

УДК 389:681.2

В.Т. КОНДРАТОВ

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова, г. Киев

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: ТЕОРИЯ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА  
УРАВНЕНИЙ ИЗБЫТОЧНЫХ И СВЕРХИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
СООБЩЕНИЕ 5. ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВВЕДЕНИЯ ПОПРАВОК**

*В Сообщении 5 дальнейшее развитие получили теория и методы структурного анализа уравнений избыточных и сверхизбыточных измерений в части исследования графоаналитических методов введения поправок при решении задач повышения точности обработки округленных данных.*

*Разработаны и описаны графоаналитические методы введения поправок при обработке данных, соответствующих первому квадранту прямоугольной системы координат. Приведены графические построения номограмм и результаты обработки числовых значений округленных до пола или до потолка результатов измерительного преобразования рядов физических величин по уравнениям числовых значений. Оценена эффективность описанных методов.*

*Работа представляет интерес для метрологов, специалистов, магистров и аспирантов, изучающих методы (сверх)избыточных измерений физических величин, пути и методы повышения точности машинной обработки округленных данных.*

*Ключевые слова: округление, структурный анализ, уравнения (сверх)избыточных измерений, уравнения числовых значений, поправки, графоаналитические методы.*

V.T. KONDRATOV

V.M.Glushkov Institute of cybernetics of National academy of Science of Ukraine

**FUNDAMENTAL METROLOGY:  
THE THEORY OF THE STRUCTURAL ANALYSIS OF THE EQUATIONS OF REDUNDANT AND SUPER-  
REDUNDANT MEASUREMENTS**

**The message 5. Graphoanalytical methods of introduction of amendments**

*Abstract — In the Message 5 further development was received by the theory and methods of the structural analysis of the equations of redundant and super-redundant measurements regarding research graphoanalytical methods of introduction of amendments at the decision of problems of increase of accuracy of processing of the rounded data.*

*Are developed and described graphoanalytical methods of introduction of amendments at the data processing, corresponding to the first quadrant rectangular system of co-ordinates. Graphic constructions of nomograms and results of processing of numerical values of results of measuring transformation of numbers of physical quantities according to the equations of numerical values are given. Efficiency of the described methods is estimated.*

*Work is of interest for metrologists, experts, masters and the post-graduate students studying methods of redundant and super-redundant measurements of physical quantities ways and methods of increase of accuracy of machining of data.*

*Keywords: a rounding off, the structural analysis, the equations of redundant and super-redundant measurements, emigraphical and analytical methods.*

**Введение**

В сообщении 4 [1] описана общая методология повышения точности обработки округленных результатов измерительного преобразования рядов физических величин по уравнениям числовых значений (УЧЗ) и было показано, что обработка округленных данных по априори определенному УЧЗ, полученному из уравнения (сверх)избыточных измерений, приводит к завышению или занижению значения конечного результата в зависимости от соотношения значений аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности определения базового значения варианты и от неучтенного количества сомнительных цифр после запятой.

Нами установлено и показано, что результат вычисления значения искомой физической величины может быть представлен в виде суммы произведений нормированного значения физической величины (меры) на базовое значение варианты и на аддитивную и мультипликативную составляющие погрешностей ее определения. Доказана возможность повышения точности обработки округленных данных за счет повышения точности определения базового значения варианты путем введения поправок в результаты вычислений по УЧЗ.

В настоящем сообщении рассматриваются графоаналитические методы введения поправок, обеспечивающие повышение точности обработки округленных данных, отображаемых, в частности, в первом квадранте осей координат.

*Объектом исследований* являются методы повышения точности машинной обработки результатов измерений или измерительных преобразований физических величин при (сверх)избыточных измерениях.

*Предметом исследований* являются: графоаналитические методы повышения точности вычислительной обработки округленных результатов линейного измерительного преобразования рядов физических величин по типовому УЧЗ за счет введения поправок в эти результаты.

*Целью работы* является разработка и описание графоаналитических методов повышения точности

обработки округленных данных, соответствующих первому квадранту прямоугольной системы координат.

### Результаты исследований

Первой особенностью общей методологии повышения точности обработки данных является представление результата обработки по конституированному УЧЗ, записанному через оптимальное базовое значение варианты с минимальными границами полосы неопределенности. Второй особенностью является возможность введения поправок в дробные части числителя и знаменателя конституированного УЧЗ.

Для (сверх)избыточных измерений характерны следующие виды поправок:

- 1) поправка  $\Delta U_{п1}$  к дробной части данных числителя УЧЗ варианты, представляющего собой разность предварительно округленных преобразованных физических величин одной пары;
- 2) поправка  $\Delta U_{п2}$  к дробной части данных знаменателя УЧЗ варианты, представляющего собой разность предварительно округленных преобразованных физических величин другой пары;
- 3) парные поправки ( $\Delta U_{п1}$  и  $\Delta U_{п2}$ ) к дробным частям данных числителя и знаменателя УЧЗ варианты;
- 4) безразмерная поправка  $k_{п}$  к значению варианты, причем  $k_{п} = k'_x - k_x = \Delta k_x$ , где  $\Delta k_x$  — погрешность или отклонение поправки  $k_x$ , полученной по отношению целых частей данных числителя и знаменателя, по отношению к поправке  $k'_x$ , полученной по отношению значений полных данных числителя и знаменателя УЧЗ варианты.
- 5) поправка со значением  $\{\Delta x_{пi}\} = \{x_i\} - \{x_{ik}\} = k_{пi} \{x_0\}$ , характеризующая разницу приведенных к входу результатов измерений до и после введения поправок в числитель и/или знаменатель УЧЗ варианты. Использование поправки  $\Delta x_{пi}$  предпочтительнее, чем использование поправки  $k_{п}$  ввиду малости значения последней;
- 6) парные поправки к значениям дробной части числителя УЧЗ варианты и к значению варианты в целом;
- 7) парные поправки к значениям дробной части знаменателя варианты и варианты УЧЗ в целом;
- 8) совместные поправки к значениям дробных частей числителя и знаменателя УЧЗ варианты, а также к значению самой варианты.

Перечисленные поправки обеспечивают исключение погрешности обработки результата (сверх)избыточных измерений по УЧЗ, которая обусловлена округлением результатов измерительного преобразования рядов физических величин, т.е. данных.

Поправки вводятся для уменьшения доверительных границ погрешности. Не исключенные составляющие погрешности (сверх)избыточных измерений появляются в случаях не возможности сведения к нулю погрешности обработки данных.

В основу структурного анализа и синтеза модифицированных УЧЗ положим типовое УЧЗ, например, вида [1]

$$\{x_{i1}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\}}, \quad (1)$$

представляющее собой уравнение числовых значений при линейной функции преобразования измерительного канала. Оно получено при измерительном преобразовании трех физических величин ( $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ ) с размерами:  $\{x_1\} = \{x_0\}$ ,  $\{x_2\} = \{x_i\}$  и  $\{x_3\} = \{x_i\} + \{x_0\}$ . В рамках данной работы рассмотрение УЧЗ при нелинейной функции преобразования измерительного канала не проводится, т.к. предложенная методология повышения точности обработки данных остается неизменной.

В результате введения поправок в УЧЗ [1] получают семь разновидностей конституированных УЧЗ, которые можно записать, например, при округлении целой части разностей в числителе и знаменателе до потолка, в дробной части — до пола, в виде следующих УЧЗ искомой физической величины:

$$\{x_{ik1}\} = \{x_0\} \frac{\lceil \{U'_3(x_i + x_0)\} \rceil - \lfloor \{U'_1(x_0)\} \rfloor + \{\Delta U_{п1}\}}{\lceil \{U'_3(x_i + x_0)\} \rceil - \lfloor \{U'_2(x_i)\} \rfloor} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + \lfloor \{\Delta U_4\} \rfloor + \{\Delta U_{п1}\}}{\{\Delta U'_{32}\} + \lfloor \{\Delta U_3\} \rfloor}, \quad (2)$$

$$\{x_{ik2}\} = \{x_0\} \frac{\lceil \{U'_3(x_i + x_0)\} \rceil - \lfloor \{U'_1(x_0)\} \rfloor}{\lceil \{U'_3(x_i + x_0)\} \rceil - \lfloor \{U'_2(x_i)\} \rfloor + \{\Delta U_{п2}\}} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + \lfloor \{\Delta U_4\} \rfloor}{\{\Delta U'_{32}\} + \lfloor \{\Delta U_3\} \rfloor + \{\Delta U_{п2}\}}, \quad (3)$$

$$\{x_{ik3}\} = \{x_0\} \frac{\lceil \{U'_3(x_i + x_0)\} \rceil - \lfloor \{U'_1(x_0)\} \rfloor + \{\Delta U_{п1}\}}{\lceil \{U'_3(x_i + x_0)\} \rceil - \lfloor \{U'_2(x_i)\} \rfloor + \{\Delta U_{п2}\}} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + \lfloor \{\Delta U_4\} \rfloor + \{\Delta U_{п1}\}}{\{\Delta U'_{32}\} + \lfloor \{\Delta U_3\} \rfloor + \{\Delta U_{п2}\}}, \quad (4)$$

$$\{x_{ik4}\} = \{x_0\} \left[ \frac{\lceil \{U'_3(x_i + x_0)\} \rceil - \lfloor \{U'_1(x_0)\} \rfloor}{\lceil \{U'_3(x_i + x_0)\} \rceil - \lfloor \{U'_2(x_i)\} \rfloor} + \frac{\{\Delta x_{пi}\}}{\{x_0\}} \right] = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + \lfloor \{\Delta U_4\} \rfloor}{\{\Delta U'_{32}\} + \lfloor \{\Delta U_3\} \rfloor} + \{\Delta x_{пi}\}, \quad (5)$$

$$\{x_{ik5}\} = \{x_0\} \left[ \frac{[\{U'_3(x_i + x_0)\}] - [\{U'_1(x_0)\}] + \{\Delta U_{п1}\}}{[\{U'_3(x_i + x_0)\}] - [\{U'_2(x_i)\}]} + \frac{\{\Delta x_{пi}\}}{\{x_0\}} \right] = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + [\{\Delta U_4\}] + \{\Delta U_{п1}\}}{\{\Delta U'_{32}\} + [\{\Delta U_3\}]} + \{\Delta x_{пi}\}, \quad (6)$$

$$\{x_{ik6}\} = \{x_0\} \left[ \frac{[\{U'_3(x_i + x_0)\}] - [\{U'_1(x_0)\}]}{[\{U'_3(x_i + x_0)\}] - [\{U'_2(x_i)\}] + \{\Delta U_{п2}\}} + \frac{\{\Delta x_{пi}\}}{\{x_0\}} \right] = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + [\{\Delta U_4\}]}{\{\Delta U'_{32}\} + [\{\Delta U_3\}] + \{\Delta U_{п2}\}} + \{\Delta x_{пi}\}, \quad (7)$$

$$\{x_{ik7}\} = \{x_0\} \left[ \frac{[\{U'_3(x_i + x_0)\}] - [\{U'_1(x_0)\}] + \{\Delta U_{п1}\}}{[\{U'_3(x_i + x_0)\}] - [\{U'_2(x_i)\}] + \{\Delta U_{п2}\}} + \frac{\{\Delta x_{пi}\}}{\{x_0\}} \right] = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + [\{\Delta U_4\}] + \{\Delta U_{п1}\}}{\{\Delta U'_{32}\} + [\{\Delta U_3\}] + \{\Delta U_{п2}\}} + \{\Delta x_{пi}\}. \quad (8)$$

Возможны и другие варианты округления данных, например, округление целой части разности в числителе и знаменателе до пола, а в дробной части — до потолка, или обе части округляются до пола и т.д.

