

**ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МЕТРОЛОГІЇ,
ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ**

УДК 389:681.2

В.Т. КОНДРАТОВ

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова, г. Київ

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: ТЕОРИЯ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА
УРАВНЕНИЙ ИЗБЫТОЧНЫХ И СВЕРХИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
СООБЩЕНИЕ 2**

В Сообщении 2 дальнейшее развитие получила теория и методы структурного анализа уравнений избыточных и сверхизбыточных измерений, направленные на повышение качества (точности, достоверности, оперативности, сопоставимости и стабильности) вычислительной обработки данных.

Рассмотрены пути осуществления структурного анализа и виды структур уравнений сверхизбыточных измерений. Впервые разработаны и приведены абсолютные, относительные и специальные показатели модифицированных и конституированных структур уравнений сверхизбыточных измерений, а также их условные обозначения.

Приведены общие основания для проведения декомпозиции уравнений сверхизбыточных измерений. Сформулированы этапы проведения общей процедуры структурного анализа.

Разработано ряд методов декомпозиции структуры уравнений сверхизбыточных измерений, описана их сущность и т.д.

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: объединения данных, декомпозиция, 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 2**

Abstract — In the message 2 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 improvement of quality (accuracy, reliability, efficiency, comparability and stability) computing data processing.

Ways of realization of the structural analysis and kinds of structures of the equations of super-redundant measurements are considered.

For the first time absolute, relative and special indicators modified and legally constituted structures of the equations of super-redundant measurements, and also their symbols are developed and resulted.

The general bases for carrying out of decomposition of the equations of super-redundant measurements are resulted. Stages of carrying out of the general procedure of the structural analysis are formulated.

It is developed a number of methods of decomposition of structure of the equations of super-redundant measurements, their essence is described.

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

Keywords: associations of data, decomposition, the structural analysis, the equations of redundant measurements.

Введение

В сообщении [1] описаны философские аспекты теории структурного анализа уравнений (сверх)избыточных измерений: законы, научные принципы и категории. Показано, что структура уравнений сверхизбыточных измерений (УСИИ) должна рассматриваться как состоящая из функционально независимых друг от друга, но закономерно связанных между собой объединений преобразованных и нормированных по значению физических величин, констант и коэффициентов пропорциональности, входящих в состав модифицированного УСИИ или уравнения числовых значений (УЧЗ).

В настоящем сообщении рассматриваются виды и типы структур, элементы и показатели структур УСИИ, 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 процесс изучения статических характеристик исходной и модифицированной структуры УСИИ, направленный на получение системы знаний об уравнении (сверх)избыточных измерений, об оптимальном алгоритме обработки данных во времени и в пространстве, а также о результатах оценки метрологических характеристик полученной структуры УСИИ или УЧЗ.

Предметом исследований являются: пути и методы осуществления структурного анализа УСИИ, показатели модифицированных и конституированных структур, процессы и методология декомпозиции УСИИ, процедура структурного анализа, объединения и модификации, направленные на всестороннюю оценку возможностей теории и методов структурного анализа УСИИ по повышению качества вычислительной обработки результатов измерительного преобразования рядов физических величин.

Целью работы является создание основ теории и методов структурного анализа уравнений избыточных и сверхизбыточных измерений.

Результаты исследований

1. Структурный анализ уравнений (сверх)избыточных измерений

Решаемые задачи

Структурный анализ уравнений избыточных измерений имеет свои особенности и включает решение следующих задач:

- определение типа структуры уравнения (сверх)избыточных измерений (линейная, функциональная, линейно-функциональная и др.);
- оценка и определение рационального числа уровней декомпозиции;
- распараллеливание структуры УСИИ с целью повышения оперативности обработки данных и определения оптимального числа микропроцессорных ядер в микроконтроллере;
- управление процессом обработки данных объединений и модифицированной структуры УСИИ в целом;
- оценка и порядок проведения вычислительных операций для обеспечения требуемой точности, достоверности и оперативности обработки;
- анализ и тестирование алгоритмов машинной обработки данных и др.

Типы структур

По степени упорядоченности различают следующие типы структур:

неупорядоченная или частично упорядоченная структура — структура с ограниченным количеством выделенных элементов, используемых для формирования объединений физических величин и коэффициентов и обработки их значений, представленных в виде приближенных чисел.

упорядоченная структура — иерархическая* структура, обеспечивающая выделение и формирование объединений, декомпозицию структуры и обработку приближенных чисел по частям, без распараллеливания структуры, но согласно порядку действий над числами и с учетом правил округления результатов сложения, вычитания, умножения и деления и т.д.;

модифицированная структура — оптимальная структура** уравнения (сверх)избыточных измерений, созданная в результате декомпозиции и распараллеливания исходной структуры, и выраженная через показатели объединений с неизменными базовыми связями между ними;

конституированная структура — модифицированная структура с видоизмененными локальными связями между структурными элементами внутри объединений и с сохраненными базовыми связями между объединениями, предназначенная для высокоточной математической обработки приближенных чисел с использованием операций распараллеливания и для создания алгоритма микропроцессорной обработки исходных и промежуточных данных.

Виды иерархических структур и их характеристика

В структурном анализе УСИИ различают четыре вида иерархических структур: линейная, функциональная, линейно-функциональная и составная структура неявного (неопределенного) вида.

Линейная структура модифицированного УСИИ характеризуется, как правило, одним-двумя показателями — вариантом метода и константой метода. Может быть представлена в виде двух параллельных ветвей (формализованных записей или «каналов») с ограниченным числом линейно соединенных структурных элементов, открытым или скрытым для глубинного анализа алгоритмом машинной обработки данных (с выполнением простых математических операций вычитания, умножения, сложения и деления).

Функциональная структура характеризуется тремя и более показателями, — основными и дополнительными вариантами метода, константами метода и переменными константами метода. Она может быть представлена двумя и более параллельными ветвями с распределенными во времени двумя, тремя и более шагами (операциями) обработки показателей согласно последовательности математических операций, открытым или скрытым для глубинного анализа алгоритмом машинной обработки данных (с выполнением математических операций возведения в квадрат, извлечения квадратного корня, логарифмирования, потенцирования вычитания, умножения, сложения и деления).

Структура смешанного типа (линейно-функциональная) является комбинированной (линейной и нелинейной) структурой и характеризуется всевозможными показателями модифицированных структур УСИИ и их связями между собой и с другими данными. Такая структура может быть представлена двумя и более параллельными ветвями, каждая из которой описывается распределенной во времени цепочкой математических операций одновременной обработкой данных, открытым или скрытым для глубинного анализа алгоритмом машинной обработки исходных и промежуточных данных и показателей.

Структуры неявного вида — структуры уравнений (сверх)избыточных измерений, представленные в неявном виде (независимые переменные $x_i, x_0, x_i + x_0, \dots$ и функции y_1, y_2, y_3, \dots связаны уравнением вида $F(x_i, x_0, x_i + x_0, \dots, y_1, y_2, y_3, \dots) = 0$, которое не разрешено относительно x_i , предполагающие распараллеливание вычислительных операций и использование для сравнения машинных операций поразрядного уравнивания.

Данная структура может быть представлена тремя-четырьмя и более параллельными ветвями, представляющими собой распределенные во времени цепочки математических операций одновременной

* Термин *иерархия* означает соподчиненность элементов структуры

** по числу элементов и вычислительных операций

обработкой данных, открытый или скрытый для глубинного анализа алгоритм машинной обработки исходных данных, промежуточных, а также показателей модифицированной структуры УСИИ.

Элементы и показатели структуры уравнений (сверх)избыточных измерений

При структурном анализе используются следующие элементы и показатели структуры УСИИ.

Элементы структуры, выражаемые посредством принятых обозначений и символов:

1. Преобразованные (не нормированные по значению) физические величины, их характеристики и связи (математические операции);

2. Физические величины, нормированных по значению, их характеристики и связи;

3. Преобразованные физические величины, нормированные по значению, их характеристики и связи;

4. Размерные универсальные физические константы.

Обобщенные показатели и коэффициенты:

1. Основная константа метода;

2. Дополнительная константа метода;

3. Основная переменная константа метода;

4. Дополнительная переменная константа метода;

5. Основная варианта метода;

6. Дополнительная варианта метода;

7. Коэффициенты пропорциональности;

8. Коэффициенты деления;

9. Коэффициенты масштабирования;

10. Коэффициент связи номинальных по значению показателей объединений;

11. Коэффициенты в виде аликвотных (египетских) дробей ($1/n$, где n — натуральное число, или числовые значения);

12. Коэффициенты трансформации и т.д. и т.п.;

13. Универсальные физические константы (безразмерные);

14. Закономерные связи (зависимости) между нормированными по значению физическими величинами, входящими в объединение, с априори известными характеристиками;

15. Закономерные связи между преобразованными физическими величинами, входящими в состав объединений;

16. Закономерные связи между априорно и апостериорно полученными физическими величинами;

17. Закономерные связи между физическими величинами и коэффициентами и т.д.;

Общие свойства вариант, констант и переменных констант

Разнообразие показателей модифицированной структуры УСИИ приведено в табл. 1.

