

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 3**

*В Сообщении 3 дальнейшее развитие получила теория и методы структурного анализа уравнений избыточных и сверхизбыточных измерений, направленное на повышение точности машинной обработки данных.*

*Философские аспекты теории структурного анализа обогащены новыми утверждениями и определениями.*

*Рассмотрены задачи метрологического обеспечения процедуры обработки данных, причины появления погрешностей, методы декомпозиции структур уравнений (сверх)избыточных измерений, направленные на повышение точности.*

*Впервые разработаны и приведены 16 разновидностей уравнений числовых значений результатов измерительного преобразования рядов физических величин, округленных до пола, до потолка и до половины единицы последнего сохраняемого разряда.*

*Предложено семь способов введения поправок для каждого из 16-ти уравнений числовых значений округленных данных.*

*Показана возможность получения 112 пар способов повышения точности обработки данных по уравнениям числовых значений.*

*Работа представляет интерес для ученых-метрологов, специалистов, магистров и аспирантов, изучающих методы избыточных и сверхизбыточных измерений физических величин, пути и методы повышения точности машинной обработки данных.*

*Ключевые слова: округление до пола, до потолка, конституирование, структурный анализ, уравнения (сверх)избыточных измерений.*

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 3**

*Abstract — In the message 3 further development was received by the theory and methods of the structural analysis of the equations of the redundant and super-redundant measurements, directed on increase of accuracy of computing data processing.*

*Philosophical aspects of the theory of the structural analysis are enriched by new statements and definitions.*

*Problems of metrological maintenance of procedure of data processing, the reason of occurrence of errors, methods of decomposition of structures of the equations (super)redundant measurements, directed on accuracy increase are considered.*

*For the first time 16 versions of the equations of numerical values of results of measuring transformation of numbers of the physical quantities approximated to a floor, to a ceiling and to half of the last unit of the stored discharge are developed and resulted.*

*For the first time 16 versions of the equations of numerical values of results of measuring transformation of numbers of the physical sizes approximated to a floor, to a ceiling and to half of unit of the younger category are developed and resulted.*

*It is offered seven ways of introduction of amendments for each of 16 equations of numerical values of the rounded data.*

*It is offered seven ways of introduction of amendments for 16 equations of numerical values of the approximated data everyone them.*

*Possibility of reception more than hundred pairs ways of increase of accuracy of data processing on the equations of numerical values is shown.*

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

*Keywords: a rounding off to a floor and-or to a ceiling, institutionalization, the structural analysis, the equations (super)redundant measurements.*

**Введение**

В сообщении 2 [1] описаны философские аспекты теории структурного анализа уравнений (сверх)избыточных измерений: законы, научные принципы и категории. Показано, что структуру уравнений (сверх)избыточных измерений (УСИИ) всегда можно рассматривать как состоящую из функционально независимых друг от друга, но закономерно связанных между собой объединений преобразованных и нормированных по значению физических величин, констант и коэффициентов пропорциональности, составляющих модифицированные УСИИ или уравнения числовых значений (УЧЗ). В сообщении 3 [2] рассмотрены виды и типы структур УСИИ, их элементы и показатели, в том числе и показатели модифицированных и конституированных структур УСИИ, процедура структурного анализа, его особенности, вопросы декомпозиции структур УСИИ, а также методы декомпозиции, направленные на повышения точности и оперативности машинной обработки данных.

*Объектом исследований* является свойства и характеристики исходной и модифицированной структур УСИИ

*Предметом исследований* являются: пути и методы повышения точности вычислительной обработки результатов измерительного преобразования рядов физических величин.

*Целью работы* является разработка, анализ и развитие методов повышения точности и соответствующих

конституированных УЧЗ, использующих результаты измерительного преобразования рядов физических величин, округленные до пола, до потолка и до половины единицы последнего сохраняемого разряда.

### Результаты исследований

В конце пятидесятих годов прошлого столетия, при решении задач машинной обработки результатов измерений параметров траектории движения спутника Земли, ученые столкнулись с вычислительными трудностями. Их исследования показали, что при увеличении числа измерений, обусловленность матрицы нормальных уравнений величин ухудшается по причине нарушения симметрии обратной матрицы при появлении вычислительных погрешностей. Дело в том, что вычислительные погрешности нарушают симметрию обратной матрицы, что приводит к недопустимому увеличению погрешности определения искомых параметров [3]. В то же время, при ручных вычислениях эта проблема либо не возникала, ввиду не очень большого числа доступных измерений, либо исключалась путем выполнения на бумаге вычислений с нужным большим числом значащих цифр. Кроме того, в измерениях присутствовали погрешности, обусловленные временем их выполнения.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1) (сверх)избыточные измерения и соответствующие им структуры уравнений избыточных измерений должны учитывать время проведения однократных и многократных измерительных преобразований рядов физических величин и циклов измерений в целом с целью уменьшения или даже исключения влияния на конечный результат случайных погрешностей, носящих нестационарный характер. Желательно каждый результат измерительного преобразования рядов физических величин соотносить или «привязывать» к соответствующему моменту времени, а обрабатывать следует те группы результатов, которые соответствуют циклу измерений;

2) повышение точности вычислительной обработки показателей объединений модифицированного УСИИ достигается, если значения констант метода априори определяются при ручных вычислениях (или с использованием многоразрядного калькулятора) и записываются в память микроконвертора с нужным числом значащих цифр, т.е. с точностью, необходимой для машинной обработки;

3) для повышения точности машинных вычислений вариант метода и установления их взаимосвязей с другими приближенными значениями показателей модифицированного УСИИ, следует применить специальные методы и алгоритмы обработки полученных данных. По большому счету должны учитываться погрешности и правила округления всех используемых данных.

### 1. Методы округления

При использовании микропроцессора или компьютера промежуточные округления в научно-технических приложениях чаще всего теряют смысл, поскольку округляется только конечный результат. Однако это справедливо при проведении прямых измерений. При косвенных и при избыточных измерениях результат получают по уравнениям измерений, представляющим собой некоторую совокупность математических операций над результатами измерений или измерительного преобразования физических нескольких физических величин.

В этой связи, результаты измерительного преобразования физических величин, осуществляемые с помощью АЦП, необходимо получать с погрешностью в 5 – 10 раз меньшей, чем требуемая погрешность конечного результата измерений. При этом округление этих результатов должно осуществляться до заданного числа знаков после запятой.

Рассмотрим методы округления, используемые в метрологии.

#### Округление к ближайшему целому

Это наиболее часто используемое округление, при котором результат измерительного преобразования или вычисления округляется до целого, модуль разности с которым у этого числа минимален [4]. При округлении числа в десятичной системе правило может быть сформулировано следующим образом:

если  $N + 1$  цифра результата измерительного преобразования  $< 5$ , то  $N$ -я цифра сохраняется, а  $N + 1$ -я и все последующие обнуляются;

для специального случая, когда  $N + 1$ -я отбрасываемая цифра равна 5, и за ней нет значащих цифр (или стоят одни нули), то последняя оставляемая цифра увеличивается на единицу, когда она нечетная, и остается неизменной, когда она четная. *Например:* 0.875 (округлить до сотых)  $\approx$  0.88; 0.5450 (округлить до сотых)  $\approx$  0.54;

если  $N + 1$  цифра  $\geq 5$ , то  $N$ -я цифра увеличивается на единицу, а  $N + 1$ -я и все последующие обнуляются. *Например:* 21,9  $\rightarrow$  22;  $-0,7 \rightarrow -1$ ;  $-1,2 \rightarrow -1$ ; 3,5  $\rightarrow$  4.

При таком округлении максимальная дополнительная абсолютная погрешность (*погрешность округления*) составляет  $\pm 0,5$  единицы последнего сохраняемого разряда. Такое значение погрешности округления не всегда устраивает разработчиков средств измерений.

Из второго правила выделим частный случай (новое правило) в следующей интерпретации:

если  $N + 1$ -я отбрасываемая цифра = 5 и за ней нет значащих цифр (или стоят одни нули), то последняя оставляемая цифра  $N$ , равная 5-и, не увеличивается на единицу. *Например:* 0,755 (округлить до сотых)  $\approx$  0,75; 0,3550 (округлить до сотых)  $\approx$  0,35. В этом случае погрешность округления будет отрицательным числом.

Из рассмотрения мы исключаем следующие виды округлений 0,5 к ближайшему целому: *математическое округление*, т.е. округление, осуществляемое всегда в большую по модулю сторону (предыдущий разряд всегда увеличивается на единицу); *банковское округление*, т.е. округление к ближайшему четному (например, 3,5  $\rightarrow$  3, 4,5  $\rightarrow$  5); *случайное округление*, т.е. округление в меньшую или большую сторону в случайном порядке, но с равной вероятностью, а также *чередующееся округление*, когда округление осуществляется в меньшую или большую сторону поочередно. Напомним, что недостатком математического округления

является накопление погрешности округления при округлении большого числа данных.

Определенный научный интерес представляют способы округления, описанные в работе [5].

### 2. Способы округления чисел (числовых значений)

Изложим всевозможные способы округления чисел по данным работы [5], а также приведем соответствующие примеры.

Существует несколько способов округления чисел вверх до ближайшего целого:

- а) округление числа 30,3 до ближайшего целого, — 30,3 → 31;
- б) округление числа -7,9 вверх до ближайшего целого, — -7,9 → -8;
- в) округление числа 13,5484 вверх до двух десятичных разрядов, — 13,5484 → 13,55;
- г) округление числа 5,25 вверх до ближайшего четного целого, — 5,25 → 6;
- д) округление числа 30,3 вверх до ближайшего нечетного целого, — 30,3 → 31.

#### Округление числа вниз:

- а) округление числа 30,3 вниз до ближайшего целого, — 30,3 → 31;
- б) округление числа -7,9 вниз, — -7,9 → -7;
- в) округление числа вниз до второго знака после запятой, — 13,5484 → 13,54.

#### Округление числа до ближайшего:

- а) округление числа 30,3 вниз, так как дробная часть меньше 0,5, — 30,3 → 30;
- б) округление числа 7,9 вверх, так как дробная часть больше 0,5, — 7,9 → 8;
- в) округление числа -7,9 вниз, так как дробная часть меньше 0,5, — -7,9 → -8;

#### Округление числа до указанного числа знаков после запятой:

- а) округление числа 3,35 до одного знака после запятой. Поскольку округляемая часть — 0,05 или больше, число округляется вверх, — 3,35 → 3,4;
- б) округление числа 70,452 до двух знаков после запятой. Поскольку округляемая часть (0,002) меньше 0,005, число округляется вниз, — 70,452 → 70,45.

