

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,  
МЕТРОЛОГИЯ  
И ИНФОРМАЦИОННО–  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ  
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

INSTRUMENT MAKING,  
METROLOGY AND  
INFORMATION  
MEASUREMENT DEVICES  
AND SYSTEMS

УДК389.6: 006.354 +\_

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-157-164

## Оценка достоверности контроля приборов, поверяемых в нескольких точках диапазона\*

С.Б. ДАНИЛЕВИЧ<sup>1,a</sup>, В.В. ТРЕТЬЯК<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup> 630004, РФ, г. Новосибирск, ул. Революции, 36, а/я 68, Новосибирский филиал Академии стандартизации, метрологии и сертификации (учебная)

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. К. Маркса 20, Новосибирский государственный технический университет

<sup>a</sup> ser-danilevich@yandex.ru    <sup>b</sup> tretyak.94@gmail.com

В статье рассмотрены задачи, решаемые при разработке методик метрологического контроля (поверки) измерительных приборов, поверяемых в нескольких точках диапазона измерения. Методика поверки должна обеспечивать требуемую достоверность результатов поверки. Используются следующие критерии достоверности результатов поверки: риски заказчика и производителя; вероятность ошибки контроля 2-го рода. Эти критерии широко применяются при разработке методик многопараметрового контроля сложных изделий. При разработке методик поверки приборов предложено использовать метод Монте-Карло. Разработана имитационная модель процедуры поверки для случая, когда погрешность измерительного прибора (ИП) рассматривается как стационарная случайная функция. Достоверность результатов контроля оценивалась с учетом неопределенности выполняемых измерений и количества контролируемых точек в диапазоне измерения. Исследовалось влияние модели погрешности ИП на показатели достоверности поверки. Приведены результаты расчета показателей достоверности при поверке в нескольких точках диапазона измерения для двух моделей погрешности ИП. Первая модель предполагала независимость значений погрешности ИП в соседних поверяемых точках. Вторая модель предполагала известную корреляционную зависимость погрешности в соседних поверяемых точках. Показано, что даже при высокой точности измерения выбор модели погрешности ИП и количество контролируемых точек существенно влияют на риски заказчика и производителя. При разработке методик поверки предлагается принимать за основу некоторую абстрактную модель погрешности в виде стационарной случайной функции. В этом случае использование имитационной модели позволяет сравнить между собой несколько вариантов методики и выбрать наиболее эффективную методику поверки.

**Ключевые слова:** контроль качества, достоверность контроля, измерительный прибор, погрешность измерения, риск заказчика, риск производителя, ошибка контроля 2-го рода, метод Монте-Карло, неопределенность измерения, корреляция погрешности

---

\* Статья получена 09 октября 2019 г.

## ВВЕДЕНИЕ

При оценке соответствия различных объектов установленным требованиям необходимо использовать эффективные и достоверные методики контроля состояния объектов, минимизирующие риски принятия неверных решений [1–4]. Это следует учитывать при разработке методик метрологического контроля (поверки) средств измерений, так как процедура контроля метрологических характеристик (прежде всего погрешности) является важной составной частью методики поверки. Следовательно, обеспечение достоверности результатов контроля и разработки эффективных /оптимальных методик контроля (поверки) средств измерения является актуальным [5–8].

При поверке измерительных приборов (ИП) их погрешность определяется в нескольких дискретных (контролируемых) точках диапазона измерения. В результате сравнения показаний поверяемого ИП и эталона определяется, не превышает ли погрешность ИП в этих точках предельное допустимое значение погрешности (установленное в нормативной документации). Если превышения нет, погрешность поверяемого ИП соответствует требованиям и прибор по этому параметру признается годным.