Исследования показали, что все многообразие методов повышения точности обработки данных можно разделить на: графоаналитические, аналитические, эвристические, аналитико-эвристические и другие методы.

В настоящей статье рассматриваются графоаналитические методы для случаев, когда значения исходных данных соответствуют первому квадранту прямоугольной системе координат. Причем предполагается, что в исходных данных первая и вторая цифры после запятой являются сомнительными.

### Графоаналитические методы повышения точности обработки данных

В метрологии особый интерес представляют графоаналитические методы, использующие номограммы. Номограммы широко применяются для решения задач оперативного определения данных при сложных нелинейных зависимостях. Номограммы различают по способу изображения значений переменных (точками или линиями) и по способу задания соответствия между изображениями переменных [2].

В теории структурного анализа уравнений (сверх)избыточных измерений решение задачи повышения точности обработки округленных данных графоаналитическими методами с использованием номограмм интересно тем, что по выделенным из разностей исходных данных числителя и знаменателя значениям целых и дробных частей можно определить значение погрешности, вносимой дробной частью данных в результат их обработки по соответствующему УЧЗ.

На номограмме каждому УЧЗ соответствует семейство прямых одного и того же типа (см. рис. 1). Номограмма может состоять из семейства прямых или из нескольких прямых, в зависимости от многократности измерительного преобразования рядов физических величин при решении задач статистической обработки результатов избыточных измерений. Причем прямые проходят через числовые отметки (точки), соответствующие значениям дробной части числителя.

На рис. 1 для каждого квадранта отмечены области округления дробных частей данных числителя и знаменателя до пола, до потолка и до половины единицы последнего сохраняемого разряда.

Угол наклона прямой определяется базовым значением варианты, определяемом как отношение целых частей верных цифр данных числителя и знаменателя УЧЗ варианты. Сомнительные цифры дробной части данных числителя отображаются отметками на линейной вертикальной шкале (см. рис.1, ось ординат), базовое значение варианты отображается углом наклона прямой, а сомнительные цифры дробной части знаменателя указывают на соответствующее значение погрешности обработки данных по УЧЗ.

Особенность номограмм заключается в том, что каждое графическое представление изображает заданную область изменения погрешности обработки данных, причем каждое значение погрешности изображается на номограмме определённой точкой. Изображения значений переменных, т.е. сомнительные цифры дробных частей данных числителя и знаменателя, связанные функциональной зависимостью, находятся на номограмме в определённом соответствии, общем для номограмм одного и того же типа.

Как отмечается в [2], точность получения ответов по номограммам зависит от вида номографической зависимости, пределов изменения переменных, размеров чертежа и выбранного типа номограммы. В среднем номограммы могут обеспечить получение ответов с 2-3 верными значащими цифрами. Когда точность номограмм недостаточна, их можно использовать для прикидочных расчетов, для определения погрешностей, для нахождения нулевых приближений, а также для контроля вычислений с целью обнаружения промахов или грубых ошибок.

Описываемые методы предполагают: округление результатов измерительного преобразования физических величин в коды многоразрядных чисел, дробная часть которых состоит из 1-й, 2-х, 3-х, реже 4-х десятичных разрядов после запятой; вычисление и округление значений варианты до 2-х, 3-х или 4-х значащих цифр младших десятичных разрядов дробной части числа (например, при округлении до потолка  $[0,73684] \approx 0,737$ , при округлении до пола  $[4,3428] \approx 4,34$ ) с последующим анализом значений 2-х (реже 3-х и 4-х) значащих цифр после запятой. Отметим, что базовое значение варианты  $k_x$  вычисляется, как правило, с точностью, которая, после округления, равна или на 1-2 порядка превышает точность воспроизведения нормированной по значению физической величины.

Между собой графоаналитические методы отличаются видом анализируемой структуры УЧЗ, структурами УЧЗ варианты, константы или вариабельной константы, используемыми правилами округления данных, например, до числа, меньшего 5 (с отбрасыванием остатка — третьего и четвертого десятичных разрядов после запятой, которые меньше 5), большего 5 или равного 5 (с отбрасыванием остатка) [3].

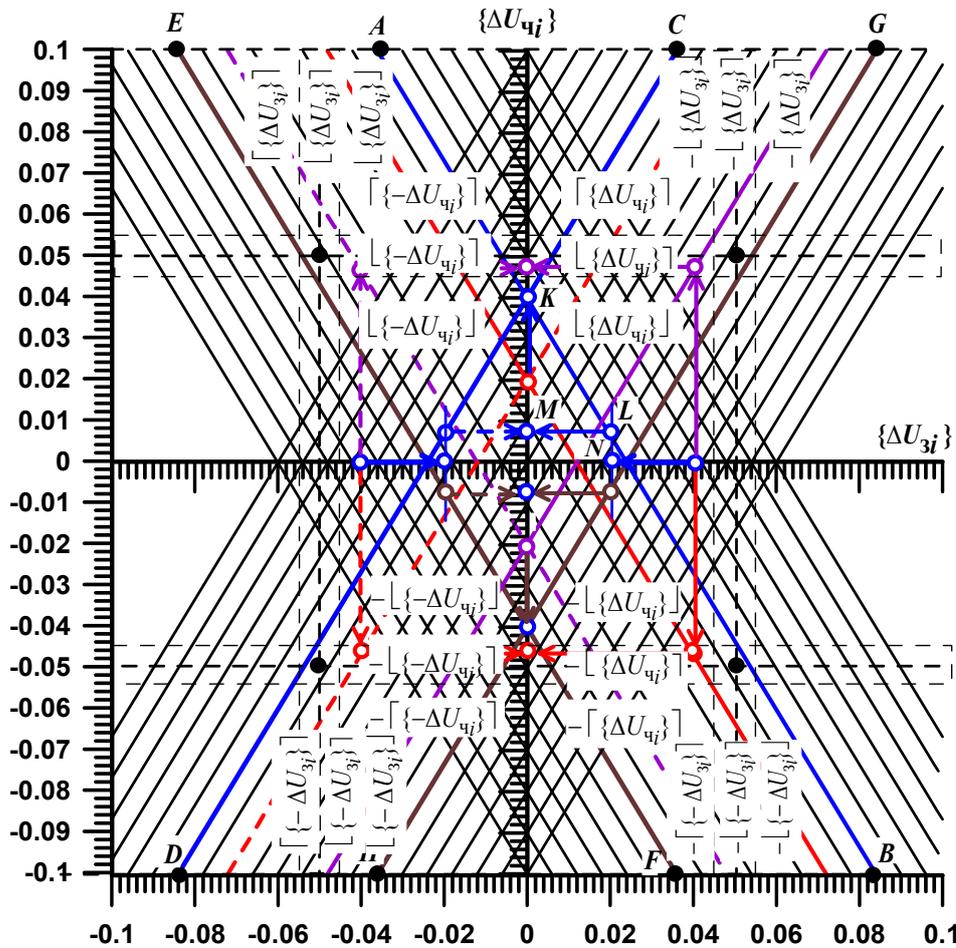


Рис. 1. Номограмма определения погрешностей обработки округленных данных при разных знаках дробных частей

**1-й графоаналитический метод**

Основан на комбинированном использовании графических представлений операции деления и аналитических расчетов с использованием данных, соответствующих 1-у квадранту прямоугольной системы координат.

Примем за аксиому то, что результаты измерительного преобразования физических величин, т.е. данные, являются случайными числами, округленными до определенного десятичного знака после запятой, например. до второго десятичного знака.

Предположим, что исследуемая структура УЧЗ и конечный результат имеют вид

$$\begin{aligned} \{x_j\} &= \{x_0\} \frac{\lceil \{U'_3(x_i + x_0)\} \rceil - \lceil \{U'_1(x_0)\} \rceil}{\lceil \{U'_3(x_i + x_0)\} \rceil - \lceil \{U'_2(x_i)\} \rceil} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U_{31}\} + \{\Delta U'_q\}}{\{\Delta U_{32}\} + \{\Delta U'_3\}} = \\ &= 17 \frac{35,71 - 20,38}{35,71 - 18,51} = 17 \frac{15 + 0,33}{17 + 0,2} = \lceil 15,1517 \rceil = 15,15 = 15 + 0,15 \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\{\Delta U_{31}\} = 15$  — значение целой части числителя;  $\{\Delta U_q\} = 0,33$  — значение дробной части числителя;  $\{\Delta U_{32}\} = 17$  — значение<sup>1</sup> целой части знаменателя;  $\{\Delta U_3\} = 0,2$  — значение дробной части знаменателя.

Требуется исключить погрешность результата обработки, которая в данном примере равна  $\{\Delta_{x1}\} = 0,15$  при значении искомой физической величины  $\{x_1\} = 15$ .

Рассматриваемый метод предполагает введение поправки  $\{\Delta U_{п1}\}$  в значение дробной части числителя УЧЗ (9) с целью исключения погрешности  $\Delta_{x1}$  результата обработки округленных данных.

Вначале определяется базовое значение варианты с точностью до третьего знака после запятой после округления до пола:

$$k_x = -\{\Delta U_{31}\} / \{\Delta U_{32}\} = \text{tg}(90^\circ + \alpha) = -\text{ctg} \alpha = -15/17 = \lceil -0,88235 \rceil \approx -0,882. \quad (10)$$

Для данного случая аддитивная и мультипликативная составляющие погрешности определения значения

<sup>1</sup> Здесь и ниже имеется ввиду «значение напряжения». Обозначение единицы физической величины опускается, т.к. речь идет только о значениях.

варианты, соответственно, равны:

$$\Delta k_{ха} = \frac{\{\Delta U_{ч}\}}{\{\Delta U_{32}\} + \{\Delta U_3\}} = \frac{0,33}{17 + 0,2} = \lfloor 0,01919 \rfloor = 0,019, \quad (11)$$

$$\Delta k_{хм} = -k_x \frac{\{\Delta U_3\}}{\{\Delta U_{32}\} + \{\Delta U_3\}} = -0,88235 \frac{0,2}{17 + 0,2} = -\lfloor 0,01026 \rfloor = -0,010. \quad (12)$$

С учетом (11) и (12), действительное значение варианты

$$k'_x = k_x + (\Delta k_{ха} - \Delta k_{хм}) = 0,88235 + (0,01919 - 0,01026) = \lfloor 0,89128 \rfloor = 0,891. \quad (13)$$

В аналитических выражениях (10) – (13) подчеркнуты цифры, которые отбрасываются при округлении значения варианты до требуемого знака.