#### Округление числа до указанного количества значимых разрядов<sup>1</sup>:

а) округление числа 5593830 до 3-х значащих разрядов (5590000). Так как это число является целым с длиной в 7 цифр и его требуется округлить до 3-х значимых разрядов, необходимо вычесть 7 и 3, чтобы определить значение параметра (-4);

б) округление числа -364835 до 4-х значащих разрядов (-364800). Как и в предыдущем примере, для определения значения параметра (-2) нужно вычесть длину (6-ти цифр) из нужного количества значимых разрядов (4);

в) округление числа 22280 вниз до 3-х значащих разрядов (22200). Обратите внимание на то, что в данном случае осуществляется округление трех последних цифр 280 числа вниз до 200;

г) округление числа 22280 вверх до 1-го значащего разряда (30000). Обратите внимание на то, что один значимый разряд (первая цифра 2) округляется вверх до 3-х;

д) округление числа -789 вверх до 2-х значащих разрядов (-790). При округлении отрицательного числа оно сначала преобразуется в абсолютное значение, поэтому при округлении вверх оно на самом деле округляется вниз;

е) округление числа -779 вниз до 2-х значащих разрядов (-770). Аналогично предыдущему примеру при округлении отрицательного числа вниз оно на самом деле округляется вверх;

ж) округление числа -0,35 до 1-го значащего разряда (-0,4);

з) округление числа -0,35 вниз до 1-го значащего разряда (-0,3).

#### Округление числа до заданного кратного

Иногда может потребоваться округлить значение до кратного заданному числу:

- а) округляется число 32 до ближайшего числа, кратного 5 (30);
- б) округляется число -32 до ближайшего числа, кратного -5 (-30);
- в) округляется число 5,5 до ближайшего числа, кратного 0,08 (5,6).

### 3. Философские аспекты теории структурного анализа уравнений (сверх)избыточных измерений

В метрологии используются простые методы округления, предложенные математиками без учета требований науки метрологии. Максимальная дополнительная абсолютная погрешность, вносимая при таком округлении (погрешность округления), составляет плюс – минус половину последнего сохраняемого разряда, т.е. ±0,5 ед.млр. Такая погрешность в метрологии не допустима. Она и приводит к большим погрешностям машинной обработки данных. В десятичной системе приближенные числа округляют до  $N$ -ого знака, в качестве которого принято половина единицы последнего сохраняемого разряда. Во всех этих методах «лишние» знаки обнуляются (отбрасываются), а предшествующий им знак округляется по выбранному правилу [4].

В 1962 году Кеннет Айверсон предложил округления числа  $N_{xi} = \{x_i\}$  до ближайшего целого в меньшую и большую стороны называть «пол» и «потолок». На рисунке, по данным работы [6], приведены функции пола и потолка для математической константы, иррационального и трансцендентного числа  $e$ , которое приблизительно равно 2,718.... . Графики этих функций напоминают супеньки над и под прямой  $f(x) = x$  (см. рис. 1 и рис. 2). Например, из графиков, приведенных на рис. 1 видно, что  $[e]=2$ ,  $[-e]=-2$ ,  $[e]=3$ ,  $[-e]=-3$ .

Понятия «пол» и «потолок» положены в основу решения проблемы структурного анализа УЧЗ и разработки соответствующих методов повышения точности машинной обработки данных за счет уменьшения погрешности округления. Запишем несколько усверждений, используемых при решении данной проблемы.

<sup>1</sup> Значимые разряды — это разряды, которые влияют на точность числового значения или числа

Приведем классические определения указанным функциям.

*Определение*

Функция пола — ступенчатая периодическая, с периодом  $\{T\} = 1$ , функция округления чисел снизу до наибольшего целого, определённая в области  $\{x_i\} + 1$  и  $\{x_i\} - 1$  вещественных чисел, и принимающая целочисленное значение меньше или равно  $\{x_i\}$ :  $\lfloor \{x_i\} \rfloor \max n \in \mathbb{Z} | n \leq \{x_i\}$ .

График функции «пол» лежит под диагональю  $f(x_i) = x_i$  и, как уже отмечалось,  $\lfloor \{x_i\} \rfloor \leq \{x_i\}$  (рис. 1).

*Определение*

Функция потолка — ступенчатая периодическая, с периодом  $\{T\} = 1$ , функция округления чисел сверху до ближайшего (наименьшего) целого, определённая в области  $\{x_i\} + 1$  и  $\{x_i\} - 1$  вещественных чисел, и принимающая целочисленное значение больше или равно  $\{x_i\}$ :  $\lceil \{x_i\} \rceil \min n \in \mathbb{Z} | n \geq \{x_i\}$ .

График функции «потолок» расположен над диагональю  $f(x_i) = x_i$  и  $\lceil \{x_i\} \rceil \geq \{x_i\}$  (рис 1).

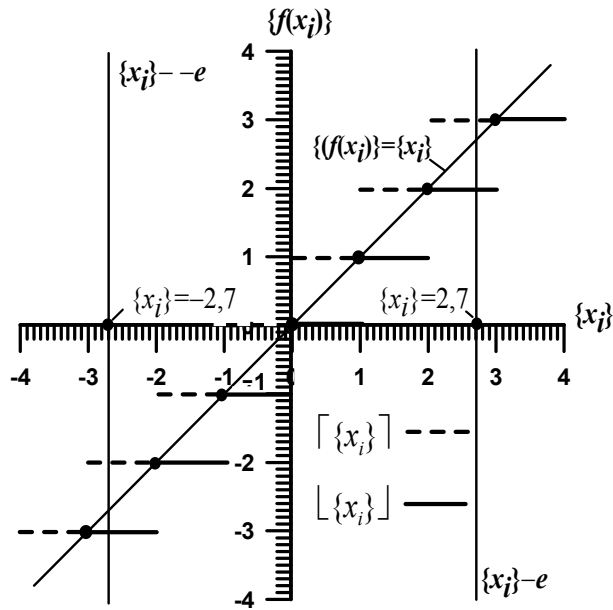


Рис. 1. Графики функций пола и потолка

При целых значениях  $x_i$  эти две функции совпадают:  $\lfloor \{x_i\} \rfloor = \{x_i\} \Leftrightarrow x_i \text{ целое} \Leftrightarrow \lceil \{x_i\} \rceil = \{x_i\}$ . Символ " $\Leftrightarrow$ " означает «тогда и только тогда». Если же они не совпадают, то потолок ровно на единицу выше пола:  $\lceil \{x_i\} \rceil - \lfloor \{x_i\} \rfloor = \{x_i\}$  не целое. Свойства данных функций подробно описаны в работе [6].

Если сдвинуть диагональ вниз на 1, то она окажется полностью под функцией «пол», так что  $\{x_i\} - 1 < \lfloor \{x_i\} \rfloor$ ; аналогично  $\{x_i\} + 1 > \lceil \{x_i\} \rceil$ .

*Определение*

Промежуточная функция — ступенчатая периодическая, с периодом  $\{T\} = 1$ , функция округления чисел до 5, определённая в области  $\{x_i\} + (\{T\} - 0,5)$  и  $\{x_i\} - (\{T\} + 0,5)$  вещественных чисел, лежащая между функцией пола и функцией потолка посередине и принимающая целочисленное значение равно  $\{x_i\}$ :  $\lfloor \{x_i\} \rfloor \min \max n \in \mathbb{Z} | n = \{x_i\} = 5$  (см. рис 2).

Другими словами, промежуточная функция — это функция пола, смещенная вверх на +0,5 ед. мл. р. (см. рис. 2) или функция потолка, смещенная вниз на 0,5 ед. мл. р.

$$(f_{п.}(x_i) = f(x_i + n(T - k_{мл.р.})) = f(x_i - n(T + k_{мл.р.})),$$

$$(f(x_i) = f(x_i + nT - k_{мл.р.}),$$

где  $k_{мл.р.} = 0,5$ .

Приведенные на рис. 1 графики отражают процесс округления числа до первого знака после запятой. При округлении положительного числа, например, до двух десятичных разрядов, графики функций пола и потолка отличаются только масштабом представления и на порядок большей разрядностью представления округляемого числа (см. рис. 2). В этом случае период повторения ступенек будет иметь меньшую цену делений, т.е. большую точность.

В ряде случаев, при округлении данных до их обработки по УЧЗ, может быть использован вариант их округления до половины младшего сомнительного разряда. Так, например,

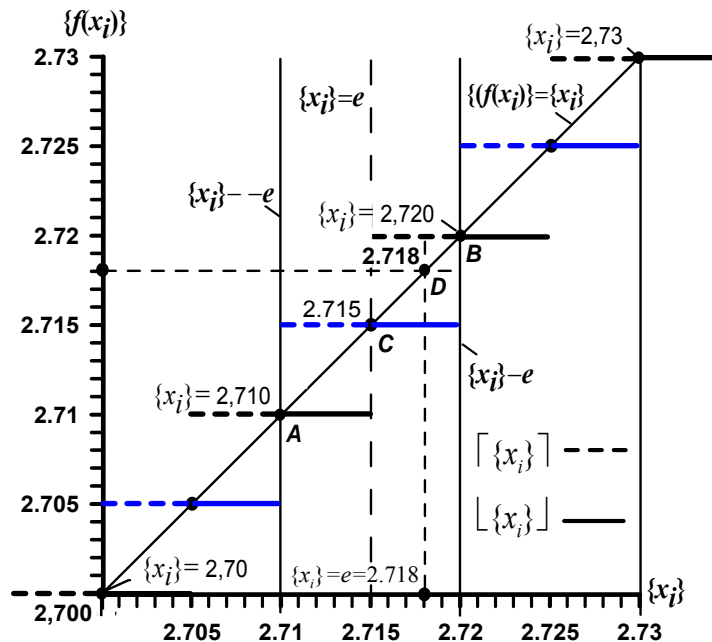


Рис. 2. Графики функций пола и потолка с округлением до 2-го и 3-го десятичных знаков после запятой

число  $e = 2,718$  может быть округлено вниз до двух десятичных разрядов снизу, сверху и до половины сомнительного разряда:  $e = 2,71$ ,  $e = 2,72$  и  $e = 2,715$  (рис. 2).

