

УДК 006.91.001+ 681.518

DOI: [10.26102/2310-6018/2022.39.4.013](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.39.4.013)

Модель измерительного блока, учитывающая влияние внешних факторов на изменение полной погрешности измерительного тракта

Н.В. Романцова✉, Е.С. Сулоева

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

Резюме. Для метрологического синтеза актуальной задачей является разработка математического и алгоритмического обеспечения, которое позволит создавать модели измерительных трактов и автоматизировать расчет полной погрешности, что ускорит процесс разработки средств измерения. В статье предлагается модель измерительного блока, которая учитывает изменение характеристики преобразования вследствие влияния параметров внешней среды, вид функциональной зависимости характеристики преобразования от влияющего аргумента, количество влияющих параметров и характер влияния. Каждый измерительный блок необходимо описывать данной моделью, при этом измерительный тракт состоит из последовательно включенных блоков. Математическая модель основана на методе нелинейного преобразования, обратной функции распределения, а также на способах описаний сигналов, теории математической статистики и теории вероятностей. На основе аналитических расчетов авторы провели метрологический анализ и сравнили параметры случайной величины на выходе измерительного тракта при учете влияния внешних факторов на характеристики преобразования измерительных блоков с результатами, полученными без учета влияния внешних факторов. Приведенные примеры расчетов подтверждают необходимость минимизации полной погрешности измерительного тракта в целом, а не отдельно для каждого измерительного блока.

Ключевые слова: измерительный тракт, характеристика преобразования, погрешность результата измерения, метрологический синтез, метрологический анализ, модель измерительного блока.

Для цитирования: 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;10(4). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1248> DOI: 10.26102/2310-6018/2022.39.4.013

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

N.V. Romantsova✉, E.S. Suloeva

*Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI",
Saint-Petersburg, Russian Federation
nvromantsova@mail.ru✉*

Abstract. A necessary task for metrological synthesis is to develop mathematical and algorithmic software that will allow creating models of measuring channels and automating the calculation of the total error, which will accelerate the process of developing measuring devices. The article proposes a model of a measuring unit that takes into account the change in the transformation characteristic due to

the influence of environmental parameters, the type of functional dependence of the transformation characteristic on the influencing argument, the number of influencing parameters and the pattern of the influence. It is important to describe each measuring unit according to this model; concurrently, the measuring channel consists of sequentially connected units. The mathematical model is based on the method of nonlinear transformation, the inverse of the distribution function, as well as on the methods of describing signals, the theory of mathematical statistics and the theory of probability. Following on from the analytical calculations, the authors conducted a metrological analysis and compared the parameters of a random value at the output of the measuring channel accounting for the influence of external factors on the characteristics of the measuring unit conversion with the results obtained without regard for the influence of external factors. Examples of calculations confirm the need to minimize the total error of the measuring channel as a whole and not separately for each measuring unit.

Keywords: measurement channel, conversion characteristic, measurement result error, metrological synthesis, metrological analysis, measuring unit model.

For citation: 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;10(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1248> DOI: 10.26102/2310-6018/2022.39.4.013 (In Russ.).

Введение

В настоящее время существует большое количество метрологически значимого программного обеспечения [1], то есть сред моделирования, в которых можно создавать программные узкоспециализированные модули, предназначенные для решения задач метрологии, поэтому актуально разрабатывать математическое и алгоритмическое обеспечение для метрологического синтеза и метрологического анализа. Главной задачей метрологического синтеза является построение измерительного тракта с известной величиной погрешности измерения. Каждый блок измерительного тракта имеет свою характеристику преобразования, которая подвержена влиянию внешних факторов, что приводит к возникновению дополнительной погрешности результата измерения на выходе тракта. Если априорные знания позволяют установить зависимость характеристики преобразования от параметра, то существует возможность на основании плотности распределения случайной входной величины определить плотность распределения вероятности на выходе измерительного блока. Цель данной работы заключается в создании модели измерительного блока, которая учитывает изменение характеристики преобразования вследствие влияния параметров внешней среды. Для этого необходимо решить задачи: рассмотреть связь входной и выходной величин измерительного блока; формализовано описать влияние параметров внешней среды на характеристику преобразования измерительного блока; формализовано описать влияние параметров внешней среды на выходную величину измерительного тракта, состоящего из последовательного включения измерительных блоков [2].

Материалы и методы

Измеряемая величина является случайной величиной (СВ) X_1 и имеет свой закон распределения, она подается на вход первого блока измерительного тракта. Выходная величина первого блока X_2 также является случайной величиной, форма плотности распределения выходной случайной величины зависит от формы плотности распределения входной случайной величины. В случае линейной характеристики преобразования блока форма закона распределения случайной величины будет сохраняться. Например, если плотность распределения вероятности входной случайной величины X_1 первого блока распределена по нормальному закону и характеристика

преобразования $X_2(X_1)$ является линейной функцией, то выходная случайная величина X_2 будет распределена по нормальному закону [3]. Характеристика преобразования блока может изменяться под влиянием внешних факторов.