Однако при этом обычно не учитывается, что в некотором интервале между контролируемыми точками диапазона измерения погрешность ИП может превысить допустимое значение (т. е. прибор может оказаться фактически негодным). В этом случае контролером может быть принято неверное решение – признать годным фактически негодный ИП (возникнет ошибка контроля 2-го рода) [9–13, 15]. Однако вследствие влияния неопределенности измерения при поверке в одной (или нескольких) контролируемых точках возможна ошибка контроля 1-го рода. Таким образом, одновременно могут иметь место две ошибки контроля разного рода, но в результате негодный прибор будет признан негодным. Следовательно, при наличии двух (или более) ошибок контроля разного рода контролером может быть принято в итоге правильное решение – негодный ИП будет забракован. Учесть этот эффект с использованием аналитических методов достаточно сложно, однако возможно с применением методов компьютерного моделирования [8–13]. Рассмотрению данного вопроса и посвящена статья.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Вероятность возникновения ошибок контроля (поверки) зависит от нескольких факторов: принятой модели погрешности поверяемых ИП, корреляции погрешности в соседних точках диапазона измерения, числа и расположения поверяемых точек в диапазоне измерения, неопределенности измерений при поверке. Для исследования данного вопроса была разработана имитационная модель процедуры поверки ИП. Модель при наличии соответствующей информации о погрешности поверяемых приборов позволяет анализировать существующие методики поверки, а также планировать новые эффективные методики [8–13, 15].

При поверке серийно выпускаемых ИП целесообразно использовать следующие критерии достоверности результатов контроля [14]:

- риск производителя  $R_p$ , характеризующий среднюю долю ошибочно забракованных, но фактически годных ИП среди всех поступивших

на поверку (используется при расчете экономических потерь производителя);

- риск заказчика  $R_3$ , характеризующий среднюю долю «негодных» ИП в партии приборов, признанных при поверке годными (так называемый «уровень дефектности» партии).

Также в качестве критерия достоверности возможно применение вероятности  $P_2$  – условной вероятности признать при поверке годным любой ИП при условии, что последний фактически является негодным.

Ниже приведены результаты исследования влияния выбора модели погрешности ИП на основные интересующие потребителя показатели достоверности поверки  $R_3$  и  $P_2$ .

## 2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приведенные ниже результаты получены при следующих предположениях. ИП является фактически годным, если во всём диапазоне его погрешность не выходит за симметричные верхнюю и нижнюю допускаемые границы. Погрешность контролируется в нескольких поверяемых точках, равномерно расположенных в диапазоне измерения. ИП считается годным, если во всех поверяемых точках погрешность не выходит за допускаемые границы.

Часто применяется первая модель погрешности ИП данного типа, при которой значения погрешности в соседних поверяемых точках считаются некоррелированными случайными величинами. При использовании такой модели, очевидно, не учитывается возможность выхода погрешности за допускаемые границы в интервалах между поверяемыми точками диапазона измерения.

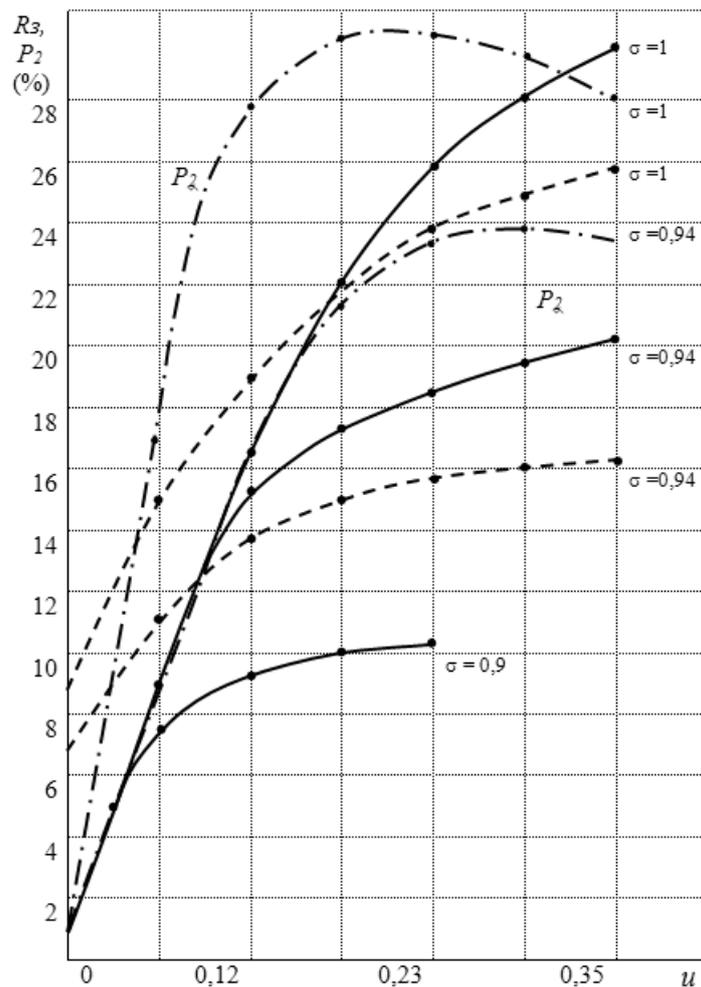
Вторая модель более адекватна реальной ситуации – погрешность ИП рассматривается как реализация стационарной случайной функции (ССФ) с известной автокорреляционной функцией. В этом случае значения погрешности ИП в соседних точках диапазона измерений (в том числе и в поверяемых точках) являются коррелированными случайными величинами. Эта модель предполагает контроль погрешности во всех точках диапазона измерения (т. е. «непрерывный» контроль). Однако практически обычно производится контроль погрешности ИП только в нескольких дискретных точках, предусмотренных методикой поверки.