В результате анализа свойств функций пола и потолка были сформулированы следующие утверждения.

**Утверждение 1**

Приближенное число может быть представлено в виде суммы целой ( $\{U_i\}$ ) и дробной ( $\{\Delta U_i\}$ ) частей, последняя из которых может содержать одну, реже две сомнительные цифры. При этом имеет место следующие формы записи чисел, округленных: снизу, —  $\lfloor \{U_i\} + \{\Delta U_i\} \rfloor = \{U_i\} + \lfloor \{\Delta U_i\} \rfloor$  — запись для пола; сверху, —  $\lceil \{U_i\} + \{\Delta U_i\} \rceil = \{U_i\} + \lceil \{\Delta U_i\} \rceil$  — запись для потолка; и до половины единицы младшего сохраняемого разряда, —  $\lfloor \{U_i\} + \{\Delta U_i\} \rfloor = \{U_i\} + \lfloor \{\Delta U_i\} \rfloor$ .

Для анализа округленных чисел и решения проблемы повышения точности обработки данных по УЧЗ использование двух стандартных обозначений не достаточно. Нами введено новое (третье) обозначение приближенного числа, округленного до половины единицы младшего разряда, например,  $\lfloor \{U_i\} + \{\Delta U_i\} \rfloor = \{U_i\} + \lfloor \{\Delta U_i\} \rfloor$ . При этом выделяются и анализируются только дробные части округленных чисел: например,  $\lfloor \{\Delta U_i\} \rfloor > 0,05$ ;  $\lfloor \{\Delta U_i\} \rfloor < 0,05$  и  $\lfloor \{\Delta U_i\} \rfloor = 0,05$  — соответственно числовые значения, округленные до потолка, до пола, а также до половины единицы младшего сохраняемого разряда.

Таким образом, устанавливается мера округления сомнительного числа, значение которой больше, меньше или равно половине единицы младшего сохраняемого разряда. В этих границах и осуществляется подбор и введение поправок в используемые в УЧЗ математические операции.

**Утверждение 2**

Округляемый результат измерительного преобразования физических величин может быть представлен в виде суммы двух взаимосвязанных между собой приближенных чисел, отличающихся только дробной частью.

Действительно, представим числовое значение

$$\begin{aligned} \{U_1\} &= \left( \{U_1\} / 2 + \lceil \{\Delta U_1\} \rceil \right) + \left( \{U_1\} / 2 - \lfloor \{\Delta U_1\} \rfloor \right) = \\ &= 2\{U_2\} + \lceil \{\Delta U_1\} \rceil - \lfloor \{\Delta U_1\} \rfloor = 2 \cdot \{U_2\}, \end{aligned}$$

где  $\{U_1\} = 2\{U_2\}$ . Согласно свойства пола  $\lfloor \{U_1\} + \{\Delta U_1\} \rfloor = \{U_1\} + \lfloor \{\Delta U_1\} \rfloor$ ,  $\lfloor \{U_2\} + \{\Delta U_2\} \rfloor = \{U_2\} + \lfloor \{\Delta U_2\} \rfloor$ .

Разность взаимосвязанных приближенных числовых значений равна

$$\{U'_{12}\} = \lfloor \{U_1\} + \{\Delta U_1\} \rfloor - \lfloor \{U_2\} + \{\Delta U_2\} \rfloor = \{U_1\} + \lfloor \{\Delta U_1\} \rfloor - \{U_2\} - \lfloor \{\Delta U_2\} \rfloor = \{\Delta U_{12}\} + \left[ \lfloor \{\Delta U_1\} \rfloor - \lfloor \{\Delta U_2\} \rfloor \right]. \quad (1)$$

Так как функции пола и потолка являются отражениями друг друга от обеих осей, т.е.  $\lfloor \{U_i\} \rfloor = -\lceil \{U_i\} \rceil$  и  $\lceil -\{U_i\} \rceil = -\lfloor \{U_i\} \rfloor$ , то приближенное числовое значение (1) можно заменить на приближенное число  $\{U''_{12}\} = \{\Delta U_{12}\} + (\lceil \{\Delta U_2\} \rceil - \lfloor \{\Delta U_1\} \rfloor)$ . Полусумма этих чисел равна целому числу:

$$\{U'_{12}\} + \{U''_{12}\} = (\{\Delta U_{12}\} + \{\Delta U_{12}\}) / k_2 + \left[ \lfloor \{\Delta U_1\} \rfloor - \lceil \{\Delta U_2\} \rceil \right] / k_2 + \left[ \lceil \{\Delta U_2\} \rceil - \lfloor \{\Delta U_1\} \rfloor \right] / k_2 = \{\Delta U_{12}\}.$$

**Утверждение 3**

Разность двух округленных результатов измерительного преобразования физических величин может быть представлена в виде метрологического числа, состоящего из целого числа с верхней и нижней границами доверительного интервала:

$$\{U'_{12}\} = \lfloor \{U_1\} + \{\Delta U_1\} \rfloor - \lfloor \{U_2\} + \{\Delta U_2\} \rfloor = (\{U_1\} - \{U_2\}) + \left\{ \begin{array}{l} +\lceil \{\Delta U_1\} \rceil \\ -\lfloor \{\Delta U_2\} \rfloor \end{array} \right\} = \{U_{12}\} + \left\{ \begin{array}{l} +\lceil \{\Delta U_1\} \rceil \\ -\lfloor \{\Delta U_2\} \rfloor \end{array} \right\}. \quad (2)$$

**Утверждение 4** (вытекает из утверждения 3)

Метрологическое число (результат измерительного преобразования физической величины) может быть представлено в виде разности целой и дробной частей двух приближенных чисел, т.е.

$$\{U_{12}\} + \left\{ \begin{array}{l} +\{\Delta U_1\} \\ -\{\Delta U_2\} \end{array} \right\} = \{U_{12}\} + \left\{ \begin{array}{l} +\lceil \{\Delta U_1\} \rceil \\ -\lfloor \{\Delta U_2\} \rfloor \end{array} \right\} = (\{U_1\} - \{U_2\}) + \left\{ \begin{array}{l} +\lceil \{\Delta U_1\} \rceil \\ -\lfloor \{\Delta U_2\} \rfloor \end{array} \right\} = (\{U_1\} + \lceil \{\Delta U_1\} \rceil) - (\{U_2\} + \lfloor \{\Delta U_2\} \rfloor) = \lfloor \{U_1\} + \{\Delta U_1\} \rfloor - \lfloor \{U_2\} + \{\Delta U_2\} \rfloor, \quad (3)$$

и обрабатываться по соответствующим правилам.

**Утверждение 5**

Для целого числового значения  $\{U_i\}$  пол и потолок совпадают:

$\lfloor \{U_i\} \rfloor = \{U_i\} \Leftrightarrow \{U_i\} \in \mathbb{Z} \Leftrightarrow \lceil \{U_i\} \rceil = \{U_i\}$ . Если  $\{U_i\}$  — не целое, то потолок ровно на единицу выше пола:

$$\lceil \{U_i\} \rceil - \lfloor \{U_i\} \rfloor = \begin{cases} 1, & \text{при } \{U_i\} \notin \mathbb{Z} \\ 0, & \text{при } \{U_i\} \in \mathbb{Z} \end{cases}.$$

#### Утверждение 6

Округление до пола (до потолка) приближенного значения результата измерительного преобразования  $\{U_i\}$  физической величины  $x_i$ , являющегося аргументом некоторой функции (или стоящей под знаком функции  $f(U_i)$ ), приводит к получению округленного до пола (до потолка) значения этой функции, т.е.  $f(x_i) = \lfloor (\{U_i\} + \{U_0\}) / k_0 \rfloor = (\lfloor \{U_i\} \rfloor + \{U_0\}) / k_0$  ( $f(x_i) = \lceil (\{U_i\} + \{U_0\}) / k_0 \rceil = (\lceil \{U_i\} \rceil + \{U_0\}) / k_0$ ), где  $\{U_0\}$  — известное числовое значение физической величины,  $k_0$  — постоянный коэффициент, при условии, что аргумент представляет собой прямую величину. Числовое значение функции получают округленным до потолка (до пола), если аргумент представляет собой обратную величину  $1/U_i$ , т.е.  $f(1/U_i) = (1 / \lfloor \{U_i\} \rfloor + \{U_0\}) / k_0 = \lceil (1 / \{U_i\} + \{U_0\}) / k_0 \rceil$  или  $f(1/U_i) = (1 / \lceil \{U_i\} \rceil + \{U_0\}) / k_0 = \lfloor (1 / \{U_i\} + \{U_0\}) / k_0 \rfloor$ .

#### 4. Метрологическое обеспечение процесса подготовки и обработки данных

##### Причины появления погрешностей при (сверх)избыточных измерениях

Причин появления погрешностей несколько [7]:

1) несоответствие математической модели метода (сверх)избыточных измерений исследуемому физическому явлению.

Это приводит к выводу уравнения (сверх)избыточных измерений, которое в полной мере не учитывает некоторые особенности объекта исследований, сенсора и измерительного канала средства измерений (вид функции преобразования, фундаментальность приписываемой объекту исследований математической модели и т.д.);

*Погрешность метода* возникает потому, что численным методом, как правило, решается не исходная задача, а более простая. Кроме того, обычно численный метод основан на бесконечном процессе, который приходится обрывать на некотором шаге. Поэтому исходные модели должны описываться конечными наборами чисел с указанием конечной последовательности действий для их обработки. При этом целесообразно ряд элементарных функций (умножения, деления, логарифмирования и др.) заменять таблицами.

Большинство численных методов зависит от одного или от нескольких параметров. Выбор числовых значений параметров метода позволяет регулировать погрешность метода;

- 2) несоответствие вычислительных операций машинным при обработке данных;
- 3) погрешность воспроизведения нормированных по значению физических величин;
- 4) погрешность формирования рядов преобразуемых физических величин;
- 5) погрешности измерительного преобразования физических величин;
- 6) погрешность метода решения вычислительных задач;
- 7) погрешности округлений в арифметических и других действиях над приближенными числами;

Погрешность округлений не должна быть существенно больше погрешности метода. А погрешность метода целесообразно выбирать в 2-5 раз меньше неустранимой (неисключаемой) погрешности.

