

УДК 621.317

*Титова Е.В., Тришкин В.Я., Кравец В.И., Лосихин Д.А., Гнатко Д.А.***ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА****ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр**

В данной работе рассмотрена проблема определения качества результата измерения расхода вещества. Целью любого измерения является определение значения измеряемой величины, однако для принятия решения по результатам измерения на основании только значения недостаточно, необходима оценка качества измерения. Качество измерений характеризуется такими показателями, как точность, правильность и достоверность. Эти показатели должны определяться по оценкам, к которым предъявляются требования состоятельности, несмещенности и эффективности. Одним из основных показателей качеств измерений является точность, в качестве количественной характеристики которой традиционно используется погрешность, в частности, часто применяют квазистатистический подход, согласно которому находят доверительный интервал суммарной погрешности. Однако современная теория несколько иначе подходит к оценке качества результата выполненного измерения. Прежде всего, обращается внимание на то, что экспериментатору известен результат измерения и неизвестно истинное значение, а потому для оценки качества результата невозможно пользоваться погрешностью, как степень его отклонения от неизвестного истинного значения измеряемой величины. Поэтому в таком случае необходимо использовать другую количественную характеристику качества измерения. В этом подходе с одной стороны не используется понятие истинного значения величины, поскольку оно неизвестно, и, с другой стороны, реализовано унифицированный подход к количественной оценке качества результата независимо от происхождения и способа воздействия различных факторов на результат измерения. В общем, неопределенность результата измерения количественно отражает недостаток знаний о различных аспектах измерения конкретной величины. Исследование особенностей применения концепции неопределенности для оценки точности результата измерений в расходомерии в частности электромагнитных расходомеров практически не рассмотрены. Таким образом, актуальной задачей является разработка методологии применения концепции неопределенности в области измерения расхода. В данной работе разработан алгоритм оценки неопределенности в области измерения расхода и представлен бюджет неопределенности. Произведена оценка неопределенности измерения расхода электромагнитным расходомером, встроенным в дозатор жидких сред. Измерительная система расходомеров состоит из проточной камеры, пары катушек, создающих в этой камере магнитное поле, и пары сенсорных электродов, встроенных в стенки камеры. Движущимся в магнитном поле проводником служит электропроводящая рабочая жидкость. Оцениваемые величины, которые влияют на результат измерения, являются некоррелированными так как, все они определяются с помощью разных приборов, и методов и не связаны одна с другой. Для каждой входной величины рассчитана стандартная неопределенность $U(X_i)$ и вклад в неопределенность $U_1(y)$.

Ключевые слова: оценка неопределенности, измерение расхода, нормирование погрешности, бюджет неопределенности, алгоритм оценки неопределенности.

Постановка проблемы и анализ последних исследований и публикаций

Целью любого измерения является определение значения измеряемой величины, однако для принятия решения по результатам измерения на основании только значения недостаточно, необходима оценка качества измерения.

Под качеством измерений понимают совокупность свойств, обуславливающих получение результатов с требуемыми точностными характеристиками, в необходимом виде и в установленные сроки. Качество измерений характеризуется такими показателями, как точность, правильность и достоверность. Эти показатели должны определяться по оценкам, к которым предъявляются требования состоятельности, несмещенности и эффективности.

Истинное значение измеряемой величины отличается от среднего значения на величину систематической погрешности D_c , $x = \bar{x} - D_c$.

Если систематическая составляющая исключена, то $x = \bar{x}$. Однако из-за ограниченного числа наблюдений \bar{x} точно определить также невозможно. Можно лишь оценить это значение, указать границы интервала, в котором оно находится, с определенной вероятностью.

Оценку \bar{x} числовой характеристики закона распределений, изображаемую точкой на числовой оси, называют точечной оценкой.

Одним из основных показателей качества измерений является точность, в качестве количественной характеристики которой традиционно используется погрешность [1].

