

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Асп. КУЗЬМИНА О. А.

Белорусский национальный технический университет

Выход в свет «Руководства по выражению неопределенности измерения» вызвал широкое обсуждение предлагаемой концепции описания точности измерения как среди метрологов, так и среди специалистов высшей школы. Несомненным достоинством данного подхода является достаточно простой и универсальный алгоритм вычисления неопределенности.

Главные отличия концепции неопределенности от концепции погрешности состоят в отходе от понятия «истинное значение измеряемой величины» как непознаваемого, в силу чего погрешность теряет смысл. Сравнение с мерой является лишь одним из способов измерения определяемой величины, а сама мера вводится в соответствии с процедурой определения измеряемой величины. Вместо деления погрешностей на случайные и систематические вводится классификация неопределенностей на типы *A* и *B*. Для типа *B* применяется аппарат субъективной теории вероятностей и широко используется априорная информация [1].

При проведении сертификационных испытаний светотехнического оборудования необходимо проводить оценку неопределенности измерений основных фотометрических характеристик в соответствии с требованиями СТБ ИСО/МЭК 17025–2001 и «Руководством по выражению неопределенности измерения».

В данной статье приведена оценка неопределенности измерения фотометрических характеристик светотехнического оборудования автотранспортных средств с несменными источниками света.

Основным количественным выражением неопределенности измерений является стандартная неопределенность u . Основным коли-

чественным выражением неопределенности измерений при проведении косвенных измерений, когда результат определяется через значения других величин, является суммарная стандартная неопределенность u_c [2].

Расширенная неопределенность U определяется по формуле

$$U = k u_c,$$

где k – коэффициент охвата (числовой коэффициент, используемый как множитель суммарной стандартной неопределенности для получения расширенной неопределенности).

При этом измеряемая величина Y определяется как

$$Y = f(X_1, \dots, X_m),$$

где $X_1, \dots, X_m$ – непосредственно измеряемые входные величины; m – число этих величин; f – вид функциональной зависимости.

Оценка измеряемой величины y вычисляется как функция оценок входных величин $x_1, \dots, x_m$ после внесения поправок на все известные источники неопределенности, имеющие систематический характер, такие как погрешность люксметра, неопределенность, вызванная погрешностью измерения длины, и т. п.:

$$y = f(x_1, \dots, x_m).$$

Затем вычисляют стандартные неопределенности входных величин $u(x_i)$ ($i = 1, \dots, m$) и возможные коэффициенты корреляции $r(x_i, x_j)$ оценок i -й и j -й входных величин ($j = 1, \dots, m$).

Исходными данными для расчета стандартной неопределенности по типу *A* являются результаты многократных измерений: $x_{i1}, \dots, x_{in_i}$ ($i = 1, \dots, m$), где n_i – число измерений i -й

входной величины. При этом стандартная неопределенность измерений i -й входной величины, при которых результат определяют как среднее арифметическое, вычисляется по формуле

$$u_A(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n_i(n_i-1)} \sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2},$$

где $\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{q=1}^{n_i} x_{iq}$ – среднее арифметическое результатов измерений i -й входной величины.

Для нахождения неопределенностей по типу B применяется аппарат субъективной теории вероятностей: вероятность характеризует меру доверия, а не частоту событий. Широко при этом используется априорная информация, что характерно для байесовских оценок. Неопределенность измерений по типу B вычисляется в предположении равномерного закона распределения возможных значений входной величины в указанных (нижней и верхней) границах ($[b_{i-}, b_{i+}]$ для i -й входной величины).

При этом стандартную неопределенность, рассчитываемую по типу B , определяют по формуле

$$u_B(x_i) = \frac{b_{i+} - b_{i-}}{2\sqrt{3}}.$$

В случае других законов распределения формулы для вычисления неопределенности по типу B будут иными.

В случае некоррелированных оценок $x_1, \dots, x_m$ суммарную стандартную неопределенность по формуле

$$U_c^2(y) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i),$$

где $u(x_i)$ – стандартная неопределенность i -й входной величины, вычисленная по типу A или B .