8) нарушение законов округления приближенных чисел, в том числе заданных таблично, в частности, например, чисел  $\pi$ ,  $e$  и др.

Погрешность решения, вызванная первыми двумя причинами, называется *неустранимой* — она не зависит от разработчика приборов.

Ниже, в табл. 1, приведены используемые в настоящее время в метрологии аналитические выражения для вычисления предельной погрешности при различных действиях над метрологическими числами по данным работы [8]. Согласно табл. 1, при сложении и вычитании *абсолютные* погрешности складываются; при умножении и делении *относительные* погрешности складываются; при возведении в степень относительные погрешности умножаются на абсолютное значение показателя степени; при отыскании значения функции абсолютное значение погрешности функции равно произведению абсолютного значения погрешности аргумента на абсолютное значение производной

Приведенные в табл. 1 действия над метрологическими числами и над значениями погрешностей отображают сущность двоичной системы счисления, при которой многие вычислительные операции выполняются, при машинной обработке, с использованием операций поразрядного суммирования и сдвига. В результате имеет место накопление погрешностей. Это свидетельствует о том, что необходимо искать иные методы представления приближенных и метрологических чисел и их машинной обработки, учитывающей правила округления и погрешности накопления. В идеале выполнение отдельных арифметических операций необходимо осуществлять с использованием иных методов обработки данных, например, матричных методов и средств обработки данных и других. На сегодня данная проблема является весьма актуальной и требует своего всестороннего решения.

**Аналитические выражения для вычисления предельной погрешности при различных действиях с числовыми значениями величин**

Действия над метрологическими числами	Действия со значениями погрешностей	
	абсолютной	относительной
1	2	3
1. $(\{x_1\} \pm \{\Delta_1\}) + (\{x_2\} \pm \{\Delta_2\})$	$\{\Delta_x\} =  \{\Delta_1\}  +  \{\Delta_2\} $ $\Rightarrow$	$\delta_x = \frac{ \{\Delta_1\}  +  \{\Delta_2\} }{\{x_1\} + \{x_2\}}$
2. $(\{x_1\} \pm \{\Delta_1\}) - (\{x_2\} \pm \{\Delta_2\})$	$\{\Delta_x\} =  \{\Delta_1\}  +  \{\Delta_2\} $ $\Rightarrow$	$\delta_x = \frac{ \{\Delta_1\}  +  \{\Delta_2\} }{\{x_1\} - \{x_2\}}$
3. $(\{x_1\} \pm \{\Delta_1\}) \times (\{x_2\} \pm \{\Delta_2\})$	$\{\Delta_x\} = \delta(\{x_1\} \times \{x_2\})$ $\Leftarrow$	$\delta_x =  \delta_1  +  \delta_2 $
4. $\frac{\{x_1\} \pm \{\Delta_1\}}{\{x_2\} \pm \{\Delta_2\}}$	$\{\Delta_x\} = \delta \frac{\{x_1\}}{\{x_2\}}$ $\Leftarrow$	$\delta_x =  \delta_1  +  \delta_2 $
5. $\{x_0\}(\{x_1\} \pm \{\Delta_1\})$	$\{\Delta_x\} = \delta(\{x_0\} \{x_2\})$ $\Leftarrow$	$\delta_x = \delta_1$
6. $(\{x_1\} \pm \{\Delta_1\})^n$	$\{\Delta_x\} = \delta \{x_1\}^n$ $\Leftarrow$	$\delta_x = n\delta_1$
7. $\sqrt[n]{\{x_1\} \pm \{\Delta_1\}}$	$\{\Delta_x\} = \delta \sqrt[n]{\{x_1\}}$ $\Leftarrow$	$\delta_x = \frac{\delta_1}{n}$

**Метрологическое обеспечение процесса обработки данных предполагает:**

а) воспроизведение двух нормированных по значению физических величин с равными или близкими по значению погрешностями, причем в 3 – 10 раз меньшими, чем ожидаемые погрешности результата избыточных измерений;

б) учет правил оценки погрешностей объединений при:

вычислении констант метода и округление их значений до третьего (четвертого) знака после запятой;

вычислении вариант метода и округление их значений до третьего (четвертого) знака после запятой;

вычислении переменных констант метода и округление их значений до третьего (четвертого) знака после запятой;

в) получение многоразрядных результатов измерительного преобразования рядов входных физических величин с заданной погрешностью и их обработку с целью определения значений показателей модифицированной структуры УСИИ с априори заданной точностью и, в конечном счете, результата избыточных измерений;

г) представление структуры уравнений избыточных измерений через константы, варианты и переменные константы метода, универсальные физические константы и коэффициенты;

д) установление оптимальной по точности процедуры обработки данных объединений, значения констант которых меньше единицы;

е) установление порядка (во времени) вычислительной обработки всех констант, образующих структуру уравнения избыточных измерений;

ж) автоматическую самопроверку процесса вычислительной обработки данных по каждому уравнению (сверх)избыточных измерений;

з) сравнительный анализ алгоритмов обработки данных с заданным числом значащих цифр без и с плавающей запятой.

*Арифметические действия с приближенными числами*

При выполнении арифметических действий с приближенными числами возникают две взаимообратные задачи:

1) по известным погрешностям входных данных оценить погрешность результата обработки этих данных.

2) определить точность исходных данных, обеспечивающую заданную точность результата обработки.

Первая задача связана с погрешностью измерительного преобразования физических величин, а вторая — с погрешностями математической и машинной обработки данных.

**Общие рекомендации по повышению точности машинной обработки данных [9]**

1. Точность вычислений

Прежде чем верить результатам, полученным на компьютере, целесообразно дополнительно увеличить точность всех расчетов на пару разрядов. Если это изменит результат в предыдущих знаках, значит, вычисления проводились с недостаточной точностью и нужно использовать более точные типы данных для представления чисел (например, в языке Си «float» заменить на «double», а в языке Паскаль тип «real» заменить на «extended»).

2. Обусловленность

В вычислительной практике большое значение имеет чувствительность решения к малым изменениям входных данных. Вычислительная задача называется плохо обусловленной, если малые

изменения входных данных приводят к заметным изменениям решения. Измерить эту обусловленность на практике очень просто. Для этого необходимо чуть-чуть изменить входные данные, т.е. результаты измерительного преобразования входных физических величин, и посмотреть, как меняется конечный результат. Собственно, нужно выяснить, какие правила округления использовались и с какой погрешностью заданы входные данные, а затем экспериментально проверить в каких пределах меняется результат избыточных измерений при варьировании значений входных данных в пределах полосы неопределенности.

### 3. Зависимость от алгоритма и модели

Общее решение — дать одну и ту же задачу избыточных измерений нескольким группам разработчиков приборов или решить ее при ином числе рядов входных физических величин. В результате будут получены разные модели и будут пользоваться разные УСИИ и алгоритмы их обработки. Если все решения выдадут один и тот же результат, значит задача хорошая — она устойчива к выбору модели и алгоритма, и не так важно каким способом её решать.

3.1. Неточность выбранной модели обуславливает необходимость ее совершенствования.

3.2. Не достаточная точность выбранного алгоритма вычислений обуславливает необходимость перебора нескольких существующих и разработанных новых алгоритмов вычислений.

Нужно помнить, что без вычислительных ошибок численных решений не бывает.

### Практические проверки

При решении вычислительных задач широко используются следующие методы практических проверок:

а) метод «возмущения» или метод приближенного решения задач вычислительной техники;

б) определение погрешности вычисления варианты метода до и после введения поправок в исходные данные, используемые при проведении математических вычислений, например, путем увеличения (уменьшения) числовых значений двух физических величин в числителе (знаменателе) на несколько единиц младшего разряда, или увеличения (уменьшения) на одну или несколько единиц младшего разряда всех числовых значений варианты метода. Оценивается изменение конечного результата определения квазиистинного значения физической величины или параметра функции преобразования измерительного канала;

в) метод сравнения.

Если есть возможность сравнить результаты обработки данных до и после введения поправок, то такие сравнения являются поводом для подтверждения верности расчетов и эффективности введения поправок в части уменьшения погрешности обработки. Как уже отмечалось, без погрешностей вычислений численных решений не бывает. Вопрос заключается в том, значительны ли неисключенные погрешности обработки данных или они незначительны.

## 5. Метрологическое обеспечение процедуры обработки данных по уравнениям избыточных измерений с модифицированной структурой

### Исходные предпосылки:

1. Числовые значения физических величин, констант и коэффициентов пропорциональности необходимо получать с погрешностью в 5 – 10 раз меньшей, чем требуемая погрешность конечного результата избыточных измерений.

2. Значения констант метода должны определяться априори посредством ручных вычислений или с использованием многоразрядного калькулятора с нужным числом значащих цифр.

3. Округлениям подлежат результаты преобразования рядов физических величин, значения фундаментальных физических констант и приближенные числа вычисленных показателей структурного анализа УИИ: значения константы метода, переменные константы метода, варианты метода, т.е. конечные результаты промежуточной обработки данных. По результатам округлений записываются УЧЗ с округлением до пола и до потолка.

4. При усреднении округляются не исходные данные, а результаты промежуточной и окончательной обработки данных.

Различают следующие подходы:

а) округление с точностью, превышающей точность результата избыточных измерений в 3(5) – 5(10) раз; например, до тысячных долей, —  $157 \pm 0,153$  ;

б) округление с заданной точностью с учетом разрядности АЛУ МК, например,  $157 \pm 0,15$  . В последнем случае значение результата измерительного преобразования физической величины представляется так, чтобы оно оканчивалось десятичным знаком того же разряда, какой имеет погрешность этого результата.

в) округление сверху (в сторону увеличения), например,  $157 \pm 0,16$  . При этом абсолютная погрешность произведения увеличивается;

г) округление снизу (в сторону уменьшения), например,  $157 \pm 0,15$  .

5. Для решения задачи уменьшения погрешностей машинной обработки данных целесообразно использовать прямые, инверсные и дополнительные коды.

