

Такий результат розрізнення не може задовольняти сучасним вимогам інформаційного забезпечення.

З результатів проведеного аналізу випливають два попередніх висновки-рекомендації, виконання яких можна реалізувати в ході модернізації існуючих зразків оглядових РЛ РН:

- 1) забезпечення великого динамічного діапазону приймального тракту (до 50 і більше дБ);
- 2) усунення впливу пристроїв знімання інформації на реальну РС за рахунок застосування замість індикаторів дисплейних систем з цифровим зніманням або зменшення ступеня впливу до 5... 10 %.

Не маючи достовірних даних по статистиці і прогнозуванню параметрів повітряних потоків в умовах високої їх інтенсивності, виходячи з розумного підходу з точки зору можливостей сучасної технології побудови радіолокаційних засобів, можна в якості тактичної вимоги до лінійного розрізнення запропонувати наступне: забезпечити при ширині ДС  $1,2^\circ$  лінійне розрізнення:

- на дальності 100 км – до 1 км,
- на дальності 75 км – не більше 650 м,
- на дальності 50 км – 450 м.

Така задача може бути вирішена тільки при застосуванні методів і алгоритмів обробки, що одержали назву «надрозрізнення». Практичні потреби в розрізненні близьких джерел випромінювання стимулювали розробку великого числа методів «надрелеївського» розрізнення. Найбільш відомими і достатньо теоретично проробленими є методи спектрального оцінювання [4]. Практичне застосування будь-якого з цих методів в оглядових РЛС систем радіонавігації обмежується цілою низкою факторів: високими вимогами до обчислювальних ресурсів системи обробки, орієнтацією на розрізнення сигналів, структура яких відрізняється від використовуваних в РЛС РН та інше.

**Висновок.** Забезпечення підвищених вимог до інформаційних характеристик оглядових РЛС навігації вимагає пошуку алгоритмів «надрозрізнення», прийнятних з точки зору можливостей практичної реалізації, а також розробці нових методів просторово-часової обробки сигналів.

#### Література

1. Перевезенцев Л.Т. Радиолокационные системы аэропортов / Л.Т. Перевезенцев, В.Н. Огарков. – М. : Транспорт, 1991. – 360 с.
2. Радионавигация. Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – № 1.
3. Теория радиолокационных систем / [под ред. С.В. Ленкова]. – К. : «Киевский университет», 2008. – 350 с.
4. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Марпл С.Л.; [пер. с англ.]. – М. : Мир, 1990.

Надійшла 23.11.2012 р.  
Рецензент: д.т.н. Шинкарук О.М.

УДК 389.001(075.8)

**В.Т. КОНДРАТОВ**

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины

### **ТЕОРИЯ ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ: РЕШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НЕНАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ БЕЗ ПРИПИСЫВАЕМОЙ ОБЪЕКТУ ИЗМЕРЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ. СООБЩЕНИЕ 1.3**

*В сообщении 1.3 рассмотрены пути и методы решения задач избыточных измерений физических величин ненаправленного действия без приписываемой объекту измерений математической модели и при линейной функции преобразования измерительного канала.*

*Ключевые слова: метрологические задачи, методы решения, избыточные измерения, информационно-избыточные модели.*

*In the message 1.3 ways and methods of the decision of metrological problems of redundant measurements of physical sizes of the no directional action are considered. And problems without attributed to object of measurements of mathematical model are considered and at linear function of transformation of the measuring channel.*

*Keywords: metrological problems, decision methods, redundant measurements, informatively-redundant models.*

#### **Введение**

Как было показано в [1], при решении задач избыточных измерений физических величин ненаправленного действия (при линейной функции преобразования измерительного канала) предпочтительно использовать ряды физических величин (ФВ), связанные между собой по закону геометрической прогрессии. В этом случае осуществляется опосредованное формирования физических величин методом линейного

преобразования системы координат, в частности — методом поворота системы координат на угол  $\alpha$ , при котором, например,  $\operatorname{tg}\alpha = S_{л2}''$ .

В настоящей работе рассматривается еще три примера решения измерительных задач при использовании рядов измеряемых физических величин ненаправленного действия. При этом их размеры связаны между собой по законам арифметической и/или геометрической прогрессий. Покажем особую роль составных и сопряженных физических величин при решении измерительных задач.