Если СВ X_1 попадает в интервал $[x_{10}, x_{10} + \Delta x_1]$, СВ X_2 попадает в интервал $[x_{20}, x_{20} + \Delta x_2]$. Поэтому выполняется равенство $P\{x_{10} < X_1 < x_{10} + \Delta x_1\} = P\{x_{20} < X_2 < x_{20} + \Delta x_2\}$, откуда следует, что $\omega(X_1) \cdot |\Delta x_1| = \omega(X_2) \cdot |\Delta x_2|$ и при $\Delta x_1 \rightarrow 0, \Delta x_2 \rightarrow 0$ получаем соотношение $\omega(X_2) = \omega(X_1) \cdot \left| \frac{dX_1}{dX_2} \right|$ [4-7].

Если характеристика преобразования блока отлична от линейной, то форма закона распределения выходной случайной величины будет искажена. Пусть задана входная СВ X_1 с равномерным законом распределения $\omega(X_1) = 0.5$, при $X_1 \in [1; 3]$. Для получения выходной СВ X_2 с заданным законом распределения $\omega(X_2)$, которому соответствует некоторое нелинейное преобразование, например, $X_2 = X_1^2$, необходимо определить плотность распределения вероятности $\omega(X_2) = \omega(X_1) \cdot \left| \frac{dX_1}{dX_2} \right| = 0.5 \cdot \frac{1}{2X_1} = 0.5 \cdot \frac{1}{2\sqrt{X_2}} = \frac{0.25}{\sqrt{X_2}}$.

Характеристика преобразования измерительного блока может зависеть от параметра f . Изменение формы характеристики преобразования приводит к изменению плотности распределения промежуточного результата измерения в каждом блоке.

Иными словами, СВ X_2 зависит не только от X_1 , но и от параметра f , величина которого определяется внешними условиями и может носить как аддитивный $f=b$, так и мультипликативный характер $f=k$ [8]. В общем случае зависимость будет иметь вид $X_2 = kX_1 + b$.

В случае мультипликативного характера параметра f , зависимость $X_2(X_1)$ примет вид:

$$X_2(X_1) = (k \cdot X_1)^2, \quad (1)$$

рассмотренная ранее плотность распределения вероятности примет вид $\omega(X_2) = \omega(X_1) \cdot \left| \frac{dX_1}{dX_2} \right| = 0.5 \cdot \frac{1}{2k^2 \cdot X_1} = 0.5 \cdot \frac{1}{2k\sqrt{X_2}} = \frac{0.25}{k\sqrt{X_2}}$.

Для нормального закона распределения входной случайной величины плотность распределения выходной случайной величины для характеристики преобразования вида (1) вычисляется согласно выражению:

$$\omega(X_2) = \frac{\omega(X_1)}{\left| \frac{dX_2}{dX_1} \right|} = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi D[X_1]}} e^{-\frac{(\sqrt{X_2} - M[X_1])^2}{2D[X_1]}} \right] \cdot \frac{0.5}{k\sqrt{X_2}}, \quad (2)$$

где $M[X_1]$ – математическое ожидание входной случайной величины X_1 , $D[X_1]$ – дисперсия входной случайной величины X_1 .

Для приведенного вида зависимости $X_2(X_1)$ (1) рассматриваются варианты нормального (Рисунок 1а) и равномерного (Рисунок 1б) законов распределения входной случайной величины X_1 . При увеличении параметра k на 20% характеристика преобразования становится круче, плотность распределения выходной случайной величины X_2 смещается: математическое ожидание и дисперсия случайной величины увеличиваются. В свою очередь при уменьшении k на 20% характеристика преобразования имеет более пологий вид, случайная величина X_2 уменьшается по параметрам дисперсии и математическому ожиданию.

Кроме того, что форма плотности распределения выходной случайной величины X_2 не является идентичной по форме плотности распределения входной случайной величины X_1 , также формы плотностей распределения случайных величин X_2 отличаются для трех рассмотренных случаев параметров k ($k, k + 20\%, k - 20\%$).

Из выше изложенного можно сделать вывод, что для учета изменения параметра f , имеющего мультипликативный характер, для расчета законов распределения выходных случайных величин, необходимо опираться на общие математические выражения и не учитывать классификацию закона распределения входной случайной величины.