Характеристику суммарной погрешности обычно находят эвристическими методами. В частности, часто применяют квазистатистический подход, согласно которому находят доверительный интервал суммарной погрешности. При этом применяют несколько разные варианты, однако часто суммарный доверительный интервал находят по выражению:

$$\Delta_{\Sigma \text{ дов}} = K_{\Sigma} (P_{\text{ дов}}) S_{\Sigma},$$

где $S_{\Sigma} = \sqrt{S_c^2 + S_b^2}$ – суммарное стандартное отклонение погрешности; $K_{\Sigma}(P_{\text{ дов}})$ – коэффициент, зависящий от соотношения суммы границ систематической и случайной погрешностей при одной и той же доверительной вероятности к сумме их стандартных отклонений.

Если границы найдены при разных доверительных вероятностях, то необходимо их пересчитать. При одинаковом распределении систематической и случайной погрешностей, чаще

всего нормальном, этот коэффициент соответствует квантилю соответствующего распределения, в частности нормального:

$$K_{\Sigma}(P_{\text{ дов}}) = z_n(P_{\text{ дов}}).$$

Итак, конечной целью анализа погрешностей измерений как раз является оценка границ погрешностей, в которых они находятся с определенной вероятностью $P_{\text{ дов}}$. Считают, что результат измерения вместе с интервалом, который определяется этими границами погрешности с указанной вероятностью покрывает истинное значение измеряемой величины.

Современная теория несколько иначе подходит к оценке качества результата выполненного измерения [2]. Прежде всего, обращает внимание на то, что экспериментатору известный результат измерения и неизвестно истинное значение, а потому для оценки качества результата невозможно пользоваться погрешностью, как степенью его отклонения от неизвестного истинного значения измеряемой величины. Поэтому в таком случае необходимо использовать другую количественную характеристику качества измерения. Кроме того, в связи с тенденциями к глобализации во всех областях человеческой жизни, возникла проблема унифицированного оценивания и представления характеристик качества результата измерения, подобно как это было сделано в мировом масштабе, внедряя Международную Систему Единиц (СИ). Попытка такого подхода сделана путем внедрения нового метрологического термина неуверенность (неопределенность) результата измерения. Основные принципы внедрения и использования этого термина оформлены в «Руководстве по выражению неопределенности измерений» (далее Руководство). В этом подходе с одной стороны не используется понятие истинного значения величины, поскольку оно неизвестно, и, с другой стороны, реализовано унифицированный подход к количественной оценке качества результата независимо от происхождения и способа воздействия различных факторов на результат измерения [3].

Вместе с тем, большинство основ теории погрешностей, хотя об этом ясно и открыто в Руководстве не говорится, успешно используются в новом подходе, то есть для оценки неуверенности (неопределенности) результата.

Прежде всего, об определении термина. Неуверенность (неопределенность) результата измерения в Руководстве обозначили как пара-

метр, связанный (объединенный) с результатом измерения и характеризующий разброс значений, которые обоснованно можно приписать измеряемой величине. Здесь слово «неуверенность» («неопределенность») означает сомнительность и отсюда в метрологическом смысле «неуверенность» означает сомнения относительно значения результата измерения. В общем, неуверенность результата измерения количественно отражает недостаток знаний о различных аспектах измерения конкретной величины.

С точки зрения экспериментатора приведенное выше определение неуверенности (неопределенности) является выражением факта, что для полученного результата измерения данной измеряемой величины в общем существует не одно ее значение, а большее (возможно даже нескончаемое) их количество, которые рассеяны вокруг этого результата. И так, одному и тому же результату измерения могут соответствовать множество значений измеряемой величины, определенным образом можно сгруппировать вокруг него и параметры неуверенности количественно характеризует такое группирование.

Наиболее полно вопросы применения концепции неопределенности рассмотрены в области физико-химических измерений.

Исследование особенностей применения концепции неопределенности для оценки точности результата измерений в расходомерии, в частности электромагнитных расходомеров, практически не рассмотрены.