В качестве примера рассмотрим влияние неопределенности измерения при поверке (с учетом неопределенности эталона) на достоверность результатов поверки для указанных двух моделей погрешности ИП. Исследование проводилось методом Монте-Карло (имитационного моделирования) [8–13, 15]. Данным методом были вычислены оценки  $R_3$  и  $P_2$  для двух случаев: при среднеквадратичном отклонении (СКО) погрешности ИП  $\sigma = 0,94$  и  $\sigma = 1,0$  (таким образом учитывалась возможная вариативность СКО). Предполагалось также, что погрешность поверяемых ИП в каждой точке диапазона измерения распределена по равномерному закону.

На рисунке приведены зависимости вероятностей  $R_3$  и  $P_2$  от стандартной неопределенности  $u$  измерений при поверке, полученные для описанных

двух моделей погрешности ИП. При моделировании было принято, что стандартная неопределенность измерений  $u$  изменяется от 0 до 0,35, а предельное допустимое значение погрешности ИП равно 1,5. При использовании первой модели имитировалась поверка ИП в пяти независимых точках диапазона измерения.

Возможность выхода погрешности ИП за допуск в интервалах между поверяемыми точками не учитывалась. Поэтому если  $u = 0$  при поверке, то и  $R_3 = P_2 = 0 \%$ .



Зависимость  $R_3$  (сплошная и пунктирная линии) и  $P_2$  (штрихпунктирная линия) от неопределенности измерения  $u$ . Сплошной и штрихпунктирной линией отображены результаты, полученные для первой модели погрешности ИП, а пунктирной – для второй модели погрешности

The dependence of  $R_3$  (solid and dotted lines) and  $P_2$  (dash-dotted line) of uncertainty of the measurement  $u$ . Solid and dash-dotted lines display the standard results obtained for the first model of the error MD, and the dashed lines show the second model error

Для второй модели оценки искомых вероятностей получены при имитации на компьютере поверки также в пяти равномерно расположенных поверяемых точках. Однако учитывалась также и возможность выхода погрешности за допуск в интервалах между поверяемыми точками, так как в качестве модели погрешности ИП использовалась дискретная ССФ с равномерным распределением и нормированной автокорреляционной функцией  $r(\tau) = \exp(-10\tau^2)$ ,  $0 < \tau < 1$ .

С учетом возможности выхода погрешности ИП за допустимый предел в интервалах между поверяемыми точками даже при максимально возможной точности измерения (т. е. при  $u = 0$ ) в данном примере  $Rz \geq 6$  %. Отметим, что при этом, очевидно,  $Rп = 0$  %. Расчеты также показали, что при  $u = 0,12$  риск производителя  $Rп$  может находиться в пределах от 5 до 7,5 %.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных при моделировании результатов и результатов, приведенных в [9–13, 15], позволяет сделать следующие выводы.