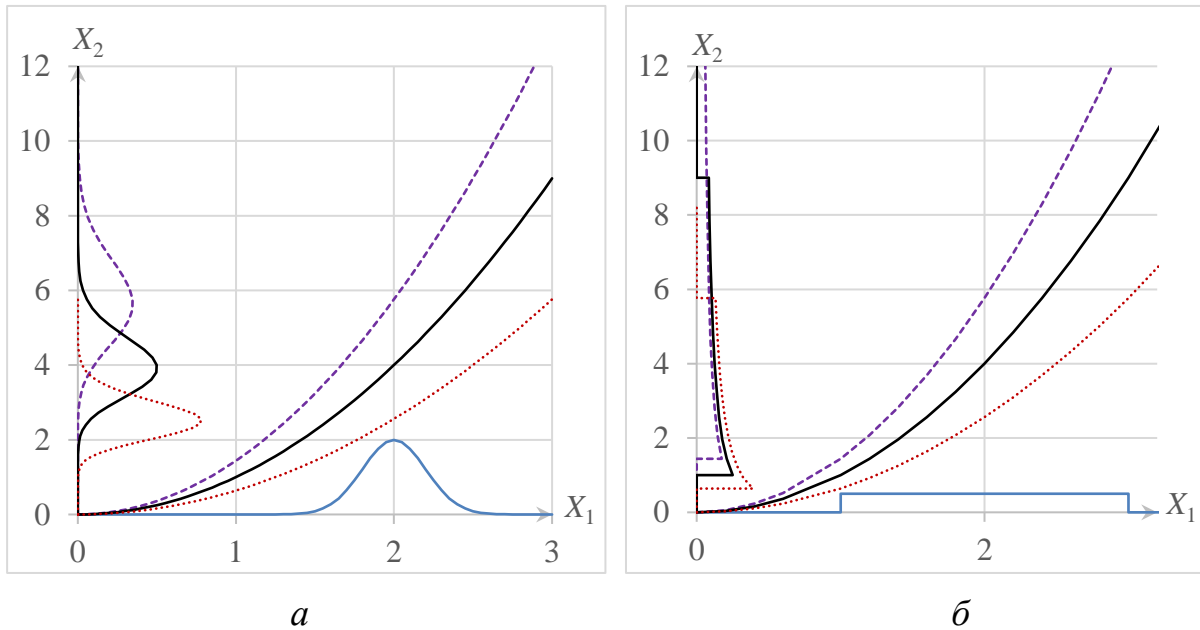


Рисунок 1 – Изменение плотности распределения выходной случайной величины при изменении мультипликативной составляющей характеристики преобразования на $\pm 20\%$
Figure 1 – Change in the distribution density of the output random value when the multiplicative component of the transformation characteristic changes by $\pm 20\%$

В случае аддитивного характера параметра $f=b$ зависимость $X_2(X_1)$ примет вид $X_2(X_1)=(X_1+b)^2$.

Рассмотренная ранее плотность распределения вероятности имеет вид:

$$\omega(X_2) = \frac{\omega(X_1)}{\left| \frac{dX_2}{dX_1} \right|} = \frac{\omega(X_1)}{2(X_1 + b)}$$

На Рисунке 2 изображено влияние изменения аддитивной составляющей характеристики преобразования на форму плотности распределения выходной случайной величины X_2 . Видно, что нарушается симметрия нормального закона распределения, а также изменяется разброс и математическое ожидание выходной случайной величины.