Таким образом, актуальной задачей является разработка методологии применения концепции неопределенности в области измерения расхода.

В настоящее время оценивание качества измерений производится в соответствии с концепцией неопределенности, нормативной базой которой является [4].

Формулировка целей статьи

Целью настоящего исследования является разработка алгоритма и оценивание неопределенности в области измерения расхода электромагнитными расходомерами.

Изложение основного материала исследования

В данной работе произведена оценка неопределенности измерения расхода электромагнитным расходомером, который лежит в основе дозатора при заданной дозе $Q=50$ л. Технические преимущества электромагнитного метода преобразования при создании приборов измерения расхода электропроводных жидкостей

общеизвестны [5]. Эти преимущества обусловили применение электромагнитных преобразователей в широком диапазоне скоростей течения жидкости (от 10^{-2} м/с до 10 м/с и более) в трубопроводах с диаметрами от 10^{-2} до 3,6 м для большого разнообразия жидкостей и пульп, электропроводность которых лежит в пределах от 10^{-3} см/м до 10 см/м.

Внедрение интеллектуальных электромагнитных преобразователей расхода, в которых высокие метрологические характеристики обеспечиваются благодаря управлению процессом измерения и цифровой обработке измерительной информации с помощью микропроцессорного устройства, позволило повысить точность электромагнитных расходомеров.

Электромагнитные преобразования такого типа используются в пищевой промышленности для дозирования небольших количеств (до 50 л) жидких ингредиентов, что предъявляет особые требования к представлению и оцениванию качества измерений.

В основе электромагнитных расходомеров лежит взаимодействие движущейся электропроводной жидкости с магнитным полем, подчиняющееся закону электромагнитной индукции. Измерительная система расходомеров состоит из проточной камеры, пары катушек, создающих в этой камере магнитное поле, и пары сенсорных электродов, встроенных в стенки камеры. Движущимся в магнитном поле проводником служит электропроводящая рабочая жидкость. Микропроцессорный блок расходомера формирует ток возбуждения в катушках и измеряет величину тока сенсорных электродов, вызванного наведенной в камере ЭДС. Общее уравнение преобразования электромагнитного расходомера согласно с [5] имеет вид:

$$Q = \frac{\pi d}{K4B} E_i, \quad (1)$$

где d – расстояние между электродами электромагнитного расходомера; K – коэффициент, зависящий от вида магнитного поля:

$$K = \sin 2\pi ft, \quad (2)$$

где B – магнитная индукция в зазоре между полюсами электромагнита; E_i – ЭДС электромагнитной индукции.

Для того, чтобы определить, какие величины влияют на результат измерения представим уравнение (1) в виде:

$$Q=f(d, K, B, E_i). \tag{3}$$

Значение расстояния между электродами d получаем путем усреднения результатов 10 независимых наблюдений d_1, d_2, \dots, d_{10} , полученных с помощью штангенциркуля. Для обработки результатов в этом случае применяем методы математической статистики, согласно которым оценка измеренного расстояния \bar{d} рассчитывается как среднее арифметическое полученных значений, а неопределенность измерения расстояния между электродами $U_A(\bar{d})$ оценивается по типу А:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i; \tag{4}$$

$$U_A(\bar{d}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}. \tag{5}$$

Стандартную неопределенность оценивают по типу В:

$$U_B(\bar{K}) = \frac{K}{\sqrt{3}}. \tag{6}$$

Значение магнитной индукции B в зазоре между полюсами электромагнита получены путем усреднения результатов 10 независимых наблюдений B_1, B_2, \dots, B_{10} , полученных с помощью измерителя магнитной индукции НИ-3637. Для обработки результатов в этом случае применяем методы математической статистики, согласно которым оценка измеренной индукции B рассчитывается как среднее арифметическое полученных значений, а неопределенность измерения магнитной индукции $U_A(\bar{B})$ оценивается по типу А:

$$\bar{B} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i; \tag{7}$$

$$U_A(\bar{B}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2}. \tag{8}$$

Определение ЭДС E_i осуществляется микроконтроллером, который в свою очередь управляет процессом дозирования. Было проведено 10 независимых наблюдений $E_{i1}, E_{i2}, \dots, E_{i10}$, при

