

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

Рассмотрены основные понятия эффективности методов измерений с автоматической коррекции погрешностей результатов измерений и эффективности методов автоматической коррекции погрешностей. Приведены соответствующие аналитические выражения функции эффективности коррекции погрешностей для ряда частных случаев. На конкретном примере показана эффективность МНВ-методов избыточных измерений с автоматической коррекцией систематических погрешностей.

© В.Т. Кондратов, 2002

УДК 389.638.011

В.Т. КОНДРАТОВ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Важная измерительная задача – это оценка эффективности методов и средств измерений физических величин (ФВ) по важнейшим метрологическим характеристикам или параметрам. Преимущественно сравниваются между собой точность и быстродействие измерений, реже – метрологическая надежность и др.

В общем случае эффективность характеризует превалирование системных свойств одного метода измерения относительно другого, направленных на достижение положительного эффекта, в частности, например, на повышение точности измерений.

Эффективность или действенность методов измерений с автоматической коррекцией погрешностей результатов измерений является характеристикой отличительных особенностей и системных свойств сравниваемых методов измерений ФВ и самих методов коррекции погрешностей в диапазоне значений измеряемой ФВ. Обозначим эффективность латинской буквой “E” (от слова “*effektiveness* – эффективность”). Для описания характера поведения эффективности в диапазоне значений измеряемой ФВ вводится обобщенное понятие “функция эффективности коррекции (ФЭК) погрешностей”. Она характеризует эффективность коррекции погрешностей измерения сравниваемых методов измерений в диапазоне измерений ФВ x_i и обозначается как $E(x_i)$ [1].

Формулировка понятия ФЭК погрешностей наиболее корректна через понятие “точность измерения”. Как известно, точность измерения представляет собой характеристику качества

измерения, отражающей близость к нулю погрешности его результата [2]. В связи с этим под ФЭК погрешностей будем понимать модуль отношения точностей сравниваемых методов измерений в заданном диапазоне значений КнФВ.

Поскольку определение точности предполагает наличие сведений о ширине зоны неопределенности или об энтропийной погрешности [3], а аналитическая оценка качества измерения через точность используется редко, то целесообразно использовать понятие ФЭК погрешностей через сами погрешности результатов измерений сравниваемых методов.

Необходимо различать ФЭК погрешностей результата измерений ФВ одним методом по отношению к другому в диапазоне значений ФВ от ФЭК погрешностей результатов измерений ФВ одним и тем же методом без коррекции и с коррекцией погрешностей. Например, речь может идти об эффективности МНВ-методов избыточных измерений с автоматической коррекцией погрешностей по отношению, например, к методам прямых (косвенных) измерений ФВ с поэлементной коррекцией и без коррекции погрешностей.

В общем случае (при НФП сенсора) ФЭК погрешностей одним методом измерений по отношению к другому, зависит как от значений контролируемой ФВ x_i , так и от значений погрешностей сравниваемых методов измерений и описывается как

$$E(x_i) = f(x_i, \Delta_{x1}, \Delta_{x2}), \quad (1)$$

где Δ_{x1} и Δ_{x2} – погрешности (первого и второго) сравниваемых методов измерений.

В частных случаях виды аналитического представления ФЭК (1) зависят от формы представления погрешностей: а) через уравнения измерений, б) через уравнения погрешностей (результатирующей погрешности или через составляющие погрешности). Поэтому ФЭК погрешностей может быть описана уравнением измерений и/или уравнением погрешностей сравниваемых методов измерений. Последнее позволяет учесть существующие различия в тонкой структуре погрешностей сравниваемых методов измерений.

Если сравниваются между собой методы измерений ФВ при ЛФП сенсора, то ФЭК (1) будет представлять собой прямую линию, не зависящую от значений измеряемой ФВ x_i . В этом случае ФЭК характеризуется постоянным коэффициентом $E(x_i) = E = \text{const}$, называемым коэффициентом эффективности коррекции (КЭК) [1].