6. Для оценки погрешностей следует учитывать следующие правила [10, 11]:

при сложении и вычитании *абсолютные* погрешности складываются (см. табл. 1)

при умножении и делении *относительные* погрешности складываются (см. табл. 1);

при возведении в степень относительные погрешности умножаются на абсолютную величину показателя степени;



предельная относительная погрешность корня из приближенного числа делится на показатель корня; при отыскании значения функции абсолютная погрешность функции равна произведению абсолютной погрешности аргумента на абсолютную величину производной; при умножении приближенного числа на точное число  $\{x_0\}$  предельная относительная погрешность приближенного числа не меняется, а предельная абсолютная погрешность увеличивается в  $|\{x_0\}|$  раз.

7. УЧЗ, описывающее модифицированную структуру УСИИ, необходимо преобразовать к такому виду, чтобы в нем не было вычитания близких числовых значений величин. Последнее может привести к большой потере точности и к большим относительным погрешностям [12].

#### **6. Общие представления о методах декомпозиции, направленных на повышение точности обработки данных**

Рассмотрим возможные методы декомпозиции структуры УСИИ, направленные на повышения точности математической и машинной обработки данных.

##### **Первый метод декомпозиции, направленный на повышение точности математической обработки данных**

Самым распространенным способом представления отрицательных чисел в машинной арифметике является представление их в дополнительном коде. В этой связи в основу первого метода декомпозиции положен метод, основанный на математической обработке данных, представленных в прямом и дополнительном кодах.

Сущность метода состоит в параллельном вычислении промежуточных данных (преимущественно данных по объединению преобразованных рядов физических величин) и конечного результата (по УСИИ) в прямом и в дополнительном кодах с последующим нахождением погрешности преобразования и учета ее при записи промежуточного и окончательного результатов обработки данных. Метод требует дополнительных аппаратных и временных затрат.

##### **Второй метод декомпозиции, направленный на повышение точности математической обработки данных**

Сущность метод декомпозиции структуры с целью повышения точности математической обработки данных в объединениях, состоит в:

- анализе исходной структуры и элементов структуры (— физических величин, коэффициентов, математических операций) УСИИ с метрологической точки зрения, — как использующие приближенные или метрологические числа, округленные до пола, до потолка и/или до половины единицы младшего разряда;
- декомпозиции структуры УСИИ, в том числе и с использованием уравнений замены переменных величин;
- введение новых математических операций путем замены одной группы и последовательности математических операций над величинами, входящими в объединение, другой группой и последовательностью математических операций, полученных в результате реализации метода введения поправок;
- представлении модифицированной структуры в виде алгоритма параллельной и последовательной обработки данных;
- анализе погрешностей полученных числовых значений показателей объединений и принятии решения по использованию того или иного правила их округления или не округления;
- анализ возможностей и использование новых методов математической обработки (вычисления) значений показателей объединений с целью получения более точных их значений;
- выбор структуры УЧЗ с округленными данными, а также метода повышения точности за счет введения поправок в одну, две, три или четыре используемые математические операции;
- ручном вычислении (с помощью многоразрядного калькулятора) значений констант метода и запоминании полученных значений в ПЗУ микропроцессора или микроконвертора;
- уточнении числа структурных элементов и их связей в модифицированной структуре с учетом вновь введенных математических операций;
- составлении модифицированного алгоритма обработки данных;
- определении затрат времени на обработку значений показателей объединений и всего алгоритма обработки данных в целом;
- разработке тестов и тестировании работы алгоритма обработки данных с целью определения его метрологических характеристик.

Целевой функцией данного метода декомпозиции структуры является использования новых операций и методов повышения точности математической обработки данных в объединениях и в модифицированной структуре УЧЗ в целом.

##### **Третий метод декомпозиции, направленный на повышение точности машинной обработки данных**

Прежде, чем рассматривать данный метод, опишем особенности машинной обработки данных. Машинные вычисления обладают следующими специфическими особенностями [13]:

1. При машинных вычислениях присутствует машинная погрешность (округления), поскольку используются числа с ограниченным количеством знаков после запятой. Это обусловлено конечной длиной мантиссы при представлении действительного числа в памяти микропроцессора.
2. В вычислительной практике большое значение имеет обусловленность задачи, т.е. чувствительность ее решения к малым изменениям входных данных.
3. Выбор того или иного вычислительного алгоритма влияет на результаты вычислений.
4. Существенная черта численного метода — экономичность вычислительного алгоритма, т.е. минимизация числа элементарных операций при выполнении его на микропроцессоре.

5. Различают две категории погрешностей: неустранимые погрешности, связанные с построением математической модели объекта и приближенным заданием входных данных, и устранимые погрешности, т.е. погрешности метода решения задачи и погрешности округления. Эти погрешности являются источниками малых возмущений, вносимых в решение задачи.

Основное отличие вычислительной математики заключается в том, что при решении вычислительных задач человек оперирует машинными числами. Важную роль в вычислительной математике играют оценки точности алгоритмов и их устойчивость к представлениям машинных чисел в компьютере.

В тех случаях, когда в модифицированных УСИИ (УЧЗ) проставлены скобки, сначала выполняются действия в скобках в указанном выше порядке, а затем все остальные действия вне скобок опять же с соблюдением указанного выше порядка.

Метод декомпозиции структуры, направленный на повышения точности машинной обработки данных, представленных в виде приближенных чисел, основан на:

анализе структуры и элементов структуры УСИИ (физических величин и коэффициентов), декомпозиции и модификации ее для решения задачи машинной обработки метрологических и приближенных чисел;

оценке погрешностей обработки данных, входящих в объединение, по значениям сомнительных цифр, а также по результатам обработки этих данных до и после введения поправок;

принятии решения по выбору того или иного правила (группы правил) введения или не введения поправок после округления приближенных значений показателей объединений;

использовании всевозможных методов введения поправок, алгоритмов и программ машинной обработки метрологических и приближенных чисел;

иных действиях над приближенными числами (— над полученными значениями констант метода, вариант метода и коэффициентов) с целью повышения точности результата машинной обработки всей совокупности данных;

подготовке прикладного программного обеспечения для микроконтроллера с учетом разрядности АЦП и микропроцессора и используемых методов обработки;

разработке методов тестирования прикладных программ.

Целевой функцией данного метода декомпозиции структуры является использования новых машинных операций и методов повышения точности машинной обработки данных и, как следствие, повышение точности конечного результата (сверх)избыточных измерений физических величин.

#### ***Комбинированные методы декомпозиции структуры УСИИ***

Комбинированные методы — это методы декомпозиции структуры УЧЗ, направленные на повышение оперативности и точности математической и машинной обработки результатов измерительного преобразования рядов физических величин.

#### ***7. Конституирование структуры уравнения (сверх)избыточных измерений***

Исследования показали, что конституирование структуры УСИИ необходимо проводить одновременно с решением задачи повышения оперативности избыточных измерений, используя декомпозицию структуры и для решения задачи повышения точности компьютерной (машинной) обработки данных. А после этого предлагать адекватный алгоритм параллельной машинной обработки данных по модифицированному УСИИ.

Под конституированием будем понимать процесс изменения исходной или модифицированной структуры УСИИ, направленный на синтез новой структуры, учитывающей особенности используемых вычислительных средств, и на обеспечение высокоточной машинной обработки приближенных и метрологических чисел.

Конечной целью конституирования является придание синтезированной структуре законной силы и права быть использованной в процедуре высокоточной машинной обработки данных, входящих в структуру УСИИ.

Конституирование предполагает изменение (модификацию) связей между физическими величинами, константами и коэффициентами внутри объединений с целью повышения точности компьютерной обработки данных<sup>1</sup> и конечного результата в целом.

В этой связи структура УСИИ рассматривается нами не только как состоящая из объединений с установленными связями между ними, но и из взаимосвязанных между собой подсистем внутренних локальных связей объединений, модификация которых также возможна.

Конституирование рассматривает любую структуру с позиции системного подхода и предполагает модификацию известных и разработку новых (интеллектуальных) методов повышения точности компьютерной обработки данных. Оно может быть осуществлено, например: а) за счет изменения значений преобразованных физических величин и/или величин установленного размера на несколько десятичных единиц запоминаемого младшего разряда с целью уменьшения погрешностей округления; б) путем замены существующей системы связей новой, модифицированной, обеспечивающей повышение точности машинной обработки данных.

Конституирование, как процесс замены одной системы связей другой, модифицированной, является завершающим этапом формирования алгоритма и формулирования условий машинной обработки данных.

Одной из задач (целей) конституирования модифицированной структуры УСИИ является разработка новых подходов и методов представления и обработки данных, обеспечивающих создание интеллектуальных алгоритмов их машинной обработки с пошаговым анализом и управлением ходом этого процесса.

<sup>1</sup> с использованием чисел с плавающей точкой четверной точности (по IEEE 754), при которой компьютерный формат представления чисел занимает в памяти четыре машинных слова (в случае 32-битного компьютера — 128 бит или 16 байт)

**8. Разработка методов повышения точности машинной обработки данных**

В основу структурного анализа и синтеза модифицированных УЧЗ положим типовое УЧЗ вида

$$\{x_{i1}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\}}, \quad (4)$$

представляющее уравнение избыточных измерений при линейной функции преобразования измерительного канала, полученное при измерительном преобразовании трех физических величин  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  с размерами:  $\{x_1\} = \{x_0\}$ ,  $\{x_2\} = \{x_i\}$  и  $\{x_3\} = \{x_i\} + \{x_0\}$ .

Прежде, чем описать методы повышения точности, рассмотрим всевозможные структуры УЧЗ (4), видоизмененные за счет округленными данных до пола, до потолка и/или до половины единицы младшего разряда.

Установлено существование 16-ти типовых структур УЧЗ (4) с всевозможными вариантами округления до потолка и до пола всех значений, полученных в результате измерительного преобразования трех физических величин (см. табл. 2).

Формализовано уравнений числовых значений с округлением данных до пола, до потолка и/или до половины единицы младшего разряда целесообразно записывать следующим образом (пример с округлением данных до потолка), —

$$\{x_{i1}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} = \{x_0\} \frac{(\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\}) + (\overline{\{U_3\}} - \overline{\{U_1\}})}{(\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_0)\}) + (\overline{\{U_3\}} - \overline{\{U_2\}})}, \quad (5)$$

т.е. с выделением целых и дробных частей в числителе и знаменателе в виде соответствующих разностей (см. крайнюю правую часть равенства (5)). В то же время, ввиду ограничений по объему публикации, многочисленные представления вариантов округления нами приводятся, как показано в центральной части УЧЗ (5), т.е. без разделений целой и дробной частей результатов измерительного преобразования физических величин и без отдельного рассмотрения варианты метода декомпозиции.