1. При поверке ИП в нескольких точках диапазона измерения риски заказчика  $Rz$  могут быть весьма значительными (достигать 20 % и более). Вероятность  $P_2$  при этом может быть существенно больше, чем  $Rz$ .

2. При разработке методик поверки ИП необходимо учитывать, что вероятность ошибки метрологического контроля (поверки) 2-го рода  $P_2$  может быть значительной даже при высокой точности выполняемых при поверке измерений.

3. На основе экспериментальных данных, полученных при калибровке ИП, в ряде случаев возможно разработать адекватную модель погрешности поверяемых приборов с учетом корреляции погрешности в соседних точках [10]. Использование такой модели погрешности ИП позволяет выбрать оптимальное число и расположение поверяемых точек в диапазоне измерения методом Монте-Карло.

4. Если невозможно разработать адекватную модель погрешности поверяемых ИП, можно принять за основу некоторую абстрактную модель погрешности в виде стационарной случайной функции. В этом случае предложенный метод позволяет сравнить между собой несколько вариантов методики поверки (с разным числом и расположением контролируемых точек) и выбрать наиболее эффективную методику, обеспечивающую достаточно высокую достоверность результатов поверки при минимальной трудоемкости.

Описанный подход, очевидно, может быть использован при разработке эффективных методик контроля качества различных объектов, если моделью контролируемого параметра может служить стационарная случайная функция и контроль осуществляется в нескольких дискретных точках диапазона.

Необходимым условием для применения предложенного подхода к оценке достоверности контроля является наличие информации для формирования адекватных вероятностных моделей контролируемых параметров и стандартной неопределенности измерений при контроле (поверке).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жагора Н.А.* Влияние точности измерений на результаты оценки соответствия // Контроль качества продукции. – 2016. – № 4. – С. 29–34.
2. *Щеглов Д.М.* Применение риск-ориентированного подхода к оценке влияния погрешности измерений параметров объекта на эффективность его испытаний // Вестник метролога. – 2019. – № 2. – С. 15–19.
3. JCGM 106:2012. Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment. – JCGM, 2012.
4. *Адлер Ю.П.* О рисках без всякого риска // Контроль качества продукции. – 2016. – № 6. – С. 22–25.
5. *Невская Е.Е.* Оценивание апостериорной достоверности поверки средств измерений характеристик ионизирующих измерений // Измерительная техника. – 2017. – № 1. – С. 13–15.
6. *Коровина О.А.* Оценка рисков изготовителя и заказчика при контроле погрешностей измерительных устройств в одной или нескольких точках // Измерительная техника. – 2018. – № 5. – С. 14–17.
7. *Юров Л.В.* Оптимизация поверки средств измерений способом отбраковки // Измерительная техника. – 2019. – № 2. – С. 3–5.
8. *Цветков Э.И.* Имитационное моделирование как инструмент метрологического анализа // Мир измерений. – 2013. – № 6. – С. 9–13.
9. *Данилевич С.Б., Третьяк В.В.* Метрологическое обеспечение достоверности результатов контроля // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 7. – С. 56–60.
10. *Голобоков М.В., Данилевич С.Б.* Оценка достоверности результатов измерений температуры при поверке пирометров // Метрология. – 2018. – № 3. – С. 50–60.
11. *Рубичев Н.А., Фрумкин В.Д.* Достоверность допускового контроля качества. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 171 с.
12. *Данилевич С.Б., Колесников С.С., Пальчун Ю.А.* Применение имитационного моделирования при аттестации методик контроля и испытаний // Измерительная техника. – 2011. – № 7. – С. 70–73.
13. *Данилевич С.Б., Третьяк В.В.* Метрологическое обеспечение допускового измерительного контроля // Контроль. Диагностика. – 2019. – № 4. – С. 44–47.
14. *Данилевич С.Б., Колесников С.С.* О выборе показателей достоверности результатов контроля // Законодательная и прикладная метрология. – 2008. – № 2. – С. 48–51.
15. *Savel'kaev S.V., Danilevich S.B.* Methods and tools for simulation and quality control of design and production of microwave devices: monograph. – Newcastle upon Tyne, UK: Cambridge Scholars Publishing, 2020. – 264 p. – ISBN 1-5275-4317-X. – ISBN 978-1-5275-4317-1.