В общем случае НФП сенсора каждому значению ФВ x_i ($\{x_{ij}\} = \{x_{nj}\}$) соответствует парциальный КЭК $E_n = E_n(x_n)$. Данный коэффициент количественно характеризует эффективность автоматической коррекции погрешностей сравниваемых методов измерений при конкретном значении измеряемой ФВ. В этом случае парциальные КЭК должны записываться с указанием соответствующих значений измеряемой ФВ, например, $E(x_{in} \dots x_{ik}) = 5 \dots 37$ или $E(\{x_{in}\} = 1 \dots \{x_{ik}\} = 10) = 5 \dots 37$, $E_n(\{x_i\} = 1) = 5$ или $E_n(1) = 5$, $E_n = 7$ и др. Первые два примера характеризуют эффективность коррекции в диапазоне или в части диапазона измеряемых значений ФВ и записываются с указанием на-

чальной и конечной точек диапазона измерений. Последние два примера характеризуют эффективность коррекции при конкретных значениях измеряемой ФВ.

В метрологию избыточных измерений нами введены следующие понятия эффективности.

1. Эффективность автоматической коррекции погрешности результата измерения ФВ МНВ-методом избыточных измерений по отношению к методу прямого измерения действительного значения измеряемой ФВ без автоматической коррекции погрешностей при одних и тех же номинальных значениях параметров НПФ сенсора и в заданном диапазоне значений ФВ [1].

В этом случае эффективность характеризует свойство относительного подавления составляющих погрешности результата измерения измеряемой ФВ при реализации МНВ-методов избыточных измерений по сравнению с прямыми при воздействии дестабилизирующих факторов на абсолютные значения параметров НПФ датчиков, проявляющееся в значениях погрешностей результатов измерений ФВ x_i в заданном диапазоне значений.

Под ФЭК погрешностей будем понимать модуль отношений методических погрешностей метода прямого (непосредственного) измерения ФВ и МНВ-метода избыточных измерений, т.е. функцию вида

$$E_1(x_i) = \left| \frac{x_{in} - x_i}{x_{im} - x_i} \right| = \left| \frac{\Delta_{xp}(x_i)}{\Delta_{xm}(x_i)} \right|, \quad (2)$$

где x_i и x_{in} , x_{im} – истинное и действительные значения измеряемой ФВ; $\Delta_{xp}(x_i)$ – погрешность метода прямых измерений; $\Delta_{xm}(x_i)$ – погрешность МНВ-метода избыточных измерений.

В связи с тем, что МНВ-методы и уравнения избыточных измерений обеспечивают не только автоматическую коррекцию погрешностей, но и линеаризацию общей функции преобразования (ОФП) цифрового измерительного прибора (ЦИП), то, в случаях корректного решения измерительной задачи, значение погрешности МНВ-методов не зависит от контролируемой ФВ, т.е. $\{\Delta_{xm}(x_i)\} = \text{const}$. Значение погрешности прямых методов постоянно, т.е. $\{\Delta_{xp}(x_i)\} = \text{const}$, только при линейной функции преобразования (ЛФП) сенсора и ЦИП в целом. В связи с этим ФЭК

$$E_1(x_i) = \left| \Delta_{xp} / \Delta_{xm} \right| = \text{const} = E_1 \quad (3)$$

представляет собой прямую линию, параллельную оси абсцисс, т.е. не зависит от измеряемой ФВ x_i . В этом случае эффективность коррекции погрешностей описывается парциальным КЭК E_1 . Отметим, что значение парциального коэффициента E_1 может быть определено не только абсолютными (Δ_{xp} и Δ_{xm}), но и

относительными методическими погрешностями ($\delta_{хл}$ и $\delta_{хм}$) измерений, присущие каждому из сравниваемых методов.

2. Эффективность автоматической коррекции погрешности результата определения действительного значения ФВ x_i МНВ-методом избыточных измерений по отношению к методу косвенного определения действительного значения ФВ x_i без автоматической коррекции погрешностей при одних и тех же номинальных значениях параметров НФП сенсора и в заданном диапазоне значений ФВ [1].