которых значение E_i извлекалось из ОЗУ микроконтроллера. Для обработки результатов в этом случае применяем методы математической статистики, согласно которым оценка измеренной индукции B рассчитывается как среднее арифметическое полученных значений, а неопределенность измерения ЭДС E_i $U_A(\bar{E}_i)$ оценивается по типу А [6]:

$$\bar{E}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{i1}; \tag{9}$$

$$U_A(\bar{E}_i) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (E_{i1} - \bar{E}_i)^2}. \tag{10}$$

Оценку измеряемой величины Q получаем из уравнения (1), используя входные оценки $\bar{d}, \bar{K}, \bar{B}, \bar{E}_i$. Таким образом, входная оценка Q , которая является результатом измерения, выражается таким образом:

$$Q = \frac{\pi \bar{d}}{\bar{K} 4 \bar{B}} \bar{E}_i. \tag{11}$$

Оцениваемые величины являются некоррелированными так как, все они определяются с помощью разных приборов, и методов и не связаны одна с другой.

Для случая некоррелированных оценок d, K, E_i, B , суммарную стандартную неопределенность $U_c(Q)$ вычисляют по формуле

$$U_c(Q) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 U^2(x_i)}. \tag{12}$$

Вычислим расширенную неопределенность, для её вычисления необходимо выбрать коэффициента охвата k . В общем случае коэффициент охвата k выбирают в соответствии с формулой

$$k = t_p(v_{\text{eff}}). \tag{13}$$

Но во многих практических случаях при вычислении неопределенностей результатов измерений делают предположение о нормальности закона распределения возможных значений измеряемой величины и полагают: $k=2$ при $p \approx 0,95$ и $k=3$ при $p \approx 0,99$.

Расширенную неопределенность рассчитыв-

Бюджет неопределенности

Входная величина X_i	Оценка входной величины X_i	Стандартная неопределенность $U(X_i)$	Распределение вероятности входной величины	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределенность $U_i(y)$
d	25,0100 мм	0,1176 мм	Нормальный	0,960	0,1128960
K	0,1700	0,0980	Нормальный	-0,141	-0,0138180
B	0,2079 Т	0,0004 Т	Нормальный	1	0,0004000
Ei	0,1298 В	0,0061 В	Нормальный	-0,005	-0,0000305
Q	49,8600 л				0,0150000

вают в соответствии с формулой

$$U = t_p(v_{\text{eff}})U_c(\bar{Q}) \quad (14)$$

Окончательный результат измерения расхода электромагнитным расходомером можно записать в виде:

$$Q = Q \pm U, p; \quad (15)$$

$$Q = 49,86 \pm 0,03, p = 0,95.$$

Бюджет неопределенности измерения расхода электромагнитным расходомером, который составлен на основании расчетов, выполненных в данном исследовании, представлен в таблице.

Выводы

В данной работе разработан алгоритм оценки неопределенности в области измерения расхода электромагнитными расходомерами. Произведена оценка неопределенности в соответствии с разработанным алгоритмом и представлен бюджет неопределенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фридман А.Э. Основы метрологии. Современный курс. – СПб.: Професионал, 2008. – 284 с.
2. Guide to the Expression of Uncertainty in Analytical Measurement. ISO, Geneva, 1993. ISBN 92-67-10188-9.
3. РМГ 43-2001. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений»: рекомендации по межгосударственной стандартизации / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Минск.: Изд-во стандартов, 2002. – 26 с.
4. ГОСТ Р 54500.1-2011. Руководство ИСО/МЭК 98-1: 2009. Неопределенность измерения. Ч. 1: Введение в руководства по неопределенности измерения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 24 с.
5. Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов / 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 460 с.
6. Демидова Н.М., Поджаренко В.О. Застосування кон-

цепції невизначеності в області вимірювання витрат // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія – 2006): 36. наук. праць п'ятої наук.-техн. конференції (м. Харків, 10-12 жовтня 2006 р.) – Х.: ННЦ «Інститут метрології». – 2006. – Т.2. – С.199-203.