Приведенные показатели представляют качественные и количественные характеристики объединений физических величин и коэффициентов, входящих в уравнения (сверх)избыточных измерений и обладают следующими общими свойствами:

1. Одноименные качественные характеристики представляют идентичные структуры объединений преобразованных физических величин установленных и неизвестных размеров (значений) и нормированных по значению физических величин и (см. табл. 1, 1-й, 2-й и 3-й столбцы соответственно);

2. Все показатели представляют собой безразмерные коэффициенты относительной изменчивости физических величин, входящих в объединение;

3. Числовые значения показателей изменяются линейно при малых линейных изменениях значений погрешностей измерительного преобразования или воспроизведения любой из физических величин, входящих в состав аналитического выражение, описывающего данное объединение (см. графические построения, приведенные на рисунке);

4. Числовые значения показателей увеличиваются линейно при одновременных малых линейных изменениях значений погрешностей измерительного преобразования или воспроизведения физических величин, входящих в состав числителя аналитического выражение, описывающего данное объединение (см. рисунок, прямые O_1A_1 , O_3A_3 , O_4A_4).

Отметим, что при графических построениях использовалось уравнение числовых значений $k_x = [(10 + \{\Delta_{x1}\}) - (2 + \{\Delta_{x2}\})] / [(8 + \{\Delta_{x3}\}) - (2 + \{\Delta_{x4}\})] = (8 + \{\Delta_{x12}\}) / (6 + \{\Delta_{x34}\})$ и его составные части — числитель и знаменатель. Изменение значения погрешности от нуля до единицы принято условно, с целью получения видимых изменений значений показателя k_x . Здесь $\{\Delta_{x1}\} \dots \{\Delta_{x34}\}$ — значения единиц младшего разряда.

5. Числовые значения показателей уменьшаются линейно при увеличении (одновременных малых линейных изменениях) значений погрешностей измерительного преобразования или воспроизведения физических величин, входящих в состав знаменателя аналитического выражения (см. рисунок, прямые O_1B_1 , O_3B_3 , O_4B_4);

6. Числовые значения показателей изменяются линейно при одновременных малых линейных изменениях значений погрешностей измерительного преобразования или воспроизведения физических величин, входящих в состав числителя и знаменателя аналитического выражение, описывающего данное объединение (см. рисунок, прямые O_1C_1 , O_2C_2 , O_3C_3 , O_4C_4). Причем, если значение числителя превышает значение знаменателя, то значение погрешности линейно увеличивается (см., например, изменения значений k_x в точках D_2 и E_2 относительно точек G_1 и G_2 , а также в точках D_4 и E_4 относительно точек H_4 и G_4). В противном случае ее значение уменьшается (см. значения, отмеченные точками H_3 и M_3 , H_4 и M_4).

Показатели модифицированной структуры уравнений (сверх)избыточных измерений			
№ п/п	Варианты метода	Вариабельные константы метода	Константы метода
1	$k_{x1} = \frac{S'_l(x_i + x_0) - S'_l x_0}{S'_l(x_i + x_0) - S'_l x_i} = \frac{x_i}{x_0}$	$k_{v1} = \frac{S'_l x_{01} - S'_l x_{00}}{S'_l x_{02} - S'_l x_{00}} = \frac{x_{01}}{x_{02}}$	$k_{o1} = \frac{x_{01}}{x_{02}}$
2	$k_{x2} = \frac{S'_l x_i - S'_l x_{00}}{S'_l x_0 - S'_l x_{00}} = \frac{x_i}{x_0}$	$k_{v2} = \frac{S'_l x_{02} - S'_l x_{00}}{S'_l x_{01} - S'_l x_{00}} = \frac{x_{02}}{x_{01}}$	$k_{o2} = \frac{x_{02}}{x_{01}}$
3	$k_{x3} = \frac{S'_l(x_i + x_0) - S'_l x_0}{S'_l x_0 - S'_l x_{00}} = \frac{x_i}{x_0}$	$k_{v3} = \frac{S'_l(x_{02} + x_{01}) - S'_l x_{01}}{S'_l x_{01} - S'_l x_{00}} = \frac{x_{02}}{x_{01}}$	$k_{o3} = \frac{x_{02}}{x_{01}}$
4	$k_{x4} = \frac{S'_l(x_i + x_{01}) - S'_l x_{01}}{S'_l x_{02} - S'_l x_{01}} = \frac{x_i}{x_{02} - x_{01}}$	$k_{v4} = \frac{S'_l x_{03} - S'_l x_{00}}{S'_l x_{02} - S'_l x_{01}} = \frac{x_{03}}{x_{02} - x_{01}}$	$k_{o4} = \frac{x_{03}}{x_{02} - x_{01}}$
5	$k_{x5} = \frac{S'_l(x_i + x_{01}) - S'_l x_{01}}{S'_l(x_{02} + x_{01}) - S'_l x_{00}} = \frac{x_i}{x_{02} + x_{01}}$	$k_{v5} = \frac{S'_l x_{03} - S'_l x_{00}}{S'_l(x_{02} + x_{01}) - S'_l x_{00}} = \frac{x_{03}}{x_{02} + x_{01}}$	$k_{o5} = \frac{x_{03}}{x_{02} + x_{01}}$
6	$k_{x6} = \frac{S'_l(x_i + x_{02}) - S'_l(x_{02} + x_{01})}{S'_l x_{03} - S'_l x_{00}} = \frac{x_i - x_{01}}{x_{03}}$	$k_{v6} = \frac{S'_l x_{02} - S'_l x_{01}}{S'_l x_{03} - S'_l x_{00}} = \frac{x_{02} - x_{01}}{x_{03}}$	$k_{o6} = \frac{x_{02} - x_{01}}{x_{03}}$
7	$k_{x7} = \frac{S'_l x_i - S'_l x_{01}}{S'_l x_{01} - S'_l x_{00}} = \frac{x_i - x_{01}}{x_{01}}$	$k_{v7} = \frac{S'_l x_{02} - S'_l x_{01}}{S'_l x_{01} - S'_l x_{00}} = \frac{x_{02} - x_{01}}{x_{01}}$	$k_{o7} = \frac{x_{02} - x_{01}}{x_{01}}$
8	$k_{x8} = \frac{S'_l(x_i + x_{02}) - S'_l x_{00}}{S'_l x_{01} - S'_l x_{00}} = \frac{x_i + x_{02}}{x_{01}}$	$k_{v8} = \frac{S'_l(x_{01} + x_{02}) - S'_l x_{00}}{S'_l x_{01} - S'_l x_{00}} = \frac{x_{01} + x_{02}}{x_{01}}$	$k_{o8} = \frac{x_{01} + x_{02}}{x_{01}}$
9	$k_{x9} = \frac{S'_l x_i - S'_l x_{01}}{S'_l x_{02} - S'_l x_{01}} = \frac{x_i - x_{01}}{x_{02} - x_{01}}$	$k_{v9} = \frac{S'_l x_{03} - S'_l x_{01}}{S'_l x_{02} - S'_l x_{01}} = \frac{x_{03} - x_{01}}{x_{02} - x_{01}}$	$k_{o9} = \frac{x_{03} - x_{01}}{x_{02} - x_{01}}$
10	$k_{x10} = \frac{S'_l x_i - S'_l x_{01}}{S'_l(x_i + x_{02}) - S'_l x_{00}} = \frac{x_i - x_{01}}{x_i + x_{02}}$	$k_{v10} = \frac{S'_l x_{03} - S'_l x_{01}}{S'_l(x_{02} + x_{01}) - S'_l x_{00}} = \frac{x_{03} - x_{01}}{x_{01} + x_{02}}$	$k_{o10} = \frac{x_{03} - x_{01}}{x_{01} + x_{02}}$
11	$k_{x11} = \frac{S'_l(x_i + x_0) - S'_l x_{00}}{S'_l x_i - S'_l x_0} = \frac{x_i + x_0}{x_i - x_0}$	$k_{v11} = \frac{S'_l(x_{02} + x_{01}) - S'_l x_{00}}{S'_l x_{02} - S'_l x_{01}} = \frac{x_{02} + x_{01}}{x_{02} - x_{01}}$	$k_{o11} = \frac{x_{02} + x_{01}}{x_{02} - x_{01}}$
12	$k_{x12} = \frac{S'_l(x_i + x_{02}) - S'_l x_{01}}{S'_l x_i - S'_l x_{00}} = \frac{(x_i + x_{02}) - x_{01}}{x_i}$	$k_{v12} = \frac{S'_l(x_{03} + x_{02}) - S'_l x_{01}}{S'_l x_{03} - S'_l x_{00}} = \frac{x_{03} + (x_{02} - x_{01})}{x_{03}}$	$k_{o12} = \frac{x_{03} + (x_{02} - x_{01})}{x_{03}}$
13	$k_{x13} = \frac{S'_l(x_i - x_{01}) - S'_l x_{02}}{S'_l x_i - S'_l x_{00}} = \frac{x_i - (x_{01} + x_{02})}{x_i}$	$k_{v13} = \frac{S'_l(x_{03} - x_{02}) - S'_l x_{01}}{S'_l x_{03} - S'_l x_{00}} = \frac{x_{03} - (x_{02} + x_{01})}{x_{03}}$	$k_{o13} = \frac{x_{03} - (x_{02} + x_{01})}{x_{03}}$
14	$k_{x14} = \frac{S'_l x_i - S'_l x_{01}}{S'_l(x_i + x_{02}) - S'_l x_{01}} = \frac{x_i - x_{01}}{x_i + (x_{02} - x_{01})}$	$k_{v14} = \frac{S'_l x_{03} - S'_l x_{01}}{S'_l(x_{03} + x_{02}) - S'_l x_{01}} = \frac{x_{03} - x_{01}}{(x_{03} - x_{01}) + x_{02}}$	$k_{o14} = \frac{x_{03} - x_{01}}{(x_{03} - x_{01}) + x_{02}}$
15	$k_{x15} = \frac{S'_l(x_i + x_{02}) - S'_l x_{01}}{S'_l x_i - S'_l x_{01}} = \frac{(x_i - x_{01}) + x_{02}}{x_i - x_{01}}$ и др.	$k_{v15} = \frac{S'_l(x_{03} + x_{02}) - S'_l x_{01}}{S'_l x_{03} - S'_l x_{01}} = \frac{(x_{03} - x_{01}) + x_{02}}{x_{03} - x_{01}}$ и др.	$k_{o15} = \frac{(x_{03} - x_{01}) + x_{02}}{x_{03} - x_{01}}$ и др.