**Объект исследований** — процесс избыточных измерений.

**Предмет исследований** — процесс избыточных измерений при решении метрологических задач без приписываемой объекту измерений математической модели и при линейной функции преобразования измерительного канала.

**Целью работы** является ознакомление ученых и специалистов с путями и методами решения метрологических задач без приписываемой объекту измерений математической модели.

## Результаты исследований

### 1. Естественные, составные, сопряженные и сопряжено-составные физические величины

Физические величины, участвующие в измерительном преобразовании, составляют ряды величин, размеры которых связаны между собой по законам арифметической и /или геометрической прогрессий. С позиции теории избыточных измерений используемые физические величины могут быть разделены по признаку сопряженности на: (естественные (реальные или несопряженные), составные, сопряженные и сопряжено-составные).

#### Определение 1 (классическое)

Естественная физическая величина — свойство, общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

#### Определение 2

Составной называется физическая величина, которая в количественном отношении представляет сумму или разность количественных определенностей свойств двух других однородных с ней физических величин.

Составные физически величины следует записывать следующим образом: ФВ  $x_{c1}$  с размером  $\{x_{c1}\} = \{x_i\} + \{\Delta x_0\}$  или ФВ  $x_{c1} (\{x_{c1}\} = \{x_i\} + \{\Delta x_0\})$ , где индекс «с» является первой буквой слова «сопряжение\*». Это объясняется тем, что в общем случае физические величины, как свойства, не складываются и не вычитаются. Например, нельзя сложить две температуры, как нельзя сложить и две концентрации или влажности. Запись вида  $x_{c1} = x_i + \Delta x_0$  является некорректной, поскольку не характеризует количественную определенность свойств. Корректной является запись вида:  $t_x = 15^\circ\text{C} + 5^\circ\text{C} = 20^\circ\text{C}$ , т.е. с указанием размера (или значения) однородных физических величин и их единицы.

#### Определение 3

Спряженной будем называть однородную с реальной физическую величину, свойство которой в количественном отношении изменено в установленное число раз. Сопряжение — взаимосвязь чего-либо с чем-либо, неперменное соупутствие, совмещение нескольких объектов, явлений [3].

Спряженная физическая величины связана с исходной (реальной) через операцию масштабного преобразования размера последней. Сопряженные величины описываются уравнением связи между однородными величинами. Связующим буквенным символом является безразмерный коэффициент масштабного преобразования.

Пример записи уравнений величин:  $x_{c1} = k_{л1}x_i$ ,  $x_{c2} = k_{л1}\Delta x_0$ ,  $x_{c3} = k_{л1}x_0$ . В данном случае в качестве коэффициента масштабного преобразования используется коэффициент локальной линеаризации  $k_{л}$  ( $k_{л} \neq 1$ ). Практически может быть использован коэффициент масштабного преобразования любого иного принятого (нормированного) значения.

#### Определение 4

Сопряжено-составной физической величиной называется величина, количественная определенность свойства которой равна сумме или разности преобразованных в заданное число раз количественных определенностей свойств двух однородных с ней физических величин.

В качестве примера структуры этих величин можно привести уравнения связи между числовыми значениями исходных величин и коэффициентами в виде:  $\{x_{c1}\} = k_{л}(\{x_i\} + \{\Delta x_0\})$ ,  $\{x_{c2}\} = k_{л}(\{x_i\} - \{\Delta x_0\})$ ,  $\{x_{c3}\} = k_{л}(\{x_i\} + \{x_0\})$ ,  $\{x_{c4}\} = k_{л}(\{x_i\} - \{\Delta x_0\})$ ,  $\{x_{c5}\} = k_{л1}(\{x_i\} + k_{л2}\{\Delta x_0\})$ .

В основу опосредованного формирования составных, сопряженных и сопряжено-составных физических величин положены методы линейного преобразования системы координат. С математической точки зрения они именуется как: методы поворота системы координат на заданный угол  $\alpha$  (см. [2], рис. 1 – рис. 4), методы смещения системы координат по оси абсцисс и/или ординат и методы одновременного поворота и смещения осей координат на установленные значения этих параметров.

