

дисперсии корректируются с учётом значения x_0 , то есть $\sigma_y = \sigma_y(x + x_0)$; $\sigma_z = \sigma_z(x + x_0)$. Как правило, для относительно неболь-

ших значений высот подъёма факела ($H < 100 \div 200$ м) $f(A) = 1$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воробьев Е.И., Прусаков В.М., Душутин К.К.** Охрана атмосферы и нефтехимия. Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 231 с.

2. **Замышляев Б.В.** Влияние начальных размеров выброса (истечения) невесомой примеси на оценку концентрационных полей, возникающих при распространении облака гауссова типа // Проблемы безопасности и ЧС. 2004. №4. С. 35-42.

мой примеси на оценку концентрационных полей, возникающих при распространении облака гауссова типа // Проблемы безопасности и ЧС. 2004. №4. С. 35-42.

УДК 006.91

*к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: candell@mail.ru*

Пильцов Михаил Владимирович,

*к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника» ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: mpilcov@yandex.ru*

Борисов Артем Дмитриевич,

*обучающийся группы ЭНм-22-1 ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: borartdm1t@yandex.com*

ПРИМЕР ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Voronova T.S., Piltsov M.V., Borisov A.D.

EXAMPLE OF ESTIMATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY

Аннотация. Согласно действующей на сегодняшний день нормативной документации показан алгоритм расчета неопределенности при косвенных измерениях. Приводится пример расчета расширенной неопределенности при косвенных измерениях.

Ключевые слова: точность результатов измерений, концепция неопределенности измерений, неопределенность, стандартная неопределенность, оценивание неопределенности типа A, оценивание неопределенности типа B, суммарная стандартная неопределенность, расширенная неопределенность.

Abstract. According to the current regulatory documentation, an algorithm for calculating uncertainty in indirect measurements is shown. An example of the calculation of the extended uncertainty in indirect measurements is given.

Keywords: accuracy of measurement results, concept of measurement uncertainty, uncertainty, standard uncertainty, type A uncertainty estimation, type B uncertainty estimation, total standard uncertainty, expanded uncertainty.

В последние десятилетия международные требования к оценке точности измерений регламентируют необходимость представлять результаты измерений с точки зрения концепции неопределенности измерений. Классический подход к представлению результатов измерений приведен в [1-5]. Несмотря на достаточно обширную отечественную нормативную базу в области концепции неопределенности, обзор которой был пред-

ставлен в [6], применение этой концепции вызывает затруднения у рядового пользователя. Действительно, освоение, например, одного из основополагающих документов [7], требует, помимо владения метрологической терминологией, также и довольно глубокого знания элементов теории вероятностей и математической статистики. Однако в этом документе даются четкие указания по проведению процедуры оценки неопреде-

ленности в различных ситуациях, подкрепленные примерами ее применения.

В работе [6] был представлен пример оценки неопределенности измерений в случае прямого измерения. Такие измерения часто встречаются, например, при измерении концентрации какого-либо вещества с применением соответствующих приборов. Однако в исследовательской практике зачастую возникает необходимость проведения косвенных измерений. Процедура оценки неопределенности измерений для этого случая также описана в [7].

Алгоритм оценивания неопределенности измерений при косвенных измерениях включает в себя следующие этапы.

1. Составление модельного уравнения, которое выражает зависимость между выходной величиной Y и входными величинами x_1, x_2, \dots, x_m в виде:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_m).$$

2. Оценивание входных величин, за которые принимают среднее арифметическое результата n наблюдений над каждой входной величиной.

3. Вычисление оценки результата измерения, которую получают при подстановке в модельное уравнение оценок входных величин по пункту 2.

4. Вычисление стандартных неопределенностей входных величин:

- стандартной неопределенности по типу А (статистическим способом);
- стандартная неопределенность по типу В (нестатистическим способом).

5. Вычисление вкладов стандартных неопределенностей входных величин, которые получают с учетом коэффициентов чувствительности. Последние получают нахождением частных производных по соответствующей входной величине.

6. Определение суммарной стандартной неопределенности, которую получают геометрическим суммированием всех вкладов.

7. Вычисление расширенной неопределенности с учетом коэффициента охвата. Последний определяется по заданному уровню доверия и числу степеней свободы.

8. Запись результата в виде суммарной стандартной неопределенности или расширенной неопределенности.

Рассмотрим метод оценки неопределенности косвенного измерения на примере

определения мощности электрического тока P , выделяемой на резисторе. Пусть в электронной схеме имеется резистор с номинальным сопротивлением $R = 1 \text{ кОм} = 1000 \text{ Ом}$ и, согласно документации на резистор, допустимое отклонение от номинала составляет $\pm 0,1 \%$.

Измерения тока через резистор проводились миллиамперметром, имеющим с диапазоном измерений $0 - 100 \text{ мА}$, по документации его класс точности 1,0.