Указанные изменения незначительны по сравнению с изменениями погрешностей в числителе или в знаменателе (см. прямые $O_2 C_2$, изменение положения точки M_2 относительно точки G_2).

Между показателями объединений физических величин и коэффициентов существуют следующие отличия:

1. Отличия в значениях показателей объединений, обусловленные разными видами связей (математических операций) между физическими величинами и коэффициентами, а следовательно, и в алгоритмах определения числовых значений показателей этих объединений.

2. Отличия в способах определения значений вариант метода и их погрешностей, вариабельных констант метода и их погрешностей по отношению к способам определения значений констант метода и их погрешностей. Благодаря «ручному» способу вычисления значений констант метода, погрешности вычисления минимальны и зависят от установленных значений погрешностей воспроизведения нормированных по значению одноименных физических величин, входящих в состав объединения.

3. Отличия в погрешностях определения значений показателей.

Наименьшие значения погрешности получают при определении значений констант метода. Погрешности воспроизведения установленных значений физических величин в 3 – 5 (10) раз меньше погрешностей определения значений искомой физической величины и поэтому результирующая погрешность определения значения константы метода минимальна. Значения погрешностей определения значений переменных констант метода больше значений погрешностей определения констант метода, но меньше погрешностей определения вариантов метода. Это объясняется наличием не только погрешностей воспроизведения, но и погрешностей измерительного преобразования нормированных по значению физических величин.

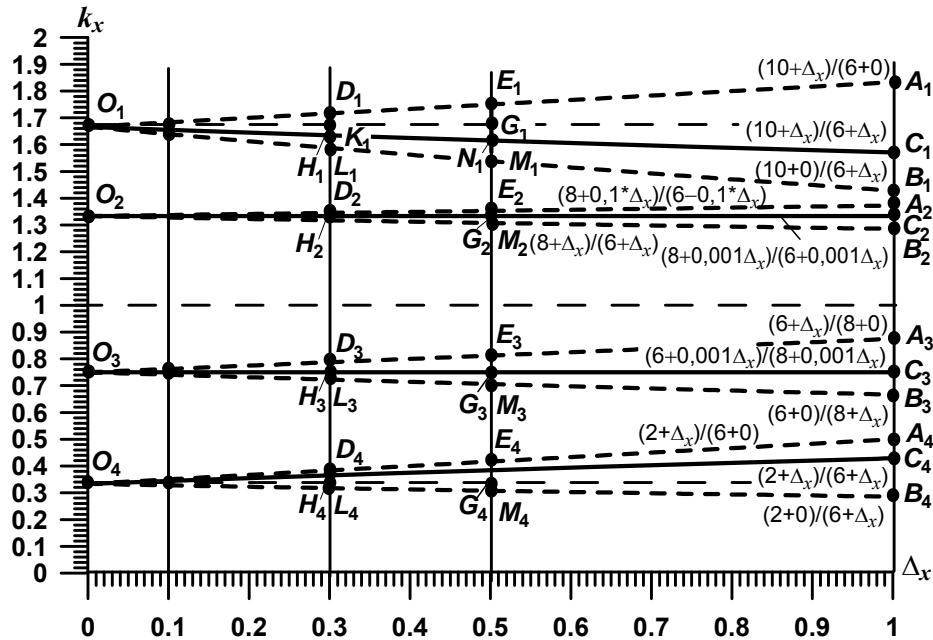


Рисунок. Графики зависимости значений варианты метода при линейном увеличении значений погрешности в небольших пределах

Наибольшие погрешности присущи результатам измерительного преобразования физических величин неизвестного размера, поскольку к ним добавляются и погрешности округления данных.

4. Отличия в структуре базовых связей между объединениями модифицированных структур УСИИ, при идентичных индивидуальных особенностях объединений.

5. Погрешности определения значений варианты метода и переменной константы метода, как частных от деления разностей двух величин, меньше составляющих погрешностей определения числовых значений числителя и знаменателя.

6. Отличия в индивидуальных особенностях структуры связей между физическими величинами каждого объединения, приводящих к различиям между модифицированными структурами УСИИ даже при одних тех же базовых связях и показателях объединений физических величин и коэффициентов.

Другими словами, модифицированные структуры, идентичные по базовым связям между объединениями, могут отличаться между собой тонкими структурами (конфигурациями) самих объединений.

7. Отличия в последовательности выполнения математических операций.

8. Отличия в использовании или не использовании уравнений замены величин с другим набором математических операций. Например, операция перемножения значений двух физических величин может быть представлена как $k_0 k_x$ или $[(k_0 + k_x)/k_2]^2 - [(k_0 - k_x)/k_2]^2$ (где $k_2 = 2$), операция $e^{k_x \ln k_0}$ — как $k_0^{k_x}$.

Если варианта метода $k_x = \frac{\{U'_3\} - \{U'_2\}}{\{U'_2\} - \{U'_1\}}$, то ее можно определить, например, как $\lg k_x = \lg(\{U'_3\} - \{U'_2\}) - \lg(\{U'_2\} - \{U'_1\}) = n$ с последующим использованием табличных данных логарифма и потенцирования: $k_x = 10^n$, т.е. нахождение числового значения по известному значению его логарифма.

Основные показатели структур УСИИ

К основным показателям структур УСИИ относятся [2]:

1. Ограниченное множество выделенных объединений;
2. Характеристики структурных элементов и связей внутри объединений;
3. Обобщенные показатели структур УСИИ, характеризующие их влияние на общность и различия, а также на структурные характеристики (варианты метода, константы метода, переменные константы метода, погрешности констант и коэффициентов, результирующую погрешность обработки данных по объединениям и данные модифицированной структуры в целом и др.).

4. Эффективность обработки данных:

по затратам времени $E_{t_3} = \Delta t_o / \Delta t_m$, где Δt_o и Δt_m — затраты времени на обработку данных до и после модификации УСИИ (индексы «о» и «м» — первые буквы слов «общие» и «модификация»);

по точности $E_{\Delta_b} = \Delta_o / \Delta_m$, где Δ_o и Δ_m — абсолютные погрешности вычисления данных до (индекс «о») и после (индекс «м») модификации УСИИ;

по количеству используемых машинных тактов $E_n = n_o / n_m$, где n_o и n_m — число машинных тактов до (индекс «о») и после (индекс «м») модификации УСИИ;

по числу математических операций $E_{m_o} = m_o / m_m$, где m_o и m_m — число математических операций до (индекс «о») и после (индекс «м») модификации УСИИ и др.;

5. Экономические затраты на получение и поддержание обобщенных показателей структур УСИИ — $E_{m_o} = s_o / s_m$, где s_o и s_m — затраты на поддержание показателей структуры УСИИ до (индекс «о») и после (индекс «м») модификации УСИИ и др.

Показатели модифицированных и конституированных структур уравнений (сверх)избыточных измерений

Различают абсолютные, относительные и специальные показатели модифицированных и конституированных структур уравнений избыточных измерений.

Абсолютные показатели:

физические величины (основные и производные, неизвестного и установленного размеров) $x_i, x_{o1}, x_{o2}, \dots, U_{x1}, \dots, U_{xn}, U_{o1}, U_{o2}, \dots$;

погрешности округления физических величин;

погрешности воспроизведения физических величин;

размерные фундаментальные физические константы: c , м/с — скорость света; e , Кл — элементарный заряд; k , Дж·К⁻¹ — постоянная Больцмана; ε_0 , Ф·м⁻¹ — электрическая постоянная; μ_0 , Гн·м⁻¹ — магнитная постоянная; Z_0 , Ω — волновое сопротивление; k , Ф·м — постоянная Кулона; эВ, Дж — электрон-вольт; $F = N_A e$ — постоянная Фарадея; σ , Вт·м⁻²·К⁻⁴ — постоянная Стефана – Больцмана; b , м·К — постоянная Вина и др.;

Относительные показатели:

безразмерные фундаментальные константы: число пи (π), число золотого сечения «Ф» или «Φ»), постоянная тонкой структуры « α », причем $\alpha^{20} = \sqrt[13]{\pi \Phi^{14}} \cdot 10^{-34}$, откуда $\alpha = 1/137,036009823754683675307501201348\dots$ и др.;

коэффициенты (постоянные, пропорциональности, деления, трансформации, связи, результирующие и т.д., обозначаемые посредством латинской буквы k с соответствующими индексами, например, $k_1, k_2, k_3, \dots, k_{п1}, k_{п2}, k_{п3}, \dots, k_{r1}, k_{r2}, k_{r3}$ и др.) и показатели « n », « m », « a » (степени, корня, основания и др.) с разными индексами.

