

Математическое и программное обеспечение для определения погрешности при решении задач метрологического анализа

Е. Н. Жданова✉, Н. В. Романцова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉enzhdanova@etu.ru

Аннотация

Введение. В настоящий момент ведутся работы по созданию специализированных программных систем, предназначенных для метрологического синтеза и анализа. Такие системы включают в себя набор функциональных блоков для решения типовых метрологических задач. Одной из таких задач является определение характеристики измеряемого образца посредством набора эталонов. Например, требуется определить толщину образца с помощью рентгеноспектрального анализа на основе знаний о характеристиках набора эталонов и с учетом инструментальной и методической погрешностей.

Цель работы. Разработка программно-алгоритмического обеспечения типовых функциональных блоков программной системы, предназначенной для метрологического анализа в части выполнения расчетов рентгеноспектрального анализа.

Материалы и методы. Разрабатываемый функциональный блок на языке G и в программной системе GNU Octave принимает на вход вид и характеристики закона распределения инструментальной погрешности прибора, значения мощностей экспозиционной дозы излучения для набора эталонов и образца, а также толщину эталонов. На выходе данный блок выдает результат измерения толщины образца и его закон распределения. Таким образом, результат измерения включает в себя инструментальную погрешность, погрешность метода аппроксимации, а также погрешности преобразований.

Результаты. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение типовых функциональных блоков программной системы, предназначенной для выполнения расчетов рентгеноспектрального анализа. Данное программное обеспечение позволяет ускорить метрологический анализ для задачи определения толщины образца на основе ряда измерений набора эталонов. Корректность программно-алгоритмического обеспечения типовых функциональных блоков программной системы подтверждена приведенными примерами, которые были реализованы расчетным методом, а также тестированием созданного программного обеспечения в среде графического программирования на языке G и в программной системе GNU Octave.

Заключение. Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение будет использовано в программных системах метрологического синтеза и анализа.

Ключевые слова: характеристика преобразования, погрешность результата измерения, метрологический синтез, метрологический анализ, модель функционального блока

Для цитирования: Жданова Е. Н., Романцова Н. В. Математическое и программное обеспечение для определения погрешности при решении задач метрологического анализа // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 6. С. 95–105. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-95-105

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20064, <https://rscf.ru/project/24-29-20064/>, а также гранта Санкт-Петербургского научного фонда (договор № 24-29-20064 от 22.05.2024).

Статья поступила в редакцию 31.07.2024; принята к публикации после рецензирования 13.11.2024; опубликована онлайн 27.12.2024



Mathematical Support and Software for Determining the Error in Solving Metrological Analysis Problems

Ekaterina N. Zhdanova[✉], Natalia V. Romantsova

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

[✉]enzhdanova@etu.ru

Abstract

Introduction. Work is currently underway to create specialized software systems designed for metrological synthesis and analysis. Such systems should include a set of functional blocks for solving typical metrological tasks. One of these tasks is to determine the characteristics of the sample under measurement by means of a set of reference standards. For example, it is required to determine the thickness of a sample using X-ray spectral analysis based on knowledge about the characteristics of a set of reference standards taking instrumental and methodological errors into account.

Aim. Development of software and algorithmic support for standard functional blocks of a software system designed for metrological analysis, intended for performing calculations of X-ray spectral analysis.

Materials and methods. The functional block, developed in the G language and in the GNU Octave software system, takes as input the type and characteristics of the distribution law of the instrumental error of the instrument, values of the exposure dose of radiation for the set of reference standards and the sample, as well as the thickness of the reference standards. At the output, this functional block outputs the result of measuring the thickness of the sample and its distribution law. Thus, the measurement result includes the instrumental error, the error of the approximation method, as well as the errors of the transformations.

Results. The software and algorithmic support of typical functional blocks of a software system designed to perform calculations of X-ray spectral analysis has been developed. This software facilitates metrological analysis for the task of determining the thickness of a sample based on a number of measurements of a set of reference standards. The correctness of the software and algorithmic support for typical functional blocks of the software system is confirmed by implementing the proposed calculation method, as well as by testing the developed software in both the graphical programming environment in the G language and the GNU Octave software system.

Conclusion. The developed software and algorithmic software can be used in software systems for metrological synthesis and analysis.

Keywords: conversion characteristics, measurement result error, metrological synthesis, metrological analysis, functional block model

For citation: Zhdanova E. N., Romantsova N. V. Mathematical Support and Software for Determining the Error in Solving Metrological Analysis Problems. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 6, pp. 95–105. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-6-95-105

Conflict of interest The authors declare no conflicts of interest

Source of funding. The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 24-29-20064, <https://rscf.ru/project/24-29-20064/>, and a grant from the St.Peterburg Science Foundation (agreement № 24-29-20064 dated 05/22/2024).

Submitted 31.07.2024; accepted 13.11.2024; published online 27.12.2024

Введение. Для моделирования электрических схем существуют программные среды, на основе которых возможно проводить метрологический синтез средств измерения и анализировать результаты измерения [1], однако данные задачи требуют больших трудозатрат.

В [2] рассматривается математическое моделирование измерительного прибора и его погрешностей в среде моделирования MATLAB & Simulink, в [3, 4] рассматривается использование среды программирования LabVIEW и среды моделирования измерительных цепей

Electronics Workbench для проведения метрологического анализа измерительных систем. Разработка измерительных каналов в средах схемотехнического моделирования позволяет осуществлять подбор элементной базы в зависимости от требуемых точностных характеристик.

Также среди программного обеспечения для моделирования электронных схем можно выделить Multisim, Proteus, PCad, Micro-Cap, DoCircuits, СИМИКА и др. Все эти программы имеют обширную базу элементов, среди которых есть датчики, что позволяет моделировать электрические цепи, однако данные продукты не специализируются на метрологическом синтезе и анализе.

В настоящий момент ведутся работы по созданию специализированных программных систем, предназначенных для метрологического синтеза и анализа [5–7]. Такие системы должны включать в себя набор функциональных блоков для решения типовых метрологических задач. Одной из таких задач является определение характеристики измеряемого образца посредством набора эталонов. Например, требуется определить толщину образца с помощью рентгеноспектрального анализа [8–17] на основе знаний о характеристиках набора эталонов и с учетом инструментальной и методической погрешностей.