В данном случае под ФЭК погрешностей будем понимать модуль отношений методических погрешностей метода косвенных измерений и МНВ-метода избыточных измерений, т.е. нелинейную функцию вида

$$E_2(x_i) = \left| \Delta_{\text{зк}}(x_i) / \Delta_{\text{зм}} \right|, \quad (4)$$

где $\Delta_{\text{зк}}(x_i)$ – погрешность метода косвенных измерений ФВ x_i .

3. Эффективность автоматической коррекции погрешности результата измерения ФВ МНВ-методом избыточных измерений по отношению к методу прямого измерения действительного значения измеряемой ФВ, но с другим подходом к коррекции погрешностей, например, с поэлементной коррекцией погрешностей, при одних и тех же номинальных значениях параметров НФП сенсора и в заданном диапазоне значений ФВ.

В этом случае ФЭК имеет вид

$$E_3(x_i) = \left| \Delta_{\text{зкк}}(x_i) / \Delta_{\text{зм}} \right|, \quad (5)$$

где $\Delta_{\text{зкк}}(x_i)$ – погрешность метода прямых измерений с поэлементной коррекцией погрешностей.

4. Эффективность автоматической коррекции погрешности результата измерения ФВ МНВ-методом избыточных измерений по отношению к методу косвенного определения действительного значения контролируемой ФВ с другими подходами к автоматической коррекции погрешностей и линеаризации НФП сенсора, например, с поэлементной коррекцией погрешностей и с несистемной линеаризацией (с использованием обратных функций, электронных таблиц поправок, решений нелинейных уравнений измерений известного вида и т.д.), при одних и тех же номинальных значениях параметров НФП сенсора и в заданном диапазоне значений ФВ.

Для данного случая ФЭК

$$E_4(x_i) = \left| \Delta_{\text{зкк}}(x_i) / \Delta_{\text{зм}} \right|, \quad (6)$$

где $\Delta_{\text{ХКК}}(x_i)$ – погрешность метода косвенного определения действительного значения контролируемой ФВ с коррекцией погрешностей.

5. Эффективность двух МНВ-методов автоматической коррекции погрешностей определения действительного значения измеряемой ФВ при одном и том же виде НФП сенсора, в заданном диапазоне значений ФВ, но при разных способах формирования корректирующих ФВ, а следовательно, и видах уравнений избыточных измерений.

В этом случае ФЭК примет вид

$$E_5(x_i) = \left| \frac{\Delta_{\text{хм2}}}{\Delta_{\text{хм1}}} \right| = E_5 \quad (7)$$

при независимых от x_i значениях методических погрешностей сравниваемых методов, т.е. эффективность коррекции характеризуется парциальным КЭК E_5 ; при зависящих от x_i значениях методических погрешностей сравниваемых методов ФЭК примет вид

$$E_5(x_i) = \left| \frac{x_{\text{им2}} - x_i}{x_{\text{им1}} - x_i} \right| = \left| \frac{\Delta_{\text{хм2}}(x_i)}{\Delta_{\text{хм1}}(x_i)} \right|. \quad (8)$$

Зависимость (8) имеет место в тех случаях, когда линеаризация общей функции преобразования проведена путем некорректного применения АЛ- или ФАЛ-методов системной линеаризации [1].

6. Эффективность МНВ-метода избыточных измерений с автоматической коррекцией погрешности результата определения действительного значения измеряемой ФВ при различных номинальных значениях параметров НФП сенсора [1].

Такая характеристика эффективности необходима для оценки инвариантности используемого в ЦИП МНВ-метода избыточных измерений к замене одного сенсора однотипным другим (из одной и той же партии, но при технологическом разбросе значений параметров их НФП) и обеспечения значений погрешностей результатов измерений в пределах заданных границ полосы неопределенности ЦИП (или полосы значений погрешностей [4]). В этом случае ФЭК имеет вид

$$E_{\delta_j}(x_i) = \left| \frac{\Delta_{\text{хmj}}}{\Delta_{\text{хм1}}} \right| = E_{\delta_j}, \quad (9)$$

где $\Delta_{\text{хmj}}$ – погрешность МНВ-метода избыточных измерений ФВ x_i для j -го сенсора, и характеризуется только j -м парциальным КЭК E_{δ_j} .