С метрологической точки зрения в их основу положены: в первом случае, — методы формирования составных физических величины, отличающихся от преобразуемых на наперед заданное значение  $\{x_0\}$ ,  $\{\Delta x_0\}$  или

$\{x_i\}$  путем изменения смещения функции преобразования на заданное значение (или параметров переменных сигналов); во втором, — методы формирования физических величин, сопряженных с преобразуемыми ФВ  $x_0, \Delta x_0$  или  $x_i$ , за счет нормированного изменения значения крутизны преобразования  $S'_л$  линейной функции преобразования измерительного канала; а в третьем — методы формирования сопряженно-составных физических величин путем измерения обоих параметров линейной функции преобразования измерительного канала. Перечисленные методы расширяют наши возможности по физической реализации составных и сопряжено-составных физических величин.

## 2. Метрологические задачи

### Метрологическая задача 7

Поставлена метрологическая задача высокоточного определения действительных значений искомой физической величины ненаправленного действия и параметров функции преобразования измерительного канала с целью контроля его текущего состояния и поддержания метрологической сверхнадежности интеллектуальной измерительной системы «ОИ – СИИ». Предположим, что измеряемые физические величины ненаправленного действия представлены рядом:

$$\left. \begin{aligned} \{x_1\} &= \{x_0\}, \\ \{x_2\} &= \{\Delta x_0\}, \\ \{x_3\} &= \{x_i\} + \{\Delta x_0\}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

согласно которому используются две опорные физические величины принятых размеров  $\{x_0\}$  и  $\{\Delta x_0\}$ , а размер третьей составной физической величины выбирается равным сумме размеров первой и второй физических величин. В этом случае математическая модель процесса избыточных измерений примет вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{л1}(x_1) &= S'_л x_0 + \Delta U'_{л}, \\ U_{л2}(x_2) &= S'_л \Delta x_0 + \Delta U'_{л}, \\ U_{л3}(x_3) &= S'_л (x_i + \Delta x_0) + \Delta U'_{л}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Прежде, чем описать решение данной метрологической задачи, покажем, что при избыточных измерениях физических величин ненаправленного действия использование рядов физических величин, размеры которых составляют арифметическую погрешность, может привести к дополнительной методической погрешности.

Математически решение системы (2) не представляет трудностей. Из (2) легко определить уравнения избыточных измерений для всех неизвестных.

Как видно из (1), размеры физических величин  $x_i$  и  $x_0$  связаны между собой по закону арифметической прогрессии. Физически сложить величины ненаправленного действия практически не возможно. Стоит задача формирования такого воздействия на сенсор или измерительный канал, которое бы вызвало такую же ответную реакцию, как действие суммарной по значению ФВ  $x_3$  ( $\{x_3\} = \{x_i\} + \{\Delta x_0\}$ ).

На первый взгляд данная задача может быть решена путем использования метода линейного преобразования системы координат, а именно, — нормированного смещения системы координат вниз по оси ординат. Это соответствует нормированному смещению функции преобразования вверх на наперед заданное значение.

Действительно, в результате измерительного преобразования, например, ФВ  $\Delta x_0$ , получают напряжение

$$U_{л2} = S'_л \Delta x_0 + \Delta U'_{л}. \quad (3)$$

Напряжение (3) преобразуется в код числа

$$N_2 = {}^1S_a (S'_л \Delta x_0 + \Delta U'_{л}), \quad (4)$$

где  ${}^1S_a$  – крутизна аналого-цифрового преобразования единичного значения ( $\{{}^1S_a\} = 1$ ). Полученный результат (4) запоминается. Далее осуществляется обратное преобразование кода числа (4) в напряжение смещения

$$U'_0 = {}^1S_{ц} N_2 = {}^1S_{ц} ({}^1S_a (S'_л \Delta x_0 + \Delta U'_{л})) = S'_л \Delta x_0 + \Delta U'_{л}, \quad (5)$$

где  ${}^1S_{ц}$  – крутизна цифро-аналогового преобразования единичного значения ( $\{{}^1S_{ц}\} = 1$ ),

Затем осуществляется смещение системы координат вниз на нормированное значение, что соответствует смещению графика линейной функции преобразования вверх на то же нормированное значение  $\{U'_0\}$  (5). После этого проводится измерительное преобразование ФВ  $x_i$  при смещенной на  $U'_0$  (5) функции преобразования. Математически указанные операции запишутся таким образом:

$$U_{л3} = U'_0 + S'_л x_i + \Delta U_{л} = S'_л (x_i + \Delta x_0) + k_2 \Delta U'_{л}. \quad (6)$$

где  $k_2 = 2$ .