Специальные показатели и их условные обозначения:

основные варианты метода, — $k_{x1}, k_{x2}, k_{x3}, \dots$, например, $k_{x1} = \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1}$, $k_{x2} = \frac{U'_3 - U'_2}{U'_2 - U'_1}$ и т.п.;

дополнительные варианты метода, — $k_{xd1}, k_{xd2}, k_{xd3}, \dots$, например, $k_{xd1} = \frac{(U'_5 - U'_1) + (U'_3 - U'_2)}{U'_2 - U'_1}$,

$k_{xd2} = \frac{U'_3 - U'_2}{(U'_2 - U'_1) + (U'_5 - U'_3)}$, $k_{xd4} = \frac{(U'_3 - U'_2) + (U'_5 - U'_4)}{(U'_2 - U'_1) + (U'_5 - U'_3)}$ и т.п., где U'_5 — преобразованная переменная величина;

мультипликаторные варианты метода — $k_{mx1} = g k_x$, $k_{mx2} = F / k_x$, $k_{mx3} = k_x / k_2$, где $\{g\} = 9,806\,65 \text{ м·с}^{-2}$, $\{F\} = 96\,485,332\,89(59) \text{ Кл·моль}^{-1}$, $k_2 = 2$, и т.п.;

основные константы метода, — например, $k_o = \frac{x_{o2} - x_{o1}}{x_{o3} - x_{o1}}$, $k_o = \frac{x_{o3} - x_{o2}}{x_{o3} - x_{o1}}$, представляющие собой отношения разностей других нормированных по значению одноименных физических величин x ;

дополнительные константы метода, — $k_{од1}, k_{од2}, k_{од3}, \dots$, например, $k_{од1} = \frac{x_{o2} - x_{o1}}{x_{o1} + x_{o2}}$, $k_{од2} = \frac{x_{o2} + x_{o1}}{x_{o1} - x_{o2}}$,

$k_{од3} = \frac{x_{o1} + x_{o3}}{x_{o1} + x_{o2}}$, $k_{од4} = \frac{x_{o2} - x_{o1}}{x_{o1}}$, $k_{од5} = \frac{x_{o2} + x_{o1}}{x_{o1}}$, $k_{од6} = \frac{x_{o1}}{x_{o1} + x_{o2}}$, $k_{од7} = \frac{x_{o1}}{x_{o1} - x_{o2}}$, $k_{од8} = \frac{x_{o1}}{x_{o2}}$ и др.;

мультипликаторные константы метода — $k_{mo1} = g k_o$, $k_{mo2} = F / k_o$, $k_{mo3} = k_o / k_2$, где $k_2 = 2$, и т.п.;

основные переменные константы метода, — $k_{v1}, k_{v2}, k_{v3}, \dots$, например, $k_{v1} = \frac{U'_3 - U'_1}{U'_3 - U'_2}$, $k_{v2} = \frac{U'_3 - U'_2}{U'_2 - U'_1}$,

т.е. отношения разностей преобразованных величин и др.

дополнительные переменные константы метода, — k_{vd1} , k_{vd2} , k_{vd3} , ..., например,

$$k_{vd1} = \frac{(U'_3 - U'_2) + (U'_3 - U'_1)}{U'_2 - U'_1}, k_{vd2} = \frac{U'_3 - U'_2}{(U'_2 - U'_1) + (U'_3 - U'_1)}, k_{vd3} = \frac{(U'_3 - U'_2) + (U'_3 - U'_1)}{(U'_2 - U'_1) + (U'_3 - U'_1)} \text{ и т.п.};$$

мультипликаторные переменные константы метода — $k_{mv1} = gk_v$, $k_{mv2} = F / k_v$, $k_{mv3} = k_v / k_2$ и т.п.;
 погрешности вычисления (показателей объединений, результирующего и других коэффициентов);
 погрешности воспроизведения числовых значений коэффициентов, в том числе и безразмерных
 фундаментальных физических констант, представленных приближенными числами.

Составляющие процесса структурного анализа

Структурный анализ осуществляется путем:
 изучения, оценивания и упорядочения структуры УСИИ;
 выделения объединений физических величин, констант и коэффициентов пропорциональности, ограниченных конечной совокупностью отношений и связей;
 решения существующих задач декомпозиции структуры;
 синтеза модифицированной структуры на базе объединений;
 замены, по возможности, сложных и неточных алгоритмов обработки данных более простыми и точными;
 обработки исходных данных по тому или иному объединению без их предварительного округления, но с округлением полученных значений показателей объединений;
 минимизации погрешностей микропроцессорной обработки (вычисления) каждого в отдельности и всех показателей модифицированной структуры УСИИ в совокупности.

Этапы структурного анализа ограниченного множества (ансамбля) УСИИ

- Общая процедура структурного анализа включает следующие основные этапы:
1. Анализ ограниченного множества структур УСИИ с разной степенью их организации (упорядочения);
 2. Пространственно-временное упорядочение элементов и связей в анализируемой структуре УСИИ;
 3. Формулирование критериев и оценка эффективности структур по оперативности, точности и достоверности обработки данных;
 4. Выделение, при необходимости, из множества УСИИ ансамблей структур по априори заданным признакам;
 5. Представление групп (подмножеств) структур УСИИ в виде объединений преобразованных и нормированных по значению физических величин, физических констант и коэффициентов с установленными связями между ними и с ограниченным числом арифметических операций;
 6. Определение качественных и количественных характеристик (показателей) выделенных объединений элементов и связей (оценивание каждой структур);
 7. Определение типа, качественных и количественных характеристик (показателей) модифицированных структур и их описание, т.е. оценивание объединений структур;
 8. Декомпозиция структуры УСИИ и ее представление через конечное число преобразованных и нормированных по значению физических величин, физических констант и коэффициентов;
 9. Формирование модифицированной структуры путем выделения функционально обособленных объединений с установленными связями:
 - а) между физическими величинами с априори известными характеристиками (значениями и погрешностями воспроизведения их номинальных значений);
 - б) между преобразованными физическими величинами, полученными в результате измерительного преобразования рядов входных величин;
 - в) между физическими величинами и коэффициентами;
 - г) между физическими величинами и константами.
 10. Структурный и метрологический анализ погрешностей до и после использования существующих правил округления числовых значений физических величин и констант, а также коэффициентов, используемых в объединениях;
 11. Качественная оценка погрешностей, вносимых выделенными объединениями в конечный результат избыточных измерений физических величин;
 12. Формирование критериев и оценка эффективности машинной обработки данных выделенных структур;
 13. Рекомендации по параллельной и последовательной во времени обработке данных объединений в структуре УСИИ;
 14. Рекомендации по формированию для статистической обработки подмножеств данных, полученных с помощью уравнений избыточных измерений или уравнений числовых значений, имеющих идентичные или подобные структуры.
 15. Принятие решения о необходимости совершенствования структурных характеристик УСИИ посредством совершенствования метода избыточных измерений и его математической модели.
 16. Выдача рекомендаций по обеспечению требуемого качества (точности, оперативности достоверности и т.д.) обработки данных по результатам структурного анализа.

В результате структурного анализа может быть достигнуто повышение точности избыточных измерений за счет модификации структуры УСИИ, выбора подходов и правил округления показателей объединений и оптимизации их погрешностей, установления новой последовательности операций машинной обработки показателей объединений модифицированной структуры с учетом предложенных подходов к усреднению данных.

2. Декомпозиция структур УСИИ: общие понятия и определения

Декомпозиция — это процесс упрощения чего-либо без потери целостности [5]. Такое определение не является корректным, поскольку характеризует целевую функцию как «процесс упрощения».

Структуру УСИИ всегда можно рассматривать как состоящую из функционально независимых друг от друга, но закономерно связанных между собой, объединений одноименных преобразованных и нормированных по значению физических величин, фундаментальных физических констант и коэффициентов.

Декомпозиция не меняет сути декомпозируемой структуры УСИИ. Она не только упрощает, но и помогает снять неопределенность или локализовать ее.

Декомпозиция структуры УСИИ — это процесс представления данной структуры через показатели функционально обособленных объединений* одноименных физических величин (преобразованных и не преобразованных, нормированных и неизвестного значения) и коэффициентов с модифицированными или неизменными связями между ними, а также с неизменными базовыми связями между показателями объединений, направленный на сохранение целевой функции УСИИ и достижение целевой функции структурного анализа — получение модифицированной и конституированной структур УСИИ, обеспечивающих повышение оперативности и уменьшения степени неопределенности конечного результата математической и машинной обработки данных.

Основания для декомпозиции

Согласно [7], можно выделить следующие основания для декомпозиции структуры УСИИ:

декомпозиция целей, — достижение поставленной цели или системы целей;

функциональная декомпозиция — декомпозиция с целью расширения функциональных возможностей УСИИ в части обработки и анализа данных с управлением и без управления процессами машинной обработки их во времени и в пространстве и т.п.;

структурная декомпозиция (декомпозиция по подсистемам) — декомпозиция параллельных подструктур УСИИ;

декомпозиция по структуре проблемы — декомпозиция с целью повышения точности обработки данных, оперативности вычислительной и машинной обработке данных;

декомпозиция по типам ресурсов системы (по входам) — декомпозиция по числу преобразуемых рядов физических величин, изменяющих структуру УСИИ, и декомпозиция при многократных измерительных преобразованиях физических величин со статистической обработкой данных и др.;

декомпозиция по получаемым результатам (выходам) — декомпозиция с целью получения достоверных результатов усреднения при определении вначале параметров функции преобразования измерительного канала (ФП ИК), затем значения искомой ФВ, погрешности, времени наработки на метрологический отказ и т.д.);

декомпозиция по тактам изменения во времени состояний измерительной системы — декомпозиция и распараллеливание структур УСИИ физических величин (ФВ), УСИИ параметров функции преобразования (ФП) ИК, УСИИ функционально преобразованных ФВ и т.д. в определенные дискретные моменты времени;

декомпозиция структуры УСИИ с учетом вида деятельности — по результатам тестирования, метрологической самопроверки и т.п.;

декомпозиция по этапам полного измерительного цикла — вначале декомпозиция структуры УСИИ, параметров ФП ИК, затем УСИИ искомой ФВ, потом УСИИ погрешности и т.д.);

Декомпозиция как процесс

Декомпозицию (структуризацию) можно представить как пятиступенчатый процесс, который включает в себя:

1) анализ, тестирование и упорядочение исходного уровня конфигурации структуры УСИИ (уровень упорядочения);

2) выделение объединений преобразованных и нормированных по значению физических величин, фундаментальных физических констант и коэффициентов с их взаимными внутренними и внешними связями и отношениями, получение модифицированной конфигурации структуры с неизменными базовыми связями, оценку погрешностей математической обработки данных (уровень декомпозиции);

3) модификацию и распараллеливание структуры УСИИ путем анализа и изменения связей и отношений между числовыми данными внутри объединений структуры с целью повышения оперативности и точности вычислительной (математической) обработки этих данных при неизменных закономерных связях между самими объединениями (первый уровень модификации без коррекции погрешностей);

4) видоизменение связей и отношений между числовыми данными внутри объединений модифицированной структуры, дополненной новыми структурными элементами и алгоритмами управления качеством вычислений с целью повышения точности и оперативности выполнения операций математической и машинной обработки данных, а в некоторых случаях, и между самими объединениями на новом уровне модификации.