При трехкратном ($n=3$) измерении силы тока, производимом при нормальных условиях применения миллиамперметра, получены следующие результаты: $I_1=9,8 \text{ мА}=9,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}$; $I_2=10,0 \text{ мА}=10,0 \cdot 10^{-3} \text{ А}$; $I_3=10,2 \text{ мА}=10,2 \cdot 10^{-3} \text{ А}$.

Произведем оценку неопределенности измерений в соответствии с алгоритмом, представленным выше.

1. Модельное уравнение имеет вид:

$$P = I^2 R. \quad (1)$$

2. Входных величины имеется две: R и I . За значение R принимаем его номинальное значение, а значение тока получаем путем оценивания:

$$\bar{I} = \frac{(9,8 + 10,0 + 10,2) \cdot 10^{-3}}{3} = 10,0 \cdot 10^{-3} \text{ А}. \quad (2)$$

3. Оценка результата измерений в соответствии с (1) и (2) имеет вид:

$$P = \bar{I}^2 R = (10,0 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1000 = 0,10 \text{ Вт}. \quad (3)$$

4. Произведем оценки стандартных неопределенностей входных величин.

а) Стандартная неопределенность типа А оценки измерения тока $u_A(I)$:

$$u_A(I) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n(n-1)}} = 1,15 \cdot 10^{-4} \text{ А}. \quad (4)$$

б) Стандартная неопределенность типа В оценки сопротивления рассчитывается при учете, что допустимое отклонение от номинала резистора $\delta = \pm 0,1 \%$. Отсюда граница неисключенной систематической погрешности (НСП) сопротивления резистора Θ_R составляет:

$$\Theta_R = \frac{\delta \cdot R}{100} = \frac{0,1 \cdot 1000}{100} = 1 \text{ Ом}.$$

Стандартная неопределенность типа В при наличии границ НСП определяется по общей формуле $u_B(x) = \Theta_x / \sqrt{3}$. Поскольку закон распределения погрешностей неизвестен, принимаем его равновероятным, тогда

$a = \sqrt{3}$. Отсюда стандартная неопределенность типа В оценки сопротивления равна:

$$u_B(R) = \frac{\Theta_R}{\sqrt{3}} = 0,578 \text{ Ом.} \quad (5)$$

в) Стандартную неопределенность типа В оценки силы тока определяем из условия, что в соответствии с его классом точности его относительная погрешность $\delta = \pm 1,0\%$. Тогда стандартная неопределенность оценки силы тока составляет:

$$u_B(I) = \delta \cdot \frac{x_{изм}}{\sqrt{3} \cdot 100} = \delta \cdot \frac{\bar{I}}{\sqrt{3} \cdot 100} = \dots \\ = 1,0 \cdot \frac{10,0 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3} \cdot 100} = 5,78 \cdot 10^{-5} \text{ А.} \quad (6)$$

5. Для вычисления вкладов стандартных неопределенностей входных величин определим коэффициенты чувствительности c_i .

Коэффициент чувствительности мощности к изменению сопротивления:

$$c_R = \left. \frac{\partial(I^2 R)}{\partial R} \right|_{I=const} = I^2 \Big|_{\bar{I}=10,0 \text{ мА}} = 10^{-4} \text{ А.} \quad (7)$$

Коэффициент чувствительности мощности к изменению тока:

$$c_I = \left. \frac{\partial(I^2 R)}{\partial I} \right|_{R=const} = \dots \\ = 2I \cdot R \Big|_{\bar{I}=10,0 \text{ мА}, R=1000 \text{ Ом}} = 20 \text{ А} \cdot \text{Ом.} \quad (8)$$

Вклад неопределенности каждой входной величины в суммарную стандартную неопределенность определяется по общей формуле $u_i(y) = c_i \cdot u_i(x_i)$. Отсюда вклады неопределенностей входных величин в неопределенность измерения мощности равны:

- вклад от неопределенностей (по типу А) определения силы тока с учетом формул (4) и (8):

$$u_{A,I}(P) = c_I \cdot u_A(I) = \dots \\ = 20 \cdot 1,15 \cdot 10^{-4} = 2,30 \cdot 10^{-3} \text{ Вт;} \quad (9)$$

- вклад от неопределенности (по типу В) определения тока с учетом формул (8) и (6):

$$u_{B,I}(P) = c_I \cdot u_B(I) = \dots \\ = 20 \cdot 5,78 \cdot 10^{-5} \approx 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ Вт;} \quad (10)$$

- вклад от неопределенностей (по типу В) определения сопротивления с учетом формул (7) и (5):

$$u_{B,R}(P) = c_R \cdot u_B(R) = \dots$$

$$= 10^{-4} \cdot 0,578 = 5,78 \cdot 10^{-5} \text{ Вт.} \quad (11)$$

6. При определении суммарной стандартной неопределенности заметим, что вклад неопределенности от изменения сопротивления резистора на два порядка меньше обоих вкладов (и по типу А, и по типу В) от измерения тока, поэтому вкладом $u_{B,R}(P)$ можно пренебречь.