Постановка задачи и метод ее решения. Разработка программно-алгоритмического обес-

печения типовых функциональных блоков программной системы, предназначенной для метрологического анализа в части выполнения расчетов рентгеноспектрального анализа. Типичная задача в области рентгеноспектрального анализа формулируется следующим образом: существует набор эталонов с известной характеристикой, например толщиной эталона; необходимо определить эту характеристику у образца. Чтобы определить характеристику образца, прежде всего проводят рентгеноспектральный анализ каждого эталона. Измерение характеристик эталона выполняется с инструментальной погрешностью измерительного прибора. Далее на основании полученных результатов измерения строится зависимость искомой величины от спектральных характеристик эталонов. Данная зависимость содержит погрешность аппроксимации. Следующим шагом является проведение рентгеноспектрального анализа образца, по результатам которого и на основании полученной зависимости определяется искомая характеристика.

Рассмотрим упрощенную задачу (рис. 1), для которой исходными данными являются известные параметры эталонов x_1 , x_2 , x_3 . Для этих значений при помощи измерительного прибора определяются величины f_1 , f_2 , f_3 с установленной инструментальной погрешно-

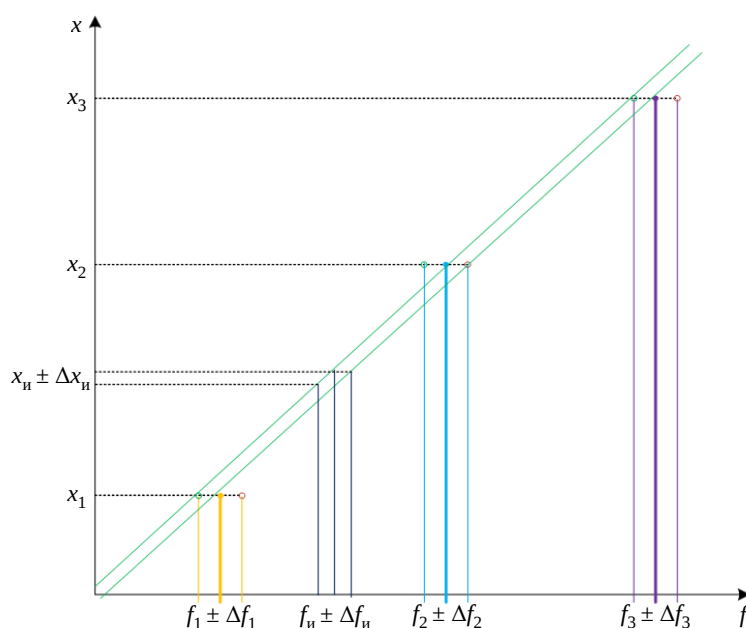


Рис. 1. Построение характеристики преобразования измеряемого параметра f в толщину x

Fig. 1. Construction of the characteristic of converting the measured parameter f into thickness x

стью. Зависимость между величинами f и x является линейной и определяется из малой выборки. На основании малой выборки и границ доверительных интервалов значений f_1 , f_2 , f_3 строятся граничные варианты линейной зависимости $x_{\text{л}}(f)$ и $x_{\text{п}}(f)$. Причем $x_{\text{л}}(f)$ не должна выходить за пределы доверительных интервалов и стремится пройти через крайнее левое положение интервала, а $x_{\text{п}}(f)$ не должна выходить за пределы доверительных интервалов и стремится пройти через крайнее правое положение интервала. Таким образом, формируется тоннель для возможных значений $x(f)$. При определении параметра образца $x_{\text{и}}$ измеряется величина $f_{\text{и}}$ измерительным прибором. Данное измерение выполняется с инструментальной погрешностью $\Delta f_{\text{и}}$, границы доверительного интервала $f_{\text{и}}$ переносятся на линейные зависимости $x_{\text{л}}(f)$ и $x_{\text{п}}(f)$, с которых проецируется доверительный интервал для $x_{\text{и}}$. Если случайная величина $f_{\text{и}}$ распределена по нормальному закону и так как $x(f)$ является линейной зависимостью, то $x_{\text{и}}$ также распределена по нормальному закону.

Алгоритмическое обеспечение функционального блока.

1. Ввод среднеквадратичного отклонения (СКО) прибора для измерения мощности экспозиционной дозы излучения P_D , вычисление СКО мощности экспозиционной дозы излучения P_{Dj} после прохождения фильтра толщиной x_j , вычисление СКО мощности экспозиционной дозы излучения без фильтра P_{D0} . Вычисление

отношения $f_j = \frac{P_{Dj}}{P_{D0}}$, определение СКО f_j :

$$\sigma_{f_j} = \sqrt{\frac{1}{P_{D0}^2} \sigma_{P_{Dj}}^2 + \frac{P_{Dj}^2}{P_{D0}^4} \sigma_{P_{D0}}^2}.$$

2. Аппроксимация зависимости отношения экспозиционной дозы излучения P_{Dj} и мощности экспозиционной дозы излучения без фильтра P_{D0} от толщин фильтра x_j линейным законом, который характеризуется туннелем, описываемым двумя прямыми линиями (рис. 2).

3. Определение тангенса угла наклона к оси x , который равен эффективному линейному коэффициенту ослабления ($\mu_{\text{эф}}$).

4. Определение доверительного интервала для $\mu_{\text{эф}}$.