Этот процесс направлен на создание не одной, а нескольких модифицированных структур с разными свойствами, но улучшенными метрологическими характеристиками (погрешностями вычисления и округления) и соответствует второму уровню модификации с коррекцией погрешностей. Последняя может осуществляться, например, путем установления и введения поправок в показатели объединений, изменения числовых значений преобразованных и нормированных по значению физических величин за счет изменения младших разрядов кодов этих величин и т.п.;

5) анализ свойств модифицированных структур, тестирование, выбор и узаконивание оптимальной

* характеризующих части целого

модифицированной структуры УСИИ, обеспечивающей достижение совокупности целей и формирование алгоритма машинной (микропроцессорной) обработки данных во времени и в пространстве (уровень конституирования).

Требования к структуре УСИИ, получаемой в результате декомпозиции [6]:

- целостность представления анализируемой структуры УСИИ на всех уровнях анализа и декомпозиции;
- иерархичность структуры;
- возможность использования количественных показателей по каждому фрагменту декомпозиции;
- возможность информационного и метрологического обеспечения на каждом уровне;
- возможность составления алгоритмов вычислительной и машинной обработки данных во времени (в виде определенной последовательности этапов (шагов)) и в пространстве (для каждого ядра микропроцессора).

3. Методы декомпозиции структуры УСИИ

Декомпозиция, как процесс расчленения, позволяет рассматривать любую исследуемую систему как сложную, состоящую из отдельных взаимосвязанных подсистем, которые, в свою очередь, также могут быть расчленены на части [7].

Одной из задач (целей) структурного анализа УСИИ является декомпозиция, — научный метод, использующий структуру уравнения (сверх)избыточных измерений и позволяющий ее расчленить и изменить путем формирования объединений преобразованных и нормированных по значению физических величин, физических констант и коэффициентов, находящихся в сложных связях и отношениях между собой и с другими объединениями и элементами структуры, а также формировать модифицированные структуры УСИИ, включающие в себя только нормированную по значению физическую величину и неизвестные и известные по значению безразмерные коэффициенты пропорциональности.

Следуя [8], выделим и рассмотрим возможные методы декомпозиции структуры уравнения (сверх)избыточных измерений.

3.1. Метод декомпозиции, направленный на повышения оперативности обработки данных

Оперативность — характеристика затрат времени необходимого для проведения какой-либо операции. В рассматриваемом случае речь идет о затратах времени на обработку данных согласно УСИИ с момента времени начала процесса измерения (измерительного преобразования входных физических величин) до получения конечного результата машинной обработки данных.

Показателями оперативности, согласно ГОСТ Р 51170-98, являются [9]:

1. Функция своевременности — вероятность своевременной обработки данных, рассматриваемая как функция заданного времени;
2. Вероятность своевременной обработки данных — вероятность того, что время обработки данных не превысит заданное (значение функции своевременности);
3. Среднее время обработки данных — математическое ожидание времени выполнения *технологического* процесса обработки данных.

Сущность метода декомпозиции структуры, обеспечивающего повышение оперативности обработки данных, состоит в:

- анализе структуры УСИИ во временных рамках получения числовых значений элементов структуры;
- учете затрат времени на подключение измеряемой физической величины ко входу измерительного канала и постоянной времени затухания переходных процессов, особенно в узкополосных каналах;
- учете затрат времени на получение результатов измерительного преобразования рядов физических величин при установленной или измененной последовательности выполнения математических операций;
- учете затрат общего времени измерительного преобразования рядов физических величин;
- в целенаправленной декомпозиции структуры УСИИ и ее модификации;
- представлении модифицированной структуры в виде алгоритма параллельной и последовательной обработки данных (с разделением выполняемых операций во времени и в пространстве);
- определении резервов времени для обработки данных в режиме текущего времени по мере их поступления;
- разработке одного или нескольких алгоритмов обработки данных, учитывающих разные методы выполнения математических и машинных операций, и в выборе оптимального по оперативности метода;
- принятии окончательного решения и выбор алгоритма пространственно-временной обработке данных: а) в режиме текущего времени, — одновременно и параллельно с процессами измерительного преобразования физических величин и с использованием резервов времени между тактами; б) по окончании всех тактов измерительного преобразования рядов физических величин; в) комбинированная пространственно-временная обработка данных;
- сравнительной оценке значений показателей оперативности обработки данных, полученных для разных методов декомпозиции структуры УСИИ.

В качестве показателей оперативности обработки данных может использоваться реальное время или число машинных тактов выполнения операций.

Системы обработки данных, в том числе и микропроцессорные, различаются по двум основным критериям: оперативность обработки данных и степень централизации обработки данных [10].

В зависимости от оперативности обработки данных используют два подхода:

- 1) обработка данных в реальном масштабе времени;
- 2) обработка данных в режиме разделения времени.

В первом случае данные обрабатываются параллельно с протекающим процессом (сверх)избыточных измерений. Это позволяет быстро и правильно использовать результаты промежуточной обработки получаемых данных для вмешательства в данный процесс и оперативно управлять им. В случае обработки данных в режиме разделения времени, данные обрабатываются после завершения всех тактов (цикла) измерений. Это не позволяет повлиять на его окончательные результаты, а лишь дает возможность их констатировать и использовать в дальнейшем в качестве исходных данных для последующих циклов измерений.

Особенности микропроцессорной обработки данных

Метрологам и программистам для решения задач обеспечения высокого качества машинной обработки данных необходимо знать и учитывать особенности микропроцессорной обработки данных, пути и методы повышения точности и/или скорости (оперативности) выполнения, прежде всего, простых арифметических операций. Приведем эти аспекты по данным работы [12].

Сложение чисел

При машинной обработке данных, алгоритм выполнения операции сложения для чисел с плавающей запятой отличается от алгоритма сложения для чисел с фиксированной запятой тем, что перед непосредственным суммированием выполняется сравнение и выравнивание порядков чисел. Результату суммирования присваивается порядок большего числа, а мантисса приводится к нормализованному виду [12].

Скорость выполнения операции суммирования определяется быстродействием сумматоров. Для повышения скорости выполнения операций сложения и вычитания применяются: а) схемы сквозных или одновременных групповых переносов; б) сумматоры с «условными суммами»; в) параллельно-параллельные сумматоры; г) асинхронные методы определения завершения переносов.

Умножение чисел

Различают четыре способа выполнения операции умножения: а) умножение на множитель со стороны младших разрядов со сдвигом частичных произведений вправо (множимое неподвижно); б) умножение на множитель со стороны младших разрядов со сдвигом множимого влево (частичные произведения неподвижны); в) умножение на множитель со стороны старших разрядов со сдвигом частичных произведений влево (множимое неподвижно); г) умножение на множитель со стороны старших разрядов со сдвигом множимого вправо (частичные произведения неподвижны).

При умножении чисел, представленных с плавающей запятой, порядок произведения равен сумме порядков сомножителей, а мантисса произведения — произведению мантисс сомножителей (результат приводится к нормализованному виду с одновременной корректировкой порядка).

Умножение отрицательных чисел, представленных обратным или дополнительным кодом, производится путем простого умножения этих кодов и введения поправок в предварительный результат, что осуществляется либо в процессе умножения, либо после него. Так, например, при отрицательном множителе, представленном дополнительным кодом, и положительным множимым, для получения правильного произведения требуется вычесть удвоенное множимое из произведения, полученного простым умножением. При представлении сомножителей обратным кодом обычно осуществляется перевод их в прямой код и умножение выполняется в прямых кодах с последующим преобразованием произведения в обратный код.

Методы ускорения выполнения математических операций с помощью микропроцессора

Способы ускорения операции умножения

Известны четыре способа ускорения операции умножения [12]:

- а) ускорение собственно операции сложения (вычитания);
- б) уменьшение общего количества сложений (вычитаний);
- в) замена одноразрядных сдвигов многоразрядными;
- г) совмещение во времени операций сложения и сдвига.

Перечисленные способы могут применяться самостоятельно и в любой комбинации, чем и обуславливается многообразие методов.

Методы ускорения умножения

Известные методы ускорения умножения можно разделить на логические и аппаратные в зависимости от дополнительных затрат оборудования.

Логические методы ускорения

К логическим методам относятся:

- а) метод пропуска тактов суммирования, если очередная цифра множителя нуль;
- б) метод группировки разрядов множителя и использование отрицательных весов разрядов для его представления;
- в) метод последовательного преобразования цифр множителя;
- г) метод совмещения сложения и сдвига.