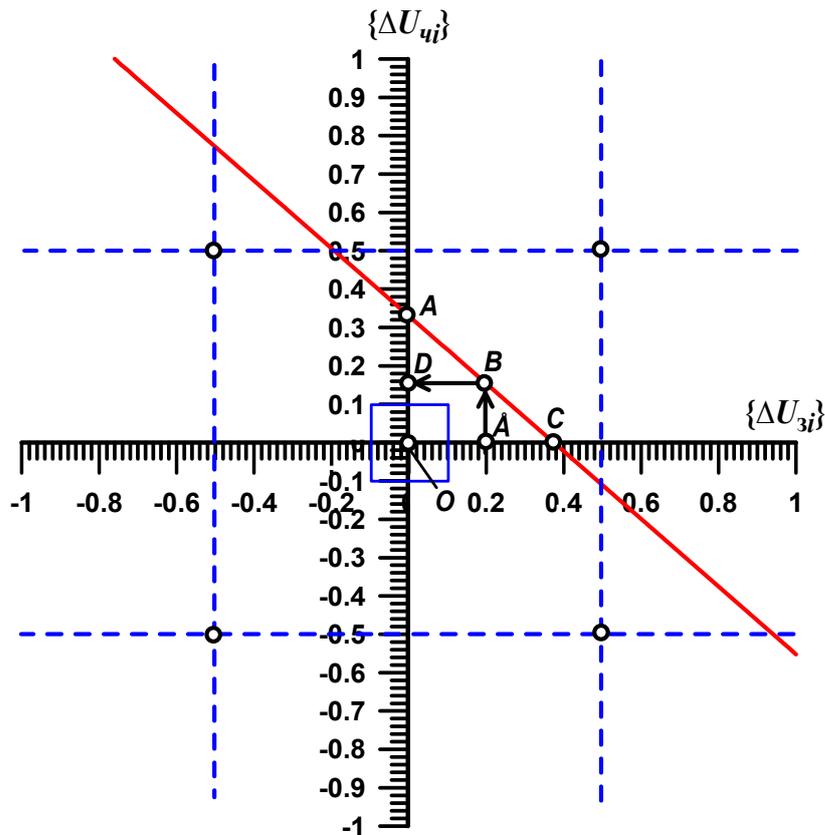


Рис. 2. Графические построения, поясняющие сущность первого графоаналитического метода

В 1-м квадранте прямоугольной системы координат (с заданными шкалами числовых значений дробных частей данных числителя и знаменателя УЧЗ варианты) построим графики при значении варианты  $k_x = -0,882$  (10) с дискретностью цифровых отметок по линейной шкале значений дробной части данных числителя равной 0,1 и ценой деления линейных шкал значений дробных частей данных числителя и знаменателя равной  $\{\Delta_d\} = 0,02$  (см. рис. 2, большие и маленькие риски на шкалах).

Прямая AC семейства графиков номограммы представляет собой исходную прямую, проходящую через точку A под углом  $\beta = 90^\circ + \alpha = -\text{arctg } k_x$ . Точка A соответствует на шкале ординат значению дробной части числителя, т.е.  $\{\Delta U_{ч}\} = 0,33$ . Через точку E, соответствующую дробной части знаменателя, т.е.  $\{\Delta U_3\} = 0,2$ , прямая AC не проходит (см. рис. 2, точки A и E).

Затем проводится перпендикуляр BE к оси абсцисс в точке E, соответствующей значению дробной части знаменателя, т.е. при  $\{\Delta U_3\} = 0,2$  (рис. 2), который пересечет прямую AC в точке B. Через точку B пересечения прямой BE с прямой AC проводится горизонтальная прямая, параллельная оси абсцисс, до пересечения с осью ординат. Точка пересечения D указывает на значение погрешности обработки данных по УЧЗ (1), т.е.  $\{\Delta_{x1}\} = 0,15$ . Данное значение и является значением поправки, т.е.  $\{\Delta U_{п}\} = \{\Delta_{x1}\} = 0,15$ . После нахождения значения поправки, результат избыточных измерений (9) уменьшают на полученное значение

поправки (погрешности), т.е.

$$x'_1 = \{x_1\} - \{\Delta_{x1}\} = \{x_1\} - \{\Delta U_{п}\} = 15,15 - 0,15 = 15. \quad (14)$$

Конечный результат не содержит погрешности обработки округленных данных.

Следовательно, 1-й графоаналитический метод обеспечивает повышение точности обработки данных по УЧЗ (14) путем определения погрешности  $\{\Delta_{x1}\} = 0,15$  за счет графических построений.

### 2-й графоаналитический метод

Данный метод уменьшает погрешность обработки округленных данных за счет введения поправки  $\{\Delta U_{п1}\}$  в дробную часть числителя УЧЗ (4). Сущность метода состоит в следующем.

Вначале определяется значение варианты с точностью до третьего знака после запятой после округления до пола согласно (6). Через точку  $A$ , соответствующую значению дробной части данных числителя УЧЗ (5), т.е.  $\{\Delta U_{ч}\} = 0,33$ , проводится прямая  $AH$  под углом  $\beta = 90^\circ + \alpha$  (см. рис. 3).

Затем прямую  $AH$  смещается вниз параллельно самой себе до отметки 0,2 на оси ординат. Это соответствует введению отрицательного значения поправки  $\{\Delta U_{п1}\}_1 = -0,13$ . В результате получают прямую  $EF$ , расположенную ниже прямой  $AH$  и пересекающую ось ординат в точке  $E$  под тем же углом  $\beta$ .

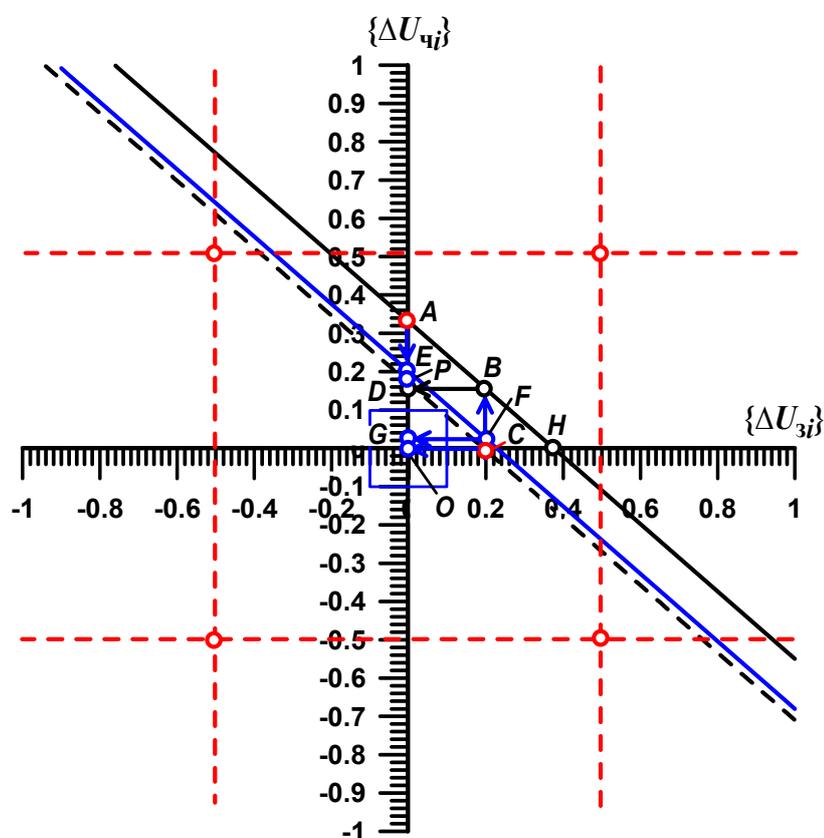


Рис. 3. Графические построения, поясняющие сущность второго графоаналитического метода

Аналитически первое значение поправки  $\{\Delta U_{п1}\}_1$  определяется как разность значений дробных частей числителя при двух положениях прямых, проходящих через точки  $A$  ( $\{\Delta U_{ч1}\}$ ) и  $E$  ( $\{\Delta U_{ч2}\}$ ):

$$\{\Delta U_{п1}\}_1 = \{\Delta U_{ч2}\} - \{\Delta U_{ч1}\} = 0,2 - 0,33 = -0,13. \quad (15)$$

Знак поправки (15) отрицательный, поскольку прямая  $AH$  была смещена вниз по оси ординат, т.е. в направлении, противоположном положительному направлению оси ординат.

Полученное значение поправки (15) вводится в значение дробной части числителя УЧЗ (1).

Перпендикуляр к оси абсцисс в точке  $C$  пересекает прямую  $EF$  в точке  $F$ . Через точку  $F$  пересечения прямой  $BC$  с прямой  $EF$  проводится горизонтальная прямая, параллельная оси абсцисс, до пересечения с осью ординат в точке  $G$ . Точка  $G$  указывает на значение погрешности  $\{\Delta_{x2}\} = 0,02$ , которая может быть достигнута при  $\{\Delta U_{п1}\}_1 = -0,13$  (15).

После подстановки значения поправки  $\{\Delta U_{п1}\}_1 = -0,13$  в УЧЗ (1) и обработки исходных данных,

получают значение искомой физической величины

$$\{x_{ik}\} = \{x_0\} \frac{[\{U'_3(x_i + x_0)\}] - [\{U'_1(x_0)\}] + \{\Delta U_{п1}\}_1}{[\{U'_3(x_i + x_0)\}] - [\{U'_2(x_i)\}]} = 17 \frac{15,33 - 0,13}{17,2} = 17 \frac{15,2}{17,2} = 15,0233 \approx 15,02. \quad (16)$$

Аналитически, при известных значениях дробных частей числителя и знаменателя УЧЗ (1), значение погрешности обработки данных может быть определено согласно уравнению погрешности

$$\Delta_{xk} = \Delta U_{ч} - k_x \Delta U_3, \quad (17)$$

полученному из  $\Delta ADB$ , т. к.  $tg(90^\circ + \alpha) = -ctg\alpha$ , из соотношения

$$k_{xч} = \{\Delta U_{ч}\} - \{\Delta U_{п1}\} / \{\Delta U_3\} \quad (18)$$

или согласно УЧЗ:

$$\{\Delta_{xk}\} = (\{\Delta U_{ч}\} - \{\Delta U_{п1}\}_1) - k_x \{\Delta U_3\} = (0,33 - 0,13) - 0,882 \cdot 0,2 = 0,0236 \approx 0,02. \quad (19)$$

При указанном значении поправки получают погрешность обработки  $\{\Delta_{x2}\} = 0,02$ , которая в 7 раз меньше значения погрешности обработки округленных данных до введения поправки ( $\{E_{kx}\} = 0,15/0,02 \approx 7$ ).

Описанный метод позволяет с помощью графических построений определить значение поправки  $\{\Delta U_{п1}\}_1$ , вводимой в дробную часть данных числителя УЧЗ, и соответствующее ей значение погрешности обработки.

### 3-й графоаналитический метод

Данный метод обеспечивает уменьшение погрешности обработки округленных данных за счет введения поправки  $\{\Delta U_{п1}\}$  в дробную часть числителя УЧЗ (1). Сущность метода состоит в следующем.