Если системная линеаризация ОФП осуществлена не корректно, то ФЭК в этом случае будет зависеть от x_i :

$$E_{6j}(x_i) = \left| \frac{x_{imj} - x_i}{x_{iml} - x_i} \right| = \left| \frac{\Delta_{xmj}(x_i)}{\Delta_{xml}(x_i)} \right|. \quad (10)$$

Для рассмотренных случаев ФЭК могут быть записаны не только через абсолютные, но и через относительные методические погрешности сравниваемых методов.

В качестве примера оценим эффективность автоматической коррекции систематических погрешностей МНВ–методом избыточных измерений по отношению к методу косвенных измерений ФВ при НФП сенсора, описываемой параболой или квадратным трехчленом.

Уравнение измерений, описывающее сущность метода косвенного определения действительного значения ФВ x_i , представляет собой известную формулу для решения квадратного уравнения относительно x_i :

$$x_i' = -k \frac{S_n'}{S_n'} + \sqrt{\left(k \frac{S_n'}{S_n'} \right)^2 + \frac{y_{ni}' - \Delta y_n}{S_n'}}, \quad (11)$$

где x_i' – приведенная ко входу выходная величина сенсора при реальных значениях параметров S_n' , S_l' и Δy_n его НФП ($\{S_n'\} = \{S_n\} + \{\Delta S_n\}$, $\{S_l'\} = \{S_l\} + \{\Delta S_l\}$ и $\{\Delta y_n'\} = \{\Delta y_n\} + \{\Delta y_{n1}\}$); k - безразмерный коэффициент ($k = 0,5$); y_{ni}' – выходная величина сенсора при входной величине x_i .

Уравнение избыточных измерений для МНВ-метода измерений с автоматической коррекцией систематических погрешностей при параболической НФП сенсора имеет вид [1]

$$x_i = n \Delta x_i' \cdot \frac{y_{ni}' - y_{n1}}{(y_{n6}' - y_{n5}') (k_{n1}' - 1) + k (k_{n1}'^2 - 1) [(y_{n3}' - y_{n2}') - (y_{n6}' - y_{n5}')]}, \quad (12)$$

где y_{n1}' , y_{n2}' , y_{n3}' , y_{n4}' , y_{n5}' , y_{n6}' – результаты преобразования ФВ x_i с помощью сенсора с учетом погрешностей воспроизведения корректирующей ФВ Δx_i и коэффициента локальной линеаризации k_{n1}' ; $n = 2$; $k = 0,5$.

Согласно (4), ФЭК для указанной НФП сенсора опишется уравнением связи параметров, коэффициентов и величин в виде

$$E_i = \left| \frac{\Delta x_0 + \Delta x_i}{-\Delta x_0 x_i} \cdot \left(\sqrt{\left(k \frac{S_n + \Delta S_n}{S_n + \Delta S_n} \right)^2 + \frac{x_i^2 (S_n + \Delta S_n) + x_i (S_n + \Delta S_n) + \Delta x_{ni}}{S_n + \Delta S_n}} - k \frac{S_n + \Delta S_n}{S_n + \Delta S_n} - x_i \right) \right|. \quad (13)$$

При НФП сенсора, описываемой уравнением числовых значений вида $\{y_n\} = \{x_i\}^2 + 0,2\{x_i\} + 5$ и значениях погрешностей $\{\Delta S_n\} = 0,001$, $\{S'_n\} = 0,002$ и $\{\Delta_{cm}\} = 0,005$, уравнение числовых значений для ФЭК примет вид

$$\{E(x_i)\} = \left| \sqrt{\frac{0,0867033}{\{x_i\}^2} + \frac{0,20402}{\{x_i\}} + 1,0201} - \frac{0,404}{\{x_i\}} - 1,01 \right|. \quad (14)$$

В диапазоне $-1 \leq \{x_i\} \leq 0$ и $0 \leq \{x_i\} \leq 1$ значения ФЭК изменяются, соответственно, от $\{E(-1)\} = 1,1$ до $\{E(-0,055)\} = 96$ и от $\{E(0,014)\} = 97$ до $\{E(1)\} = 1,2$ (см. рис.).