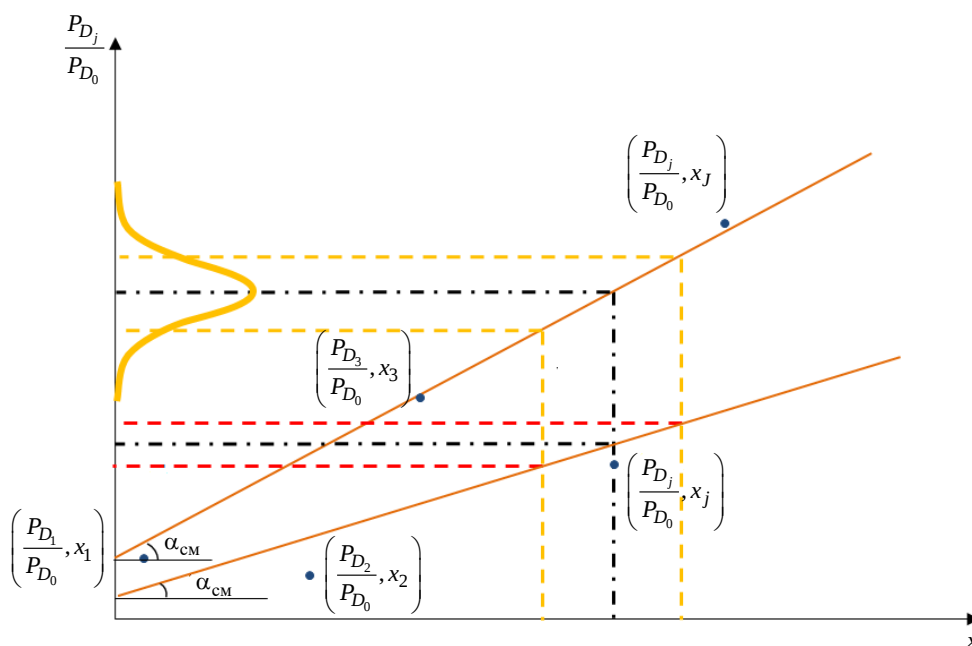


Рис. 2. Зависимость измеряемой величины от спектральных характеристик образца

Fig. 2. Dependence of the measured value on the spectral characteristics of the sample

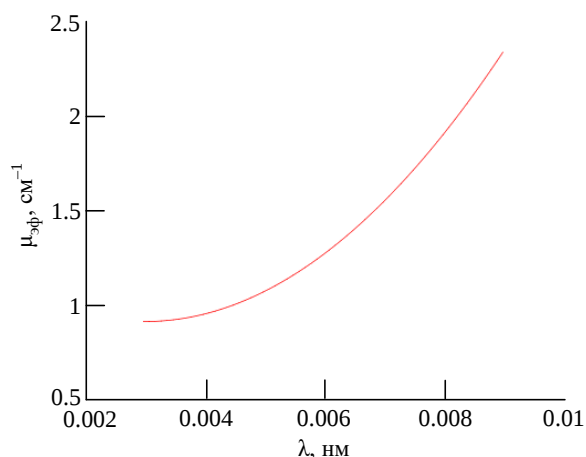


Рис. 3. Зависимость эффективного коэффициента ослабления от длины волны

Fig. 3. Dependence of the effective attenuation coefficient on the wavelength

5. Определение минимальной длины волны $\lambda_{\min}$ в спектре излучения импульсной рентгеновской трубки (ИРТ) и доверительного интервала $\lambda_{\min}$.

Для фильтров из определенного материала зависимость эффективного коэффициента ослабления от длины волны (рис. 3) можно описать полиномом второго порядка вида

$$\mu_{\text{эф}}(\lambda) = \text{tg } \alpha_{\text{см}} = 1.3012 - 241.0714\lambda + 39880.9523\lambda^2.$$

Таким образом, $\lambda_{\min}$ будет определяться выражением

$$\lambda_{\min} = 0.0030 + \frac{\sqrt{-149458 + 159524 \text{tg } \alpha_{\text{см}}}}{79762}. \quad (1)$$

6. Определение амплитуды импульса напряжения на ИРТ по формуле

$$U = \frac{1.24}{\lambda_{\min}} \quad (2)$$

и доверительного интервала $\pm \Delta U$.

7. Вывод измеряемой величины и ее погрешности.

Модель функционального блока (рис. 4) принимает на вход вид инструментальной погрешности в виде плотности распределения случайной величины или как закон распределения с его характеристиками, также на вход функционального блока поступают значения J эталонов и их измеренные параметры $\{x_j, P_{D_j}\}_1^J$, в том числе измеренный параметр

$P_{D_{\text{и}}}$ образца и мощность экспозиционной дозы излучения без фильтра P_{D_0} . На выход модели функционального блока поступают значение искомого параметра образца $x_{\text{и}}$, характеристики погрешности измеренного значения в виде доверительного интервала или вида плотности распределения измеряемой величины, а также амплитуды импульса напряжения на ИРТ и характеристика ее погрешности и минимальная длина волны $\lambda_{\min}$ в спектре излучения импульсной рентгеновской трубки и характеристика ее погрешности.

На рис. 5 σ_{f_j} – СКО величины f_j , известное для конкретного измерительного прибора; $x = kf + a$ – уравнение, описывающее линейную зависимость x от f .