*Данилевич Сергей Борисович*, доктор технических наук, доцент, профессор Новосибирского филиала Академии стандартизации, метрологии и сертификации (учебная), профессор кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – обеспечение эффективности контроля и испытаний. Опубликовал более 150 научных работ, три монографии. E-mail: ser-danilevich@yandex.ru, danilevich@corp.nstu.ru.

*Третьяк Виталий Владимирович*, аспирант кафедры систем сбора и обработки данных факультета автоматики Новосибирского государственного технического университета. E-mail: tretyak.94@gmail.com

*Danilevich Sergei B.*, D.Sc. (Eng.), associate professor, professor at the Novosibirsk branch of FGOU DPO "Academy of standardization, Metrology and Certification (educational)", Professor, Novosibirsk State Technical University. The main direction of his scientific research is to ensure the efficiency of control and testing. He has published more than 150 scientific papers and three monographs. E-mail: ser-danilevich@yandex.ru, danilevich@corp.nstu.ru.

*Tretyak Vitaly V.*, postgraduate student at the department of data collection and processing systems (SOD), automation faculty, Novosibirsk State Technical University. E-mail: tretyak.94@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-157-164

***Evaluation of the calibration reliability of devices tested at several points in the measurement range\****S.B. DANILEVICH<sup>1,a</sup>, V.V. TRETYAK<sup>2,b</sup><sup>1</sup> Novosibirsk Branch of Academy of Standardization, Metrology and Certification (educational), 36 Revolyutsii Street, Novosibirsk, 630004, Russian Federation<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation<sup>a</sup> ser-danilevich@yandex.ru    <sup>b</sup> tretiak.94@gmail.com**Abstract**

The article deals with the problems that are solved in the development of methods for testing (verification) of measuring devices that are verified at several points in the measurement range. The verification method must provide the required reliability of verification results. The following criteria are used for the reliability of verification results: the risks of the customer and the manufacturer; the probability of a control error of type 2. These criteria are widely used in the development of methods for multi-parameter control of complex products. It is proposed to use the Monte Carlo method when developing methods of instrument verification. A simulation model of the verification procedure is developed for the case when the error of the measuring device (MD) is considered as a stationary random function. The reliability of the control results was evaluated taking into account the uncertainty of the measurements performed and the number of controlled points in the measurement range. The influence of the model of the MD error on the verification reliability indicators was studied. The results of calculating the reliability indicators when checking MD at several points in the measurement range for two models of the MD error are presented. The first model assumed the independence of the MD error values at neighboring verifiable points. The second model assumed a well-known correlation of the error at the neighboring verifiable point. It is shown that even with a high measurement accuracy, the choice of the model of the MD error and the number of controlled points significantly affect the customer's and the manufacturer's risks. When developing verification methods, it is proposed to take some abstract model of error in the form of a stationary random function as a basis. In this case, the use of a simulation model allows you to compare several variants of the method and choose the most effective verification method.

**Keywords:** quality control, control reliability, measuring device, measurement error, customer risk, manufacturer risk, control error of the 2nd kind, Monte Carlo method, measurement uncertainty, error correlation

**REFERENCES**

1. Zhagora N.A. Vliyaniye tochnosti izmerenii na rezul'taty otsenki sootvetstviya [Influence of measurement accuracy, the results of conformity assessment]. *Kontrol' kachestva produktsii = Production Quality Control*, 2016, no. 4, pp. 29–34.
2. Shcheglov D.M. Primenenie risk-orientirovannogo podkhoda k otsenke vliyaniya pogreshnosti izmerenii parametrov ob"ekta na effektivnost' ego ispytaniy [Using risk-oriented approach to estimation of the influence to inaccuracy of the measurements parameter object on efficiency of his(its) test]. *Vestnik metrologa*, 2019, no. 2, pp. 15–19. (In Russian).
3. JCGM 106:2012. *Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment*. JCGM, 2012.
4. Adler Yu.P. O riskakh bez vsyakogo riska [About risks without risk]. *Kontrol' kachestva produktsii = Production Quality Control*, 2016, no. 6, pp. 22–25.