При определении расширенной неопределенности, коэффициент охвата выбирается в соответствии с формулой

$$k = t_p(v_{eff}),$$

где $t_p(v_{eff})$ – квантиль распределения Стьюдента

с эффективным числом степеней свободы v_{eff} и доверительной вероятностью (уровнем доверия) p .

Число степеней свободы определяют следующим образом:

$$v_{eff} = \frac{U_c^4}{\sum_{i=1}^m \frac{U_c^4(x_i)}{v_i} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^4},$$

где v_i – число степеней свободы при определении оценки i -й входной величины; $v_i = n_i - 1$ – для вычисления неопределенностей по типу A ; $v_i = \infty$ – для вычисления неопределенностей по типу B .

С учетом различного характера распределения случайных величин, определяющих значения неопределенности измерения фотометрических величин, проведены оценки составляющих неопределенностей, задаваемых границами систематического смещения освещенности в процессе калибровки фотометра и неопределенности обусловленной погрешностью измерения длины, определяемой границами мерительного инструмента и влиянием температурного режима измерений на материал мерительного инструмента.

Сила света является направленной величиной, поэтому направление в котором проводятся измерения, определяется в системе координат несменного источника света. Значительное влияние на величину силы света оказывает поворот несменного источника как вокруг горизонтальной (угол ψ), так и вокруг вертикальной оси (угол ϕ), что обусловлено конструкцией несменного источника. В связи с этим необходимо учитывать эти изменения при построении модели, вводя косинусоидальные функции. Кроме того, вводится поправка, учитывающая изменение силы света в процессе старения несменного источника в зависимости от продолжительности горения $\alpha \Delta t$ [3].

Математическая модель косвенного измерения силы света путем прямого измерения освещенности имеет следующий вид:

$$I = L^2 \frac{E}{S_v} (1 - C_{рас} - C_a \Delta T + \alpha \Delta t + h\nu(\phi) + k\nu(\psi)),$$

где I – сила света; E – освещенность; L – расстояние от центра светоиспускающей поверхности до рабочей поверхности фотозлемента в нулевом направлении; $C_{\text{рас}}$ – коэффициент, учитывающий рассеивание; $C_a \Delta T$ – поправка, учитывающая изменение температуры окружающей среды; $\alpha \Delta t$ – поправка, учитывающая старение; $hw(\varphi)$ – поправка, учитывающая вертикальный угол рассогласования; $kw(\nu)$ – поправка, учитывающая горизонтальный угол рассогласования; S_v – световая чувствительность фотометрической головки (указана в сертификате на прибор) [4].

Методика измерения состоит том, что несменный источник света равномерно освещает приемную площадку чувствительного элемента фотометра в направлении нормального падения луча с достаточно большого расстояния, так что по сравнению с этим расстоянием размерами несменного источника света и чувствительного элемента можно пренебречь. Схема питания несменного источника света состоит из блока питания и вольтметра, предназначенного для точного контроля напряжения питания источника. Фотометрическая головка и несменный источник света находятся на расстоянии 1 м и их световые щели лежат на одной оси. Измерения проводились при нормальных внешних условиях в темном помещении. Несменный источник света перед началом измерений прогревался в течение 30 мин для достижения теплового равновесия. В запрограммированном режиме фотометр регистрирует среднее значение освещенности.

В результате измерений освещенности при температуре $t = (23 \pm 0,05)^\circ\text{C}$, был получен ряд значений E_i , в люксах, $i = 1, \dots, n$; $n = 30$; 5,614; 5,1; 5,465; 5,2; 5,0; 5,7; 5,393; 5,4; 5,3; 5,29; 5,31; 5,42; 5,31; 5,3; 5,39; 5,42; 5,42; 5,65; 5,65; 5,7; 5,615; 5,2; 5,0; 5,393; 5,3; 5,28; 5,2; 5,3; 5,42; 5,31.