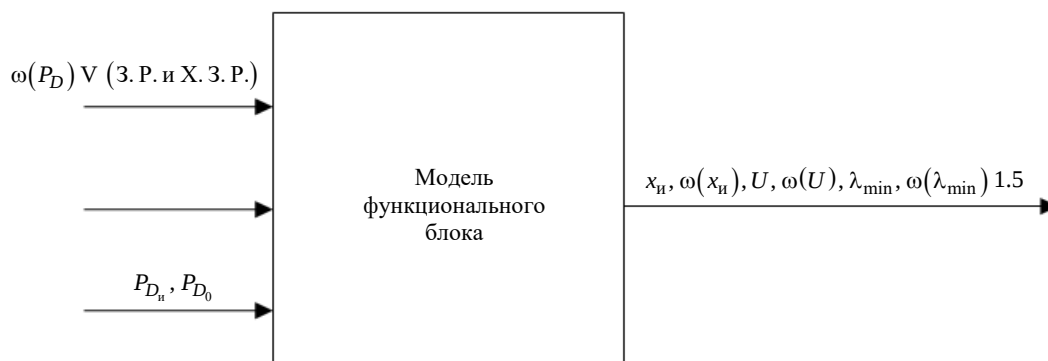


Рис. 4. Модель функционального блока

Fig. 4. Functional block model

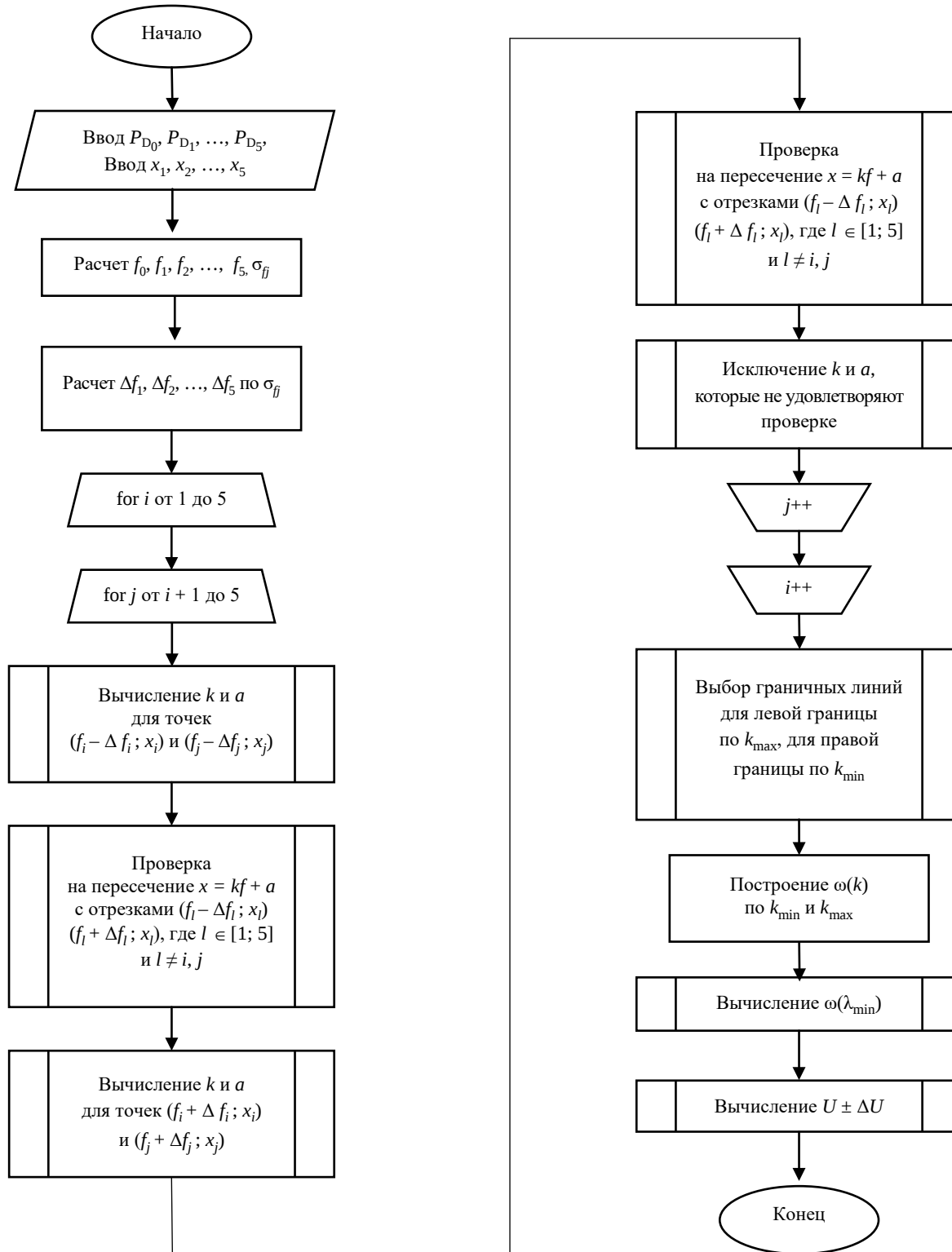


Рис. 5. Алгоритм работы типового функционального блока программной системы

Fig. 5. Operation algorithm of a typical functional block of the software system

Результаты. Продемонстрируем работу алгоритма при выборе граничных линий для левой границы по $k_{\max}$, для правой границы по $k_{\min}$.

Для эталонных значений: $\frac{P_{D1}}{P_{D0}} = 1.9$; $x_1 = 2$;

$\frac{P_{D2}}{P_{D0}} = 3.9$; $x_2 = 4$; $\frac{P_{D3}}{P_{D0}} = 6.1$; $x_3 = 6$ строится

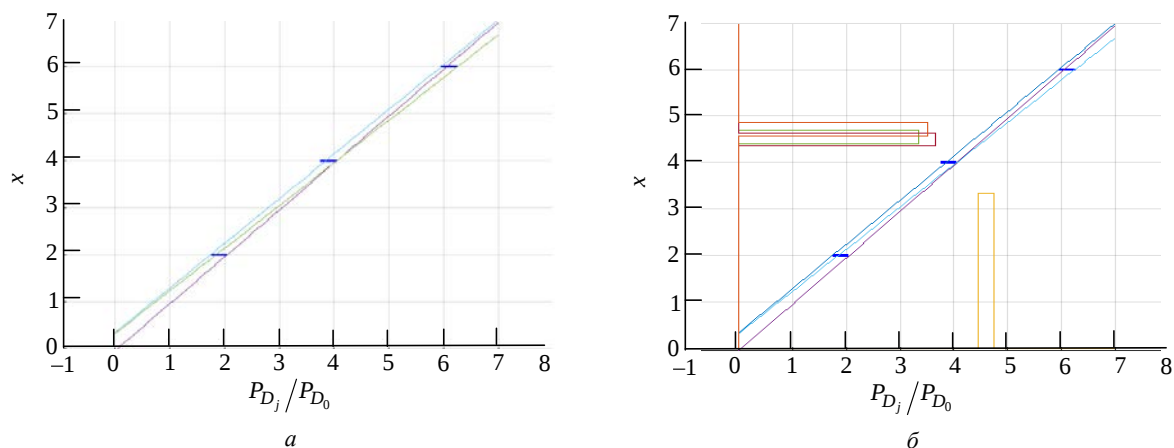


Рис. 6. Выбор $k_{\max}$, $k_{\min}$ при равномерном законе распределения измеряемой величины

Fig. 6. Choice of $k_{\max}$, $k_{\min}$ with a uniform distribution law of the measured value