Как видно из (6), результат измерительного преобразования ФВ  $x_i$  при смещенной на  $U'_0$  функции преобразования эквивалентен действию на вход ИК ФВ  $x_3$ . Но результат преобразования не является точным,

поскольку начальное смещение  $\Delta U'_л$  функции преобразования удвоилось и стало равным  $k_2\{\Delta U'_л\}$ . Это вносит дополнительную погрешность в результат избыточных измерений. В этой связи следует внимательно относиться к моделированию процессов преобразования, чтобы не допустить внесения новых методических погрешностей.

В рассмотренном случае исключение дополнительной методической погрешности может быть обеспечено путем сохранения первоначального значения смещения, т.е. исключения в (6) множителя  $k_2$ . Для этого необходимо осуществить иную организацию процесса измерительного преобразования физических величин ненаправленного действия.

Для этого решим систему линейных уравнений величин (2) относительно неизвестных параметров и искомой ФВ  $x_i$ :

$$S'_л = \frac{U_{л1} - U_{л2}}{x_0 - \Delta x_0}, \tag{7}$$

$$\Delta U'_л = \frac{1}{k_2} \left[ (U_{л1} + U_{л2}) - \frac{x_0 + \Delta x_0}{x_0 - \Delta x_0} (U_{л1} - U_{л2}) \right], \tag{8}$$

$$x_i = (x_0 - \Delta x_0) \frac{U_{л3} - U_{л2}}{U_{л1} - U_{л2}}. \tag{9}$$

При решении подобных задач важно получить уравнение избыточных измерений текущего значения параметра  $S'_л$  (чувствительности измерительного канала). Зная априори заданное значение ФВ  $\Delta x_0$  и результаты измерительного преобразования ФВ  $x_0$  и  $\Delta x_0$ , не трудно определить текущее значение параметра  $S'_л$  согласно (7), а затем и напряжение смещения  $U_0$ , которое опишется уравнением числовых значений

$$\{U_0\} = \{^1S'_л\} N_1 = N_{Sл} \{\Delta x_0\}, \tag{10}$$

где  $N_{Sл}$  – числовое значение параметра  $S'_л$ , полученное в результате его определения согласно (7).

Затем проводится измерительное преобразование ФВ  $x_i$  при смещенной на  $\{U_0\}$  (10) функции преобразования измерительного канала. Математически эти операции запишутся следующим образом [2]:

$$U_{л3} = (U_0 + S'_л x_i) + \Delta U_л = S'_л (x_i + \Delta x_0) + \Delta U_л. \tag{11}$$

Таким образом получают выходное напряжение (11) измерительного канала, эквивалентное действию на его вход ФВ  $x_3$ , и в котором отсутствует дополнительная погрешность. Напряжение (11) используется для высокоточного определения действительного значения искомой физической величины и параметров линейной функции преобразования измерительного канала согласно уравнений избыточных измерений (7) – (9).

Формализованное описание информативно-избыточной модели измерительного канала для рассматриваемой метрологической задачи в общем виде описывается следующим образом [2]:

$$x_i \Big|_{i=1}^{i=n} \begin{matrix} pq \\ \Rightarrow \\ wm \end{matrix} U_{ли} \Big|_{\tau_{пр},c}^{\%_0, ppm/час} = S'_л x_i + \Delta U'_л \begin{matrix} k_{yc} \\ \Delta U_{л}, B \\ \uparrow U_{\Delta} \end{matrix} \begin{matrix} \text{АЦП, дв.р.} \\ \Rightarrow \\ f_{д}, кГц \end{matrix} N_i \Big|_{i=1}^{i=n}. \tag{12}$$