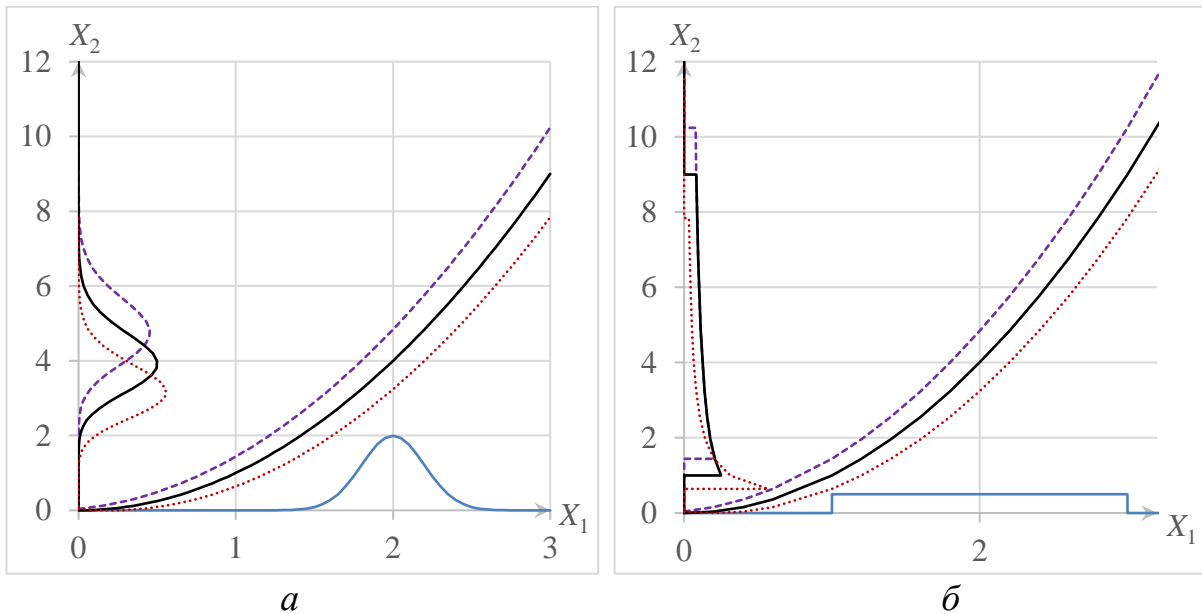


Рисунок 2 – Изменение плотности распределения выходной случайной величины при изменении аддитивной составляющей характеристики преобразования на $\pm 20\%$
Figure 2 – Change in the distribution density of the output random value when the additive component of the transformation characteristic changes by $\pm 20\%$

При сравнении аналитически полученных результатов (Рисунки 1-2) можно сделать вывод, что одинаковые численные значения мультипликативной и аддитивной составляющих характеристики преобразования в разной степени влияют на форму выходной случайной величины.

Результаты

Приведенные математические выкладки характерны для одного измерительного блока. Обобщая результаты расчетов для измерительного тракта, очевидно [9], что параметр f влияет неодинаково на характеристики преобразования каждого из блоков измерительного тракта. Выходная величина измерительного тракта $X_n(X_{n-1})$, зависит от случайной величины X_{n-1} , которая, в свою очередь, зависит от случайных величин $\{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_{n-2}\}$ (Рисунок 3).

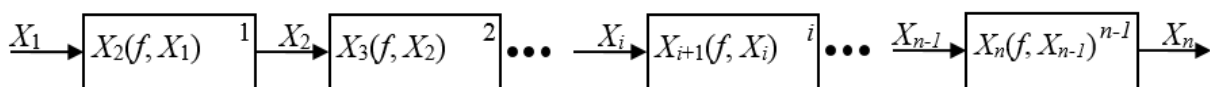


Рисунок 3 – Структурная схема измерительного тракта
Figure 3 – Block diagram of the measuring channel

Возможен случай компенсации влияния параметра f на суммарную характеристику преобразования измерительного тракта $X_n(X_1)$. Поэтому необходимо оптимизировать во время синтеза [10] измерительного тракта суммарную характеристику преобразования, а не минимизировать влияние параметра f на каждый измерительный блок. Изменения характеристик преобразования каждого блока необходимо учитывать во время моделирования измерительного тракта для определения суммарной погрешности. Применение средств моделирования существенно сократит временные затраты на синтез измерительного тракта. Таким образом необходимо разработать модель каждого измерительного блока (Рисунок 4) с учетом возможности

влияния на характеристику преобразования нескольких параметров f_m , общим числом от 1 до M . На Рисунке 4 $\{c_j\}_1^L$ коэффициенты функции, описывающей параметр f_m на L интервалах, границы которых определены как $[t_{r-1}, t_{r-1+1}]$. При этом функция, описывающая параметр f_m , представляет линейную комбинацию составляющих вида $\{u_j(t)\}_1^L$, где аргумент t представляет собой физическую величину, от которой зависит параметр f_m . {Характер влияния} – бинарная величина, определяющая мультипликативный или аддитивный характер влияния каждого параметра f_m .

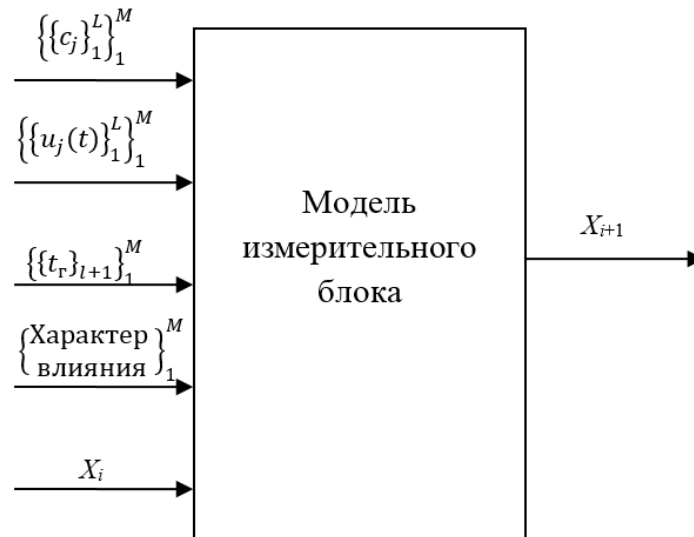


Рисунок 4 – Модель измерительного блока
Figure 4 – Model of the measuring unit

В качестве примера аргумента t может выступать температура, которая влияет на электрические параметры элементной базы, составляющей измерительный блок, в связи с чем меняется характеристика преобразования блока.