На основе полученных значений вычисляют среднее значение освещенности по формуле

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i = 5,397 \text{ лк.}$$

Результат измерений силы света получают по формуле

$$I = L^2 \frac{E}{S_v} + (1 - C_{\text{рас}} - C_a \Delta T + \alpha \Delta t + hw(\varphi) + kw(\nu)) = 5,393 \text{ кд.}$$

Стандартная неопределенность, вычисленная по типу A , определится следующим образом:

$$U_A(I) = U(\bar{E}) = S(\bar{E}) = 0,00054 \text{ кд.}$$

При вычислении неопределенностей по типу B , обусловленных источниками неопределенности, имеющими систематический характер, закон распределения величин внутри границ считают равномерным.

Границы систематического смещения при измерениях освещенности определены при калибровке, и соответствующую стандартную неопределенность вычисляют по формуле

$$U_{B,E} = \frac{3 \cdot 10^{-4} \cdot \bar{E} + 0,1}{\sqrt{3}} = 0,0632 \text{ лк.}$$

Границы, внутри которых лежит значение линейки, составляют $0,001L$. Тогда при $L = L_0$ соответствующую стандартную неопределенность можно рассчитать

$$U_{B,L} = \frac{0,001L_0}{\sqrt{3}} = 0,000577 \text{ м.}$$

Границы изменения значения расстояния, обусловленные изменением температуры, равны $\alpha \Delta t L_0$. Соответствующая стандартная неопределенность равна

$$U_{B,t} = \frac{\alpha \Delta t L_0}{\sqrt{3}} = 3,4 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Этой составляющей неопределенности из-за ее малости по сравнению с другими составляющими можно пренебречь.

Стандартная неопределенность, учитывающая влияние изменения окружающей температуры, определяется при введении относительной поправки $C_a \Delta T$, учитывающей изменение окружающей температуры. Стабилизация с помощью системы кондиционирования воздуха сводит к нулю это произведение в интервале

$\pm 0,0007$ с прямоугольным распределением вероятностей

$$U_{B,C_a\Delta T} = \frac{0,0007}{\sqrt{3}} = 4 \cdot 10^{-4}.$$

Стандартная неопределенность, учитывающая влияние рассеивания света, с учетом относительной поправки на рассеянное световое излучение $C_{\text{рас}}$, равной 0,0004 (ее значение определяется и оценивается в интервале $\pm 0,0002$ с прямоугольным распределением вероятностей), находится по формуле

$$U_{B,C_{\text{рас}}} = \frac{0,0002}{\sqrt{3}} = 12 \cdot 10^{-5}.$$

Стандартная неопределенность, учитывающая влияние старения при продолжительном горении несменного источника, определяется:

$$U_{B,\alpha\Delta t} = \frac{0,0007}{\sqrt{3}} = 4 \cdot 10^{-4}; \quad \alpha\Delta t - \text{относительная}$$

поправка на старение при продолжительном горении НИС $\Delta t = 3$ ч. Для данного случая произведение $\alpha\Delta t = 0,0007$ в интервале $\pm 0,0007$ с прямоугольным распределением вероятностей.

Стандартная неопределенность, учитывающая влияние отклонения угла установки несменного источника по вертикали от соосности, определится при введении коэффициента $hw(\varphi)$ (неопределенность вычисления коэффициента $h = 0,2$ пренебрежимо мала); угловое рассогласование оцениваем интервалом $|\varphi| \leq 1,0^\circ$ с прямоугольным распределением вероятностей:

$$X_i = \cos^2 \varepsilon \rightarrow X_i = 1;$$

$$U(X_i) = g \frac{a^2}{\sqrt{20}};$$

$$U(hw(\varphi)) = 0,2 \frac{\left(1,0^\circ \frac{\pi}{180}\right)^2}{\sqrt{20}} = 0,000014.$$

Стандартная неопределенность, учитывающая влияние отклонения угла установки НИС по горизонтали от соосности, определится путем введения коэффициента $kw(v)$ (неопределенность вычисления коэффициента $k = 3,0$

пренебрежимо мала). Угловое рассогласование оцениваем интервалом $|v| \leq 2,0^\circ$ с прямоугольным распределением вероятностей

$$U(kw(v)) = 3,0 \frac{\left(2,0^\circ \frac{\pi}{180}\right)^2}{\sqrt{20}} = 0,000817.$$