Аналогично первому, данный метод предусматривает не произвольное смещения вниз прямой  $AH$ , а смещение ее до положения прямой  $PC$ , пересекающей ось абсцисс в точках  $P$  и  $C$  (см. рис. 3), последняя из которых соответствует значению дробной части данных знаменателя, т.е.  $\{\Delta U_3\} = 0,2$ . Значение поправки  $\{\Delta U_{п1}\}_2$  определяется положением точки  $P$  на оси ординат или отрезком  $PO$ . Из графических построений получим значение поправки  $\{\Delta U_{п1}\}_2 = -0,18$ , т.к.  $PO = AO - AP$ . Ее знак отрицательный, поскольку прямая  $AH$  была смещена вниз, т.е. против положительного направления оси ординат. В то же время положение точки  $O$  характеризует значение погрешности обработки округленных данных по УЧЗ (1). Ввиду близости ее значения к нулю и трудности оценки, значение погрешности определяется аналитически по УЧЗ

$$\{\Delta_{x3}\} = (\{\Delta U_{ч}\} - \{\Delta U_{п1}\}_2) - k_x \{\Delta U_3\} = (0,33 - 0,18) - 0,882 \cdot 0,2 = [0,0026] \approx 0. \quad (20)$$

В данном случае погрешность (20) результата обработки будет в 57,69 раза меньше ( $E_{kx} = 57,69$ ) по сравнению с погрешностью результата (9), полученного без введения поправки в дробную часть числителя.

Следовательно, описанные графоаналитические методы обеспечивают уменьшение и даже исключение погрешностей машинной обработки округленных результатов измерительного преобразования рядов физических величин при (сверх)избыточных измерениях.

### 4-й графоаналитический метод

В данном методе предполагается определение значения поправки  $\{\Delta U_{п2}\}$  и введение ее в дробную часть данных знаменателя УЧЗ (1) при  $\{x_0\} = 17$ ,  $\{\Delta U_{31}\} = 15$ ,  $\{\Delta U_{ч}\} = 0,33$ ,  $\{\Delta U_{32}\} = 17$ ,  $\{\Delta U_3\} = 0,2$ .

Вначале по УЧЗ (6) вычисляется значение варианты  $k_x = \text{arccctg}(90^\circ + \alpha) = 15/17 = -0,882$  с точностью до третьего знака после запятой после округления до пола. Полученное значение варианты запоминается, как и все исходные данные УЧЗ.

Через точку  $A$ , соответствующую значению дробной части данных числителя УЧЗ (5), т.е.  $\{\Delta U_{ч}\} = 0,33$ , проводится прямая  $AH$  под углом  $\beta = 90^\circ + \alpha$  к оси абсцисс (см. рис. 3). Положение точки  $P$  на оси абсцисс отмечает значение дробной части  $\{\Delta U_3\}$  данных знаменателя. Обозначим через  $H$  точку пересечения прямой  $AH$  с осью абсцисс. Эта точка указывает на числовой шкале оси абсцисс числовое значение 0,37 длины отрезка  $OH$ . Обозначим его как  $\{\Delta U_3\}_p = 0,37$ .

Установлено, что для данного метода поправка  $\Delta U_{п2}$  дробной части знаменателя определяется как разность длин отрезков  $OH$  и  $OC$  на оси абсцисс (см. рис. 3). Как видно из графических построений, длина

отрезка  $OC$  равна 0,2, а  $OH$  — 0,37. Тогда искомая поправка

$$\{\Delta U_{п2}\} = \{\Delta U_3\}_p - \{\Delta U_3\} = 0,37 - 0,2 = 0,17. \quad (21)$$

Подставляя (21) в дробную часть УЧЗ (1), окончательно получим конституированное УЧЗ и результат обработки в виде:

$$\{x_{ик}\} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\}}{\{\Delta U'_{32}\} + \{\Delta U_{п2}\}} = 17 \frac{15,33}{17,2+0,17} = 17 \frac{15,33}{17,37} = 15,0034 = 15 + 0,0034 \approx 15. \quad (22)$$

В описанном методе погрешность  $\Delta_{x2} = 0,0034$  результата обработки данных в 44 раза меньше по сравнению с погрешностью  $\Delta_{x1} = 0,15$  результата, полученного в (9) без введения поправки в дробную часть числителя, т.е. эффективность обработки  $E_{кx} = \Delta_{x1} / \Delta_{x2} = 0,15 / 0,0034 \approx 44$ .

Следовательно, описанный графоаналитический метод обеспечивает существенное уменьшение погрешности обработки округленных данных за счет введения поправки в дробную часть данных знаменателя УЧЗ.

#### **Графоаналитические методы двух поправок**

Графоаналитический метод двух поправок имеет четыре разновидности:

а) графоаналитический метод, в котором значения поправок для дробных частей данных числителя и знаменателя УЧЗ определяются как по результатам графических построений, так и по результатам вычислений, в том числе и конечного результата измерений;

б) графоаналитический метод, согласно которого все значения поправок для дробных частей данных числителя и знаменателя УЧЗ определяются по результатам графических построений. Обработка данных осуществляется по конституированному УЧЗ вида

$$\{x_{ик}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} - \{\Delta U_{п1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} - \{\Delta U_{п2}\}} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + \overline{\{\Delta U'_4\}} - \{\Delta U_{п1}\}}{\{\Delta U'_{32}\} + \overline{\{\Delta U'_3\}} - \{\Delta U_{п2}\}}; \quad (23)$$

в) графоаналитический метод, согласно которого значение поправки  $\Delta U_{п1}$  для дробной части данных числителя УЧЗ устанавливается путем задания значения погрешности  $\Delta_{x2}$ , а значение поправки  $\Delta U_{п2}$  для дробной части данных знаменателя вычисляется после предварительного определения значения  $\{\Delta U_{ч2}\}$ ;

г) значение поправки  $\Delta U_{п1}$  для дробной части данных числителя вычисляется, а значение поправки  $\{\Delta U_{п2}\}$  для дробной части данных знаменателя УЧЗ задается по результатам смещения прямой  $AH$  на заданную величину  $\Delta U_{чi}$  и после определения значения погрешности  $\Delta_{x2}$ .

Рассмотрим эти методы.

#### **5-й графоаналитический метод** (первый методом двух поправок)

На рис. 4 приведены графические построения, поясняющие сущность первого метода двух поправок, т. е. метода определения и введения поправок в дробные части данных числителя и знаменателя варианты УЧЗ.

Предположим, что структура УЧЗ до введения поправок имеет вид с конечным результатом (см. [3], табл. 6, п.2):

$$\{x'_i\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + \overline{\{\Delta U'_4\}}}{\{\Delta U'_{32}\} + \overline{\{\Delta U'_3\}}} = 19 \frac{34,95 - 20,25}{34,95 - 15,50} = 19 \frac{14 + 0,7}{19 + 0,45} = 19 \frac{14,7}{19,45} = \overline{[14,3599]} = 14,36. \quad (24)$$

В приведенном примере получена погрешность результата обработки  $\{\Delta_{x1}\} = 14,36 - 14 = 0,36$  при значении искомой физической величины  $\{x_1\} = 14$ . Поставлена задача уменьшения погрешности обработки округленных результатов измерительного преобразования трех физических величин по УЧЗ (24) с определением поправок путем использования графических построений и аналитических расчетов.

Сущность метода двух поправок заключается в следующем. По значениям дробных частей данных числителя и знаменателя вычисляется базовое значение варианты

$$k_x = \text{ctg}(90^\circ + \alpha) = -\text{tg}\alpha = -\{\Delta U_{31}\} / \{\Delta U_{32}\} = -14/19 = \overline{[-0,73684]} \approx -0,737. \quad (25)$$

Как и в предыдущих методах, базовое значение варианты  $k_x$  определяется с точностью до третьего знака после запятой, как и точность воспроизведения нормированной по значению физической величины  $x_0$ . И только

после перемножения значения  $k_x$  на нормированное значение физической величины  $x_0$ , осуществляется округление полученного результата до требуемого десятичного знака после запятой.

Графики номограммы будем строить при  $k_x = -0,737$  и при дискретности цифровых отметок на вертикальной шкале значений дробной части числителя равной 0,10, и ценой деления шкал значений дробных частей числителя и знаменателя равной  $\{\Delta_d\} = 0,02$  (ввиду ограниченности пространства) (см. рис. 4).

Построим три графика номограммы с неравномерным удалением их друг от друга. Первая прямая  $AH$  проводится под углом  $\beta = \text{arcctg} k_x = 90^\circ + \alpha$  через точку  $A$ , соответствующую значению дробной части числителя варианты УЧЗ (24), т.е.  $\{\Delta U_{ч1}\} = 0,7$ . Вторая прямая  $PC$  проводится под тем же углом уже через точку  $C$ , соответствующую значению дробной части знаменателя варианты УЧЗ, т.е.  $\{\Delta U_{з1}\} = 0,45$ . Прямая  $EK$  проводится через точку  $E$ , соответствующую значению дробной части числителя, уменьшенного, например, на 0,2, т.е.  $\{\Delta U_{ч2}\} = \{\Delta U_{ч1}\} - 0,2 = 0,7 - 0,2 = 0,5$ .

Через точку  $C$  проводится прямая  $BC$  перпендикулярная оси абсцисс. Перпендикуляр  $BC$  пересечет прямую  $AH$  в точке  $B$ . Затем через точку  $B$  проводится прямая  $DB$ , параллельная оси абсцисс.

Точка  $D$  пересечения прямой  $BD$  с осью ординат характеризует значение погрешности обработки округленных данных без введения поправки. Точка  $D$  соответствует отметке со значением 0,37, представляющая собой значение погрешности  $\{\Delta_{x1}\} = \{\Delta_{x1}\} = 0,37$  (см. рис. 4, точку  $D$ ).

При необходимости значение погрешности  $\Delta_{x1}$  обработки округленных данных (без введения поправки) может быть уточнено путем вычисления его по УЧЗ

$$\{\Delta_{x1}\} = \{\Delta U_{ч1}\} - k_x \{\Delta U_{з1}\} = 0,7 - 0,737 \cdot 0,45 = \lceil 0,3682 \rceil = 0,37, \quad (26)$$

где  $\{\Delta U_{ч1}\}$  и  $\{\Delta U_{з1}\}$  — значения дробных частей данных числителя и знаменателя варианты.

Как видно из рис. 4, перпендикуляр  $BC$  пересекает прямую  $EK$  и в точке  $F$ . Соответствующая ей точка  $G$  с отметкой 0,17 на вертикальной шкале характеризует значение погрешности  $\{\Delta_{x2}\} = 0,17$ , которое может быть достигнуто при смещении прямой  $AH$  вниз параллельно самой себе на 0,5 единиц, т.е. до точки  $E$  (см. рис. 4, точку  $G$ ).