где  $x_i$  — физическая величина ненаправленного действия; *pq* — аббревиатура слов «physical quantity» (физическая величина); *wm* — аббревиатура слов «without modulation» (без модуляции); *wfb* — аббревиатура слов «wide frequency band» (широкая полоса частот) в кГц;  $S'_л$  и  $\Delta U'_л$  — параметры линейной функции преобразования;  $\%_0$  — нестабильность измерительного канала, ppm/час;  $\tau_{пр}$  — время преобразования, с;  $U_s$  — напряжение коррекции чувствительности (параметра  $S'_л$ );  $\Delta U_л$  — напряжение смещения, В;  $U_{\Delta}$  — напряжение коррекции смещения ФП (параметра  $\Delta U'_л$ );  $k_{yc}$  — коэффициент усиления,  $\dots \cdot 10^m$ ; АЦП — аналого-цифровое преобразование; дв. р. — сокращенное указание числа двоичных разрядов аналого-цифрового преобразователя;  $f_{д}$  — частота дискретизации в кГц;  $N_i$  — результат измерительного преобразования ФВ  $x_i$  (числовое значение выходного сигнала измерительного канала).

Обобщенная запись (12) дает качественное представление о процессах преобразования и о параметрах измерительного канала. Поэтому предпочтительнее приводить информативно-избыточную модель с указанием конкретных рекомендуемых значений параметров измерительного канала. В этой связи модель (12) с конкретными числовыми значениями параметров примет вид:

$$x_i \Big|_{i=1}^{i=2} \begin{matrix} x \\ \Rightarrow \\ wm \end{matrix} U_{ли} \Big|_{\tau_{пр} \leq 0,2c}^{\%_0 \leq 5 ppm/8 час} = S'_л x_i + \Delta U'_л \begin{matrix} k_{yc} \approx 0,5 \cdot 10^3 \\ \Delta U_{л} = 1 \cdot 10^{-3} B \\ \uparrow 1_{MB} \\ \Delta f = 300 кГц \end{matrix} \begin{matrix} \text{АЦП12} \\ \Rightarrow \\ f_{д} = 300 кГц \end{matrix} N_i \Big|_{i=1}^{i=3}. \tag{13}$$

В (13) знак « $\approx$ » означает, что принятое значение коэффициента усиления должно контролироваться, т.е. выполняться метрологический самоконтроль и корректировка. Периодичность последней определяется

стабільністю параметрів вимірювального каналу.

Формалізована інформативно-избыточная модель (13) читається наступним образом [2]: 1) вимірювальному преобразованню піддаються дві, а не три однородні фізическі величини ненаправленого діявства); 2) здійснюється пряме вимірювальне преобразованню кожної фізическої величини в напруженіе без модуляції; 3) вимірювальному каналу приписана лінійна функція преобразованню; 4) дрейф нуля не перевищує  $5\text{ppm}/8\text{час}$ ; 5) время преобразованню складає не більше 0,2 с; 6) коэффициент усиления вимірювального каналу (или значение параметра  $S_{л}$ ) равен 500; 7) полоса пропускания складає 300 кГц; 8) аналого-цифровое преобразованню выходного сигнала вимірювального каналу здійснюється 12-ти разрядним АЦП; 9) частота дискретизации  $f_{д} = 300\text{ кГц}$ ; 10) напруженіе коррекції смещения равно 1мВ.

Допускаються нововведення в формалізовану модель, забезпечуючі приближенність її числових значень к числовим значенням параметрів и характеристикам реальної фізическої моделі.

На рис. 1 и рис. 2 приведены два варианта структурных схем интеллектуальной измерительной системы «ОИ – СИИ», реализующей метод избыточных измерений, описанный выше в виде процедур измерительного преобразования рядов физических величин (1) ненаправленого діявства. Для підвищення уровня інтелектуальності введена експертна система ЭС. В качестве формировавателей фізическі величин (ФФВ) ненаправленого діявства на рис. 1 и рис. 2 используются объект вимірювань ОИ и стандартный образец СО, воспроизводящий ФВ двух размеров —  $\{x_0\}$  и  $\{\Delta x_0\}$ . В отличие от структурной схемы, приведенной на рис. 1, на рис. 2 в вимірювальний канал ІК дополнительно введены суммирующее устройство СУ и цифро-аналоговый преобразователь ЦАП, соединенные с другими функциональными блоками как показано на рис. 2. Управление работой функциональных блоков интеллектуальной измерительной системы осуществляется по соответствующей программе, записанной в микроконвертор МК или в сигнальный процессор СП.

В приведенных структурных схемах вместо меры используется стандартный образец СО, а формирование напруженіе смещения  $U_0$  возложено на цифроаналоговый преобразователь микроконвертора МК в соответствии с уравнением числовых значений (10). Управление работой функциональных блоков измерительной системы осуществляется по программе, записанной в памяти микроконвертора МК.