---

\* Received 09 October 2019.

5. Nevskaya E.E. Otsenivanie aposteriornoi dostovernosti poverki sredstv izmerenii kharakteristik ioniziruyushchikh izmerenii [Evaluating the a posteriori reliability of verification of means of measurement of the characteristics of ionizing radiation]. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques*, 2017, no. 1, pp. 13–15. (In Russian).

6. Korovina O.A. Otsenka riskov izgotovatelya i zakazchika pri kontrole pogreshnostei izmeritel'nykh ustroystv v odnoi ili neskol'kikh tochkakh [Estimate of risk for the manufacturer and the customer when monitoring the errors of measuring devices at one or more points]. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques*, 2018, no. 5, pp. 14–17. (In Russian).

7. Yurov L.V. Optimizatsiya poverki sredstv izmerenii sposobom otrakovki [Optimization of verification of measuring instruments by the rejection method]. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques*, 2019, no. 2, pp. 3–5. (In Russian).

8. Tsvetkov E.I. Imitatsionnoe modelirovanie kak instrument metrologicheskogo analiza [Simulation modeling as a tool for metrological analysis]. *Mir izmerenii = Measurements World*, 2013, no. 6, pp. 9–13. (In Russian).

9. Danilevich S.B., Tretyak V.V. Metrologicheskoe obespechenie dostovernosti rezul'tatov kontrolya [Metrological supervision of control results validity]. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*, 2018, no. 7, pp. 56–60. (In Russian).

10. Golobokov M.V., Danilevich S.B. Otsenka dostovernosti rezul'tatov izmerenii temperatury pri poverke pirometrov [Estimation of authenticity of results of temperature measurements in the calibration of pyrometers]. *Metrologiya = Measurement Techniques*, 2018, no. 3, pp. 50–60. (In Russian).

11. Rubichev N.A., Frumkin V.D. *Dostovernost' dopuskovogo kontrolya kachestva* [Reliability of tolerance quality control]. Moscow, Standards Publ., 1990. 171 p.

12. Danilevich S.B., Kolesnikov S.S., Palchun Yu.A. Primenenie imitatsionnogo modelirovaniya pri attestatsii metodik kontrolya i ispytaniy [Use of simulation modelling for checking monitoring and testing procedures]. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques*, 2011, no. 7, pp. 70–73. (In Russian).

13. Danilevich S.B., Tretyak V.V. Metrologicheskoe obespechenie dopuskovogo izmeritel'nogo kontrolya [Metrological support of admission measuring control]. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*, 2019, no. 4, pp. 46–49. (In Russian).

14. Danilevich S.B., Kolesnikov S.S. O vybore pokazatelei dostovernosti rezul'tatov kontrolya [About selection of reliability indicators of control results]. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya = Legislative and applied Metrology*, 2008, no. 2, pp. 48–51.

15. Savel'kaev S.V., Danilevich S.B. *Methods and tools for simulation and quality control of design and production of microwave devices*. Newcastle upon Tyne, UK: Cambridge Scholars Publishing, 2020. 264 p. ISBN 1-5275-4317-X. ISBN 978-1-5275-4317-1.

Для цитирования:

Данилевич С.Б., Третьяк В.В. Оценка достоверности контроля приборов, поверяемых в нескольких точках диапазона // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 1 (78). – С. 157–164. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-157-164.

For citation:

Danilevich S.B., Tretyak V.V. Otsenka dostovernosti kontrolya priborov, poveryaemykh v neskol'kikh tochkakh diapazona [Evaluation of the calibration reliability of devices tested at several points in the measurement range]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 1 (78), pp. 157–164. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-1-157-164.