Структуры УЧЗ, приведенные в табл. 2, отображают правила округления данных. Это положено в основу разработки методов введения поправки в используемые математические операции.

Как видно из табл. 2, каждая структура УЧЗ, содержит следующие арифметические операции: две операции вычитания, одну операцию деления и одну операцию умножения. Выполнение каждой из этих операций сопровождается получением соответствующей погрешности вычисления.

Погрешность вычисления изменяет значение варианты или конечного результата (сверх)избыточных измерений в целом, т.е. вносит систематическую составляющую погрешности. Для ее уменьшения целесообразно в каждый или в некоторые результаты вычислений вносить поправку  $\Delta U_{\Pi}$  априори установленного значения  $\{\Delta U_{\Pi}\}$ . Таким образом выводятся методы повышения точности математической обработки данных для каждого варианта УЧЗ (методы поправок). Для выбранного базового УСИИ нами получено по семь способов введения поправок для каждого их 16-ти УЧЗ результата избыточных измерений с округленными исходными данными (см. табл. 3 – табл. 18). Всего получено 112 способов введения поправок или способов формирования конституированных УЧЗ из одного базового УЧЗ.

Все способы отличаются местоположением введенной поправки: в числителе УЧЗ ( $-\Delta U_{\Pi 1}$ ), в знаменателе ( $-\Delta U_{\Pi 2}$ ), к результату деления ( $-\Delta U_{\Pi 3}$ ), без учета погрешности воспроизведения  $\pm\{\Delta_{x0}\}$  нормированной по значению физической величины  $\{x_0\}$ , и за счет сочетаний вводимых поправок  $\Delta U_{\Pi 1}$ ,  $\Delta U_{\Pi 2}$  и  $\Delta U_{\Pi 3}$ .

Причем, получено восемь способов формирования конституированных УЧЗ из одного базового УЧЗ без округления (см. табл. 2, п. 1, ..., п. 8) и восемь с содержанием в дробной части исходных данных цифры, равной половине единицы младшего разряда (см. табл. 2, п. 9, ..., п. 16). Всего получено 16 способов формирования за счет введения поправок.

В табл. 19, в качестве примера, приведено 26 (16+10) способов формирования конституированных УЧЗ из одного базового УЧЗ (5), например, с округлением данных до потолка (см. п.1 табл. 2), полученных за счет введения поправок разного знака, но без учета погрешности воспроизведения  $\pm\Delta_{x0}$  нормированной по значению физической величины  $x_0$ . Одна из структур конституированных УЧЗ с учетом погрешности воспроизведения  $\pm\Delta_{x0}$  нормированной по значению физической величины  $x_0$ , приведена, в усеченном виде, в табл. 20. и табл. 21.

Аналогично по 26 вариантов конституированных УЧЗ можно записать для всех 16-ти базовые УЧЗ с использованием разного вида округления используемых результатов измерительного преобразования физических величин, т.е. исходных данных.

С учетом знаков поправок  $\Delta U_{\Pi 1}$ ,  $\Delta U_{\Pi 2}$  и  $\Delta U_{\Pi 3}$ , каждое базовое УЧЗ может быть представлено 26-я конституированными структурами. Всего получаем 416 вариантов. Анализ показал, что не все из 26 вариантов записи поправок с учетом их знаков и сочетаний дают возможность эффективно уменьшить погрешность обработки данных. В этой связи целесообразно рассматривать только базовые варианты, приведенные в табл. 3 – табл. 18.

Если учитывать еще и погрешность воспроизведения нормированной по значению физической величины  $x_0$ , то каждое базовое УЧЗ может быть представлено еще  $7 \times 2 = 14$  варианта конституированных структур. Всего получают 112 пар всевозможных вариантов или способов повышения точности обработки данных по УЧЗ ( $14 \times 16 = 224$ ).

Ниже, в качестве примера, приводится в усеченном виде запись 26 вариантов (см. табл. 20 и табл. 21) конституированных УЧЗ  $\{x_{i7}\}$  (см. п.7 табл. 2) с округлением данных до пола и до потолка при  $\pm \Delta_{x0}$  ( $\pm \{\Delta_{x0}\} = \pm \{\Delta U_{n0}\}$ ), где  $\{\Delta_{x0}\}$  и  $\{\Delta U_{n0}\}$  — положительные или отрицательные по значению погрешность воспроизведения и числовая поправка.

Таблица 2

Уравнения числовых значений результата измерений с округленными данными

№ п/п	Формализованная запись УЧЗ с округленными данными до пола и до потолка	№ п/п	Формализованная запись УЧЗ с округленными данными до пола, до потолка и до половины единицы младшего разряда
1	$\{x_{i1}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	9	$\{x_{i9}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$
2	$\{x_{i2}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	10	$\{x_{i10}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$
3	$\{x_{i3}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	11	$\{x_{i11}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$
4	$\{x_{i4}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	12	$\{x_{i12}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$
5	$\{x_{i5}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	13	$\{x_{i13}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$
6	$\{x_{i6}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	14	$\{x_{i14}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$
7	$\{x_{i7}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	15	$\{x_{i15}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$
8	$\{x_{i8}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	16	$\{x_{i16}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$

Таблица 3

№ п/п	Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными до потолка и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.1 табл. 2)		
1	$\{x_{ik1/1}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$ (без введения поправок: $\{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0$ )	5	$\{x_{ik1/5}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
2	$\{x_{ik1/2}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	6	$\{x_{ik1/6}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
3	$\{x_{ik1/3}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	7	$\{x_{ik1/7}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
4	$\{x_{ik1/4}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	8	$\{x_{ik1/8}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$

Учет погрешности воспроизведения  $\pm \{\Delta_{x0}\}$  нормированной по значению физической величины  $\{x_0\}$  не предусмотрен

Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.2 табл. 2)		
1	$\{x_{ik2/1}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \text{ (без введения поправок: } \{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0 \text{)}$	5
2	$\{x_{ik2/2}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	6
3	$\{x_{ik2/3}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	7
4	$\{x_{ik2/4}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	8
Учет погрешности воспроизведения $\pm\{\Delta_{x0}\}$ нормированной по значению физической величины $\{x_0\}$ не предусмотрен		

Таблиця 5

Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.3 табл. 2)		
1	$\{x_{ik3/1}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \text{ (без введения поправок: } \{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0 \text{)}$	5
2	$\{x_{ik3/2}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	6
3	$\{x_{ik3/3}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	7
4	$\{x_{ik3/4}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	8
Учет погрешности воспроизведения $\pm\{\Delta_{x0}\}$ нормированной по значению физической величины $\{x_0\}$ не предусмотрен		

Таблиця 6

Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.4 табл. 2)		
1	$\{x_{ik4/1}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \text{ (без введения поправок: } \{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0 \text{)}$	5
2	$\{x_{ik4/2}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	6
3	$\{x_{ik4/3}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	7
4	$\{x_{ik4/4}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	8
Учет погрешности воспроизведения $\pm\{\Delta_{x0}\}$ нормированной по значению физической величины $\{x_0\}$ не предусмотрен		

№ п/п	Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.5 табл. 2)	
1	$\{x_{ik5/1}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\}}$ (без введения поправок: $\{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0$ )	5 $\{x_{ik5/5}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
2	$\{x_{ik5/2}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\}}$	6 $\{x_{ik5/6}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
3	$\{x_{ik5/3}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	7 $\{x_{ik5/7}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
4	$\{x_{ik5/4}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	8 $\{x_{ik5/8}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
Учет погрешности воспроизведения $\pm\{\Delta_{x_0}\}$ нормированной по значению физической величины $\{x_0\}$ не предусмотрен		

Таблица 8

№ п/п	Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.6 табл. 2)	
1	$\{x_{ik6/1}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\}}$ (без введения поправок: $\{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0$ )	5 $\{x_{ik6/5}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
2	$\{x_{ik6/2}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\}}$	6 $\{x_{ik6/6}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
3	$\{x_{ik6/3}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n3}\}}$	7 $\{x_{ik6/7}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
4	$\{x_{ik6/4}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	8 $\{x_{ik6/8}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
Учет погрешности воспроизведения $\pm\{\Delta_{x_0}\}$ нормированной по значению физической величины $\{x_0\}$ не предусмотрен		

Таблица 9

№ п/п	Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.7 табл. 2)	
1	$\{x_{ik7/1}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\}}$ (без введения поправок: $\{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0$ )	5 $\{x_{ik7/5}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
2	$\{x_{ik7/2}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\}}$	6 $\{x_{ik7/6}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
3	$\{x_{ik7/3}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	7 $\{x_{ik7/7}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
4	$\{x_{ik7/4}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	8 $\{x_{ik7/8}\} = \{x_0\} \frac{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{U'_3(x_i + x_0)\} - \{U'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
Учет погрешности воспроизведения $\pm\{\Delta_{x_0}\}$ нормированной по значению физической величины $\{x_0\}$ не предусмотрен		

№ п/п		Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.8 табл. 2)	
1	$\{x_{ik8/1}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\}}$ (без введения поправок: $\{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0$ )	5	$\{x_{ik8/5}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
2	$\{x_{ik8/2}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\}}$	6	$\{x_{ik8/6}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
3	$\{x_{ik8/3}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	7	$\{x_{ik8/7}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
4	$\{x_{ik8/4}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	8	$\{x_{ik8/8}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
Учет погрешности воспроизведения $\pm\{\Delta_{x0}\}$ нормированной по значению физической величины $\{x_0\}$ не предусмотрен			

Таблиця 11

№ п/п		Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.9 табл. 2)	
1	$\{x_{ik9/1}\} = \{x_0\} \frac{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_1(x_0)\}}{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_2(x_i)\}}$ (без введения поправок: $\{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0$ )	5	$\{x_{ik9/5}\} = \{x_0\} \frac{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_1(x_0)\}}{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
2	$\{x_{ik9/2}\} = \{x_0\} \frac{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_2(x_i)\}}$	6	$\{x_{ik9/6}\} = \{x_0\} \frac{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
3	$\{x_{ik9/3}\} = \{x_0\} \frac{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_1(x_0)\}}{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	7	$\{x_{ik9/7}\} = \{x_0\} \frac{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_1(x_0)\}}{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
4	$\{x_{ik9/4}\} = \{x_0\} \frac{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	8	$\{x_{ik9/8}\} = \{x_0\} \frac{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{\overline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\overline{U}'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
Учет погрешности воспроизведения $\pm\{\Delta_{x0}\}$ нормированной по значению физической величины $\{x_0\}$ не предусмотрен			