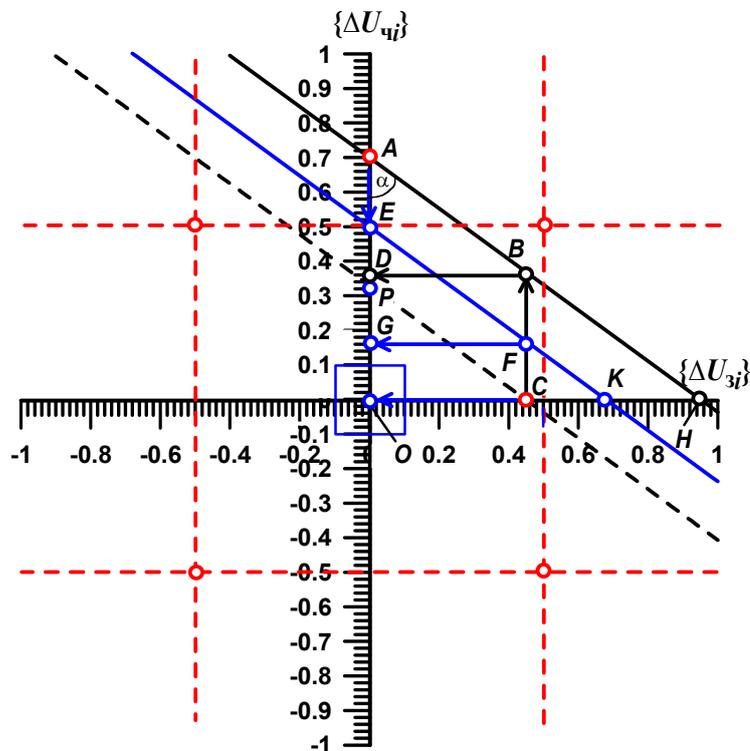


Рис. 4. Графические построения, поясняющие сущность метода введения двух поправок

Для перепроверки или уточнения расчетное значение погрешности  $\Delta_{x2}$  может быть определено из соотношения сторон треугольника  $FCK$  ( $FC = -\text{tg} \alpha \cdot OF$ ):

$$\{\Delta_{x2}\} = -\text{tg} \alpha \cdot \{\Delta U_{ч2}\} = -k_x \cdot \{\Delta U_{ч2}\} = -0,737 \cdot 0,23 = -0,17. \quad (27)$$

Поправка для дробной части числителя данных определяется как разность  $AG = GO - AO$   
 $\{\Delta U_{п1}\} = 0,17 - 0,7 = -0,53$ .

Из треугольника  $EKO$ , диагональю которого является прямая  $EK$  (см. рис. 4), определяется расчетное значение (индекс «р») дробной части знаменателя при  $\{\Delta U_{ч2}\} = -0,5$ . Значение  $\{\Delta U_{ч2}\}$  дробной части данных знаменателя, характеризующееся отрезком  $KO$  или положением точки  $K$  на горизонтальной шкале (оси абсцисс), соответствует точке пересечения прямой  $EK$  с осью абсцисс (см. рис. 4, точки  $K$  и  $O$ ) и определяется согласно УЧЗ

$$\{\Delta U_{ч3}\}_p = \{\Delta U_{ч3}\} = \{\Delta U_{ч2}\} / (-\text{tg } \alpha) = \{\Delta U_{ч2}\} / (-k_x) = 0,5 / (-0,737) = -0,6784 \approx -0,68. \quad (28)$$

Значение поправки  $\Delta U_{п2}$  ( $CK$ ) для дробной части данных знаменателя варианты УЧЗ, с учетом значения  $\{\Delta U_{ч3}\} = 0,45$  дробной части знаменателя варианты УЧЗ (24), равно

$$\{\Delta U_{п2}\} = \{\Delta U_{ч3}\} - \{\Delta U_{ч3}\}_p = 0,45 - 0,6784 = -0,2284. \quad (29)$$

В (29) знак минус поставлен в связи с перемещением прямой  $AK$  сверху вниз.  
 С учетом поправок, конституированное УЧЗ примет вид

$$\{x_{ик}\} = \{x_0\} \frac{\left[ \{U'_3(x_i + x_0)\} \right] - \left[ \{U'_1(x_0)\} \right] + \{\Delta U_{п1}\}}{\left[ \{U'_3(x_i + x_0)\} \right] - \left[ \{U'_2(x_i)\} \right] + \{\Delta U_{п2}\}} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + \left[ \{\Delta U'_4\} \right] + \{\Delta U_{п1}\}}{\{\Delta U'_{32}\} + \left[ \{\Delta U'_3\} \right] + \{\Delta U_{п2}\}}. \quad (30)$$

Подставляя в (30) исходные данные и значения поправок, получим результат обработки округленных данных с высокой точностью:

$$\{x_i\} = 19 \frac{14 + 0,7 - 0,53}{19 + 0,45 - 0,2284} = 19 \frac{14,17}{19,2216} = \lceil 14,0066 \rceil = 14,01. \quad (31)$$

Погрешность обработки округленных данных не превышает 0,0066 вместо 0,36 до введения поправок, что в 54 раза меньше исходного значения, т. е.  $E_{кx1} = 54,54$ .

Расчеты показали, что действительно необходимо округлять не промежуточные, а конечный результат. Если, например, округлить значение поправки (29) до  $-0,23$  и использовать это значение при расчетах в (31), то получим  $\{x_i\} = 19 \cdot (14,17/19,22) = \lceil 14,0078 \rceil = 14,01$  при эффективности  $\{E_{кx2}\} = 46,15$ , меньшей  $E_{кx1} = 54,54$ .

В целом, описанный метод обеспечивает решение поставленной задачи повышения точности обработки данных.

#### **6-й графоаналитический метод** (второй методом двух поправок)

Поставлена задача разработки графоаналитического метода уменьшения погрешности обработки округленных результатов измерительного преобразования трех физических величин по УЧЗ с преобладанием графических построений.

Сущность метода двух поправок заключается в следующем. Исходные данные анализируются по разрядности и числу достоверных цифр в полученных данных. Выделяется верная целая и сомнительная дробная части данных.

Предположим, что по результатам синтеза верных и сомнительных частей данных структура УЧЗ приняла следующий вид и результаты обработки:

$$\begin{aligned} \{x'_i\} &= \{x_0\} \frac{\left[ \{U'_3(x_i + x_0)\} \right] - \left[ \{U'_1(x_0)\} \right]}{\left[ \{U'_3(x_i + x_0)\} \right] - \left[ \{U'_2(x_i)\} \right]} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + \left[ \{\Delta U'_4\} \right]}{\{\Delta U'_{32}\} + \left[ \{\Delta U'_3\} \right]} = \\ &= 19 \frac{34,95 - 20,35}{34,95 - 15,60} = 19 \frac{14 + 0,6}{19 + 0,35} = 19 \frac{14,6}{19,35} = \lceil 14,3359 \rceil = 14,34. \end{aligned} \quad (32)$$

Графические построения, поясняющие сущность графоаналитического метода определения и введения поправок в дробные части данных числителя и знаменателя варианты УЧЗ, приведены на рис. 5.

По значениям дробных частей данных числителя и знаменателя вычисляется базовое значение варианты

$$k_x = \text{ctg}(90^\circ + \alpha) = -\text{tg } \alpha = -\{\Delta U_{31}\} / \{\Delta U_{32}\} = -14/19 = \lceil -0,73684 \rceil \approx -0,737 \quad (33)$$

с точностью до третьего знака после запятой (включительно).

Вначале проводится прямая  $AH$  под углом  $\beta = \text{arcctg } k_x = 90^\circ + \alpha$  через точку  $A$ , соответствующую значению дробной части числителя варианты УЧЗ (23-30), т.е.  $\{\Delta U_{ч}\} = 0,6$ .

Через точку  $C$ , соответствующую значению дробной части данных знаменателя, т.е.  $C [0,35; 0]$  или  $\{\Delta U_{ч}\} = 0,35$ ,

проводиться перпендикуляр  $BC$  к оси абсцисс (см. рис. 5, прямые  $BC$  и  $OH$ ). На прямой  $AH$  отмечается точка пересечения  $B$ , через которую проводится прямая  $DB$ , параллельная оси абсцисс.

Определяется значение погрешности  $\{\Delta_{x1}\} = 0,34$  обработки данных до введения поправок по точке  $D$  пересечения прямой  $DB$  с осью ординат (со шкалой  $OD$ ).

Произвольно задается значение первой поправки в диапазоне значений  $\{\Delta U_{п1}\} < \{\Delta U_{ч}\}$ , например,  $\{\Delta U_{п1}\} = 0,43$ . Согласно графическим построениям, приведенным на рис. 5, поправка  $\{\Delta U_{п1}\} = 0,6 - 0,17 = 0,43$  определяется как разность длин отрезков на оси ординат, т.е.  $GA = OA - OG$ .

Через точку  $G$ , соответствующую значению  $0,17$  интервала  $OG$ , проводится прямая  $GL$ , параллельная оси абсцисс. Отмечается точка  $F$  пересечения прямой  $GL$  с перпендикуляром  $BC$ . Через точку  $F$  проводится прямая  $EK$ , параллельная прямой  $AH$ . Точка  $K$  пересечения прямой  $EK$  с осью абсцисс соответствует отметке на шкале абсцисс, равной  $0,58$  (см. рис. 5).

Затем определяется значение второй поправки  $\{\Delta U_{п2}\}$ , которая равна половине длины отрезка  $CK$  (м. рис. 5). Она вычисляется как половина разности длин отрезков  $OK$  и  $OC$  на оси абсцисс, т.е.  $\{\Delta U_{п2}\} = CK / 2 = 0,5 \cdot (OK - OC) = 0,5(0,58 - 0,35) = 0,115$ .

Полученные в результате графических построений и отсчетов значений по шкалам осей ординат и абсцисс числовые значения поправок подставляются в конституированное УЧЗ (28). В результате обработки получают:

$$\begin{aligned} \{x_{ik}\} &= \{x_0\} \frac{[\{U'_3(x_i + x_0)\}] - [\{U'_1(x_0)\}] - \{\Delta U_{п1}\}}{[\{U'_3(x_i + x_0)\}] - [\{U'_2(x_i)\}] - \{\Delta U_{п2}\}} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + [\{\Delta U'_4\}] - \{\Delta U_{п1}\}}{\{\Delta U'_{32}\} + [\{\Delta U'_3\}] - \{\Delta U_{п2}\}} = \\ &= 19 \frac{34,95 - 20,35 - 0,43}{34,95 - 15,60 - 0,115} = 19 \frac{14 + 0,6 - 0,43}{19 + 0,35 - 0,115} = 19 \frac{14,17}{19,225} = [14,0042] = 14. \end{aligned} \quad (34)$$

Значение погрешности обработки округленных данных не превышает  $0,004$  вместо  $0,36$  до введения поправок, что в  $90$  раз меньше исходного значения, т.е. эффективность  $E_{кx} = 90$ .