При логических методах количества числовых регистров арифметического устройства сохраняется без изменения, а ускорение достигается за счет усложнения устройства управления. Для этих методов количество дополнительного оборудования N не зависит от числа разрядов сомножителей m .

Аппаратные методы ускорения

Аппаратные методы ускорения умножения основаны на введении:

- а) дополнительных цепей сдвига в регистрах для сокращения количества сдвигов;
- б) дополнительных суммирующих схем для ускорения сложений.

Необходимо отметить, что аппаратные методы ускорения требуют введения дополнительного оборудования в регистровую часть арифметического устройства. Его количество зависит от количества разрядов сомножителей m .

Различают аппаратные методы ускорения первого порядка, для которых характерна линейная зависимость N от m , и аппаратные методы второго порядка, для которых количество дополнительного оборудования пропорционально m^2 .

К аппаратным методам 1-го порядка относятся:

а) прием, заключающийся во введении многоразрядных сдвигов, и дополнительного многоразрядного сумматора со сдвигающими регистрами чисел;

б) метод одновременного умножения на старшую и младшую половины множителя; в) метод неполного суммирования.

К аппаратным методам 2-го порядка относится использование дополнительных суммирующих схем и инверторов, с помощью которых производится умножение на все разряды множителя параллельно.

Деление и извлечение квадратного корня

Операции деления и извлечения квадратного корня обычно выполняют по подпрограммам с помощью итерационного процесса, включающего операции сложения, вычитания, умножения. Выполнение этих операций по микропрограммам в арифметическом устройстве приводит к сокращению времени их выполнения по сравнению с подпрограммой, при незначительном увеличении количества оборудования в общем объеме микропроцессора [12].

В микропроцессорах применяется, как правило, метод деления без восстановления остатка. Его сущность состоит в том, что цифре частного присваивают значение «0», если очередной остаток получился отрицательный, и производят удвоение этого остатка с последующим прибавлением делителя. Знак частного определяется, как и при умножении.

При делении чисел, представленных с плавающей запятой, порядок результата соответствует разности порядков делителя и делимого с поправкой на нормализацию мантиссы результата. Деление чисел, представленных в обратном или дополнительном коде, не требует коррекций, как при умножении, а прибавление или вычитание делителя из очередного остатка устанавливают, сравнивая знаки остатка и делителя: если они не совпадают, то осуществляется прибавление делителя, если совпадают — вычитание (сложение и вычитание выполняется с учетом алгебр, знаков).

Методы ускорения операции деления

Как и при умножении, ускорение операции деления осуществляется на основе:

- а) сокращения количества сложений (вычитаний);
- б) ускорения собственно операции сложения (вычитания);
- в) введения многоразрядных сдвигов и т.д.

К логическим методам ускорения операции деления относятся:

- а) метод пропуска тактов вычитаний при нормализованном делителе путем анализа старших цифр остатка;
- б) метод замены тактов вычитания делителя из остатка тактами сдвига, если в старших разрядах остатка нули (соответствующие цифры частного равны нулям).

Аппаратные методы ускорения операции деления практически не отличаются от аппаратных методов умножения, так как используют то же оборудование и методы, например, метод неполного суммирования, использование дополнительных сумматоров и др.

Выполнение операции извлечения квадратного корня

Алгоритм выполнения операции извлечения квадратного корня, как самостоятельной операции, заключается в определении цифр корня, как и при делении, по знаку остатка, полученного в результате вычитания из очередной грани подкоренного выражения, начиная со старшей, удвоенного частичного корня (вычитание выполняется в дополнительном коде) [12]. Порядок результата, представленного плавающей запятой, равен порядку подкоренного выражения, деленному на два.

Рассмотрим несколько практических примеров по осуществлению структурного анализа УСИИ и декомпозиции структур, направленной на повышение оперативности обработки данных.

3.2. Методы повышения оперативности обработки данных на основе параллельных вычислений и распараллеливания программ

Идея распараллеливания вычислений, проводимых согласно структуры УСИИ или с использованием структуры УЧЗ известна. Она основана на том, что большинство задач обработки данных может быть разделено на набор меньших задач, которые могут быть решены одновременно.

Параллельные вычисления существуют в нескольких формах: параллелизм на уровне битов, параллелизм на уровне инструкций, параллелизм данных, параллелизм задач [13].

В метрологии наибольший интерес представляют методы повышения оперативности обработки данных на основе использования двух форм параллелизма: параллелизм данных и параллелизм программ. Сущность методов, основанных на параллелизме данных, заключается в том, что одна операция выполняется сразу над всеми элементами массива данных. Распараллеливание в этом случае чаще всего выполняется уже на этапе компиляции — перевода исходного текста программы в машинные команды. Роль программиста в этом случае обычно сводится к заданию настроек параллельной оптимизации компилятору, директив параллельной компиляции, использованию специализированных языков для параллельных вычислений.

Методы, основанные на параллелизме задач, подразумевают разбиение вычислительной задачи на несколько относительно самостоятельных подзадач, каждую из которых выполняет соответствующий процессор.

Следуя [14], можно утверждать, что методы, использующие параллельные вычисления, направлены на организацию компьютерных вычислений таким образом, при котором прикладные программы разрабатываются как набор взаимодействующих вычислительных процессов, работающих параллельно (одновременно).

Методы, использующие распараллеливание программ, направлены на осуществление процесса адаптации алгоритмов обработки данных, записанных в виде прикладных программ, с целью их эффективного исполнения на используемом процессоре.

Основная сложность при реализации методов распараллеливания программ состоит в обеспечении правильной последовательности взаимодействий между различными вычислительными процессами, а также в координации ресурсов, распределяемых между процессами.

Все эти методы повышения оперативности обработки данных во многом определяются структурой УСИИ.

3.3. Структурный анализ с использованием методов повышения оперативности обработки данных

Вначале осуществляется анализ структуры УСИИ в части ее упорядоченности. Затем структура УСИИ приводится к виду, удобному для выделения объединений и анализа погрешностей. После этого проводится декомпозиция структуры и представление ее через показатели модифицированных структур — константы, варианты и переменные константы и др. Далее осуществляется конституирование модифицированной структуры и получение структуры УСИИ со скрытым алгоритмом обработки данных. Этот алгоритм получают в виде, пригодном для распараллеливания. Для машинной обработки используется алгоритм параллельной обработки данных.

В табл.2 – табл. 3 приведены разные формы представления структур УСИИ входного сопротивления измерительного канала и результаты их упорядочения, модификации и конституирования.

Для получения правильного результата обработки данных должен установлен определённый порядок действий над числовыми значениями или над числами. Для указания порядка выполнения действий, пользуются скобками. Если скобки отсутствуют, то действия выполняются в следующем порядке [4]:

- 1) возведение в степень и извлечение корня (в порядке их следования);
- 2) умножение и деление (в порядке их следования);
- 3) сложение и вычитание (в порядке их следования).

В заключение отметим, что вопросы конституирования в рамках данного сообщения не рассматриваются, но будут рассмотрены в последующих сообщениях.

Таблица 2

Пример 1. Структура уравнений избыточных измерений входного сопротивления измерительного канала

№ п/п	Формы представления
1	Не полностью (частично) упорядоченная структура уравнения (сверх)избыточных измерений
	$R_{\text{вх}} = R_{01} \left(\frac{U'_5 - U'_2}{U'_2 - U'_1} \right) / \left(k_1 - \left(\frac{R_{01}}{R_{02}} + k_1 \right) \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right)$
2	Вариант 1. Структура уравнения (сверх)избыточных измерений после упорядочения, удобная для выделения объединений и анализа погрешностей
	$R_{\text{вх}} = R_{01} \left(\frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1} + k_1 \right) / \left(k_1 - \left(\frac{R_{01}}{R_{02}} + k_1 \right) \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right)$
3	Структура, полученная в результате декомпозиции исходной структуры, удобная для анализа погрешностей констант
	$R_{\text{вх}} = R_{01} \frac{k_{x1} - k_1}{k_1 - (k_{01} + k_1)k_{x1}} \text{ — УСИИ, а } \{R_{\text{вх}}\} = \{R_{01}\} \frac{k_{x1} - 1}{1 - (k_{01} + 1)k_{x1}} \text{ — УЧЗ, где } k_{x1} = \frac{\{U'_5\} - \{U'_1\}}{\{U'_2\} - \{U'_1\}} \text{ —}$ числовое значение варианты метода; $k_{01} = \frac{\{R_{01}\}}{\{R_{02}\}}$ — числовое значение константы метода.
4	Структура, полученная в результате конституирования, полностью формализованная, но не позволяющая осуществлять анализ погрешностей констант (структура со скрытым алгоритмом обработки)
	$R_{\text{вх}} = R_{01} \frac{k_{\text{хд}}}{k_{\text{ох1}}} = R_{01} k_{\text{п}} \text{ или } N_{\text{вх}} = \{R_{01}\} \frac{k_{\text{хд}}}{k_{\text{ох1}}} = N_{01} k_r, \text{ где коэффициенты } k_{\text{хд}} = k_{x1} - k_1,$ $k_{\text{ох1}} = k_1 - (k_{01} + k_1)k_{x1}, k_r = k_{\text{хд}}/k_{\text{ох}} \text{ . Результат получен с погрешностью со знаком плюс.}$
5	Алгоритм (процедура) параллельной обработки данных по модифицированному уравнению (сверх)избыточных измерений
	$(k_{x1} - k_1) \Rightarrow k_{\text{хд}} \Rightarrow : \Rightarrow k_r \times \{R_{01}\} \Rightarrow \{R_{\text{вх}}\}$ $(k_{01} + k_1) \Rightarrow k_{\text{ох}} \Rightarrow \times k_{x1} \Rightarrow k_{\text{ох3}} \Rightarrow (k_1 - k_{\text{ох3}}) \Rightarrow k_{\text{ох1}} \nearrow$