Таблиця 12

№ п/п		Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.10 табл. 2)	
1	$\{x_{ik10/1}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\}}$ (без введения поправок: $\{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0$ )	5	$\{x_{ik10/5}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
2	$\{x_{ik10/2}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\}}$	6	$\{x_{ik10/6}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
3	$\{x_{ik10/3}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	7	$\{x_{ik10/7}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
4	$\{x_{ik10/4}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	8	$\{x_{ik10/8}\} = \{x_0\} \frac{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_1(x_0)\} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\{\underline{U}'_3(x_i + x_0)\} - \{\underline{U}'_2(x_i)\} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
Учет погрешности воспроизведения $\pm\{\Delta_{x0}\}$ нормированной по значению физической величины $\{x_0\}$ не предусмотрен			

Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.11 табл. 2)	
1	$\{x_{ik11/1}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \quad (\text{без введения поправок: } \{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0)$
5	$\{x_{ik11/5}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
2	$\{x_{ik11/2}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$
6	$\{x_{ik11/6}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
3	$\{x_{ik11/3}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$
7	$\{x_{ik11/7}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
4	$\{x_{ik11/4}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$
8	$\{x_{ik11/8}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
Учет погрешности воспроизведения $\pm\{\Delta_{x0}\}$ нормированной по значению физической величины $\{x_0\}$ не предусмотрен	

Таблица 14

Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.12 табл. 2)	
1	$\{x_{ik12/1}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \quad (\text{без введения поправок: } \{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0)$
5	$\{x_{ik12/5}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
2	$\{x_{ik12/2}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$
6	$\{x_{ik12/6}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
3	$\{x_{ik12/3}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$
7	$\{x_{ik12/7}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
4	$\{x_{ik12/4}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$
8	$\{x_{ik12/8}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
Учет погрешности воспроизведения $\pm\{\Delta_{x0}\}$ нормированной по значению физической величины $\{x_0\}$ не предусмотрен	

Таблица 15

Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.13 табл. 2)	
1	$\{x_{ik13/1}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \quad (\text{без введения поправок: } \{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0)$
5	$\{x_{ik13/5}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
2	$\{x_{ik13/2}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$
6	$\{x_{ik13/6}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
3	$\{x_{ik13/3}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$
7	$\{x_{ik13/7}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
4	$\{x_{ik13/4}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$
8	$\{x_{ik13/8}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
Учет погрешности воспроизведения $\pm\{\Delta_{x0}\}$ нормированной по значению физической величины $\{x_0\}$ не предусмотрен	



№ п/п	Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.14 табл. 2)	
1	$\{x_{ik14/1}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \text{ (без введения поправок: } \{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0 \text{)}$	5 $\{x_{ik14/5}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
2	$\{x_{ik14/2}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	6 $\{x_{ik14/6}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
3	$\{x_{ik14/3}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	7 $\{x_{ik14/7}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
4	$\{x_{ik14/4}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	8 $\{x_{ik14/8}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
Учет погрешности воспроизведения $\pm\{\Delta_{x0}\}$ нормированной по значению физической величины $\{x_0\}$ не предусмотрен		

Таблиця 17

№ п/п	Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.15 табл. 2)	
1	$\{x_{ik15/1}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \text{ (без введения поправок: } \{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0 \text{)}$	5 $\{x_{ik15/5}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
2	$\{x_{ik15/2}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	6 $\{x_{ik15/6}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
3	$\{x_{ik15/3}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	7 $\{x_{ik15/7}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
4	$\{x_{ik15/4}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	8 $\{x_{ik15/8}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
Учет погрешности воспроизведения $\pm\{\Delta_{x0}\}$ нормированной по значению физической величины $\{x_0\}$ не предусмотрен		

Таблиця 18

№ п/п	Формализованная запись структур конституированных УЧЗ с округленными данными и введенными поправками (см. базовое УЧЗ по п.16 табл. 2)	
1	$\{x_{ik16/1}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \text{ (без введения поправок: } \{\Delta U_{n1}\} = \{\Delta U_{n2}\} = \{\Delta U_{n3}\} = 0 \text{)}$	5 $\{x_{ik16/5}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
2	$\{x_{ik16/2}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	6 $\{x_{ik16/6}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
3	$\{x_{ik16/3}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	7 $\{x_{ik16/7}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
4	$\{x_{ik16/4}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}}$	8 $\{x_{ik16/8}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} \pm \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} \pm \{\Delta U_{n2}\}} \pm \{\Delta U_{n3}\}$
Учет погрешности воспроизведения $\pm\{\Delta_{x0}\}$ нормированной по значению физической величины $\{x_0\}$ не предусмотрен		

№ п/п	Формализованная запись конституированных УЧЗ с округлением данных до потолка и не содержащие цифры 0,05 в дробной части исходных данных (см. п.1 табл.11)	
1	$\{x_{ik1}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} + \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	14 $\{x_{ik14}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} - \{\Delta U_{n1}\} + \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$
2	$\{x_{ik2}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} - \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	15 $\{x_{ik15}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} + \{\Delta U_{n2}\} + \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$
3	$\{x_{ik3}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} + \{\Delta U_{n2}\}}$	16 $\{x_{ik16}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} - \{\Delta U_{n2}\}} - \{\Delta U_{n3}\}$
4	$\{x_{ik4}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} - \{\Delta U_{n2}\}}$	17 $\{x_{ik17}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} + \{\Delta U_{n2}\}} - \{\Delta U_{n3}\}$
5	$\{x_{ik5}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} + \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} + \{\Delta U_{n2}\}}$	18 $\{x_{ik18}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} - \{\Delta U_{n2}\}} + \{\Delta U_{n3}\}$
6	$\{x_{ik6}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} - \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} - \{\Delta U_{n2}\}}$	19 $\{x_{ik19}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} + \{\Delta U_{n1}\} + \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} + \{\Delta U_{n2}\}}$
7	$\{x_{ik7}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} + \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} - \{\Delta U_{n2}\}}$	20 $\{x_{ik20}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} - \{\Delta U_{n1}\} - \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} - \{\Delta U_{n2}\}}$
8	$\{x_{ik8}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} - \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} + \{\Delta U_{n2}\}}$	21 $\{x_{ik21}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} + \{\Delta U_{n1}\} - \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} + \{\Delta U_{n2}\}}$
9	$\{x_{ik9}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} + \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	22 $\{x_{ik22}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} - \{\Delta U_{n1}\} + \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} - \{\Delta U_{n2}\}}$
10	$\{x_{ik10}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} - \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	23 $\{x_{ik23}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} + \{\Delta U_{n1}\} - \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} - \{\Delta U_{n2}\}}$
11	$\{x_{ik11}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} + \{\Delta U_{n1}\} + \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	24 $\{x_{ik24}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} - \{\Delta U_{n1}\} + \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} + \{\Delta U_{n2}\}}$
12	$\{x_{ik12}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} - \{\Delta U_{n1}\} - \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	25 $\{x_{ik25}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} - \{\Delta U_{n1}\} - \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} + \{\Delta U_{n2}\}}$
13	$\{x_{ik13}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} + \{\Delta U_{n1}\} - \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	26 $\{x_{ik26}\} = \{x_0\} \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} + \{\Delta U_{n1}\} + \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} - \{\Delta U_{n2}\}}$

Таблица 20

№ п/п	Формализованная запись конституированных УЧЗ с округлением данных до потолка при положительном знаке погрешности воспроизведения нормированной по значению ФВ (для УЧЗ по п.7 табл. 2)	
1	$\{x_{ik1}\} = (\{x_0\} + \{\Delta_{x0}\}) \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} + \{\Delta U_{n1}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	14 $\{x_{ik14}\} = (\{x_0\} + \{\Delta_{x0}\}) \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} - \{\Delta U_{n1}\} + \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$
...	...	...
13	$\{x_{ik13}\} = (\{x_0\} + \{\Delta_{x0}\}) \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} + \{\Delta U_{n1}\} - \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}}}$	26 $\{x_{ik26}\} = (\{x_0\} + \{\Delta_{x0}\}) \frac{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_1(x_0)\}} + \{\Delta U_{n1}\} + \{\Delta U_{n3}\}}{\overline{\{U'_3(x_i + x_0)\}} - \overline{\{U'_2(x_i)\}} - \{\Delta U_{n2}\}}$

Окончательно вид практически используемого конституированного УЧЗ (одного или нескольких, — в зависимости от поставленной задачи) устанавливается с учетом округленных значений обрабатываемых данных и навыков разработчика и инженера-программиста по определению вида округления, корректному выбору вида конституированного УЧЗ и числовых значений поправок.

Для наглядности в табл. 20 и табл. 21 приведены в усеченном виде варианты структур конституированных УЧЗ с округлением данных до пола и/или до потолка для УЧЗ.

Таблица 21

№ п/п	Формализованная запись конституированных УЧЗ с округлением данных до потолка при положительном знаке погрешности воспроизведения нормированной по значению ФВ (для УЧЗ по п.7 табл. 2)	
1	$\{x_{ик1}\} = (\{x_0\} - \{\Delta_{x0}\}) \frac{\{[U'_3(x_i + x_0)]\} - \{[U'_1(x_0)]\} + \{\Delta U_{п1}\}}{\{[U'_3(x_i + x_0)]\} - \{[U'_2(x_i)]\}}$	14 $\{x_{ик14}\} = (\{x_0\} - \{\Delta_{x0}\}) \frac{\{[U'_3(x_i + x_0)]\} - \{[U'_1(x_0)]\} - \{\Delta U_{п1}\}}{\{[U'_3(x_i + x_0)]\} - \{[U'_2(x_i)]\}} + \{\Delta U_{п3}\}$
...	...	...
13	$\{x_{ик13}\} = (\{x_0\} - \{\Delta_{x0}\}) \frac{\{[U'_3(x_i + x_0)]\} - \{[U'_1(x_0)]\} + \{\Delta U_{п1}\}}{\{[U'_3(x_i + x_0)]\} - \{[U'_2(x_i)]\}} - \{\Delta U_{п3}\}$	26 $\{x_{ик26}\} = (\{x_0\} - \{\Delta_{x0}\}) \frac{\{[U'_3(x_i + x_0)]\} - \{[U'_1(x_0)]\} + \{\Delta U_{п1}\}}{\{[U'_3(x_i + x_0)]\} - \{[U'_2(x_i)]\}} + \{\Delta U_{п3}\}$

Важно отметить, что для получения полноценного интеллектуального метода повышения точности математической обработки данных для каждого из приведенных в табл. 3, ..., табл. 18 конституированных УЧЗ необходимо разработать условия выбора числовых значений поправок, обеспечивающие высокую эффективность уменьшения погрешностей.

