УДК 006.91.001+ 681.518
DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.017

# Математическое и программное обеспечение для определения погрешности при моделировании средства измерения

**Н.В. Романцова, Е.С. Сулоева**✉

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),*
*Санкт-Петербург, Российская Федерация*
*suloewa@list.ru*✉

***Резюме.*** При метрологическом синтезе ставится задача определения метрологических характеристик средства измерения. В рамках модели средство измерения может быть представлено как совокупность узлов, параметры которых влияют на результат измерения. В работе рассматривается случай определения плотности вероятности погрешности результата измерения для последовательно соединенных узлов средства измерения. Проводится идентификация закона распределения полной погрешности на основе машинного эксперимента. В качестве примера предлагается рассмотреть случай, сочетающий в себе постоянное значение входной величины, для которой погрешность определяется как аддитивный шум, составленный независимыми величинами. Выполняется машинный эксперимент для итеративного поиска композиции законов распределения случайных независимых величин, являющихся погрешностями соседних узлов средства измерения, результат композиции сопоставляется с известными законами распределения. Указываются два случая принадлежности закона распределения суммарной случайной величины нормальному закону или закону произвольной формы. Оценка погрешности средства измерения основывается на вычислении вероятностных характеристик по найденной плотности распределения вероятности, что позволяет использовать при оценке априорную информацию о каждом из узлов средства измерения. Предлагается рассмотрение математического ожидания, дисперсии и интервальной вероятности в качестве характеристик точности идентифицируемой плотности распределения погрешности результата измерения.

***Ключевые слова:*** средство измерения, погрешность результата измерения, плотность распределения вероятности, композиция законов распределения, имитационное моделирование, идентификация закона распределения.

***Для цитирования:*** Романцова Н.В., Сулоева Е.С. Математическое и программное обеспечение для определения погрешности при моделировании средства измерения. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2021;9(4). Доступно по: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1068 DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.017

# Mathematical and software tools for determining the error in modeling a measuring instrument

**N.V. Romantsova, E.S. Suloeva**✉

*Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI",*
*Saint-Petersburg, Russian Federation*
*suloewa@list.ru*✉

***Abstract:*** In metrological synthesis, the task is to determine the metrological characteristics of a measuring instrument. In modeling, the measuring means can be represented as a nodes unit whose parameters affect the measurement result. The case of determining the probability density of the total error of the measurement result for sequentially connected units of the measuring instrument is considered. The identification of the distribution law of the overall error is carried out based on a machining experiment. As an illustration, it is proposed to consider a case combining a constant value of an input quantity for which the error is defined as additive noise composed of independent values. A machining experiment is performed to iteratively search for the composition of the distribution laws of random independent quantities of neighboring nodes of the measuring instrument. The composition result is compared with the known distribution laws. Two cases of attribution of the law of distribution of the total random variable to the normal law or the law of arbitrary form are indicated. The estimation of the error of the measuring instrument is based on the calculation of probabilistic characteristics based on the found probability distribution density, which makes it possible to use a priori information about each of the nodes of the measuring instrument in the evaluation. It is proposed to consider mathematical expectation, variance, and interval probability as characteristics of the accuracy of the identified density of the error distribution of the measurement result.

***Keywords:*** measuring instrument, measurement result error, probability distribution density, composition of distribution laws, simulation modeling, identification of the distribution law.

***For citation:*** 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;9(4). Available from: https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1068 DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.017 (In Russ).

## Введение

В метрологической практике основной задачей является определение измеряемой величины с заданной точностью. Для этого существует ряд практических методов, которые в рамках физического эксперимента способны минимизировать погрешности результата. В метрологических испытаниях помимо указанной аппаратной части, существует так называемая процессорная часть, которая подразумевает расчетный метод определения характеристик погрешности, который может быть основан на машинном эксперименте.