ФФВ фізическі величини  $x_0, \Delta x_0$  и  $x_i$  через коммутатор каналов КК поочередно воздействуют на вход ПИП (сенсора).

По программе, записанной в постоянном запоминающем устройстве микроконвертора МК (или сигнального процессора СП), реализуются приведенные выше математические модели избыточных измерений I-го рода. Математические модели избыточных измерения II-го или III-го рода реализовать не сложно. Для этого проводятся многократные измерительные преобразования ФВ  $x_1, x_2, x_3$  и многократное повторение всего цикла измерений. Для

установления номинального значения параметра  $S'_{л}$  с учетом (7), определяется разность полученного (7) и номинального значений чувствительности измерительного канала. По соответствующей программе на аналоговом выходе порта DA2 (см. рис. 1) (или на выходе ЦАП (рис. 2)) формируется управляющее напруженіе, которое поступает на вход управления измерительного преобразователя ИП (или СУ), компенсируя отклонение чувствительности от номинального значения.

При стабильных параметрах измерительного канала такты измерительного преобразования ФВ  $x_0$  и  $\Delta x_0$  принятых размеров могут осуществляться один раз за 10 мин., за 1 час или даже за 8 часов. Таким

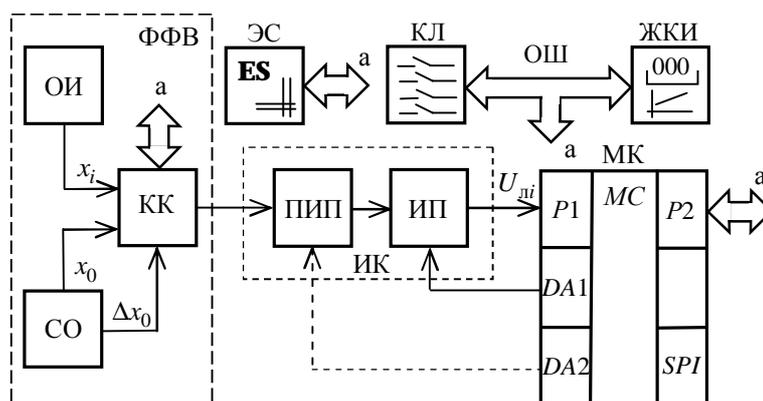


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной измерительной системы «ОИ – СИИ» с формирователем рядов физических величин ненаправленого діявства

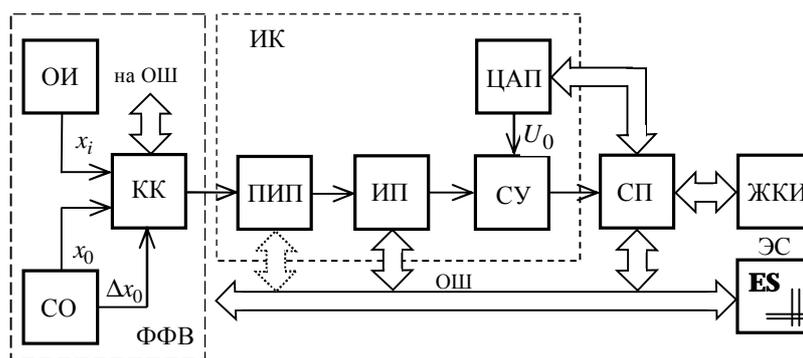


Рис. 2. Структурная схема интеллектуальной измерительной системы «ОИ – СИИ» с включенными в измерительный канал ЦАП и СУ

способом достигается повышение быстродействия избыточных измерений практически равным быстродействию прямых измерений.

Возможны частные случаи решения данной метрологической задачи, когда  $\{x_0\} = k_{\text{л}}\{\Delta x_0\}$  или  $\{\Delta x_0\} = \{x_0\}/k_{\text{л}}$ , где  $k_{\text{л}} \neq 1$ . При этом принятое значение  $\{x_0\}$  может соответствовать второй половине диапазона измеряемой физической величины, а  $\{\Delta x_0\}$  – его первой трети. Рассмотрим первый из них.