Условия выбора того или иного способа формирования и структуры конституированного УЧЗ для каждого из 16-и базовых УЧЗ, приведенных в табл. 2, будут рассмотрены в Сообщении 4. Там же будут изложены практические примеры метрологического обеспечения процедуры обработки данных с использованием декомпозиции структуры УСИИ.

В целом, общая методология повышения оперативности и точности математической и машинной обработки результатов измерительного преобразования рядов физических величин предполагает анализ структуры УСИИ, ее декомпозицию, представление через объединения с неизменными и видоизмененными связями между элементами его структуры, выбор способа введения поправок и условий подбора их числовых значений для создания и получения одной или нескольких конституированных структур УЧЗ, удобных для распараллеливания и получение скорректированного результата избыточных измерений.

### Выводы

В работе изложены основания для проведения исследований в части разработки путей и методов уменьшения вычислительных погрешностей.

Впервые в мире для решения проблемы повышения точности машинной обработки данных использованы понятия и свойства округления данных до пола, до потолка и/или до половины единицы младшего разряда.

Обогащены новыми определениями и утверждениями философские аспекты теории структурного анализа уравнений (сверх)избыточных измерений.

Сформулированы причины появления погрешностей вообще и погрешностей, обусловленных машинной обработкой данных, в частности. Как правило, при машинной обработке многие вычислительные операции выполняются с использованием операций поразрядного суммирования и сдвига. В результате имеет место накопление погрешностей. Это свидетельствует о необходимости поиска иных методов представления приближенных и метрологических чисел и их машинной обработки, которые бы учитывали правила округления и возникаемые погрешности.

Утверждается, что проблема повышения точности машинной обработки данных является весьма актуальной и требует своего всестороннего решения. Выполнение отдельных арифметических операций необходимо осуществлять с использованием пооперационных методов уменьшения погрешностей обработки данных.

Предложена совокупность действий, осуществляемых при метрологическом обеспечении процесса машинной обработки данных, а также типовые и разработанные правила, рекомендации и основания по их осуществлению.

Рассмотрено, в общем виде, ряд методов декомпозиции структуры УСИИ, направленных на повышение точности математической и машинной обработки данных.

Рассмотрена сущность и особенности методов декомпозиции структур УЧЗ, обеспечивающих повышение точности математической обработки данных в объединениях. Это послужило основой дальнейшего развития теории и методов структурного анализа УСИИ.

Констатируется, что заключительной операцией структурного анализа УСИИ является конституирование. Это понятие в метрологии используется впервые. Под конституированием понимают процесс изменения исходной или модифицированной структуры УСИИ или УЧЗ, направленный на синтез новой структуры, учитывающей особенности используемых вычислительных средств, и на обеспечение высокоточной машинной обработки приближенных и метрологических чисел. Конечной целью конституирования является придание синтезированной структуре законной силы и права быть использованной в процедуре высокоточной машинной обработки данных.

Утверждается, что конституирование предполагает изменение (модификацию) связей между физическими величинами, константами и коэффициентами внутри объединений для повышения точности компьютерной обработки данных за счет использования интеллектуальных алгоритмов машинной обработки данных с их пошаговым анализом и управлением ходом этого процесса.

Для конкретного УСИИ установлено существование 16-ти типовых структур УЧЗ с всевозможными вариантами округления до потолка и/или до пола результатов измерительного преобразования рядов физических величин, что является важным шагом в достижении конечной цели структурного анализа УСИИ.

Предложено несколько вариантов формализованной записи УЧЗ с округлением данных до пола, до потолка и/или до половины младшего разряда без и с разделением целой и дробной частей используемых данных. Все они отображают специфику нового, разработанного автором, подхода к повышению точности машинной обработки данных, связанную с используемыми правилами округления данных, введением поправок в используемые математические операции и с формированием конституированных УЧЗ.

Описана процедура вывода метода повышения точности математической обработки данных (метода поправок)

для каждого варианта УЧЗ. Получено по семь способов введения поправок для каждого их 16-ти УЧЗ. Всего получено 224 способа введения поправок или способов формирования конституированных УЧЗ из одного базового УЧЗ.

В целом установлено, что общая методология повышения оперативности и точности математической и машинной обработки результатов измерительного преобразования рядов физических величин предполагает анализ структуры УСИИ, ее декомпозицию, представление через объединения с неизменными и видоизмененными связями между элементами его структуры, выбор способа введения поправок и условий подбора их числовых значений для создания и получения одной или нескольких конституированных структур УЧЗ, удобных для распараллеливания и получение скорректированного результата избыточных измерений.

### Литература

1. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология: теория структурного анализа уравнений избыточных и сверхизбыточных измерений. Сообщение 1/ В.Т.Кондратов //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. № 1, С. 17-26, 2016.
2. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология: теория структурного анализа уравнений избыточных и сверхизбыточных измерений. Сообщение 2 / В.Т.Кондратов //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. № 2, С. 7-22, 2016.
3. Платонов А. К., Казакова Р. К. Первая машинная обработка траекторных измерений спутника Земли. Режим доступа: <http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/VRAN/SPUTNIK.HTM>.
4. Округление. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%BA%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5>.
5. Округление числа. Режим доступа: <https://support.office.com/ru-ru/article/%D0%9E%D0%BA%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%B%D0%B0-f82b440b-689d-4221-b21e-38da99d33435>.
6. Целочисленные функции. Режим доступа: <http://www.williamsublishing.com/PDF/978-5-8459-1588-7/part.pdf>.
7. Раздел 1. Приближенные числа и действия над ними. Режим доступа: [http://hm.tpu.ru/geologi/galanov%5CthislMetod\\_lection%5Cpribligennje\\_chisla.html](http://hm.tpu.ru/geologi/galanov%5CthislMetod_lection%5Cpribligennje_chisla.html).
8. Кондратов В.Т. Проблема работы с метрологическими числами – проблема, которая объединит метрологию, информатику и вычислительную технику / В.Т.Кондратов // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2008. – №7. – С. 13 – 22.
9. Что такое вычислительная математика. Режим доступа: [https://ru.wikibooks.org/wiki/%D0%A7%D1%82%D0%BE\\_%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B5\\_%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0](https://ru.wikibooks.org/wiki/%D0%A7%D1%82%D0%BE_%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0).
10. Погрешности основных арифметических операций. Режим доступа: <http://studopedia.info/2-1968.html>.
11. Прямая задача теории погрешностей. Режим доступа: <http://studopedia.info/2-1970.html>.
12. Свойства действий над числами. Режим доступа: <http://www.nado5.ru/e-book/svoystva-deistvii-nad-chislami>.
13. Паралельные вычисления. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5\\_%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F).

### References

1. Kondratov V.T. Fundamentalnaja metrologija: teorija struktornogo analiza uravnenij izbytochnykh i sverkhizbytochnykh izmerenij. Soobschenije 1/ V.T. Kondratov //Vymiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tekhnologichnykh protsesakh. № 1, S. 17-26, 2016.
2. Kondratov V.T. Fundamentalnaja metrologija: teorija struktornogo analiza uravnenij izbytochnykh i sverkhizbytochnykh izmerenij. Soobschenije 2/ V.T. Kondratov //Vymiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tekhnologichnykh protsesakh. № 2, S. 7-22, 2016.
3. Platonov A. K., Kazakova R. K. Pervaja mashinnaja obrabotka traektornykh izmerenij sputnika Zemli. Rezhim dostupa: <http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/VRAN/SPUTNIK.HTM>.
4. Okruglenije. Rezhim dostupa: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%BA%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5>.
5. Okruglenije chisla. Rezhim dostupa: <https://support.office.com/ru-ru/article/%D0%9E%D0%BA%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%B%D0%B0-f82b440b-689d-4221-b21e-38da99d33435>].
6. Tselochislennyje funkicii. Rezhim dostupa: <http://www.williamsublishing.com/PDF/978-5-8459-1588-7/part.pdf>.
7. Razdel 1. Priblizhennyje chisla i dejstvija nad nimi. Rezhim dostupa: [http://hm.tpu.ru/geologi/galanov%5CthislMetod\\_lection%5Cpribligennje\\_chisla.html](http://hm.tpu.ru/geologi/galanov%5CthislMetod_lection%5Cpribligennje_chisla.html).
8. Kondratov V.T. Problema raboty s metrologicheskimi chislami – problema, kotoraja obedinit netrologiju, informatiku i vychislitelnyu tekhniku / V.T. Kondratov // Kompyuterni zasoby, merezhi ta systemy. – 2008. – №7. – S. 13 – 22.
9. Chto takoje vychislitelnaja matematika. Rezhim dostupa: [https://ru.wikibooks.org/wiki/%D0%A7%D1%82%D0%BE\\_%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B5\\_%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0](https://ru.wikibooks.org/wiki/%D0%A7%D1%82%D0%BE_%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0).
10. Pogreshnosti osnovnykh arifmeticheskikh operatcyj. Rezhim dostupa: <http://studopedia.info/2-1968.html>.
11. Pryamaja zadacha teorii pogreshnostej. Rezhim dostupa: <http://studopedia.info/2-1970.html>.
12. Svoystva dejstvij nad chislami. Rezhim dostupa: <http://www.nado5.ru/e-book/svoystva-deistvii-nad-chislami>.
13. Svoystva dejstvij nad chislami. Rezhim dostupa: <http://www.nado5.ru/e-book/svoystva-deistvii-nad-chislami>.
14. Paralelnyje vychislenija. Rezhim dostupa: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5\\_%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F).