Поступила в редакцію 12.04.2018

ЗАСТОСУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ В ОБЛАСТІ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ

Титова О.В., Тришкін В.Я., Кравець В.І., Лосіхін Д.А., Гнатко О.М.

У даній роботі розглянута проблема визначення якості результату вимірювання витрати речовини. Метою будь-якого вимірювання є визначення значення вимірюваної величини, однак для ухвалення рішення за результатами вимірювання на підставі тільки значення недостатньо, необхідне оцінювання якості вимірювання. Якість вимірювань характеризується такими показниками, як точність, правильність і достовірність. Ці показники повинні визначатися за оцінками, до яких висуваються вимоги спроможності, незміщеності і ефективності. Одним з основних показників якості вимірювань є точність, як кількісна характеристика якої традиційно використовується похибка, зокрема, часто застосовують квазі-статистичний підхід, згідно з яким знаходять довірчий інтервал сумарної похибки. Однак сучасна теорія децю інакше підходить до оцінювання якості результату виконаного виміру. Перш за все, звертається увага на те, що експериментатору відомий результат вимірювання і невідомо справжнє значення, а тому для оцінювання якості результату неможливо користуватися похибкою, як ступенем його відхилення від невідомого істинного значення вимірюваної величини. Тому в такому випадку необхідно використовувати іншу кількісну характеристику якості вимірювання. У цьому підході з одного боку не використовується поняття істинного значення величини, оскільки воно невідомо, і, з іншого боку, реалізовано уніфікований підхід до кількісного оцінювання якості результату незалежно від походження і способу впливу різних чинників на результат вимірювання. Загалом, невизначеність результату вимірювання кількісно відображає брак знань про різні аспекти вимірювання конкретної величини. Дослідження особливостей застосування концепції невизначеності для оцінювання точності результату вимірювань в витратометрії, зокрема електромагнітних витратомірів, практично не розглянуті. Таким чином, актуальним завданням є розробка методології застосування концепції невизначеності в галузі вимірювання витрати. У даній роботі розроблений алгоритм оцінювання невизначеності в галузі вимірювання витрати та наданий бюджет невизначеності. Зроблено оцінювання невизначеності вимірювання витрати електромагнітним витратоміром, вбудованим в дозатор рідких середовищ. Вимірювальна система витратомірів

складається з проточної камери, пари катушок, що створюють в цій камері магнітне поле, і пари сенсорних електродів, вбудованих в стіни камери. Рухомим в магнітному полі провідником служить електропровідна робоча рідина. Оцінювані величини, які впливають на результат вимірювання, є некорельованими так як, всі вони визначаються за допомогою різних приладів, і методів і не пов'язані одна з одною. Для кожної вхідної величини розрахована стандартна невизначеність $U(X_i)$ і внесок у невизначеність $U_f(y)$.

Ключові слова: оцінювання невизначеності, вимірювання витрати, нормування похибки, бюджет невизначеності, алгоритм оцінювання невизначеності.

APPLICATION OF THE CONCEPT OF UNCERTAINTY IN THE FIELD OF FLOW MEASUREMENT

Titova E.V., Trishkin V.Y., Kravets V.I., Losikhin D.A., Gnatko E.N.