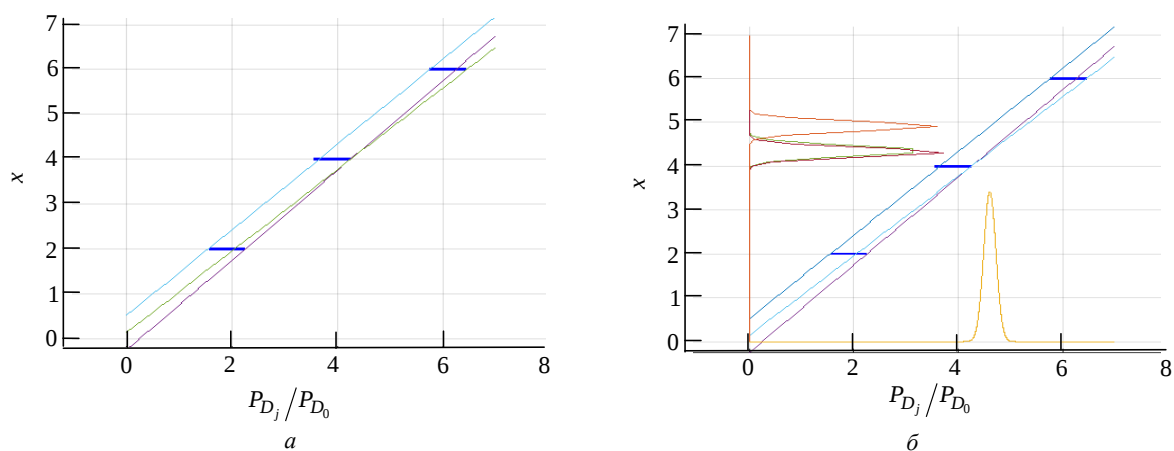


Рис. 7. Выбор $k_{\max}$, $k_{\min}$ при нормальном законе распределения измеряемой величины

Fig. 7. Choice of $k_{\max}$, $k_{\min}$ with the normal distribution law of the measured value

линейная зависимость $x \left(\frac{P_{Dj}}{P_{D0}} \right)$ для правой и

левой границ возможных значений характеристики преобразования, при равномерном законе распределения, с учетом интервала $\frac{P_{D_{\text{и}}}}{P_{D_0}}$

[4.45; 4.75] для искомого значения $x_{\text{и}}$ (рис. 6).

Для эталонных значений: $\frac{P_{D_1}}{P_{D_0}} = 1.9$; $x_1 = 2$;

$\frac{P_{D_2}}{P_{D_0}} = 3.9$; $x_2 = 4$; $\frac{P_{D_3}}{P_{D_0}} = 6.1$; $x_3 = 6$ строится

линейная зависимость $x \left(\frac{P_{Dj}}{P_{D0}} \right)$ для правой и

левой границ возможных значений характеристики преобразования, с учетом

СКО = 0.12 и $\frac{P_{D_{\text{и}}}}{P_{D_0}} = 4.6$ для искомого значения

$x_{\text{и}}$ и с доверительной вероятностью $P = 0.95$ при нормальном законе распределения (рис. 7).

Для эталонных значений: $\frac{P_{D_1}}{P_{D_0}} = 1.9$; $x_1 = 2$;

$\frac{P_{D_2}}{P_{D_0}} = 3.9$; $x_2 = 4$; $\frac{P_{D_3}}{P_{D_0}} = 6.1$; $x_3 = 6$ строится

линейная зависимость $x \left(\frac{P_{Dj}}{P_{D0}} \right)$ для правой и

левой границ возможных значений характеристики преобразования, при законе распределения

Симпсона, с учетом разброса $l = 0.15$ и $\frac{P_{D_{\text{и}}}}{P_{D_0}} = 4.6$

для искомого значения $x_{\text{и}}$ (рис. 8).

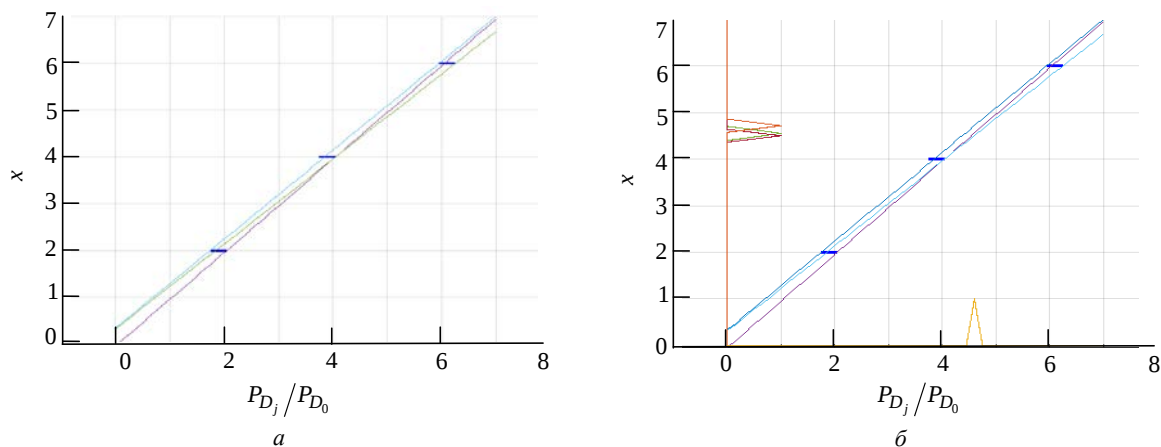


Рис. 8. Выбор $k_{\max}$, $k_{\min}$ при законе распределения Симпсона измеряемой величины

Fig. 8. $k_{\max}$, $k_{\min}$ selection under the Simpson distribution law of the measured value

Плотность распределения эффективного коэффициента ослабления $\omega(\mu_{\text{эф}}) = \omega(k) = \omega(\text{tg } \alpha_{\text{см}})$ (см. рис. 3) определяется, исходя из выражения $\mu_{\text{эф}} = \frac{x-b}{f_j}$, тогда $\omega(\mu_{\text{эф}}) = \frac{b-x}{f_j^2} \omega(f_j)$.