6	Вариант 2. Структура уравнения (сверх)избыточных измерений после упорядочения, удобная для выделения объединений и анализа погрешностей
	$R_{\text{вх}} = R_{01} \left(\frac{U'_5 - U'_2}{U'_2 - U'_1} \right) \left/ \left(k_1 - \left(\frac{R_{01}}{R_{02}} + k_1 \right) \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right) \right.$
7	Структура, полученная в результате декомпозиции исходной структуры, удобная для анализа погрешностей констант
	$R_{\text{вх}} = R_{01} \frac{k_{x2}}{k_1 - k_{02}k_{x1}} \text{ — УСИИ, а } \{R_{\text{вх}}\} = \{R_{01}\} \frac{k_{x2}}{1 - k_{02}k_{x1}} \text{ — УЧЗ,}$ <p>где $k_{x1} = \frac{\{U'_5\} - \{U'_1\}}{\{U'_2\} - \{U'_1\}}$ и $k_{x2} = \frac{\{U'_5\} - \{U'_2\}}{\{U'_2\} - \{U'_1\}}$ — значения первой и второй варианты метода; $k_{02} = \frac{\{R_{01}\}}{\{R_{02}\}} + 1$ — значение константы метода. Результат получают с меньшим числом операций машинной обработки данных; погрешность получают со знаком минус, т.к. $k_{x2} > k_{x1}$.</p>
8	Конституированная структура УЧЗ, представленная через показатели объединений, но не пригодная для анализа погрешностей констант (структура со скрытым алгоритмом обработки)
	$\{R_{\text{вх}}\} = \{R_{01}\} \left(\frac{\{U'_5\} - \{U'_2\}}{\{U'_2\} - \{U'_1\}} - 3 \text{ дес.ед.мл.р.} \right) \left/ \left(1 - \left(\frac{\{R_{01}\}}{\{R_{02}\}} + 1 \right) \frac{\{U'_5\} - \{U'_1\}}{\{U'_2\} - \{U'_1\}} \right) \right., \text{ откуда}$ $R_{\text{вх}} = R_{01} \frac{k_{x2} - k_3}{k_{\text{оx}}} = R_{01}k_{\text{п}} \text{ или } N_{\text{вх}} = \{R_{01}\} \frac{k_{x2} - k_3}{k_{\text{оx}}} = \{R_{01}\} \frac{k_{\text{хд}}}{k_{\text{оx}}} = N_{01}k_r,$ <p>где $k_3 = 0,03$ (или 3 дес.ед.мл.р.), коэффициенты $k_{\text{оx}} = k_1 - k_{02}k_{x1}$, $k_r = k_{\text{хд}}/k_{\text{оx}}$.</p>
9	Алгоритм (процедура) параллельной обработки данных по модифицированному уравнению (сверх)избыточных измерений
	$k_{x2} - 3 \text{ дес.ед.мл.р.} \rightarrow : \Rightarrow k_r \times \{R_{01}\} \Rightarrow \{R_{\text{вх}}\}$ $k_{02} \times k_{x1} \Rightarrow k_{\text{оx}} \Rightarrow (k_1 - k_{\text{оx}}) \Rightarrow k_{\text{оx}2} \nearrow$

Таблица 3

Пример 2. Структура уравнений избыточных измерений входного сопротивления измерительного канала

№ п/п	Формы представления
1	Не полностью (частично) упорядоченная структуры
	$R_{\text{вх}} = \left(R_{01}^2 \frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_2} + R_{02}^2 \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \right) \left/ \left(R_{01} \frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_2} - R_{02} \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \right) \right.$
2	Симметричная упорядоченная структура, удобная для выделения объединений и анализа погрешностей
	$R_{\text{вх}} = R_{02} \left(\frac{R_{01}^2 \frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_2} + k_1}{R_{02}^2 \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_2}} \right) \left/ \left(\frac{R_{01} \frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_2} - k_1}{R_{02} \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_2}} \right) \right.$
3	Модифицированная структура, полученная в результате декомпозиции, удобная для анализа погрешностей основных констант
	$R_{\text{вх}} = R_{02} \frac{k_{02}k_x + k_1}{k_{01}k_x - k_1} \text{ — УСИИ, } \{R_{\text{вх}}\} = \{R_{02}\} \frac{k_{02}k_x + 1}{k_{01}k_x - 1} \text{ — УЧЗ,}$ <p>где $k_{01} = \frac{\{R_{01}\}}{\{R_{02}\}}$, $k_{02} = \left(\frac{\{R_{01}\}}{\{R_{02}\}} \right)^2$, $k_x = \frac{\{U'_4\} - \{U'_2\}}{\{U'_4\} - \{U'_3\}}$, $k_1 = 1$</p>

4	Алгоритм (процедура) параллельной обработки данных по модифицированному уравнению (сверх)избыточных измерений
	$k_{o2} \times k_x \Rightarrow k_{o2x} + k_1 \Rightarrow k_{r1} \rightarrow \cdot \Rightarrow k_r \Rightarrow \times \{R_{02}\} \Rightarrow \{R_{bx}\}$ $k_{o1} \times k_x \Rightarrow k_{o1x} - k_1 \Rightarrow k_{r2} \nearrow$

Таблица 4

Пример 3. Структура уравнений избыточных измерений сопротивления резистора или резистивного сенсора

№ п/п	Формы представления
1	Не полностью (частично) упорядоченная структура уравнения (сверх)избыточных измерений
	$R_x = (R_{02} - R_{01}) / \left(\frac{U'_7 - U'_2}{U'_7 - U'_3} \cdot \frac{U'_3 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \cdot \frac{R_{02}}{R_{01}} - k_1 \right)$
2	Структура уравнения (сверх)избыточных измерений после упорядочения, удобная для выделения объединений и анализа погрешностей
	$R_x = R_{01} \left(k_1 - \frac{R_{01}}{R_{02}} \right) / \left(\left(\frac{U'_3 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \cdot \frac{U'_7 - U'_2}{U'_7 - U'_3} - \frac{R_{01}}{R_{02}} \right) \right)$
3	Структура, полученная в результате декомпозиции, удобная для анализа погрешностей констант и вариант метода
	$R_x = R_{01} \frac{k_1 - k_{o1}}{k_v k_x - k_{o1}} \text{ (1) или } R_x = R_{01} \frac{k_1 - k_1/k_{o1}}{k_1 - k_x k_v/k_{o1}} \text{ (2), } R_x = R_{01} \frac{k_1 - k_{o2}}{k_1 - k_x k_v/k_{o1}} \text{ (3), } R_x = R_{01} k_r \text{ (4)}$ <p>где $k_v = \frac{\{U'_3\} - \{U'_1\}}{\{U'_3\} - \{U'_2\}}$ — переменная константа метода; $k_x = \frac{\{U'_7\} - \{U'_3\}}{\{U'_7\} - \{U'_2\}}$ — варианта метода;</p> <p>$k_{o1} = \frac{\{R_{01}\}}{\{R_{02}\}}$ и $k_{o2} = \frac{\{R_{02}\}}{\{R_{01}\}}$ — константы метода; $k_1 = 1$; k_r — результирующий коэффициент пропорциональности.</p>
4	Структура, полученная в результате конституирования, полностью формализованная, но не позволяющая осуществлять анализ погрешностей констант (структура со скрытым алгоритмом обработки)
	$R_x = R_{01} \frac{k_{r1}}{k_{r2}} = k_r R_{01} \text{ или } N_{R_x} = \{R_{01}\} \frac{k_{r1}}{k_{r2}} = N_{R_{01}} k_r, \text{ где } k_{r1} = k_1 - k_1/k_{o1}, \text{ а } k_{r2} = k_1 - k_x k_v/k_{o1}.$
5	Алгоритм (процедура) параллельной обработки данных по модифицированному УСИИ
	$k_1 : k_{o1} \Rightarrow k_{п1} \Rightarrow (k_1 - k_{п1}) \Rightarrow k_{r1} \rightarrow \cdot \Rightarrow k_r \times \{R_{01}\} \Rightarrow \{R_{bx}\}$ $k_v \times k_x \Rightarrow k_{п2} \Rightarrow (k_1 - k_{п2}) \Rightarrow k_{r2} \nearrow$

Таблица 5

Пример 4. Структура уравнений избыточных измерений сопротивления резистора или резистивного сенсора

№ п/п	Формы представления
1	Не полностью (частично) упорядоченная структура уравнения (сверх)избыточных измерений
	$R_x = R_0 \sqrt{\frac{U'_6 - U'_1}{U'_7 - U'_6}} \cdot \sqrt{\frac{U'_7 - U'_2}{U'_2 - U'_1}}$
2	Структура уравнения (сверх)избыточных измерений после упорядочения, удобная для выделения объединений и анализа погрешностей
	$R_x = R_0 \sqrt{\frac{U'_6 - U'_1}{U'_2 - U'_1}} \cdot \sqrt{\frac{U'_7 - U'_2}{U'_7 - U'_6}}$
3	Структура, полученная в результате декомпозиции и конституирования структуры, удобная для анализа погрешностей констант и вариант метода

	$R_x = R_0 \sqrt{k_{x1} k_{x2}},$ <p>где $k_{x1} = \frac{\{U'_6\} - \{U'_1\}}{\{U'_2\} - \{U'_1\}}$ и $k_{x2} = \frac{\{U'_7\} - \{U'_2\}}{\{U'_7\} - \{U'_6\}}$ — первая и вторая варианты метода.</p>
4	Структура, полученная в результате конституирования, полностью формализованная, но не пригодная для анализа погрешностей констант (структура со скрытым алгоритмом обработки)
	$R_{\text{вх}} = R_0 k_r \text{ или } N_{R_x} = \{R_0\} k_r = N_{R_0} k_r,$ <p>где $\{R_0\}$ или N_{R_0} — числовое значение сопротивления образцового резистора; k_r — результирующий коэффициент пропорциональности.</p>
5	Алгоритм (процедура) параллельной обработки данных по модифицированному уравнению избыточных измерений

Таким образом, декомпозиция производится исходя из определенных представлений о структуре УСИИ и о ее составных элементах, исходя из конкретной технической задачи, и направлена на достижение трех системных целей: повышение оперативности и точности математической и машинной обработки данных.