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

In this paper the problem of fluid flow measurement quality determination is studied. The purpose of any measurement is determination of the measured value, but an obtained value itself is not enough for making a decision based on the results of the measurement, such decision requires also an estimate of measurement quality. The measurement quality can be described with such properties as accuracy, correctness and fidelity. These properties must be determined by the estimates, to which requirements of competence, nonbias and efficiency are applied. One of the main measurement quality properties is accuracy. As its quantitative characteristic, numerical error is commonly used. In particular, the quasi-statistical approach, according to which confidence interval of total error is calculated, is often applied. However, modern theory approaches to estimation of the quality of measurement result in a slightly different way. First of all, it takes to account that the experimenter knows the result and doesn't know a true value, which means that for the result quality estimation it's impossible to use an error as an estimate of its deviation from the unknown true value of the measured characteristic. Thus, in this case, it is necessary to use another quantitative characteristic of measurement quality. In this approach, on the one hand, the concept of a true value isn't used as it is unknown, and on the other hand, the standardized approach to the quantitative estimation of the measurement quality is fulfilled regardless of the origin and way of impact of different factors on the measurement result. In general, uncertainty of the measurement result quantitatively reflects the lack of knowledge about different measurement aspects for specific value. The research of the features of applying uncertainty concept for measurement accuracy estimation in flow survey, for electromagnetic flowmeters in particular, is almost absent. Thus, it is a relevant goal to develop a methodology for application of uncertainty concept in the field of flow measurement. In this paper, an algorithm for estimation of uncertainty in the field of flow measurement is developed and the uncertainty budget is presented. An estimation of the flow measurement uncertainty is done for the electromagnetic flowmeter, embedded into the fluid media dispensing system. Measuring system of the flowmeters consists of flow camera, a couple of coils, which generate a magnetic field in this camera, and a couple of sensor electrodes, built into the camera walls. A moving conductor in this magnetic field is an electrically conductive operating fluid. Estimated values affecting the measurement result are uncorrelated as all of them can be determined with the different instruments and methods and they are not connected with each other. For every input value the standard uncertainty $U(X_i)$

and the uncertainty score $U_f(y)$ are calculated.

Keywords: uncertainty estimation, flow measurement, error normalizing, uncertainty budget, uncertainty estimation algorithm.

REFERENCES

1. Fridman A.E. *Osnovy metrologii* [Foundations of metrology]. Sovremennyy kurs. Professional, SPb., 2008. 284 p. (in Russian).
2. *Guide to the Expression of Uncertainty in Analytical Measurement*. ISO, Geneva, 1993. ISBN 92-67-10188-9.
3. RMG 43-2001. *Primeneniye «Rukovodstva po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniy»: rekomendatsii po mezhgosudarstvennoy standartizatsii* [Application of the «Guide to the expression of measurement uncertainty»: recommendations on interstate standardization]. Mezhhgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii. Publishing of Standards, Minsk, 2002. 26 p. (in Russian).
4. GOST R 54500.1-2011. *Rukovodstvo ISO/MEK 98-1: 2009. Neopredelennost izmereniya. CH. 1: Vvedeniye v rukovodstva po neopredelennosti izmereniya* [ISO / IEC Guide 98-1: 2009. Uncertainty of measurement. Part 1: Introduction to the guidance on measurement uncertainty]. Standardinform, Moskva, 2012. 24 p. (in Russian).
5. Ivanova G.M., Kuznetsov N.D., Chistyakov V.S. *Teplotekhnicheskiye izmereniya i pribory* [Thermotechnical measurements and instruments]. Uchebnik dlya vuzov / 2-ye izd., pererab. i dop. izdatelstvo MEI, Moskva, 2005. 460 p. (in Russian).
6. Demidova N.M., Pojarenko V.O. Zastosuvannya kontseptsiyi nevyznachenosti v oblasti vymiryuvannya vytrat [Application of the concept of uncertainty in the field of measuring costs]. *Metrolohiya ta vymiryuvalna tekhnika (Metrolohiya – 2006): Zb. nauk. prats pyatoyi nauk.-tekhn.konferentsiyi (m. Kharkiv, 10-12 zhovtnya 2006 r.)*. NNTS «Instytut metrolohiyi», Kharkiv, 2006, vol. 2, pp.199-203. (in Ukrainian).