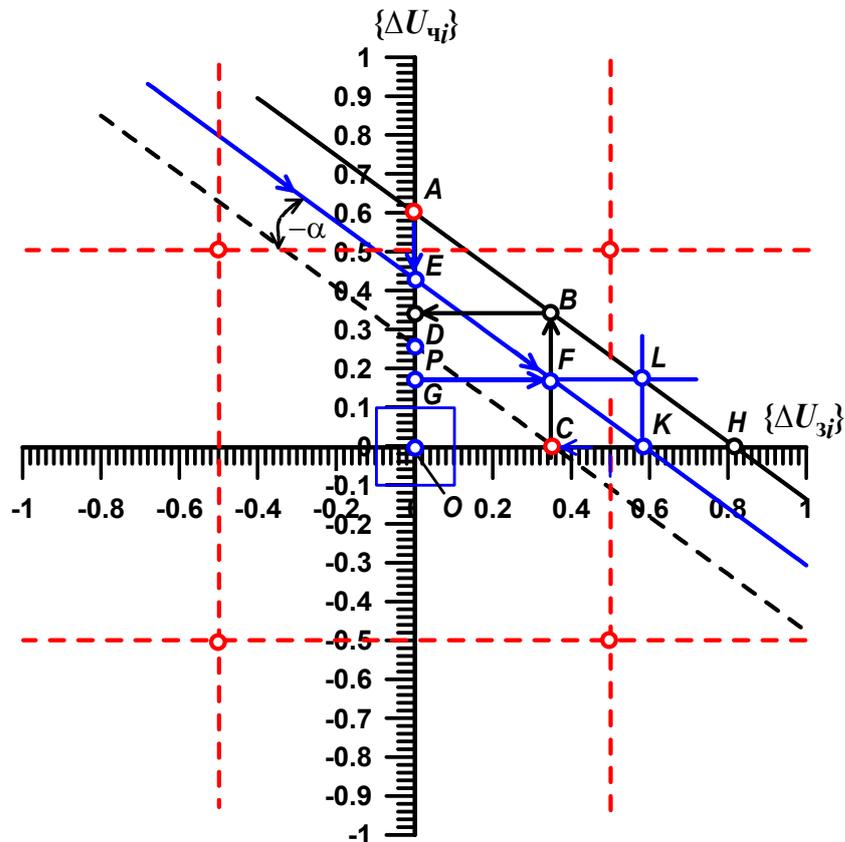


Рис. 5. Графические построения, поясняющие суть метода двух поправок

Следовательно, с помощью графических построений и определения значений поправок можно повысить эффективность обработки округленных данных в  $90$  раз.

**7-й графоаналитический метод** (третий методом двух поправок)

Поставлена задача разработки графоаналитического метода уменьшения погрешности обработки округленных результатов измерительного преобразования трех физических величин по УЧЗ (30). Для ее решения данным

методом, значение поправки  $\{\Delta U_{п1}\}$  для дробной части данных числителя УЧЗ (30) задается, а значение поправки  $\{\Delta U_{п2}\}$  для дробной части данных знаменателя варианты вычисляется. Графические построения, поясняющие сущность метода, приведены на рис. 5.

Сущность данного метода двух поправок заключается в следующем. Исходные данные анализируются по разрядности и количеству достоверных цифр. Выделяются верная целая и сомнительная дробная части данных.

Предположим, что по результатам синтеза верных и сомнительных частей данных структура УЧЗ приняла вид (32), где значение целой части числителя  $\{\Delta U_{31}\} = 14$ , дробной части числителя —  $\{\Delta U_{ч}\} = 0,6$ , целой части знаменателя —  $\{\Delta U_{32}\} = 19$ , значение дробной части знаменателя —  $\{\Delta U_{3}\} = 0,35$ . Вначале вычисляется значение варианты с точностью до третьего знака после запятой по УЧЗ (33), т.е.  $k_x = -0,737$ . Значения физической величины  $\{x_0\} = 19$  и варианты  $k_x = -0,737$  запоминаются.

Как и в предыдущем методе, сначала проводится прямая  $AH$  под углом  $\beta = \text{arccotg } k_x = 90^\circ + \alpha$  через точку  $A$ , соответствующую значению дробной части данных числителя варианты УЧЗ (39), т.е.  $\{\Delta U_{ч}\} = 0,6$  (см. рис. 5).

Затем проводится перпендикуляр  $BC$  к оси абсцисс через точку  $C$ , соответствующую значению дробной части данных знаменателя, т.е.  $C [0,35; 0]$  или  $\{\Delta U_{3}\} = 0,35$  (см. рис. 5, прямые  $BC$  и  $OH$ ). Через точку пересечения  $B$ , параллельно оси абсцисс проводится прямая  $DB$ . Точка  $D$  пересечения прямой  $DB$  с осью ординат (со шкалой  $OD$ ) соответствует значению погрешности  $\{\Delta_x\} = 0,34$  обработки данных до введения поправок. Значение погрешности  $\{\Delta_x\} = 0,34$  запоминается.

Задается произвольное значение первой поправки в диапазоне значений  $\{\Delta U_{п1}\} < \{\Delta U_{ч}\}$ , например,  $\{\Delta U_{п1}\} = 0,43$ . Согласно графическим построениям, приведенным на рис. 5, на числовой оси абсцисс отрезок  $GA = OA - OG$ , а, следовательно, значение первой поправки  $\{\Delta U_{п1}\} = 0,6 - 0,17 = 0,43$ .

Для дробной части данных знаменателя УЧЗ (34) значение второй поправки  $\{\Delta U_{п2}\}$  определяется по УЧЗ вида

$$\{\Delta U_{п2}\} = 0,5(\{\Delta U_{ч2}\} / k_x - \{\Delta U_{3}\}), \quad (35)$$

где  $\{\Delta U_{ч2}\} = OE = 0,43$ , а  $\{\Delta U_{3}\} = 0,35$ .

Подставляя в (35) исходные данные, получим значение второй поправки

$$\{\Delta U_{п2}\} = 0,5(0,43 / 0,737 - 0,35) = 0,5(0,58 - 0,35) = 0,115. \quad (36)$$

При данных значениях поправок результат обработки округленных данных

$$\begin{aligned} \{x_{ик}\} &= \{x_0\} \frac{[\{U'_3(x_i + x_0)\}] - [\{U'_1(x_0)\}] - \{\Delta U_{п1}\}}{[\{U'_3(x_i + x_0)\}] - [\{U'_2(x_i)\}] - \{\Delta U_{п2}\}} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + [\{\Delta U'_{ч}\}] - \{\Delta U_{п1}\}}{\{\Delta U'_{32}\} + [\{\Delta U'_{3}\}] - \{\Delta U_{п2}\}} = \\ &= 19 \frac{34,95 - 20,35 - 0,43}{34,95 - 15,60 - 0,115} = 19 \frac{14 + 0,6 - 0,43}{19 + 0,35 - 0,115} = 19 \frac{14,17}{19,235} = [13,9969] \approx 14 - 0,0031. \quad (37) \end{aligned}$$

Погрешность обработки равна  $-0,003$  вместо  $0,34$ , которая имеет место до введения поправок. Это в 113 раз меньше исходного значения. Эффективность обработки данных по УЧЗ (37) увеличивается в  $E_{кк} = 113$  раз.

#### 8-й графоаналитический метод (четвертый метод двух поправок)

Поставлена задача разработки графоаналитического метода уменьшения погрешности обработки округленных результатов измерительного преобразования трех физических величин по УЧЗ (30) путем задания значения поправки  $\{\Delta U_{п2}\}$  для дробной части данных знаменателя варианты и вычисления значения поправки  $\{\Delta U_{п1}\}$  для дробной части данных числителя УЧЗ варианты. При ее решении воспользуемся графическими построениями, приведенными на рис. 6.

Сущность метода поправок дробных частей данных числителя при заданном значении знаменателя варианты УЧЗ заключается в следующем.

Предположим, что структура УЧЗ до введения поправок имеет вид (32), а структура конституированного УЧЗ с введенными поправками, — вид (34). Для заданного УЧЗ (32) известны исходные данные:  $\{x_0\} = 19$ ,  $\{\Delta U_{31}\} = 14$ ,  $\{\Delta U_{ч}\} = 0,6$ ,  $\{\Delta U_{32}\} = 19$ ,  $\{\Delta U_{3}\} = 0,35$ .

Согласно данного метода, сначала проводится прямая  $AH$  под углом  $\beta = \text{arccotg } k_x = 90^\circ + \alpha$  через точку  $A$ , соответствующую значению дробной части данных числителя варианты УЧЗ (32-39), т.е.  $\{\Delta U_{ч}\} = 0,6$  (см. рис. 6).

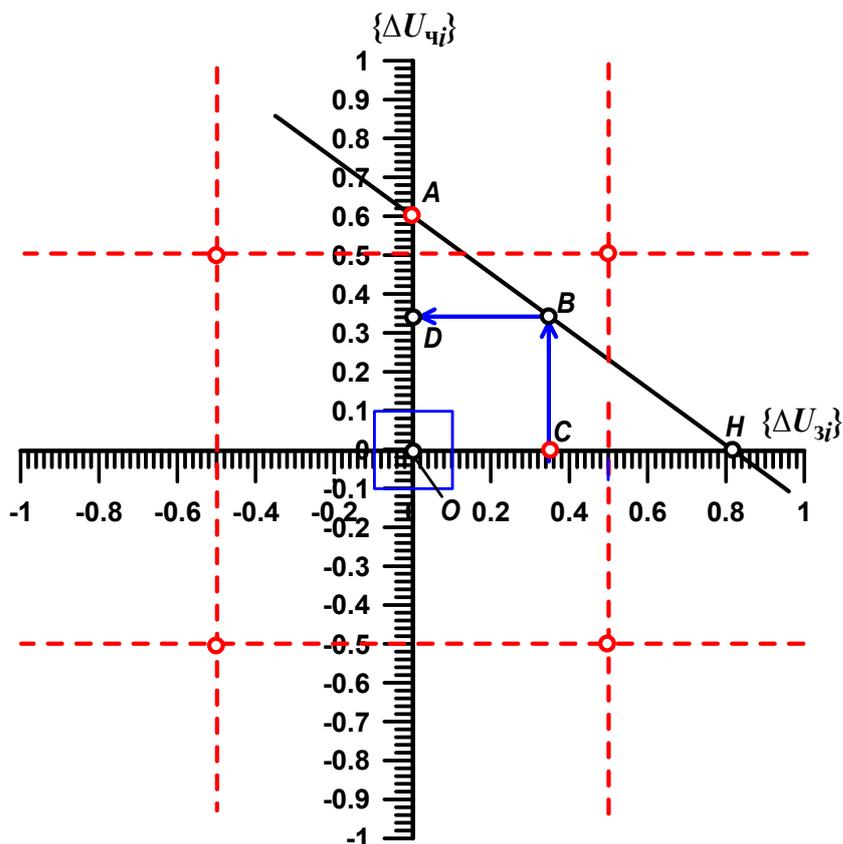


Рис. 6. Графические построения, поясняющие сущность второй разновидности метода двух поправок

Затем проводится перпендикуляр  $BC$  к оси абсцисс через точку  $C$ , соответствующую значению дробной части данных знаменателя, т.е.  $C [0,35; 0]$  или  $\{\Delta U_3\} = 0,35$  (см. рис. 6, прямые  $BC$  и  $OH$ ). Через точку пересечения  $B$  проводится прямая  $DB$  параллельная оси абсцисс. Точка  $D$  пересечения прямой  $DB$  с осью ординат (со шкалой  $OD$ ) соответствует значению погрешности  $\{\Delta_x\} = 0,34$  обработки данных до введения поправки.

Для простоты зададим значение поправки дробной части знаменателя равно, например, значению дробной части данных знаменателя со знаком минус, т. е.  $\{\Delta U_{п2}\} = CO = -\{\Delta U_3'\} = -0,35$ .