Рассматривается задача поиска закона распределения суммарной погрешности средства измерения. Предполагается, что средство измерения представляет собой набор последовательно включенных блоков или узлов (Рисунок 1). Погрешность измерения на выходе каждого блока является случайной величиной и имеет свой закон распределения. Для расчета характеристик суммарной погрешности средства измерения необходимо получить композицию законов распределения погрешностей блоков.

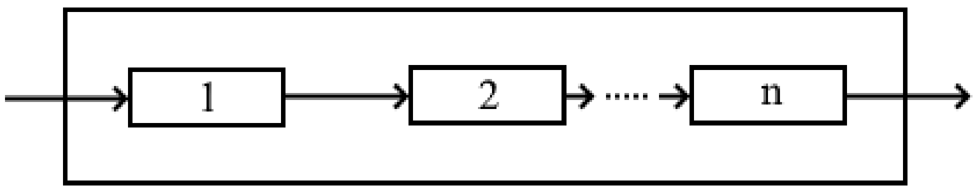



Рисунок 1 – Средство измерения
Figure 1 – Measuring instrument

Первоначально вводится математическая модель входной величины, которая является постоянной в рамках одного эксперимента ( $\gamma_j(t) = const$ ) и может быть постоянной или вариативной в серии экспериментов $\{\gamma_j(t)\}_{j=1}^{J} = const \vee \mathrm{var}$.

При прохождении через соседние блоки средства измерения входная величина приобретает дополнительные составляющие, погрешности, характер которых может быть аддитивным $\gamma_j^*(t) = \gamma_j(t) + n_j(t)$ или мультипликативным $\gamma_j^*(t) = a\gamma_j(t)$ . Также важным свойством величин, составляющих погрешность, является их независимость или взаимная корреляция, которая может быть описана в качестве дополнительного коэффициента *p*, на величину которого оказывают влияние два фактора $\mathrm{f}_1, \mathrm{f}_2$.

Этот коэффициент в общем случае определяется по формуле функциональной зависимости:

$p(\mathrm{f}_1, \mathrm{f}_2) = f(B_y(\mathrm{f}_1, \mathrm{f}_2))$, где $B_y(\mathrm{f}_1, \mathrm{f}_2)$ – корреляционная функция.

Входные воздействия при этом примут следующий вид:

$$\gamma_j^*(t) = a \cdot p(\mathrm{f}_1, \mathrm{f}_2) \cdot \gamma_j(t) \quad (1)$$

$$\gamma_j^*(t) = \gamma_j(t) + p(\mathrm{f}_1, \mathrm{f}_2) \cdot n_j(t) \quad (2)$$

Таким образом, описание для результата измерения должно включать в себя возможные варианты рассмотрения по 3 категориям:

- вариативная или постоянная входная величина;
- аддитивная или мультипликативная погрешность;
- зависимые или независимые величины, составляющие погрешность.

Предлагается провести моделирование случая, сочетающего в себе постоянное значение входной величины, для которой погрешность определяется как аддитивный шум, включающий в себя независимые величины, составляющие погрешность.

## Материалы и методы

Требуется установить закон распределения погрешности результата измерения. Определение погрешности измерения – это основная задача, суть которой состоит в том, что при имеющейся информации о законах распределения случайных величин необходимо отыскать и исследовать общую плотность распределения погрешности $\omega(\Delta_\Sigma \lambda_j^*)$ результата.

Определение $\omega(\Delta_\Sigma \lambda_j^*)$ проходит с помощью композиции законов распределения $\omega(\Delta_\Sigma \lambda_j^*) = \omega_i(\Delta_i \lambda_j^*) * \omega_k(\Delta_k \lambda_j^*)$

Произвести композицию двух законов распределения – значит найти закон распределения суммы двух независимых случайных величин, подчиненных этим законам распределения [1-2].

Пусть независимые случайные величины $\Delta_1 \lambda_j^*$ и $\Delta_2 \lambda_j^*$ , подчиненные соответственно законам распределения $\omega_1(\Delta_1 \lambda_j^*)$ и $\omega_2(\Delta_2 \lambda_j^*)$, тогда композиция этих законов, плотность распределения величины, находится следующим образом: $\Delta_{\Sigma 12} \lambda_j^* = \Delta_1 \lambda_j^* + \Delta_2 \lambda_j^*$.

