению комплекса лабораторно-практических исследований. СПб., 2009. 15 с.

References

- Lisyutina A.I. Product quality: concept and characteristics of quality. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences], 2020;(3):282-285. (In Russ.)
- State standard GOST 15467-79. Product quality management. Basic concepts. Terms and definitions. Moscow: Standards Publishing House, 2009, 21 p. (In Russ.)
- Regulatory document RD 50-605-86. Methodological guidelines for the application of standards for statistical acceptance control. Moscow: Standards Publishing House, 1986, 44 p. (In Russ.)
- MI 187-86. Methodological guidelines. State system for ensuring the uniformity of measurements. Reliability and requirements for verification methods of measuring instruments. Moscow: Standards Publishing House, 1987, 12 p. (In Russ.)
- Savkova E.N., Lagunov D.V., Naumenko M.V., Borodenok I.M. Metrological aspects of probability distributions of continuous and discrete quantities in electrical measurements. *Materialy Respublikanskoy nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proceedings of republican scientific and practical conference]. Minsk, 2021, pp.145-151. (In Russ.)
- Grzhibovsky A.M., Ivanov S.V., Gorbatova M.A. Descriptive statistics using statistical software packages STATISTICA and SPSS. *Nauka i zdravoohranenie* [Science and Healthcare], 2016;(1):7-23.
- Borovikov V.P. *Populyarnoe vvedenie v programmu STATISTICA* [Popular introduction to the STATISTICA program]. Moscow: ComputerPress, 1998, 267 p.
- Svetlichnaya V.B., Matveeva T.A., Zotova S.A., Stetskova V.V. Pearson's criterion: the essence and application of the method in practice. *Materialy IX Mezhdunarodnoy studencheskoy nauchnoy konferencii «Studencheskiy nauchnyy forum»* [Proceedings of the IX International Student Scientific Conference "Student Scientific Forum"]. Moscow, 2017.
- Orlov A.I. Nonparametric goodness-of-fit tests of Kolmogorov, Smirnov, omega-square and errors in their application. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*

- [Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2014;(97).
10. Kaida A.Yu., Rybachenko I.A. Checking the consistency of data set attributes with the normal distribution law. *Molodezh i sovremennye informatsionnye tekhnologii: sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodyh uchyonyh* [Youth and modern information technologies. Proceedings of the XVIII International scientific and practical conference of students, postgraduate students and young scientists]. Tomsk, 2021, pp. 351-352. (In Russ.)
 11. Ivanov A.I., Vjatchanin S.E., Malygina E.A., Lukin V.S. Precision statistics: neuroet networking of Chi-square test and Shapiro-Wilk test in the analysis of small samples of biometric data. Reliability and quality of complex systems. 2019;(1):27-34.
 12. Lemeshko B.Yu., Rogozhnikov A.P. On the normality of measurement errors in classical experiments and the power of criteria used to check for deviations from the normal law. *Metrologiya* [Metrology], 2012;(5):3-26. (In Russ.)
 13. Gapeeva V.D., Tsybenko B.A., Fayustov A.A. Filtering out gross errors in measurement results using various criteria in the Excel environment. *Molodoy ucheniy* [Young scientist], 2021;(49):20-27.
 14. Mironychev V.N., Titov P.L. *Metrologiya, standartizatsiya i sertifikatsiya* [Metrology, standardization and certification]. Vladivostok: FEFU, 2015, pp. 141.
 15. Pender P.A. Law of ordinal random error: The Rasch measurement model and random error distributions of ordinal assessments. *Measurement*. 2019:771-781.
 16. Simkin G.S. Normal law of measurement error distribution. *Measurement Techniques*. 2024:271-271.
 17. Bobryshov A.P., Solenyi S.V., Serzhantova M.V., Kuzmenko V.P., Sozdateleva M.E., Rudakov R.V. Theoretical assessment of the influence of automation on the production process of verification of measuring instruments. *Yadernaya fizika i inzhiniring* [Nuclear Physics and Engineering], 2023;(6):571 - 577.
 18. Barinova O.A., Nazarov V.N. Metrological certification and verification of error. Verification of measuring instruments. The influence of verification error on the assessment of suitability. Design of operational verification characteristics. Quality criteria for verification of measuring instruments. Methodical instructions for the implementation of a set of laboratory and practical studies. Saint Petersburg, 2009, 15 p.

Поступила 08.08.2024; принята к публикации 16.10.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 08/08/2024; revised 16/10/2024; published 28/03/2025

Бобрышов Алексей Павлович – аспирант, ассистент кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университета аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.
Email: ap.bobryshov@mail.ru. ORCID 0009-0009-6220-8206

Кузьменко Владимир Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.
Email: mr.konny@gmail.com. ORCID 0000-0002-0270-4875

Солёный Сергей Валентинович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.
Email: ssv555ssv@yandex.ru. ORCID 0000-0002-7919-3890

Квас Евгений Станиславович – старший преподаватель кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.
Email: kvas66@bk.ru. ORCID 0000-0001-5164-8454

Aleksey P. Bobryshov – Postgraduate Student, Assistant of the Department of Electromechanics and Robotics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.
Email: ap.bobryshov@mail.ru. ORCID 0009-0009-6220-8206

Vladimir P. Kuzmenko – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Electromechanics and Robotics. Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.
Email: mr.konny@gmail.com. ORCID 0000-0002-0270-4875

Sergey V. Solyony – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Electromechanics and Robotics. Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.
Email: ssv555ssv@yandex.ru. ORCID 0000-0002-7919-3890

Evgeny S. Kvas – Senior Lecturer at the Department of Electromechanics and Robotics. Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.
Email: kvas66@bk.ru. ORCID 0000-0001-5164-8454