Рассмотрим первый пример: измерительный тракт состоит из трех измерительных блоков (Рисунок 5). Каждый блок имеет свою характеристику преобразования вида: $X_2=(b+X_1)^2$; $X_3=(k \times X_2)^3$; $X_{\text{вых}}=k \times X_3/10$, – измерительный тракт имеет характеристику преобразования $X_{\text{вых}}(X_1)$.

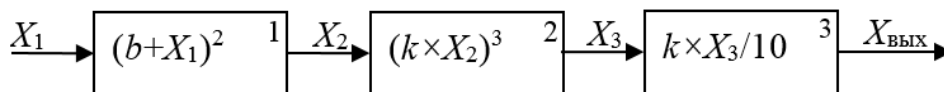


Рисунок 5 – Структурная схема измерительного тракта для первого примера
Figure 5 – Block diagram of the measuring channel for the first example

Плотность распределения вероятности $\omega(X_2)$ случайной величины X_2 определяется согласно выражению $\omega(X_2) = 0,5\omega(X_1)/(X_1 + b)$. На Рисунке 6 а по оси абсцисс отложена случайная величина X_1 , распределенная по нормальному закону с $M[X_1]=2$ и $D[X_1]=0,01$ (синяя линия). Также на графике (а) приведена характеристика преобразования $X_2=(b+X_1)^2$ с нулевым значением параметра b , т. е. при нормальных условиях эксплуатации измерительного блока 1 (зеленая линия), и при $b = 0,05$, что обусловлено изменением параметров измерительного блока под влиянием аргумента t (зеленая пунктирная линия). По оси ординат отложена случайная величина X_2 , черным

цветом изображена плотность распределения вероятности $\omega(X_2)$ при $b = 0$ (сплошная линия) и $b = 0,05$ (пунктирная линия). Плотность распределения вероятности $\omega(X_3)$ случайной величины X_3 определяется согласно выражению $\omega(X_3) = \omega(X_2) / |3k^3 X_2^2|$. На Рисунке 6 б по оси абсцисс отложена случайная величина X_1 (синяя линия). Также на графике (б) приведена характеристика преобразования $X_3(X_1)$ с нулевым значением параметра b для блока 1 и $k=1$ для блока 2, т. е. при отсутствии влияния аргумента t на электрические параметры блоков (розовая линия), и при $b = 0,05$ и $k=1,05$ (розовая пунктирная линия). По оси ординат отложена случайная величина X_3 , салатовым цветом изображена плотность распределения вероятности $\omega(X_3)$ при $b = 0, k = 1$ (сплошная линия) и при $b = 0,05, k = 1,05$ (пунктирная линия). Плотность распределения вероятности выходной случайной величины $X_{\text{вых}}$ определяется итеративно. Плотность распределения выходной величины определяется согласно выражению $\omega(X_{\text{вых}}) = 10\omega(X_3) / |k|$, значение $\omega(X_3)$ вычисляется на предыдущей итерации. На Рисунке 6 в по оси абсцисс отложена входная случайная величина X_1 измерительного тракта (синяя линия). Также на графике (в) приведена характеристика преобразования $X_{\text{вых}}(X_1)$ с нулевым значением параметра b для блока 1 и $k=1$ для блоков 2 и 3, т. е. при отсутствии влияния аргумента t на электрические параметры блоков (оранжевая линия), и при $b = 0,05$ для блока 1 и $k = 1,05$ для блоков 2 и 3 (оранжевая пунктирная линия). По оси ординат отложена выходная случайная величина $X_{\text{вых}}$, бордовым цветом изображена плотность распределения вероятности $\omega(X_{\text{вых}})$ при $b = 0, k = 1$ (сплошная линия) и при $b = 0,05, k=1,05$ (пунктирная линия).