Если $\Delta_1 \lambda_j^*$ и $\Delta_2 \lambda_j^*$ , независимы, то плотность распределения суммы двух случайных величин: $\omega(\Delta_{\Sigma 12} \lambda_j^*) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega_1(\Delta_1 \lambda_j^*) \omega_2(\Delta_{\Sigma 12} \lambda_j^* - \Delta_1 \lambda_j^*) d\omega_1(\Delta_1 \lambda_j^*)$.

Математическое и программное обеспечение, позволяющее последовательно определять композицию случайных величин для дальнейшего моделирования средства измерения предлагается создавать на основе следующего алгоритма:

1. Создание массива X размера N с шагом ΔN.

2. Анализ выбора пользователем вида плотности распределения случайной величины $\Delta_1\lambda_j^*$ : распределение Рэлея; бета-функция, непрерывное равномерное распределение; распределение Коши, распределение χ^2; экспоненциальное распределение; функция на компакте; отношение двух распределений χ^2; гамма-распределение; распределение Лапласа; логистическое распределение; логнормальное распределение; нормальное распределение; распределение Стьюдента; треугольное распределение; распределение Вейбулла; ассиметричное распределение χ^2. Анализ необходимых параметров для выбранного закона, таких как k – количество степеней свободы для распределения по Стьюденту или σ – стандартного отклонения переменной для нормального закона [3-4].

Альтернативный способ задания плотности распределения предполагает ввод данных в виде массива со значениями плотности распределения.

3. Создание массива Y размера N с шагом ΔN.

4. Анализ выбора пользователем вида плотности распределения случайной величины $\Delta_2\lambda_j^*$ и необходимых параметров для выбранного закона, аналогичные пункту 2.

5. Обработка ошибок, вызванных некорректно заданных пользователем параметров для выбранного закона распределения.

6. Расчет плотности распределения вероятности для каждого элемента массива X и массива Y.

7. Вывод графиков плотностей распределения вероятности $\omega_1(\Delta_1\lambda_j^*)$ и $\omega_2(\Delta_2\lambda_j^*)$ .

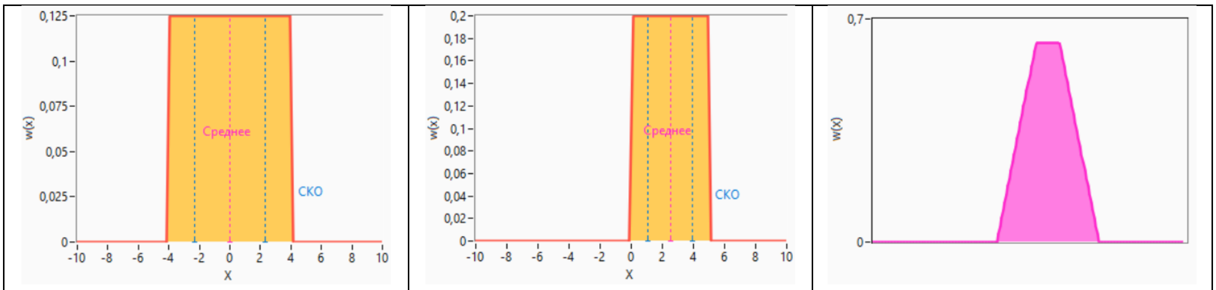
8. Расчёт для величин $\Delta_1\lambda_j^*$ и $\Delta_2\lambda_j^*$ математических ожиданий и СКО.

9. Расчёт свертки $\omega_1(\Delta_1\lambda_j^*) * \omega_2(\Delta_2\lambda_j^*)$ .

10. Вывод графика плотности распределения суммы двух случайных величин.