При расчете $\lambda_{\min}$ согласно (1) плотность распределения величины для длины волны $\omega(\lambda_{\min})$ с учетом $\text{tg } \alpha_{\text{см}} = \mu_{\text{эф}}$ будет определяться по выражению [18]

$$\omega(\lambda_{\min}) = \frac{\partial \lambda_{\min}}{\partial \mu_{\text{эф}}} \omega(\mu_{\text{эф}}),$$

$$\omega(\lambda_{\min}) = \frac{\omega(\mu_{\text{эф}})}{\sqrt{159524 \mu_{\text{эф}} - 149458}}.$$

При математическом ожидании $M(\mu_{\text{эф}}) = 1.5 \text{ см}^{-1}$, среднеквадратичном отклонении $\sigma_{\mu_{\text{эф}}} = 0.01 \text{ см}^{-1}$ и нормальном распределении $\mu_{\text{эф}}$ закон распределения $\lambda_{\min}$ будет отличаться от нормального и соответствовать оранжевой линии на рис. 9, а; при равномерном законе распределения $\mu_{\text{эф}}$ на интервале $[1.49; 1.51]$ закон распределения $\lambda_{\min}$ будет соответствовать оранжевой линии на рис. 9, б; при законе распределения Симпсона:

$$\omega(\mu_{\text{эф}}) = \begin{cases} 0, & \text{при } \mu_{\text{эф}} < a-l; \\ \frac{\mu_{\text{эф}} - a + l}{l^2}, & \text{при } a-l \leq \mu_{\text{эф}} < a; \\ \frac{l - \mu_{\text{эф}} + a}{l^2}, & \text{при } a \leq \mu_{\text{эф}} < a+l; \\ 0, & \text{при } \mu_{\text{эф}} > a+l, \end{cases}$$

где $l = 0.1$ и $a = 1.5$, закон распределения $\lambda_{\min}$ будет соответствовать оранжевой линии на рис. 9, в; при трапецидальном законе распределения:

$$\omega(\mu_{\text{эф}}) = \begin{cases} 0, & \text{при } \mu_{\text{эф}} < \mu_{\text{эфЦ}} - a, \mu_{\text{эф}} > \mu_{\text{эфЦ}} + a; \\ \frac{\mu_{\text{эф}} - \mu_{\text{эфЦ}} + a}{a^2 - b^2}, & \text{при } \mu_{\text{эфЦ}} - a \leq \mu_{\text{эф}} \leq \mu_{\text{эфЦ}} - b; \\ \frac{1}{a+b}, & \text{при } \mu_{\text{эфЦ}} - b \leq \mu_{\text{эф}} \leq \mu_{\text{эфЦ}} + b; \\ \frac{\mu_{\text{эфЦ}} + a - \mu_{\text{эф}}}{a^2 - b^2}, & \text{при } \mu_{\text{эфЦ}} + b \leq \mu_{\text{эф}} \leq \mu_{\text{эфЦ}} + a; \\ 0, & \text{при } \mu_{\text{эф}} > \mu_{\text{эфЦ}} + a, \end{cases}$$

где $a = 0.4$, $b = 0.1$ и $\mu_{\text{эфЦ}} = 1.5$, закон распределения $\lambda_{\min}$ будет соответствовать оранжевой линии на рис. 9, г.

Амплитуда импульса напряжения на ИРТ определяется согласно (2), а плотность распределения амплитуды по формуле