### Метрологическая задача 8

Недостатком предыдущей измерительной задачи является использование стандартных образцов, воспроизводящих опорные физические величины с размерами  $\{x_0\}$  и  $\{\Delta x_0\}$  (см. (1) и рис. 2). Приведенный на рис. 2 стандартный образец (СО) практически представляет собой два стандартных образца, воспроизводящих размеры указанных физических величин с разными погрешностями. Предпочтительнее использование одного стандартного образца. Рассмотрим решение измерительной задачи при наличии одного стандартного образца.

Для решения поставленной задачи избыточных измерений физической величины ненаправленного действия используем ряды физических величин следующих размеров :

$$\left. \begin{aligned} \{x_1\} &= \{x_i\}, \{x_2\} = \{x_0\}, \\ \{x_3\} &= k_2\{x_0\}, \{x_4\} = \{x_0\} + \{x_i\}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

С учетом (14), математическая модель процесса избыточных измерений примет вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{л1}}(x_1) &= S'_{\text{л}}x_i + \Delta U'_{\text{л}}, \\ U_{\text{л2}}(x_2) &= S'_{\text{л}}x_0 + \Delta U'_{\text{л}}, \\ U_{\text{л3}}(x_3) &= S'_{\text{л}}k_{\text{л}}x_0 + \Delta U'_{\text{л}}, \\ U_{\text{л4}}(x_4) &= S'_{\text{л}}(x_0 + x_i) + \Delta U'_{\text{л}}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Корректное решение задачи избыточных измерений физических величин ненаправленного действия достигается при использовании для «создания» ФВ  $x_3$  и  $x_4$  обоих способов линейного преобразования системы координат: поворота системы координат (или изменения параметра  $S'_{\text{л}}$  функции преобразования) и ее смещения (изменения параметра  $\Delta U'_{\text{л}}$  функции преобразования).

Для практической реализации рассматриваемого метода избыточных измерений необходимо наличие сенсора с дискретно изменяемой на нормированное значение крутизной преобразования и измерительного преобразователя с изменяемым с заданной точность смещением.

После проведения первого такта измерительного преобразования ФВ  $x_i$  в напряжение

$$U_{\text{л1}}(x_1) = S'_{\text{л}}x_i + \Delta U'_{\text{л}}, \quad (16)$$

осуществляется измерительное преобразование ФВ  $x_0$  при двух значениях крутизны преобразования: при  $S'_{\text{л}}$  и  $S''_{\text{л}} = k_{\text{л}}S'_{\text{л}}$ , где  $k_{\text{л}}$  – коэффициент локальной линеаризации. В результате во втором и третьем тактах получают напряжения

$$U_{\text{л2}} = S'_{\text{л}}x_0 + \Delta U'_{\text{л}} \quad (17)$$

и

$$U_{\text{л3}} = S'_{\text{л}}k_{\text{л}}x_0 + \Delta U'_{\text{л}}, \quad (18)$$

которые запоминаются.

Из разности (17) и (18) определяется уравнение избыточных измерений параметра  $S'_{\text{л}}$ :

$$S'_{\text{л}} = \frac{U_{\text{л3}} - U_{\text{л2}}}{x_0(k_{\text{л}} - 1)}. \quad (19)$$

Представим уравнение избыточных измерений (19) через уравнение числовых значений в виде

$$N_{\text{S}} = \frac{\{U_{\text{л3}}\} - \{U_{\text{л2}}\}}{\{x_0\}(k_{\text{л}} - 1)} = \frac{N_{\text{л3}} - N_{\text{л2}}}{\{x_0\}(k_{\text{л}} - 1)}, \quad (20)$$

по которому и определяется числовое значение параметра  $S'_{\text{л}}$ .

Числовое значение напряжения смещения определяется путем перемножения числовых значений  $\{x_0\}$  и  $N_{\text{S}}$  (18):

$$N_0 = \frac{\{U_{\text{л3}}\} - \{U_{\text{л2}}\}}{(k_{\text{л}} - 1)} = \frac{N_{\text{л3}} - N_{\text{л2}}}{(k_{\text{л}} - 1)}. \quad (21)$$

В результате обратного преобразования кода числа (21) получают напряжение смещения

$$U_0 = {}^1S_{\text{ц}}N_0 = {}^1S_{\text{ц}} \frac{N_{\text{л3}} - N_{\text{л2}}}{k_{\text{л}} - 1} = \frac{U_{\text{л3}} - U_{\text{л2}}}{k_{\text{л}} - 1} = \frac{U_{\text{л3}} - U_{\text{л2}}}{k_{\text{л}} - 1} = \frac{S'_{\text{л}}x_0(k_{\text{л}} - 1)}{k_{\text{л}} - 1} = S'_{\text{л}}x_0, \quad (22)$$

в котором отсутствует составляющая  $\Delta U'_{\text{л}}$ .