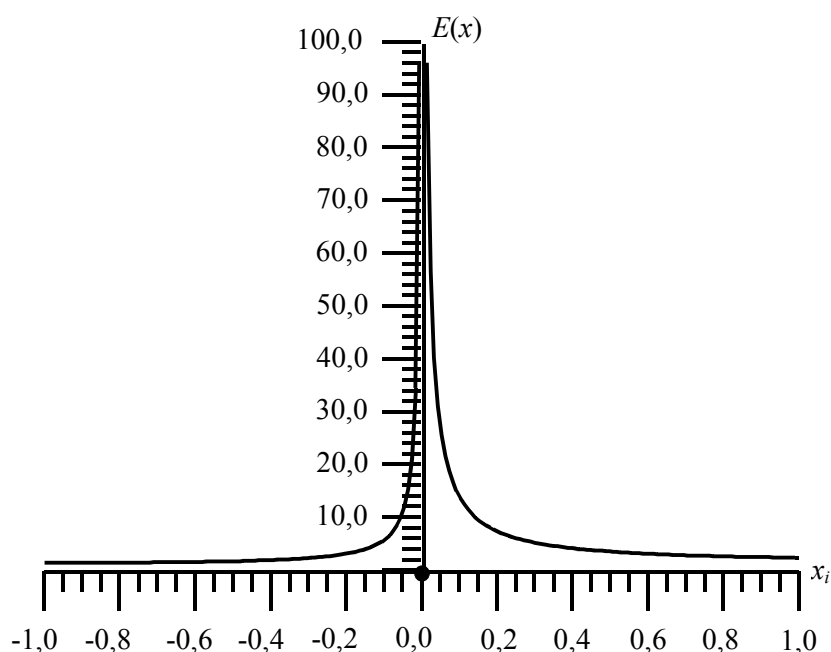


РИСУНОК. Графики ФЭК погрешностей

Таким образом, установлено, что общее понятие эффективности коррекции погрешности связано с понятием качества измерений. Отмечена необходимость различия понятий “ФЭК погрешностей методов измерений” от понятия “ФЭК погрешностей при разных методах коррекции”.

Сформулированы частные подходы и определения эффективности коррекции погрешностей, обеспечивающие учет различий в тонкой структуре сравниваемых методов и погрешностей измерений. Получены обобщенные выражения для ФЭК погрешностей. Установлено, что для общего случая НФП сенсора ФЭК

является нелинейной функцией, зависящей от значения измеряемой ФВ и методических погрешностей измерений.

Приведенные расчетные данные свидетельствуют о высокой эффективности коррекции погрешностей при использовании МНВ-методов избыточных измерений.

1. *Кондратов В.Т.* Основы теории автоматической коррекции систематических погрешностей измерения физических величин при нестабильной и нелинейной функции преобразования датчика. Дис. ... д-р. техн. наук: 05.11.15 и 05.11.01. – Киев: 2001. – Т. 1 – 501 с.
2. *Основные термины в области метрологии: Словарь-справочник / Сост. М.Ф.Юдин, М.Н.Селиванов, О.Ф.Тищенко, А.И.Скороходов* – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 113 с.
3. *Островский Л.А.* Основы общей теории электроизмерительных устройств. – Л.: Энергия, 1971. – 554 с.
4. *Новицкий П.В., Зограф И.А., Лабунец В.С.* Динамика погрешностей средств измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.

Получено 01.07.2002