$$\omega(U) = -\omega(\lambda_{\min}) \frac{1.24}{\lambda_{\min}^2}.$$

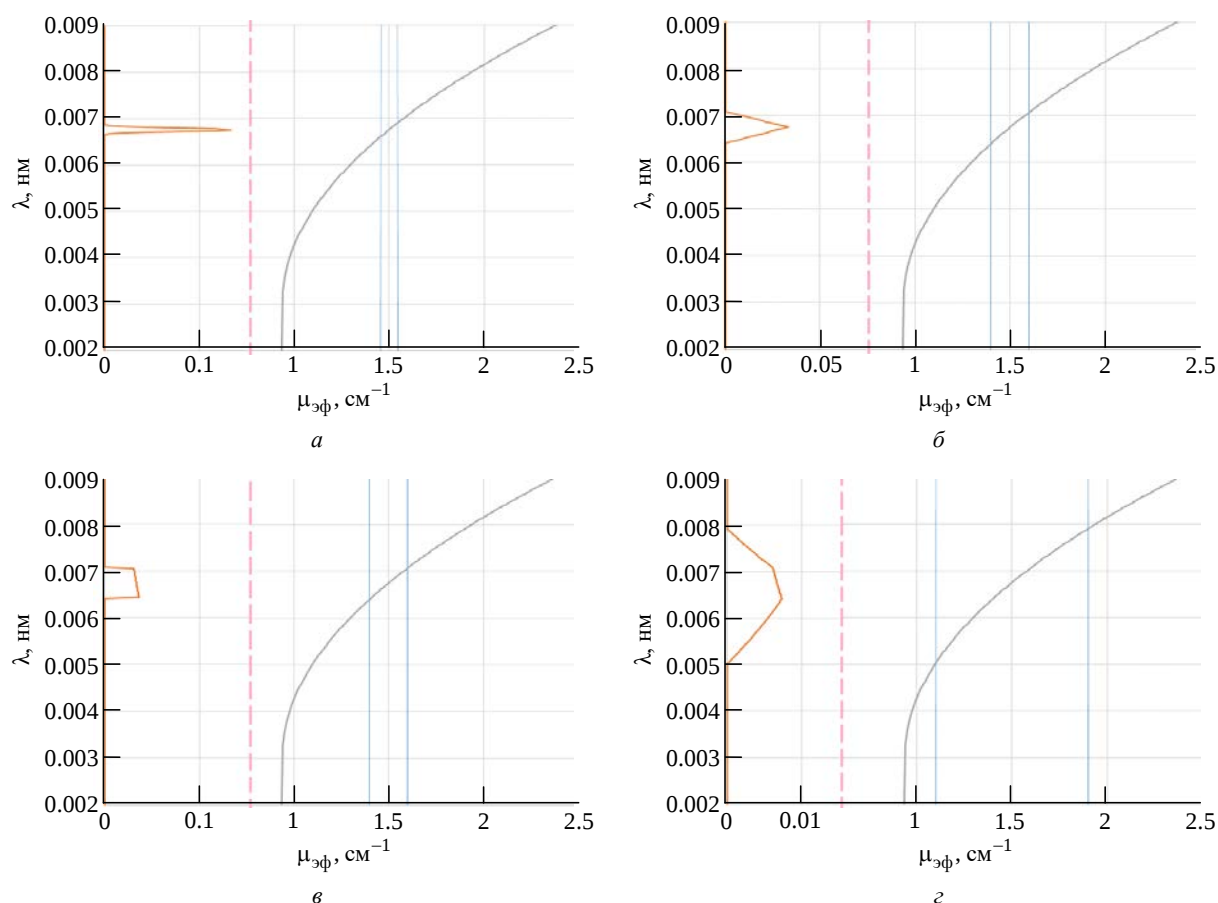


Рис. 9. Определение длины волны λ по вычисленному значению эффективного коэффициента ослабления $\mu_{\text{эф}}$

Fig. 9. Determination of the wavelength λ based on the calculated value of the effective attenuation coefficient $\mu_{\text{эф}}$

Заключение и выводы. При метрологическом анализе важно пользоваться средствами моделирования, которые должны учитывать характеристики преобразования и распределение вероятностей измеряемых величин. Для этой цели предлагается использовать разработанное алгоритмическое обеспечение (см. рис. 5), учитывающее функциональную зависимость искомой величины от измеряемой, погрешность определения функциональной зависимости и плотность распределения случайной входной величины. Корректность программно-алгоритмического обеспечения типовых функциональных блоков программной системы подтверждена приведенными примерами, ко-

торые были реализованы расчетным методом, а также тестированием созданного программного обеспечения в среде графического программирования на языке G и в программной системе GNU Octave. Предлагаемое программно-алгоритмическое обеспечение позволит проводить обработку результатов измерительного эксперимента с минимальными временными затратами, которое будет обусловлено временем, затраченным на ввод входных данных для дальнейшей работы программного средства, что существенно ускорит решение задачи метрологического анализа, а также увеличит информативность полученных результатов рентгеноспектрального анализа.

Список литературы

1. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Разработка и совершенствование процедур измерений, испытаний и контроля на предприятиях авиационной промышленности и воздушного транспорта // Мир измерений. 2019. № 4. С. 6–9.

2. Краснодубец Л. А., Пеньков М. Н. Компьютерное моделирование гидростатического измерителя плотности морской воды // Системы контроля

окружающей среды. 2020. Вып. 1 (39). С. 71–76. doi: 10.33075/2220-5861-2020-1-71-76

3. Климентьев К. Е. Имитационное моделирование метрологических аспектов измерительных систем // ИТМУ-17: Информационные технологии моделирования и управления: междунар. сб. науч. тр. Вып. 17. Воронеж: Науч. кн., 2004. С. 132–137.

4. Вовна А. В., Зори А. А., Тарасюк В. П. Алго-

Математическое и программное обеспечение для определения погрешности

при решении задач метрологического анализа

Mathematical Support and Software for Determining the Error
in Solving Metrological Analysis Problems

ритм и имитационная математическая модель измерительного канала температуры для обработки экспериментальных данных // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2010. № 5. С. 1–5.

5. Цветков Э. И. Метрология. Модели. Метрологический анализ. Метрологический синтез. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 293 с.

6. Романцова Н. В., Сулоева Е. С. Математическое и программное обеспечение для определения погрешности при моделировании средства измерения // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021. Т. 9, № 4. URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1068> (дата обращения: 25.06.2024). doi: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.017

7. Романцова Н. В., Сулоева Е. С. Модель измерительного блока, учитывающая влияние внешних факторов на изменение полной погрешности измерительного тракта // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. Т. 10, № 4. URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1248> (дата обращения: 25.06.2024) doi: 10.26102/2310-6018/2022.39.4.013

8. Электровакуумная техника, приборы и устройства / А. Ю. Грязнов, Д. К. Кострин, А. А. Лисенков, Н. Н. Потрахов, Е. Д. Прялухин. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2018. 260 с.

9. Алхимов Ю. В., Ефимов П. В., Сертаков Ю. И. Цифровые радиационные системы неразрушающего контроля. Томск: Изд-во ТПУ, 2012. 150 с.

10. Рентгеновские трубки: устройства, применения, проблемы электрической прочности / Г. Л. Брусиловский, Н. А. Куликов, А. Н. Малков и др. СПб.: Изд-во СПбГТИ (ТУ), 2012. 184 с.

11. Мазуров А. И., Потрахов Н. Н. О технологиях рентгеновских систем для контроля электронных компонентов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 3. С. 113–121. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-113-121

12. Сергунова К. А., Ахмад Е. С., Потрахов Н. Н. Методика оценки отношения сигнал/шум магнитно-резонансных изображений // Медицинская техника. 2019. Т. 315, № 3. С. 41–43.

13. Установки для рентгеновского контроля (обзор) / Н. Н. Потрахов, В. Б. Бессонов, А. В. Ободовский, А. Ю. Грязнов, В. В. Клонов, А. И. Мазуров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85, № 10. С. 35–42. doi: 10.26896/1028-6861-2019-85-10-35-42

14. Блинов Н. Н., Мазуров А. И. Состояние российской рентгенотехники и перспективы ее развития // Медицинская техника. 2012. Т. 275, № 5. С. 1–3.

15. Блинов А. Б., Блинов Н. Н., Ярославский В. Л. Развитие рентгенотехники в России // Радиология – практика. 2015. № 1. С. 51–59.

16. Лукьянченко Е. М., Грязнов А. Ю. Моделирование спектра первичного рентгеновского излучения в энергодисперсионном рентгеноспектральном анализе // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2003. № 8. С. 10–14.

17. Микрофокусная рентгенография: результаты исследований Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) / Н. Н. Потрахов, А. Ю. Грязнов, К. К. Жамова, В. Б. Бессонов, Ю. Н. Потрахов // Территория NDT. 2016. № 3. С. 54–57.

18. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. 12-е изд., перераб. и доп. М.: Едиториал URSS, 2019. 456 с.