Согласно данного метода, значение поправки дробной части данных числителя вычисляется по конституированному УЧЗ

$$\{\Delta U_{п1}\} = \left( \left[ \{U_3'(x_i + x_0)\} \right] - \left[ \{U_2'(x_i)\} \right] + \{\Delta U_{п2}\} \right) \left( \frac{\left[ \{U_3'(x_i + x_0)\} \right] - \left[ \{U_1'(x_0)\} \right]}{\left[ \{U_3'(x_i + x_0)\} \right] - \left[ \{U_2'(x_i)\} \right]} - \frac{\Delta_x}{\{x_0\}} \right) - \left( \left[ \{U_3'(x_i + x_0)\} \right] - \left[ \{U_1'(x_0)\} \right] \right) \quad (38)$$

которое выведено из УЧЗ погрешности обработки

$$\{\Delta_{x1}\} = \{x_i'\} - \{x_{ик}\} = \{x_0\} \frac{\left[ \{U_3'(x_i + x_0)\} \right] - \left[ \{U_1'(x_0)\} \right]}{\left[ \{U_3'(x_i + x_0)\} \right] - \left[ \{U_2'(x_i)\} \right]} - \{x_0\} \frac{\left[ \{U_3'(x_i + x_0)\} \right] - \left[ \{U_1'(x_0)\} \right] + \{\Delta U_{п1}\}}{\left[ \{U_3'(x_i + x_0)\} \right] - \left[ \{U_2'(x_i)\} \right] + \{\Delta U_{п2}\}} \quad (39)$$

Подставим в (38) исходные данные и получим значение первой поправки

$$\begin{aligned} \{\Delta U_{п1}\} &= (34,95 - 15,60 - 0,35) \left( \frac{34,95 - 20,35}{34,95 - 15,60} - \frac{0,34}{19} \right) - (34,95 - 20,35) = \\ &= 19 \cdot (0,7545 - 0,0179) - 14,7 = 13,9955 - 14,6 = -0,6046 = -0,6. \end{aligned} \quad (40)$$

Определим значение искомой физической величины с учетом значений поправок  $\{\Delta U_{п1}\} = -0,6046$  и  $\{\Delta U_{п2}\} = -0,35$ :

$$\{x_{ик}\} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U_{з1}\} + \{\Delta U_{ч}\} + \{\Delta U_{п1}\}}{\{\Delta U_{з2}\} + \{\Delta U_{з}\} + \{\Delta U_{п2}\}} = 19 \frac{14 + 0,6 - 0,6046}{19 + 0,35 - 0,35} = 19 \frac{13,9954}{19} = 13,9954 \approx 14 - 0,0046. \quad (41)$$

В данном случае значения погрешности обработки округленных данных составило  $-0,0046$  вместо

0,34, что имела место до введения поправок. Следовательно, эффективность обработки округленных данных по конституированному УЧЗ (41) составила  $\{E_{kx}\} = |0,34 / (-0,0046)| \approx 75$  раз.

Данный метод интересен тем, что дает возможность исследовать влияние значения поправки дробной части данных знаменателя варианты на эффективность обработки данных по конституированному УЧЗ (41).

#### 9-й графоаналитический метод

Решается задача разработки графоаналитического метода уменьшения погрешности обработки округленных результатов измерительного преобразования трех физических величин. Для этого исходные результаты анализируются по разрядности и по количеству достоверных цифр в полученных данных. Выделяется верная целая и сомнительная дробная части данных. Записывается УЧЗ в виде:

$$\begin{aligned} \{x'_i\} &= \{x_0\} \left[ \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \right] = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + \lfloor \Delta U_{\text{ч}} \rfloor}{\{\Delta U'_{32}\} + \lfloor \Delta U_3 \rfloor} = \\ &= 10 \frac{\lfloor 135,713 \rfloor - \lfloor 120,051 \rfloor}{\lfloor 135,707 \rfloor - \lfloor 125,215 \rfloor} = 10 \frac{15 + \lfloor 0,662 \rfloor}{10 + \lfloor 0,492 \rfloor} = 14,9276 = 15 - 0,0724. \end{aligned} \quad (42)$$

Согласно (42), погрешность результата обработки  $\{\Delta_{x1}\} = -0,0724$  при значении искомой физической величины  $\{x_1\} = 15$ .

Графические построения, поясняющие сущность графоаналитического метода двух поправок, приведены на рис. 7. Решение осуществляется путем задания и введения поправки  $\{\Delta x_{\text{пi}}\}$  в результат обработки и вычисления значения поправки  $\{\Delta U_{\text{пi}}\}$  для дробной части данных числителя варианты УЧЗ (42).

В этом случае конституированное УЧЗ примет вид:

$$\{x'_i\} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + \lfloor \Delta U_{\text{ч}} \rfloor + \Delta U_{\text{пi}}}{\{\Delta U'_{32}\} + \lfloor \Delta U_3 \rfloor} + \Delta x_{\text{пi}}. \quad (43)$$

Вначале, как правило, вычисляется значение варианты с точностью до третьего знака после запятой по УЧЗ (6), т.е.  $k_x = -\text{ctg } \alpha = -\{\Delta U_{31}\} / \{\Delta U_{32}\} = -15 / 10 = -1,5$ . Значения физической величины  $\{x_0\} = 10$  и варианты  $k_x = -1,5$  запоминаются.

Затем задается поправка  $\{\Delta x_{\text{пi}}\}$  к результату обработки при условии, что ее значение находится в пределах  $0 \geq \{\Delta x_{\text{пi}}\} \geq -0,22$ . Предположим, что значение поправки  $\{\Delta x_{\text{пi}}\} = -0,22$ .

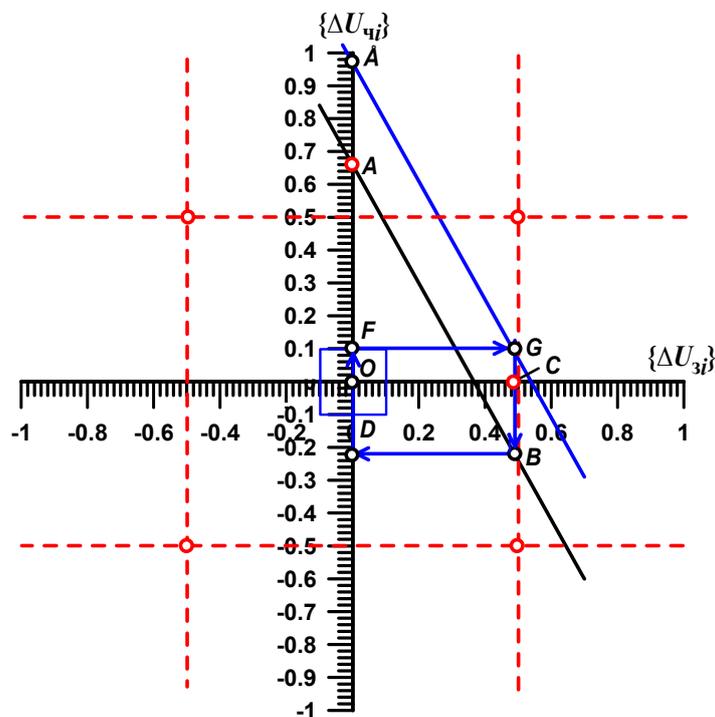


Рис. 7. Графические построения, поясняющие сущность графоаналитического метода двух поправок

Далее вычисляется значение поправки дробной части данных числителя УЧЗ (43) согласно

равенству:  $OA-OE = 0,97 - 0,66 = 0,31$ , т.е.  $\{\Delta U_{п1}\} = 0,97 - 0,66 = 0,31$ . Подставив полученные значения поправок в (43), получим, что

$$\{x_{ик}\} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + \lfloor \Delta U_{ч} \rfloor + \Delta U_{п1}}{\{\Delta U'_{32}\} + \lfloor \Delta U_3 \rfloor} + \Delta x_{пi} = 10 \frac{15 + \lfloor 0,662 \rfloor + 0,31}{10 + \lfloor 0,492 \rfloor} - 0,22 = \lfloor 15,0030 \rfloor = 15. \quad (44)$$

Если поправку  $\{\Delta U_{п1}\}$  вычислить при  $\{\Delta x_{пi}\} = -0,22$  по УЧЗ

$$\{\Delta U_{п1}\} = -\frac{\{\Delta x_{пi}\} + \{\Delta x_{пi}\}}{\{x_0\}} \left( \lfloor \{U'_3(x_i + x_0)\} \rfloor - \lfloor \{U'_2(x_i)\} \rfloor \right) = -(0,0724 + 0,22) \frac{10,492}{10} = -0,2924 \cdot 1,0492 = -0,3068 \approx 0,31, \quad (45)$$

а полученный результат подставить в конституированное УЧЗ (43), то получим:

$$\{x_{ик}\} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + \lfloor \Delta U_{ч} \rfloor + \Delta U_{п1}}{\{\Delta U'_{32}\} + \lfloor \Delta U_3 \rfloor} + \Delta x_{пi} = 10 \frac{15 + \lfloor 0,6620 \rfloor + 0,3068}{10 + \lfloor 0,4920 \rfloor} - 0,22 = \lfloor 14,9999 \rfloor = 15. \quad (46)$$

При  $\{\Delta x_{пi}\} = -0,1$

$$\{\Delta U_{п1}\} = -\frac{\{\Delta x_{пi}\} + \{\Delta x_{пi}\}}{\{x_0\}} \left( \lfloor \{U'_3(x_i + x_0)\} \rfloor - \lfloor \{U'_2(x_i)\} \rfloor \right) = -(0,0724 + 0,1) \frac{10,492}{10} = -0,1724 \cdot 1,0492 = -\lfloor 0,1809 \rfloor = -0,18, \quad (47)$$

а полученный результат обработки с использованием конституированного УЧЗ (43), будет достаточно высокоточным, т.е.

$$\{x_{ик}\} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + \lfloor \Delta U_{ч} \rfloor + \Delta U_{п1}}{\{\Delta U'_{32}\} + \lfloor \Delta U_3 \rfloor} + \Delta x_{пi} = 10 \frac{15 + \lfloor 0,6620 \rfloor + 0,1809}{10 + \lfloor 0,4920 \rfloor} - 0,1 = \lfloor 14,9999 \rfloor = 15. \quad (48)$$

При графоаналитическом определении значения первой поправки  $\{\Delta U_{п1}\}$  (45) эффективность обработки данных составила 24 раза, т.е.  $\{E_{кx}\} = \lfloor -0,0724 / 0,0030 \rfloor = 24$ . Два других примера с аналитическим расчетом значения первой поправки  $\Delta U_{п1}$  показали еще более высокую эффективность.

Следовательно, описанный метод повышает эффективность обработки округленных данных на 1-2 порядка. Сложность состоит в правильном выделении целой (верной) и дробной (сомнительной) частей данных числителя и знаменателя УЧЗ.