В целом изучение и решение проблемы повышения оперативности и точности обработки данных должно проводиться с позиции системного подхода, — с использованием конечного множества различных типовых структур уравнений избыточных измерений одной и той же физической величины; с выбором и использованием ансамбля структур УСИИ, оптимальных по сложности, оперативности и точности обработки данных и с учетом возможностей используемого математического аппарата.

Вопросы повышения точности математической и машинной обработки данных, конституирования структуры УСИИ и практического применения методов структурного анализа будут изложены в сообщении 3.

Выводы

В работе дальнейшее развитие получила теория и методы структурного анализа уравнений избыточных и сверхизбыточных измерений, направленные на повышение качества (точности, достоверности, оперативности, сопоставимости и стабильности) вычислительной обработки данных и, как следствие, на обеспечение высокого качества (сверх)избыточных измерений.

Рассмотрены пути осуществления структурного анализа и виды структур уравнений (сверх)избыточных измерений.

Установлено и выделено 17 разновидностей элементов структуры уравнений (сверх)избыточных измерений, приведены основные показатели структуры и решаемые задачи структурного анализа.

Показано, что эффективность обработки данных оценивается по затратам времени, по точности, по количеству используемых машинных тактов и по числу математических операций.

Впервые разработаны и описаны абсолютные, относительные и специальные показатели модифицированных и конституированных структур уравнений (сверх)избыточных измерений, а также их условные обозначения и отличия. Сформулировано 16 этапов проведения общей процедуры структурного анализа.

Приведены общие понятия и определения декомпозиции структур уравнений (сверх)избыточных измерений.

Показано, что декомпозиция структуры — это процесс представления данной структуры через показатели функционально обособленных объединений одноименных физических величин (преобразованных и не преобразованных, нормированных и неизвестного значения) и коэффициентов с модифицированными или неизменными связями между ними, а также с неизменными базовыми связями между показателями объединений, направленный на сохранение целевой функции уравнения (сверх)избыточных измерений и достижение целевой функции структурного анализа — получение модифицированной и конституированной структур, обеспечивающих повышение оперативности и уменьшения степени неопределенности конечного результата математической и машинной (микропроцессорной) параллельной обработки данных.

Приведены общие основания для проведения декомпозиции уравнений (сверх)избыточных измерений.

Впервые описано ряд методов декомпозиции структуры уравнений (сверх)избыточных измерений, направленные на повышение оперативности обработки данных. Отдельное внимание уделено распараллеливанию вычислений и программ. Декомпозиция производится исходя из определенных представлений о структуре УСИИ и ее составных элементах, из конкретной технической задачи. Она направлена на достижение системных целей: повышение оперативности и точности математической и машинной обработки данных.

Рассмотрены особенности микропроцессорной обработки данных, пути и методы ускорения выполнения арифметических операций. Показано, например, что методы ускорения умножения и деления подразделяются на логические и аппаратные. Причем аппаратные методы ускорения операции деления практически не отличаются от аппаратных методов умножения, так как используют то же оборудование и подходы.

Приведены примеры разных форм представления структур УСИИ входного сопротивления измерительного канала, а также результаты их упорядочения, реструктуризации, модификации и конституирования.

Полученные результаты обогатили теорию структурного анализа вообще и уравнений (сверх)избыточных измерений в частности.

Литература

1. Кондратов В.Т. Фундаментальная метрология: теория структурного анализа уравнений избыточных и сверхизбыточных измерений. Сообщение 2 //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. № 2, pp. 11-16, 2016.
2. Структурный анализ и его особенности. Режим доступа: <http://www.portal-u.ru/issledovanie-sistem-upravleniya/struktornyj-analiz-i-ego-osobennosti>
3. Компьютерная катастрофа приближается. Режим доступа: file:///C:/Documents%20and%20Settings/Vlad/%D0%9C%D0%BE%D0%B8%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8B/1%20%D0%9C%D0%BE%D0%B8%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8B/DOCL_2008/%D0%A2%D1%80%D0%B5%D1%82%D1%8C%D1%8F%20%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B8%D1%82%20%D0%A0%D0%95%D0%92%D0%9E%D0%9B%D0%AE%D0%A6%D0%98%D0%AF.%20%D0%92%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%80%20%D0%AE%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%86%D0%BA%D0%B8%D0%B9.htm
4. Порядок действий. Скобки. Режим доступа: <http://www.bymath.net/studyguide/ari/ari3.html>.
5. Что такое декомпозиция? Режим доступа: <http://www.uml2.ru/forum/index.php?topic=47.0>
6. Вопрос 4.8. Декомпозиционные методы системного анализа. Принципы и основания декомпозиции. Режим доступа: http://www.life-prog.ru/1_3832_vopros--dekompozitsionnye-metodi-sistemnogo-analiza-printsipi-i-osnovaniya-dekompozitsii.html
7. Декомпозиция в тестировании и при анализе приложения. Режим доступа: <http://www.software-testing.by/blog/dekompozicia/>.
8. Теория управления. Принципы системного анализа. Режим доступа: <http://www.refbzd.ru/viewreferat-2577-6.html>
9. ГОСТ Р 51170-98 Качество служебной информации. Термины и определения. Режим доступа: <http://www.gosthelp.ru/text/GOSTR5117098Kachestvosluz.html>
10. Лекция 5. Технология обработки данных. Режим доступа: <http://studopedia.org/5-18431.html>
11. Введение в вычислительную математику. Режим доступа: <http://www.intuit.ru/studies/courses/1012/168/lecture/4590>
12. Операции над числами. Режим доступа: http://edu.sernam.ru/book_kiber2.php?id=160
13. [Параллельные вычислительные системы. 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%82%D0%B5%D0%BC%D1%8B>].
14. Параллельные 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%82%D0%B5%D0%BC%D1%8B>].

References

1. V. T. Kondratov. Fundamentalnaja metrologija: teorija struktornogo analiza uravnenij izbytochnykh i sverkhizbytochnykh izmerenij. Soobshchenije 2 //Vymiryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tekhnologichnykh protsesakh, № 2, pp. 11-16, 2016.
2. Struktornyj analiz i ego osobennosti. Rezhim dostupa: <http://www.portal-u.ru/issledovanie-sistem-upravleniya/struktornyj-analiz-i-ego-osobennosti>
3. Kompyuternaja katastrofa priblizhaetsja. Rezhim dostupa: file:///C:/Documents%20and%20Settings/Vlad/%D0%9C%D0%BE%D0%B8%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8B/1%20%D0%9C%D0%BE%D0%B8%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8B/DOCL_2008/%D0%A2%D1%80%D0%B5%D1%82%D1%8C%D1%8F%20%D0%B2%D1%8B%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B8%D1%82%20%D0%A0%D0%95%D0%92%D0%9E%D0%9B%D0%AE%D0%A6%D0%98%D0%AF.%20%D0%92%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%80%20%D0%AE%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%86%D0%BA%D0%B8%D0%B9.htm
4. Poryadok dejstvij. Skobki. Rezhim dostupa: <http://www.bymath.net/studyguide/ari/ari3.html>].
5. Chto takoe dekompozicija? Rezhim dostupa: <http://www.uml2.ru/forum/index.php?topic=47.0>
6. Vopros 4.8. Dekompozitsionnye metody sistemnogo ayaliza. Printcipy i osnovanija dekompozicii. Rezym dostupa: http://www.life-prog.ru/1_3832_vopros--dekompozitsionnye-metodi-sistemnogo-analiza-printsipi-i-osnovaniya-dekompozitsii.html
7. Dekompozicija v testirovanii i pri analize prilozhenija. Rezhim dostupa: <http://www.software-testing.by/blog/dekompozicia/>.
8. Teoriya upravlenija. Printcipy sistemnogo analiza. Rezhim dostupa: <http://www.refbzd.ru/viewreferat-2577-6.html>
9. GOST P 51170-98 Kachestvo sluzheboj Kachestvo служебной информации. Термины и определения. Rezhim dostupa: <http://www.gosthelp.ru/text/GOSTR5117098Kachestvosluz.html>
10. Lekcija 5. Tekhnologija obrabotki dannykh. Rezhim dostupa: <http://studopedia.org/5-18431.html>
11. Vvedenie v vychislitelnuju matematiku. Rezhim dostupa: <http://www.intuit.ru/studies/courses/1012/168/lecture/4590>
12. Operacii nad chislami. Rezhim dostupa: http://edu.sernam.ru/book_kiber2.php?id=160
13. Parallelnyje vychislitelnye sistemy. 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%82%D0%B5%D0%BC%D1%8B>]. \
14. Parallelnyje 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%82%D0%B5%D0%BC%D1%8B>].

Рецензія/Peer review : 23.6.2016 p.

Надрукована/Printed : 27.6.2016 p.