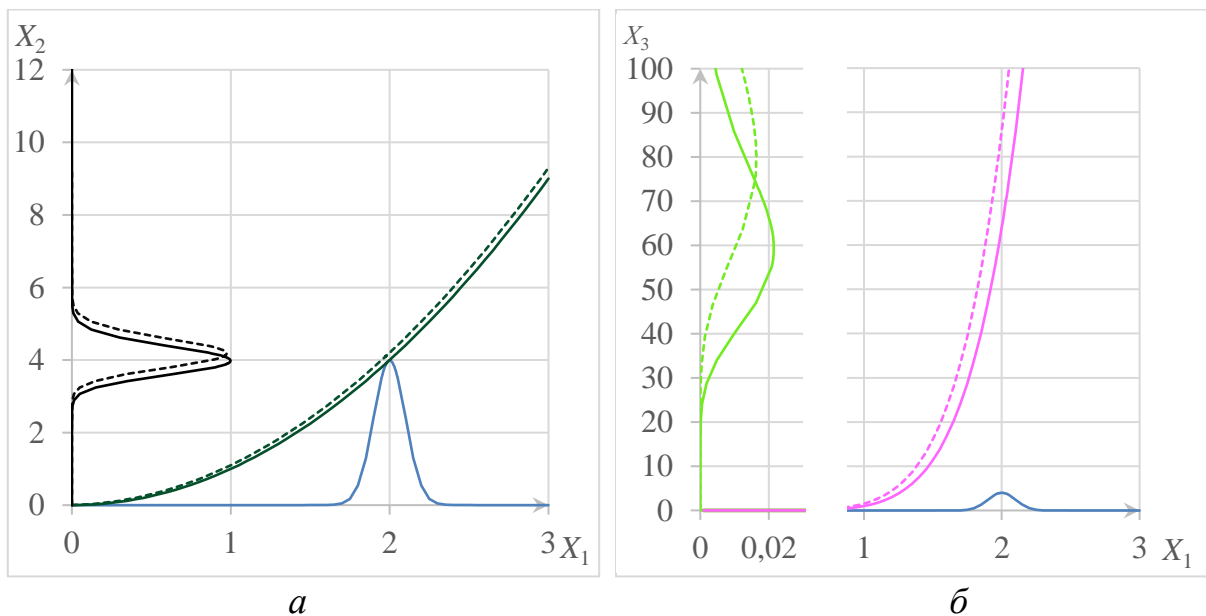


Рисунок 6 – Изменение плотности распределения выходной случайной величины при прохождении измерительного тракта

Figure 6 – Change in the distribution density of the output random value during the passage through the measuring channel

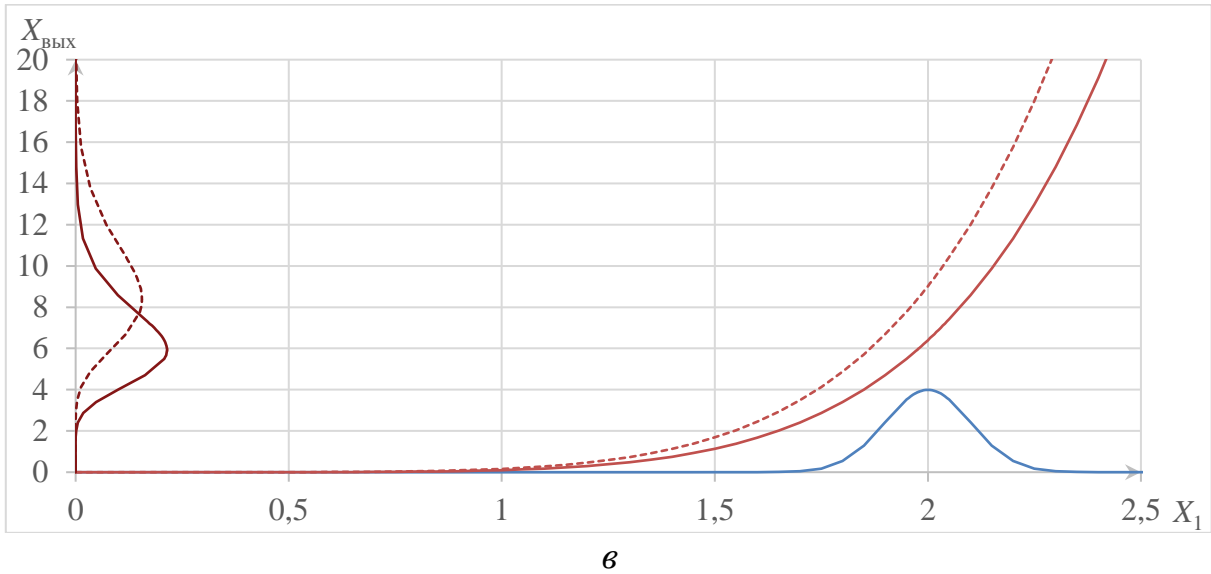


Рисунок 6 (продолжение)
Figure 6 (extended)

В качестве второго примера рассмотрим измерительный тракт, состоящий из двух измерительных блоков. Первый блок имеет характеристику преобразования вида: $X_2=(kX_1)^2$; второй блок: $X_{\text{вых}} = \sqrt{kX_2}$, – измерительный тракт имеет характеристику преобразования $X_{\text{вых}}(X_1)$. Данный пример отражает случай компенсации влияния аргумента t на суммарную характеристику преобразования измерительного тракта $X_{\text{вых}}(X_1)$ посредством двух разных параметров k , изменяющих характеристики преобразования первого и второго блоков. На вход измерительного тракта поступает случайная величина X_1 распределенная по нормальному закону с $M[X_1]=2$ и $D[X_1]=0,09$. Плотность распределения $\omega(X_2)$ определяется согласно выражению (2) при $k=1,05$; плотность распределения случайной величины $X_{\text{вых}}$ определяется по формуле $\omega(X_{\text{вых}}) = 2\omega(X_2)\sqrt{X_2}$ при $k=0,9$.