Результаты работы программного средства для поиска плотности распределения суммы двух случайных величин приведены на Рисунках 2-4, где подобраны типичные легкоузнаваемые случаи. Программное средство реализовано в среде графического программирования [5].

На Рисунке 2 представлен результат моделирования композиции двух случайных величин, распределенных по непрерывному равномерному закону.




Непрерывное равномерное распределение | Непрерывное равномерное распределение | Результат композиции

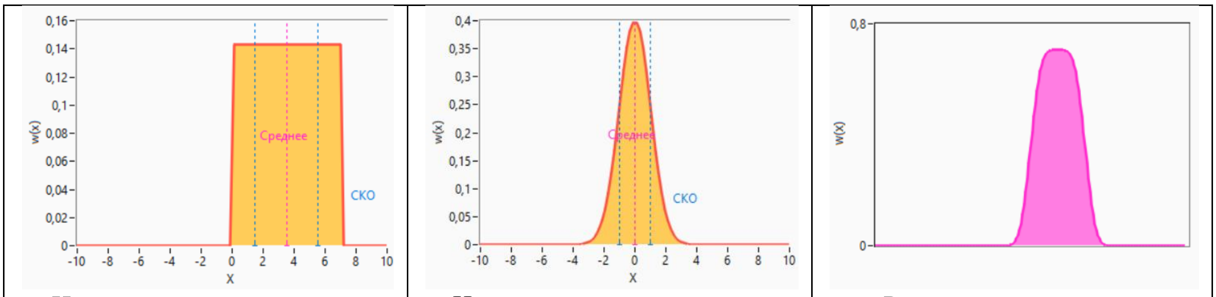
Рисунок 2 – Плотность распределения суммы двух случайных независимых величин
Figure 2 – Probability distribution density of the sum of two random independent variables

Непрерывное равномерное распределение в программе задается выражением:

$$\omega(\Delta_i\lambda^*_j) = \begin{cases} \dfrac{1}{(\Delta_{i\max}\lambda^*_j - \Delta_{i\min}\lambda^*_j)} \text{ при } \Delta_{i\min}\lambda^*_j \le \Delta_i\lambda^*_j \le \Delta_{i\max}\lambda^*_j \\ 0 \text{ при } \Delta_i\lambda^*_j > \Delta_{i\max}\lambda^*_j \text{или } \Delta_i\lambda^*_j < \Delta_{i\min}\lambda^*_j \end{cases}, \quad (3)$$

где $\Delta_{i\min}\lambda^*_j$ – указывает параметр нижнего предела переменной, $\Delta_{i\max}\lambda^*_j$ – определяет верхний предел параметра переменной

На Рисунке 3 представлен результат свертки двух плотностей распределения случайных величин, одна из которых распределена по равномерному, а вторая по нормальному закону распределения.




Непрерывное равномерное распределение | Нормальное распределение | Результат композиции

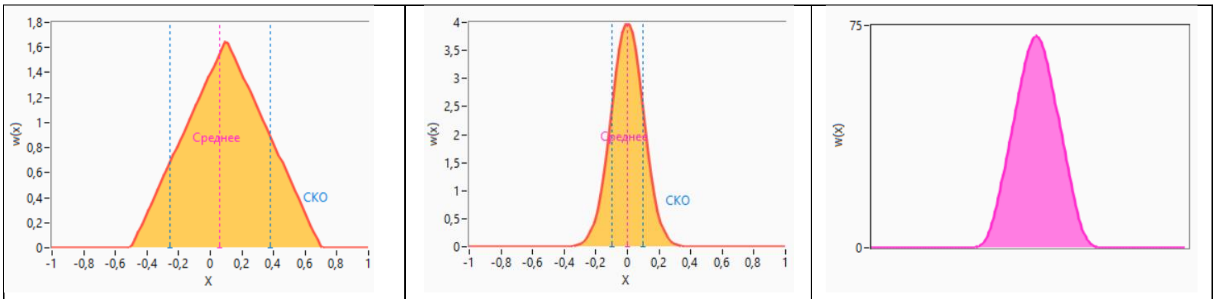
Рисунок 3 – Плотность распределения суммы двух случайных независимых величин
Figure 3 – Probability distribution density of the sum of two random independent variables

Нормальное распределение в программном средстве задается выражением:

$$\omega(\Delta_i\lambda^*_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(\Delta_i\lambda^*_j - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где μ – указывает местоположение или средний параметр переменной, σ – определяет масштаб или параметр стандартного отклонения переменной, который должен быть больше 0.