Суммарная стандартная неопределенность измерения мощности равна:

$$u_c(P) = \sqrt{u_{A,I}^2(P) + u_{B,I}^2(P)} = \dots \\ = \sqrt{(2,30 \cdot 10^{-3})^2 + (1,16 \cdot 10^{-3})^2} = \dots \\ = \sqrt{5,29 \cdot 10^{-6} + 1,3456 \cdot 10^{-6}} \approx 2,58 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

7. Для вычисления расширенной неопределенности определим коэффициент охвата $k = t_p(v_{eff})$ по распределению Стьюдента при уровне доверия $p=0,95$ и числе степеней свободы v_{eff} :

$$v_{eff} = (n-1) \cdot \left[\frac{u_c^2(P)}{u_{A,I}^2(P)} \right]^2 = \dots \\ v_{eff} = (3-1) \cdot \left[\frac{(2,58 \cdot 10^{-3})^2}{(2,30 \cdot 10^{-3})^2} \right]^2 \approx 3.$$

По таблице распределения Стьюдента при $p=0,95$ (уровень значимости $\alpha=1-p=1-0,95=0,05$) и числе степеней свободы $v_{eff}=3$ значение коэффициента охвата $k=t_{0,95}(3)=3,18$.

Расширенная неопределенность равна:

$$U(P) = k \cdot u_c(P) = \dots \\ = 3,18 \cdot 2,58 \cdot 10^{-3} \approx 8 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

8. Запись результата: $P = (0,100 \pm 0,008) \text{ Вт, } p=0,95$.

Настоящий расчет произведен для наиболее простого случая, когда входные величины (R и I) некоррелированы и измерения тока миллиамперметром проводились в нормальных условиях его применения (т.е. учитывалась только его основная относительная погрешность). Простота выбранных измерительных условий вызвана тем, что основной задачей, которую ставили перед собой авторы, является демонстрация процедуры оценки неопределенности при косвенных измерениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов, В.И. Метрологическое обеспечение технических систем: учебное пособие / В. И. Кириллов. – Минск: Новое знание, 2017. – 424 с.
2. Мочалов, В.Д. Метрология, стандартизация и сертификация. Взаимозаменяемость и технические измерения: учебное пособие / В. Д. Мочалов, А. А. Погонин, А. Г. Схиртладзе. – 3-е изд., переработанное и дополненное. – Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2017. – 263 с.
3. Сергеев, А.Г. Метрология: учебник и практикум для СПО: для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования / А. Г. Сергеев, В. В. Терегеря. – 2-е изд., переработанное и дополненное. – Москва: Юрайт, 2017. – 421 с.
4. Хромой, Б.П. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для студентов и аспирантов, / Б. П. Хромой. – Москва: Горячая линия — Телеком, 2018. – 432 с.
5. Шишмарёв, В. Ю. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник / В. Ю. Шишмарёв. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2019. – 429 с.
6. Воронова, Т. С. Неопределенность измерений при определении их точности / Т. С. Воронова, М. В. Пильцов, В. А. Кулыгин // Сб. науч. трудов АнГТУ. – 2023. – №20. – с. 12-15.
7. ГОСТ 34100.3-2017 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 104 с.

УДК 519.876.2

Колмогоров Алексей Геннадьевич,
к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: alexey-kol@narod.ru

Зудилкина Анастасия Георгиевна,
студент кафедры «Автоматизация технологических процессов»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»

СИНТЕЗ ТРЕНАЖЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Kolmogorov A.G., Zudilkina A.G.

SYNTHESIS OF SIMULATOR MODELS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

Аннотация. Предложен алгоритм синтеза математических моделей для компьютерных тренажеров, предназначенных для обучения оперативного персонала технологических установок. Алгоритм построен с учетом специфики реальных производственных объектов и охватывает весь технологический цикл разработки тренажеров.

Ключевые слова: компьютерный тренажер, обучение персонала, тренажерная модель, технологический процесс, алгоритм синтеза

Abstract. The algorithm of synthesis of mathematical models for computer simulators intended for training of operational personnel of technological installations is proposed. The algorithm is built taking into account the specifics of real production facilities and covers the entire technological cycle of simulator development.

Keywords: computer simulator, personnel training, simulator model, technological process, synthesis algorithm.

Основная роль при комплексной автоматизации производств отводится автоматизированным системам управления технологическими процессами (АСУТП), являющимися базовым уровнем в иерархической структуре АСУ. Несмотря на постоянное развитие технического обеспечения, одним из «слабых» мест в структуре АСУТП был и остается оперативный персонал, являющийся

неотъемлемой ее частью. Оператор часто допускает ошибки, применяя алгоритм, приемлемый при наличии условий, отсутствующих в данный момент. Причины ошибок разнообразны, но в большинстве случаев они являются следствием низкой квалификации оперативного персонала, вызванной отсутствием практического опыта управления установкой, недостатками системы обучения (чаще