#### 10-й графоаналитический метод

В основу метода двух поправок, — введение поправок в дробную часть данных знаменателя и в варианту в целом, положено использование конституированного УЧЗ вида

$$\{\Delta x_{пi}\} = \{x_0\} \frac{\lfloor \{U'_3(x_i + x_0)\} \rfloor - \lfloor \{U'_1(x_0)\} \rfloor}{\lfloor \{U'_3(x_i + x_0)\} \rfloor - \lfloor \{U'_2(x_i)\} \rfloor} - \{x_0\} \frac{\left( \lfloor \{U'_3(x_i + x_0)\} \rfloor - \lfloor \{U'_1(x_0)\} \rfloor \right)}{\lfloor \{U'_3(x_i + x_0)\} \rfloor - \lfloor \{U'_2(x_i)\} \rfloor + \{\Delta U_{п2}\}} - \{\Delta x_{п1}\}. \quad (49)$$

Поставлена задача разработать графоаналитический метод уменьшения погрешности обработки округленных данных. Как и в предыдущих методах, исходные данные анализируются по разрядности и числу достоверных цифр. По результатам анализа выделяется верная (целая) и сомнительная (дробная) части данных. Погрешность результата обработки  $\{\Delta x_{п1}\} = -0,0724$  при значении искомой физической величины  $\{x_1\} = 15$  (42).

Графические построения, поясняющие сущность данного графоаналитического метода, приведены на рис. 7. Решение поставленной задачи осуществляется путем задания и введения поправки  $\{\Delta x_{пi}\}$  в результат обработки и вычисления значения поправки  $\{\Delta U_{п2}\}$  для дробной части данных знаменателя варианты УЧЗ (42).

Как и в предыдущем, в данном методе конституированное УЧЗ примет вид:

$$\{x_i\} = \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + \lfloor \Delta U_{ч} \rfloor}{\{\Delta U'_{32}\} + \lfloor \Delta U_3 \rfloor + \{\Delta U_{п2}\}} + \{\Delta x_{пi}\}. \quad (50)$$

Приведем к общему знаменателю и представим УЧЗ (50) в виде суммы результата и погрешности обработки:

$$\begin{aligned} \{x_{ik}\} &= \{x_0\} \frac{\left[ \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} + \{\Delta x_{pi}\} \left[ \left( \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \right) + \{\Delta U_{n2}\} \right] \right]}{\left[ \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} + \{\Delta U_{n2}\} \right]} = \\ &= \{x_0\} \frac{\left[ \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \right]}{\left[ \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} + \{\Delta U_{n2}\} \right]} + \frac{\{\Delta x_{pi}\} \left[ \left( \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \right) + \{\Delta U_{n2}\} \right]}{\left[ \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} + \{\Delta U_{n2}\} \right]} \end{aligned} \quad (51)$$

Выведем УЧЗ второй поправки  $\Delta U_{n2}$ . Для этого из УЧЗ (1) без поправок вычтем УЧЗ (51) с поправками, а полученный результат приравняем к значению  $\{\Delta x_{i1}\}$  погрешности обработки. В результате получим:

$$\{\Delta x_{i1}\} = \{x'_i\} - \{x_{ik}\} = \{x_0\} \frac{\left[ \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \right]}{\left[ \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \right]} - \{x_0\} \frac{\left[ \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \right]}{\left[ \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} + \{\Delta U_{n2}\} \right]} - \{\Delta x_{pi}\}. \quad (52)$$

Решая равенство (52) относительно  $\{\Delta U_{n2}\}$ , получим УЧЗ для второй поправки в виде:

$$\{\Delta U_{n2}\} = \frac{\left[ \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \right]}{\left[ \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \right] - \frac{\{\Delta x_{pi}\} - \{\Delta x_{i1}\}}{\{x_0\}}} - \left( \left[ \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \right] \right). \quad (53)$$

При  $\{\Delta x_{pi}\} = 0,22$  и  $\{\Delta x_{i1}\} = 0,07$  вторая поправка равна

$$\begin{aligned} \{\Delta U_{n2}\} &= \frac{\left[ \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \right]}{\left[ \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \right] - \frac{\{\Delta x_{pi}\} - \{\Delta x_{i1}\}}{\{x_0\}}} - \left( \left[ \overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \right] \right) = \\ &= \frac{15,66}{\frac{15,66}{10,49} - \frac{0,22 - 0,07}{10}} - 10,49 = \frac{15,66}{1,4778} - 10,49 = 10,5968 - 10,49 = 0,1068. \end{aligned} \quad (54)$$

Подставив исходные заданные и расчетные значения поправок в конституированное УЧЗ (50), получим результат обработки в виде

$$\begin{aligned} \{x_i\} &= \{x_0\} \frac{\{\Delta U'_{31}\} + \lfloor \Delta U_{\text{ч}} \rfloor}{\{\Delta U'_{32}\} + \lfloor \Delta U_{\text{с}} \rfloor + \Delta U_{n2}} + \Delta x_{pi} = 10 \frac{15 + \lfloor 0,6620 \rfloor}{10 + \lfloor 0,4920 \rfloor + \lfloor 0,1068 \rfloor} + 0,22 = \\ &= 10 \frac{15,6620}{10,5988} + 0,22 = 14,9971 = 15 - 0,0029. \end{aligned} \quad (55)$$

Следовательно, описанный графоаналитический метод обеспечивает повышение эффективности обработки данных в  $E_{kx} = 0,07 / 0,0029 \approx 24$  раза.

### 11. Графоаналитические методы трех поправок

Теоретически эти методы предполагают перебор разных вариантов определения и введения трех поправок в дробные части данных числителя, знаменателя и в варианте в целом. Возможны разные подходы, связанные с заданием одной и вычислением двух других поправок и т.д. Из-за громоздкости вычислений они применяются редко.

Из графоаналитических методов трех поправок выделим три разновидности методов решения метрологической задачи повышения точности обработки округленных данных:

1) метод, в основу которого положено вычисление значения поправки  $\{\Delta x_{pi}\}$  при значениях поправок  $\{\Delta U_{n1}\}$  и  $\{\Delta U_{n2}\}$ , определенных в результате графических построений;

2) метод, в основу которого положено вычисление значения поправки  $\{\Delta U_{n1}\}$  при значении поправки  $\{\Delta U_{n2}\}$ , определенной в результате графических построений и при заданном значении поправки  $\{\Delta x_{pi}\}$ ;

3) метод, в основу которого положено вычисление значения поправки  $\{\Delta U_{n2}\}$  при значении поправки  $\{\Delta U_{n1}\}$ , определенной в результате графических построений, и при заданном значении поправки  $\{\Delta x_{pi}\}$ .

Таким образом, получило развитие новое направление в решении проблемы повышения точности обработки округленных данных при (сверх)избыточных измерениях.

### Выводы

Констатируется, что все многообразие методов повышения точности обработки данных можно разделить на: графоаналитические, аналитические, эвристические, аналитико-эвристические и другие методы.

Показано, что для методов (сверх)избыточных измерений возможно использование семи видов поправок, для определения и введения каждой из которой существует соответствующий графоаналитический метод.

Графоаналитические методы с использованием номограмм интересны тем, что по выделенным из исходных данных числителя и знаменателя значениям целых и дробных частей можно определить значение погрешности, вносимой дробной частью данных в результат их обработки по соответствующему УЧЗ.

Графоаналитические методы основаны на комбинированном использовании графических представлений операции деления и аналитических расчетов данных, соответствующих 1-у — 4-у квадрантам прямоугольной системы координат.

Особенностью использования номограмм является то, что каждое графическое представление изображает заданную область изменения погрешности обработки данных, причем каждое значений погрешности в этой области изображается на номограмме определённой точкой. Изображения значений переменных, т.е. сомнительные цифры дробных частей данных числителя и знаменателя, связанные функциональной зависимостью, находятся на номограмме в определённом соответствии, общем для номограмм одного и того же типа.

Приведены аналитические выражения семи разновидностей конституированных УЧЗ, связанных с той или иной поправкой.

Решена задача разработки графоаналитических методов уменьшения погрешности обработки округленных результатов измерительного преобразования трех физических величин по УЧЗ путем задания одних значений поправок для дробной части данных знаменателя (числителя, числителя и знаменателя) варианты и вычисления значения других поправок для дробной части данных числителя (знаменателя или общей поправки значения варианты).

Предложены и описана сущность графоаналитических методов одной, двух и трех поправок. Наиболее простыми в реализации являются методы одной поправки.

Описанные графоаналитические методы обеспечивают уменьшение и даже исключение погрешностей машинной обработки округленных результатов измерительного преобразования рядов физических величин при (сверх)избыточных измерениях.

Положено начало развития нового направления в решении проблемы повышения точности обработки округленных данных при избыточных и сверхизбыточных измерениях. Оно, естественно, требует дальнейшего развития с использованием других видов уравнений (сверх)избыточных измерений при нелинейных функциях преобразования измерительного канала.

Полученные знания обогатили теорию структурного анализа новыми графоаналитическими методами повышения точности обработки округленных данных.

### Литература

1. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология: Теория структурного анализа уравнений избыточных и сверхизбыточных измерений. Сообщение 3 / В.Т.Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2016. — №2. — С. 7 – 26.

2. Номография Режим доступа: [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_mathematics/3504/%D0%9D%D0%9E%D0%9C%D0%9E%D0%93%D0%A0%D0%90%D0%A4%D0%98%D0%AF](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_mathematics/3504/%D0%9D%D0%9E%D0%9C%D0%9E%D0%93%D0%A0%D0%90%D0%A4%D0%98%D0%AF).

3. Стандарт СЭВ 543-77. Числа. Правила записи и округления. Режим доступа: [http://www.opengost.ru/iso/07\\_gosty\\_iso/07020\\_gost\\_iso/2676-st-sev-543-77-chisla.-pravila-zapisi-i-okrugleniya.html](http://www.opengost.ru/iso/07_gosty_iso/07020_gost_iso/2676-st-sev-543-77-chisla.-pravila-zapisi-i-okrugleniya.html).

### References

1. Kondratov V.T. Fundamentalnaya metrologiya: Teoriya strukturnogo analiza ueavnenij izbytochnykh i sverkhizbytochnykh izmerenij. Soobschenie 3 / V.T.Kondratov // Vymiryuvalna ta obchislyuvalna telhnika v tekhnologichnykh prozesakh. — 2016. — №2. — S. 7 – 26.

2. Nomografiya. Rezhim dostupa: [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_mathematics/3504/%D0%9D%D0%9E%D0%9C%D0%9E%D0%93%D0%A0%D0%90%D0%A4%D0%98%D0%AF](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_mathematics/3504/%D0%9D%D0%9E%D0%9C%D0%9E%D0%93%D0%A0%D0%90%D0%A4%D0%98%D0%AF).

3. Standart SEV 543-77. Chisla. Pravila zapisi i okrugleniya. Rezhim dostupa: [http://www.opengost.ru/iso/07\\_gosty\\_iso/07020\\_gost\\_iso/2676-st-sev-543-77-chisla.-pravila-zapisi-i-okrugleniya.html](http://www.opengost.ru/iso/07_gosty_iso/07020_gost_iso/2676-st-sev-543-77-chisla.-pravila-zapisi-i-okrugleniya.html).

Рецензія/Peer review : 11.3.2017 р.

Надрукована/Printed :26.6.2017 р.

Стаття рецензована редакційною колегією