На Рисунке 4 представлен результат моделирования композиции двух случайных величин, одна из которых имеет закон распределения по Симпсону, а вторая по нормальному закону распределения.




Треугольное распределение | Нормальное распределение | Результат композиции

Рисунок 4 – Плотность распределения суммы двух случайных независимых величин
Figure 4 – Probability distribution density of the sum of two random independent variables

Треугольное распределение в программном средстве задается выражением:

$$\omega(\Delta_i\lambda_j^*) = \begin{cases} \dfrac{2(\Delta_i\lambda_j^* - \Delta_{i\max}\lambda_j^*)}{(\Delta_{i\,\mathrm{mod}\,e}\lambda_j^* - \Delta_{i\min}\lambda_j^*)(\Delta_{i\max}\lambda_j^* - \Delta_{i\min}\lambda_j^*)} \text{ при } \Delta_{i\min}\lambda_j^* \le \Delta_i\lambda_j^* \le \Delta_{i\,\mathrm{mod}\,e}\lambda_j^* \\ \dfrac{2(\Delta_i\lambda_j^* - \Delta_{i\max}\lambda_j^*)}{(\Delta_{i\,\mathrm{mod}\,e}\lambda_j^* - \Delta_{i\max}\lambda_j^*)(\Delta_{i\max}\lambda_j^* - \Delta_{i\min}\lambda_j^*)} \text{ при } \Delta_{i\,\mathrm{mod}\,e}\lambda_j^* \le \Delta_i\lambda_j^* \le \Delta_{i\min}\lambda_j^* \end{cases} \quad (5)$$

Если необходимо найти плотность распределения суммы более чем двух случайных величин, то действия производятся итеративно. Результат композиции в таком случае после первого шага выступает в качестве массива со значениями плотности распределения, с которым выполняется операция свертки плотности распределения третьей случайной величины и т. д.

Плотность распределения суммы случайных величин полезно проассоциировать с известным законом для дальнейшего определения интервальной оценки погрешности средства измерения.

## Результаты

Для подтверждения гипотезы о соответствии закона распределения известному закону существует множество критериев. В программном средстве предлагается использовать критерий Колмогорова [6-7]. Генерируется несколько выборок, которые имеют разные законы распределения случайной величины. При сложении выборок проверяется гипотеза о соответствии закона распределения получившейся случайной величины нормальному закону распределения.

Результаты работы программы:

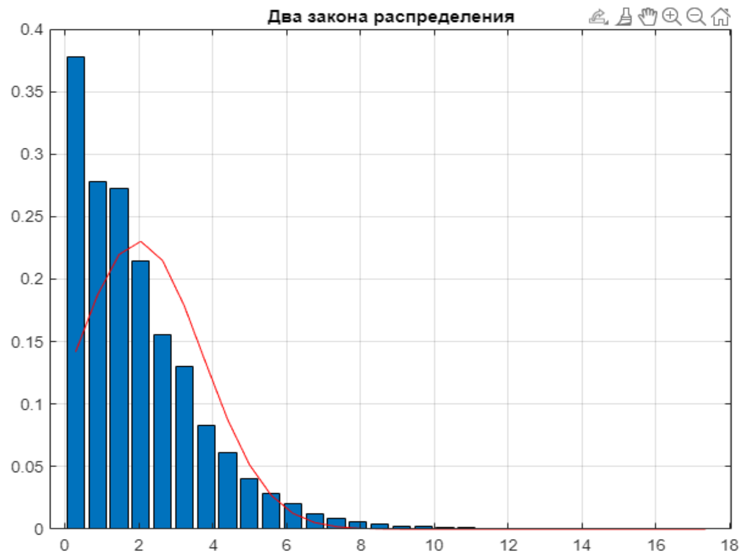



Рисунок 5– График суммы двух случайных величин
Figure 5 – Graph of the sum of two random variables