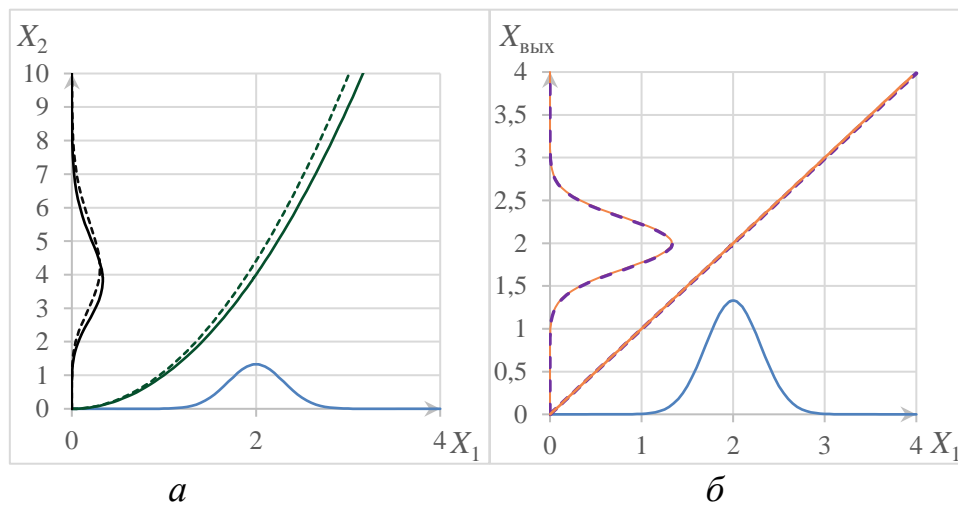


Рисунок 7 – Компенсация изменений плотности распределения выходной случайной величины при прохождении измерительного тракта
Figure 7 – Compensation of changes in the distribution density of the output random value during the passage through the measuring channel

Результаты аналитически рассчитанных плотностей распределения случайных величин на выходе измерительных блоков тракта представлены на Рисунке 7. На графике (а) по оси абсцисс отложена случайная величина X_1 (синяя линия), приведена характеристика преобразования $X_2(X_1)$ с $k = 1$, т. е. при отсутствии влияния аргумента t на электрические параметры блоков (зеленая линия), и при $k = 1,05$ (зеленая пунктирная линия). По оси ординат отложена случайная величина X_2 , черным цветом изображена плотность распределения вероятности $\omega(X_2)$ при $k = 1$ (сплошная линия) и при $k = 1,05$ (пунктирная линия). На графике (б) приведена плотность распределения выходной случайной величины $\omega(X_{\text{вых}})$, где по оси абсцисс отложена входная случайная величина X_1 измерительного тракта (синяя линия). Также на графике (б) приведена характеристика преобразования $X_{\text{вых}}(X_1)$, при отсутствии влияния аргумента t на электрические параметры блоков (оранжевая сплошная линия), и при $k=0,9$ для блока 2 (фиолетовая пунктирная линия). По оси ординат отложена выходная случайная величина $X_{\text{вых}}$, оранжевым цветом изображена плотность распределения вероятности $\omega(X_{\text{вых}})$ при $k = 1$ и при $k = 0,9$ (фиолетовая пунктирная линия).

Обсуждение

Из графиков Рисунка 6 можно сделать вывод, что незначительные изменения параметров каждого блока могут приводить к значительному изменению выходной случайной величины. В случае отсутствия влияния аргумента t случайная выходная величина имела следующие характеристики: $M[X_{\text{вых}}] = 6,63$ и $D[X_{\text{вых}}] = 3,97$, в то время как для рассмотренного примера учет влияния аргумента t привел к изменению математического ожидания $M[X_{\text{вых}}] = 9,33$ и дисперсии $D[X_{\text{вых}}] = 7,48$.

По графикам Рисунка 7 можно сделать вывод, что несмотря на изменения промежуточной случайной величины из-за влияния аргумента t (Рисунок 7 а), случайная величина на выходе измерительного тракта (Рисунок 7 б) оказывается инвариантна параметру t , что обусловлено формой характеристик преобразования каждого измерительного блока, а также видом функциональных зависимостей $\{u_j(t)\}_1^2$. В случае отсутствия влияния аргумента t случайная выходная величина имела следующие характеристики: $M[X_{\text{вых}}] = 2,00$ и $D[X_{\text{вых}}] = 0,090$, при учете влияния аргумента t математическое ожидание $M[X_{\text{вых}}] = 1,99$ и дисперсии $D[X_{\text{вых}}] = 0,089$.