Информация об авторах

Романцова Наталия Владимировна – кандидат технических наук (2015), доцент кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 59 научных работ. Сфера научных интересов – информационно-измерительные системы; метрологический анализ; измерение импульсных магнитных полей. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: nvromantsova@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7764-0338>

Жданова Екатерина Николаевна – кандидат технических наук (2019), доцент кафедры информационно-измерительных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 23 научной работы. Сфера научных интересов – информационно-измерительные системы; геоинформационные технологии; магнитные измерения. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: enzhdanova@etu.ru
<https://orcid.org/0009-0006-2281-2781>

References

1. Bogoyavlenskiy A. A., Bokov A. E. Developing and Improving the Procedures of Measurement, Tests and Control at The Enterprises of the Aerospace Industry and Air Transport. *Mir Izmerenii* [Measurements World]. 2019, no. 4, pp. 6–9. (In Russ.)

2. Krasnodubets L. A., Penkov M. N. Computer Simulation of a Hydrostatic Seawater Density Meter. *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy* [Environmental Control Systems]. 2020, iss. 1 (39), pp. 71–76. doi: 10.33075/2220-5861-2020-1-71-76 (In Russ.)

3. Klimentiev K. E. Simulation Modeling of Metrological Aspects of Measuring Systems. ITMU-17: Information Technologies of Modeling and Management. Intern. Collection of Scientific Papers. Iss. 17. Voronezh, Scientific book, 2004, pp. 132–137. (In Russ.)
4. Vovna A. V., Zori A. A., Tarasyuk V. P. Algorithm and Simulation Mathematical Model of a Temperature Measuring Channel for Processing Experimental Data. *Izvestiya SFU. Tekhnicheskie nauki*. [News SFU. Technical sciences]. 2010, no. 5, pp. 1–5. (In Russ.)
5. Tsvetkov E. I. *Metrologiya. Modeli. Metrologicheskii analiz. Metrologicheskii sintez* [Metrology. Models. Metrological analysis. Metrological synthesis]. St Petersburg, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2014, 293 p. (In Russ.)
6. Romantsova N. V., Suloeva E. S. Mathematical and Software Tools for Determining the Error in Modeling a Measuring Instrument. Modeling, Optimization and Information Technology. 2021, vol. 9, no. 4. Available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1068> (accessed 25.06.2024). doi: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.017 (In Russ.)
7. Romantsova N. V. Suloeva E. S. The Model of the Measuring Unit with Consideration for the Influence of External Factors on the Change in the Total Error of the Measurement Channel. Modeling, Optimization and Information Technology. 2022, vol. 10, no. 4. Available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1248> (accessed 25.06.2024). doi: 10.26102/2310-6018/2022.39.4.013 (In Russ.)
8. Gryaznov A. Yu., Kostrin D. K., Lisenkov A. A., Potrakhov N. N., Pryalukhin E. D. *Elektrovakuumnaya tekhnika, pribory i ustroystva* [Electrovacuum Technology, Instruments and Devices]. St Petersburg, *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2018, 260 p. (In Russ.)
9. Alkhimov Yu. V., Efimov P. V., Sertakov Yu. I. *Tsifrovye radiatsionnye sistemy nerazrushayushchego kontrolya* [Digital radiation non-destructive testing systems]. Tomsk, *Izd-vo TPU*, 2012, p. 150. (In Russ.)
10. Brusilovsky G. L., Kulikov N. A., Malkov A. N., etc. *Rentgenovskie trubki: ustroystva, primeneniya, problemy elektricheskoi prochnosti* [X-ray Tubes: Devices, Applications, Problems of Electrical Strength]. St Petersburg, *Izd-vo SPbGTI (TU)*, 2012, 184 p. (In Russ.)
11. Mazurov A. I., Potrakhov N. N. About Technologies of X-Ray Systems for Control of Electronic Components. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 113–121. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-113-121 (In Russ.)
12. Sergunova K. A., Akhmad E. S., Potrakhov N. N. Methodology for Evaluating the Signal-to-Noise Ratio of Magnetic Resonance Images. Medical Equipment. 2019, vol. 315, no. 3, pp. 41–43. (In Russ.)
13. Potrakhov N. N., Bessonov V. B., Obodovskiy A. V., Gryaznov A. Yu., Klonov V. V., Mazurov A. I. Design of X-Ray Units for Inspection Applications (Review). Industrial Laboratory. Materials Diagnostics. 2019, vol. 85, no. 10, pp. 35–42. doi: 10.26896/1028-6861-2019-85-10-35-42 (In Russ.)
14. Blinov N. N., Mazurov A. I. The State of Russian X-Ray Technology and Prospects for Its Development. Medical Equipment. 2012, vol. 275, no. 5, pp. 1–3. (In Russ.)
15. Blinov A. B., Blinov N. N., Yaroslavsky V. L. Development of X-Ray Equipment in Russia. Radiology and Practice. 2015, no. 1, p. 51–59. (In Russ.)
16. Lukyanchenko E. M., Gryaznov A. Y. Simulation of the Primary X-Ray Spectrum in the Energy-Dispersive Analysis. Proc. of Saint Petersburg Electrotechnical University. 2003, no. 8, pp. 10–14. (In Russ.)
17. Potrakhov N. N., Gryaznov A. Yu., Zhamova K. K., Bessonov V. B., Potrakhov Yu. N. Microfocus Radiography: Research Results of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The Territory of NDT. 2016, no. 3, pp. 54–57. (In Russ.)
18. Gnedenko B. V. *Kurs teorii veroyatnostei* [Course of Probability Theory]. 12nd ed. Moscow, Editorial URSS, 2019, 456 p. (In Russ.)

Information about the authors

Natalia V. Romantsova, Can. Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor of the Department of Information-measuring Systems and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 59 scientific publications. Area of expertise: information and measurement systems; metrological analysis; measurement of pulsed magnetic fields.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: nvromantsova@mail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7764-0338>

Ekaterina N. Zhdanova, Cand. Sci. (Eng.) (2019), Associate Professor of the Department of Information-measuring Systems and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 23 scientific publications. Area of expertise: information and measurement systems; geoinformation technologies; magnetic measurements.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: enzhdanova@etu.ru

<https://orcid.org/0009-0006-2281-2781>