В соответствии с [8] идентификация закона распределения полученного результата возможна путем вычисления ошибки определения данного закона:

$$\Delta\omega_j^*(\Delta_\Sigma\lambda_j^*) = \omega_j^*(\Delta_\Sigma\lambda_j^*) - \omega_j(\Delta_\Sigma\lambda_j^*)\,.$$

Здесь может быть решена как прямая задача с отнесением (перебором) полученного результата $\omega_j^*(\Delta_\Sigma\lambda_j^*)$ к известным законам распределения и последующим нахождением ошибки, так и обратная задача, где сначала задается ошибка и только потом выдается результат об идентификации рассматриваемой зависимости. Примером этого может служить отнесение нормальному закону распределения с поправкой (α), где вероятность соответствия будет, например, P=0,95.

Исходя из результата работы программы, был сделан вывод о том, что сложение восьми выборок с разными законами распределения даст выборку, закон распределения которой отличен от нормального (Рисунок 6). При проверке на нормальность закона распределения суммы более чем десяти случайных величин, гипотеза принимается, что не противоречит теореме Ляпунова [9].


Рисунок 6 – График суммы восьми случайных величин
Figure 6 – Graph of the sum of eight random variables

В случае, если вычисленный закон распределения отличен от нормального, необходимо определить точностные характеристики для получаемых результатов. В общем случае для каждой из величин можно определить вероятностную характеристику, используемую в качестве критерия точности [10]. В соответствии с теорией вероятностей для определения $\Theta[\Delta_\Sigma\lambda_j^*]$ можно использовать соотношение

$$\Theta[\Delta_\Sigma\lambda_j^*] = \int_\Delta \omega(\Delta_\Sigma\lambda_j^*) g[\Delta_\Sigma\lambda_j^*] d(\Delta_\Sigma\lambda_j^*), \quad (6)$$

где $g(\Delta\omega_j^*(\lambda))$ – исходное преобразование, лежащее в основе определения $\Theta[\Delta_\Sigma\lambda_j^*]$; $\Delta$ – область возможных значений $\Delta_\Sigma\lambda_j^*$. Такого рода определение вероятностной характеристики опирается на известное распределение плотности вероятности $\Delta_\Sigma\lambda_j^*$, которое либо установлено априори, либо устанавливается на основе соответствующих априорных знаний.

В случае отсутствия этой информации используется не распределение плотности вероятности случайной величины $\Delta_\Sigma\lambda_j^*$, а предел выборочного среднего.

$$\Theta[\Delta_\Sigma\lambda_j^*] = \frac{1}{N} \lim_{N\to\infty} \sum_{j=1}^{N} g(\Delta_\Sigma\lambda_j^*). \quad (7)$$

Это вытекает из принципов математической статистики по описанию и анализу свойств случайных величин, полученных на основе выборочных массивов.

## Обсуждение

При планировании идентификации для распределения плотности вероятности случайной величины $\omega_j(\Delta_\Sigma\lambda^*_j)$ должны быть задействованы следующие параметры: $I$ – число используемых отсчетов в $j$-ом эксперименте; Q – число интервалов(гистограммы); $\Delta_q=\lambda_q-\lambda_{q-1}$ – протяженность $q$-го интервала; $I_q$ – число отсчетов, для которых справедливо $\lambda^*_{ij}\in(\lambda_{q-1},\lambda_q)$; $n_q$ – число отсчетов, попавших в $q$-ый интервал.