Заключение

При метрологическом синтезе важно пользоваться средствами моделирования, которые должны учитывать изменения характеристик преобразования измерительных блоков из-за влияния некоторых параметров внешней среды. Для этой цели предлагается использовать модель измерительного блока (Рисунок 4), учитывающую функциональные зависимости параметров внешней среды на плотность распределения случайной выходной величины, которая обуславливает погрешность измерения. Корректность математической модели измерительного блока подтверждена приведенными примерами, которые были реализованы расчетным методом. Предлагаемая модель измерительного блока позволит проводить моделирование разрабатываемых измерительных трактов, что существенно ускорит метрологический синтез средств измерения. Планируется реализовать математическую модель измерительного блока в программных средах: SimInTech, SimuLink, LabVIEW.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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;4:6–9.
2. 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://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1068> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.017 (дата обращения: 26.10.2022).
3. Сулоева Е.С., Цветков Э.И. Процедуры принятия решения по результатам бинарных и групповых сличений. *Приборы*. 2014;11(173):33–38.
4. Васильев К.К., Служивый М.Н. *Математическое моделирование систем связи: Учеб. пособие*. Ульяновск: Изд-во УЛГТУ; 2008. 170 с.
5. Вентцель Е.С. *Теория вероятностей. Учебник для высших технических учебных заведений*. М.: Издательство «Наука»: Главная редакция физико-математической литературы; 1969. 576 с.
6. Быков В.В. *Цифровое моделирование в статистической радиотехнике*. М.: Советское радио; 1971. 328 с.
7. Гнеденко Б.В. *Курс теории вероятностей*. 12-е изд., перераб. и доп. М.: Едиториал URSS; 2019. 456 с.
8. Новицкий П.В., Зограф И.А. *Оценка погрешностей результатов измерений*. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат; 1991. 303 с.
9. 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.
10. Цветков Э.И. *Метрология. Модели. Метрологический анализ. Метрологический синтез*. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; 2014. 293 с.

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;4:6–9. (In Russ.).
2. Romantsova N.V., Suloeva E.S. Mathematical and software for determining the error in the modeling of the measuring instrument. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1068> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.017 (In Russ) (accessed on 26.10.2022).
3. Suloeva E.S., Tsvetkov E.I. Decision making procedures based on results of binary and group comparisons. *Pribory = Instruments*. 2014;11(173):33–38. (In Russ.).
4. Vasiliev K.K., Serviceman M.N. Alekseev V.V., Dolidze R.V., Nedosekin D.D., Chernyavsky E.A. *Mathematical modeling of communication systems: Textbook for universities*. Ulyanovsk, Publishing house of UISTU; 2008. 170 p. (In Russ.).
5. Wentzel E.S. *Probability theory. Textbook for higher technical educational institutions*. Moscow, Nauka Publishing House: The main editorial office of physical and mathematical literature; 1969. 576 p. (In Russ.).
6. Bykov V.V. *Digital modeling in statistical radio engineering*. Moscow, Sovetskoe radio; 1971. 328 p. (In Russ.).
7. Gnedenko B.V. *Course of probability theory*. 12nd ed., reprint. and add. Moscow, Editorial URSS; 2019. 456 p. (In Russ.).

8. Novitsky P.V., Zograf I.A. *Estimation of measurement results errors*. 2nd ed., reprint. and add. Leningrad, Energoatomizdat; 1991. 303 p. (In Russ.).
9. 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.
10. Tsvetkov E.I. *Metrology. Models. Metrological analysis. Metrological synthesis*. Saint-Petersburgh, Publishing House of SPbSETU "LETI"; 2014. 293 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Романцова Наталия Владимировна, кандидат технических наук, кафедра Информационно-измерительных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: nyromantsova@mail.ru
ORCID: [0000-0001-7764-0338](https://orcid.org/0000-0001-7764-0338)

Сулоева Елена Сергеевна кандидат технических наук, доцент, кафедра Информационно-измерительных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Российская Федерация.

e-mail: suloewa@list.ru
ORCID: [0000-0002-1293-4383](https://orcid.org/0000-0002-1293-4383)

Natalia V. Romantsova, Candidate of Technical Sciences, Information Measuring System and Technologies Department, Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russian Federation.

Elena S. Suloeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Information Measuring System and Technologies Department, Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 21.10.2022; одобрена после рецензирования 28.11.2022; принята к публикации 18.12.2022.

The article was submitted 21.10.2022; approved after reviewing 28.11.2022; accepted for publication 18.12.2022.