Неопределенность, учитывающая световую чувствительность фотометрической головки: S_v – световая чувствительность фотометрической головки, указанная в сертификате на уровне значимости $K = 2$, равная 0,695, таким образом относительная расширенная неопределенность равна 0,0062, а стандартная:

$$U(S_v) = 0,0062 \cdot \frac{0,695}{2} = 0,00215 \text{ о. е.}$$

Суммарную стандартную неопределенность, вычисленную по типу B, определяют по формуле

$$U_B = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial S_v}\right)^2 U_{B,S_v}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial C_{\text{рас}}}\right)^2 U_{B,C_{\text{рас}}}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial C_a\Delta T}\right)^2 U_{B,C_a\Delta T}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha\Delta t}\right)^2 U_{B,\alpha\Delta t}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial hw(\varphi)}\right)^2 U_{B,hw(\varphi)}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial kw(v)}\right)^2 U_{B,kw(v)}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)^2 U_{B,t}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2 U_{B,L}^2} = 0,00244 \text{ кд.}$$

Коэффициенты чувствительности рассчитаем исходя из математической модели как частные производные оцениваемой величины. Они должны быть представлены с надлежащим знаком, что особенно важно при наличии корреляции входных величин:

$$c_1 = \frac{\partial E}{\partial S_v} = \frac{E}{S_v} = 5,691333 \text{ лк/В};$$

$$c_2 = \frac{\partial E}{\partial C_{\text{рас}}} = E = 5,691333 \text{ лк};$$

$$c_3 = \frac{\partial E}{\partial (C_a\Delta T)} = E = 5,691333 \text{ лк};$$

$$c_4 = \frac{\partial E}{\partial L} = 2 \frac{E}{L} = 2 \cdot 5,691333 = 11,38266 \text{ лк/м};$$

$$c_5 = \frac{\partial E}{\partial(h\nu(\varphi))} = E = 5,691333 \text{ лк};$$

$$c_6 = \frac{\partial E}{\partial(h\nu(\nu))} = E = 5,691333 \text{ лк};$$

$$c_7 = \frac{\partial E}{\partial(\alpha \Delta t)} = E = 5,691333 \text{ лк}.$$

В случае некоррелированных входных величин суммарную стандартную неопределенность находим по формуле

$$U_c = \sqrt{U_A^2 + c_1^2 U_B^2} = \sqrt{0,00054^2 + 1 \cdot 0,00244^2} = 0,0025 \text{ лк}.$$

Для получения значения расширенной неопределенности вычислим эффективное число степеней свободы

$$\nu_{eff} = (n-1) \left[\frac{U_B^2}{U_A^2} + 1 \right]^{-2} = \infty.$$

Соответствующий коэффициент охвата

$$k = t_{0,95}(\nu_{eff}) = 1,96.$$

Расширенную неопределенность рассчитывают следующим образом:

$$U_{0,95} = k U_c = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ лк}.$$

Таким образом измеренная сила света несменного источника составила $5,393 \pm 0,0049$ кд. При этом основной вклад в значение расширенной неопределенности вносит составляющая, характеризующая границы систематического смещения при измерениях освещенности. Составляющей неопределенности, которая обусловлена зависимостью свойств материала измерительного инструмента от температуры окружающей среды, можно пренебречь, ввиду ее малости.

ВЫВОД

Использование концепции неопределенности необходимо для гармонизации зарубежных и отечественных нормативных документов и для успешной работы в нетрадиционных областях измерений, таких как фотометрия несменных источников света.

ЛИТЕРАТУРА

1. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition // ISO, Switzerland, 1995. – 101 p.
2. Руководство по выражению неопределенности измерения / Пер. с англ. под науч. ред. В. А. Слава. – СПб.: ГП ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999. – 134 с.
3. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю. Б. Айзенберга. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 472 с.
4. Digitales system-photometer S1000. – Manual, 2001. – 22 p.