Также необходимо рассмотреть оптимальные значения вероятностной характеристики величины $\Delta_\Sigma\lambda^*_j$ относительно числа используемых отсчетов в $j$-ом эксперименте, числа интервалов (гистограммы) и объема выборки. Оптимумы соответствуют решению системы уравнений:

$$\begin{cases} d(\Theta[\Delta_\Sigma\lambda^*_j])/dI=0 \\ d(\Theta[\Delta_\Sigma\lambda^*_j])/dQ=0 \\ d(\Theta[\Delta_\Sigma\lambda^*_j])/dN=0 \end{cases} \quad (8)$$

Т. е. ошибка определения плотности распределения случайной величины $\lambda$ может быть представлена при помощи следующих характеристик:

– математическое ожидание $M[\Delta_\Sigma\lambda^*_j]$;
– дисперсия $D[\Delta_\Sigma\lambda^*_j]$;
– интервальная вероятность $P_\Delta[\Delta_\Sigma\lambda^*_j]$.

Для суммарного закона распределения, не идентифицированного как нормальный, определяются вероятностные характеристики, описывающие различные свойства величины $\Delta_\Sigma\lambda^*_j$. В зависимости от задачи могут быть оценены:

$$[M[\Delta_\Sigma\lambda^*_j]=\int_\Delta\omega(\Delta_\Sigma\lambda^*_j)(\Delta_\Sigma\lambda^*_j)d(\Delta_\Sigma\lambda^*_j) \quad (9)$$

- систематическая погрешность при помощи величины $M[\Delta_\Sigma\lambda^*_j]$;

$$D[\Delta_\Sigma\lambda^*_j]=\int_\Delta\omega(\Delta_\Sigma\lambda^*_j)(\Delta_\Sigma\lambda^*_j-M[\Delta_\Sigma\lambda^*_j])^2d(\Delta_\Sigma\lambda^*_j) \quad (10)$$

- случайная погрешность в качестве СКО погрешности с использованием корня квадратного из $D[\Delta_\Sigma\lambda^*_j]$;

$$P_\Delta[\Delta_н,\Delta_в]=\int_{\Delta_Н}^{\Delta_В}\omega(\Delta_\Sigma\lambda^*_j)d(\Delta_\Sigma\lambda^*_j) \quad (11)$$

- вероятность принадлежности погрешности установленному интервалу $[\Delta_н,\Delta_в]$ или так называемая расширенная неопределенность $P_\Delta[\Delta_\Sigma\lambda^*_j]$.

## Заключение

Рассмотренный подход позволяет вычислить плотность распределения суммарной погрешности и разделить два случая: нормальный закон распределения и закон распределения суммарной погрешности произвольной формы. Для первого случая возможно применить известный математический аппарат по определению погрешности результатов измерения, второй вариант предполагает метрологический анализ на основе плотности распределения случайной величины. Такой метод, в рамках имитационного моделирования, может быть применен для метрологического синтеза средств измерения на основе комбинирования различных узлов с априори известными метрологическими характеристиками. Метод также является одним из инструментов программного обеспечения для проектирования средств измерения и их анализа.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Новицкий П.В., Зограф И.А. *Оценка погрешностей результатов измерений.* 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат; 1991. 303 с.
2. Вентцель Е.С. *Теория вероятностей.* Учебник для высших технических учебных заведений. М.: Издательство «Наука»: Главная редакция физико-математической литературы; 1969. 576 с.
3. Джонсон Н., Лион Ф. *Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных.* Пер. с англ. М.: Изд-во «Мир»; 1980. 510 с.
4. Гнеденко Б.В. *Курс теории вероятностей.* 12-е изд., перераб. и доп. М.: Едиториал URSS; 2019. 456 с.
5. Glazebnyy K.I., Romantsova N.V., Sokolov A.N. Algorithmic Support for Calculating the Compositions of Distribution Laws. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus).* 2021:360–363. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396547.
6. Иглин С.П. *Математические расчёты на базе MATLAB.* СПб.: Изд-во БХВ; 2005. 640 с.
7. Алексеев В.В., Долидзе Р.В., Недосекин Д.Д., Чернявский Е.А*: Практикум по вероятностным методам в измерительной технике: Учеб. пособие для вузов*. СПб.: Изд-во Энегоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние; 1993. 264 с.
8. Цветков Э.И. *Метрология. Модели. Метрологический анализ. Метрологический синтез.* СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; 2014. 293 с.
9. Иглин С.П. *Теория вероятностей и математическая статистика на базе MATLAB.* Харьков, Украина: Издательство НТУ "ХПИ"; 2006. 612 с.
10. Tsvetkov E.I., Suloeva E.S. Analysis of the parameters that determine the reliability of the results of a verification of measuring instruments. *Measurement Techniques*. 2018;61(9):872–877. DOI: 10.1007/s11018-018-1517-z.

## REFERENCES

1. Novitsky P.V., Zograf I.A. *Estimation of measurement results errors*. 2nd ed., reprint. and add. L.: Energoatomizdat; 1991. 303 p. (In Russ.)
2. Wentzel E.S. *Probability theory.* Textbook for higher technical educational institutions. M.: Nauka Publishing House: The main editorial office of physical and mathematical literature; 1969. 576 p. (In Russ.)
3. Johnson N., Lyon F. *Statistics and experiment planning in engineering and science. Methods of data processing.* Trans. from English. M.: Publishing house "Mir"; 1980. 510 p. (In Russ.)
4. Gnedenko B.V. *Course of probability theory*. 12nd ed., reprint. and add. M.: Editorial URSS; 2019. 456 p. (In Russ.)
5. Glazebnyy K.I., Romantsova N.V., Sokolov A.N. Algorithmic Support for Calculating the Compositions of Distribution Laws. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus).* 2021:360–363. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396547.

6. Iglin S.P. *Mathematical calculations based on MATLAB*. SPb.: Publishing house BHV; 2005. 640 p. (In Russ.)
7. Alekseev V.V., Dolidze R.V., Nedosekin D.D., Chernyavsky E.A. *Workshop on probabilistic methods in measuring technology: Textbook for universities*. SPb.: Publishing house Enegoatomizdat. St. Petersburg Department; 1993. 264 p. (In Russ.)
8. Tsvetkov E.I. *Metrology. Models. Metrological analysis. Metrological synthesis*. SPb.: Publishing House of SPbSETU "LETI"; 2014. 293 p. (In Russ.)
9. Iglin S.P. *Probability theory and mathematical statistics based on MATLAB*. Kharkov, Ukraine: Publishing house of NTU "KhPI"; 2006. 612 p. (In Russ.)
10. Tsvetkov E.I., Suloeva E.S. Analysis of the parameters that determine the reliability of the results of a verification of measuring instruments. *Measurement Techniques*. 2018;61(9):872–877. DOI: 10.1007/s11018-018-1517-z.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Романцова Наталия Владимировна**, к.т.н. доцент, кафедра Информационно-измерительных систем и технологий, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. Ульянова (Ленина) Санкт-Петербург, Российская Федерация.
*e-mail:* *nvromantsova@mail.ru*
ORCID: 0000-0001-7764-0338

**Natalia V. Romantsova,** Phd in Engineering, Associate Professor, Department «Information measuring system and technologies», Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russian Federation

**Сулоева Елена Сергеевна** к.т.н. доцент, кафедра Информационно-измерительных систем и технологий, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. Ульянова (Ленина) Санкт-Петербург, Российская Федерация.
*e-mail:* *suloewa@list.ru*
ORCID: 0000-0002-1293-4383

**Elena S. Suloeva**, Phd in Engineering, Associate Professor, Department «Information measuring system and technologies», Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russian Federation

*Статья поступила в редакцию 20.10.2021; одобрена после рецензирования 02.12.2021; принята к публикации 04.12.2021.*

*The article was submitted 20.10.2021; approved after reviewing 02.12.2021; accepted for publication 04.12.2021.*