На полученное значение напряжения (22) система координат смещается вниз на  $\{U_0\}$ , что соответствует

смещению графика линейной функции преобразования вверх на  $\{U_0\}$ , или суммированию выходного сигнала измерительного канала с опорным напряжением  $U_0$ . Далее проводится измерительное преобразование ФВ  $x_i$  при смещенной на  $\{U_0\}$  функции преобразования. Формализовано эти операции запишутся следующим образом:

$$U_{л4} = U_0 + S'_{л} x_i + \Delta U'_{л} = S'_{л} x_0 + S'_{л} x_i + \Delta U'_{л} = S'_{л} (x_0 + x_i) + \Delta U'_{л}. \quad (23)$$

Как видно из (23), результат измерительного преобразования ФВ  $x_i$  при смещенной на  $\{U_0\}$  функции преобразования эквивалентен действию на вход измерительного канала физической величины  $x_4$ . В отличие напряжения (6), полученного в четвертом такте измерительного преобразования ФВ  $x_4$ , напряжение (23) отражает реальный процесс без дополнительной методической погрешности (дополнительного смещения функции преобразования).

Полученные напряжения (16), (17), (18) и (23) обрабатываются согласно следующим уравнениям избыточных измерений:

$$x_i = x_0 \frac{U_{л4} - U_{л2}}{U_{л4} - U_{л1}}, \quad (24)$$

$$\Delta U'_{л} = U_{л2} - \frac{1}{k_{л} - 1} (U_{л3} - U_{л2}) \quad (25)$$

и

$$\Delta U'_{л} = U_{л3} - \frac{k_{л}}{k_{л} - 1} (U_{л3} - U_{л2}). \quad (26)$$

Результаты измерений запоминаются и по ним принимается решение о проведении повторных измерений и о коррекции значений параметров линейной функции преобразования измерительного канала.

Для данной метрологической задачи может быть выбрана формализованная информативно-избыточная модель измерительного канала вида:

$$x_i \Big|_{i=1}^{i=2} \begin{matrix} x \\ \Rightarrow \\ U_{ли} \\ \Big|_{wm} \end{matrix} \begin{matrix} \% \leq 0,1 \text{ ppm/час} \\ \tau_{np} \leq 0,1 \text{ с} \end{matrix} = S'_{л} x_i + \Delta U'_{л} \begin{matrix} \uparrow U_s \\ \uparrow U_{\Delta} \end{matrix} \left. \begin{matrix} k_{ycl,2} \Rightarrow \begin{cases} 0,5 \cdot 10^3 \\ 0,6 \cdot 10^3 \end{cases} \\ \Delta U_{л} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ В} \\ \Delta f = 150 \text{ кГц} \end{matrix} \right\} \begin{matrix} \text{АПЧП6} \\ f_d = 100 \text{ кГц} \end{matrix} \Rightarrow N_i \Big|_{i=1}^{i=4}. \quad (27)$$

Согласно данной модели, процесс измерительного преобразования ФВ  $x_0$  осуществляется при двух значениях параметра  $S'_{л}$ , что отображено в виде двух значений коэффициента усиления  $k_{ycl,2}$ . Управляющие напряжения  $U_s$  и  $U_{\Delta}$  подбираются в процессе отладки измерительной системы и обновляются автоматически по заданной программе при отклонениях параметров линейной функции преобразования измерительного канала от номинальных значений по результатам измерений (19) и (25)/(26). В результате измерительного преобразования ФВ  $x_0$  и  $x_i$ , а также дополнительных операций по изменению значения чувствительности и смещения функции преобразования измерительного канала получают не два, а четыре результата измерительного преобразования ФВ  $\{x_0\}$  и  $\{\Delta x_0\} : N_1, \dots, N_4$  (см. (27)).

На рис. 3 приведена структурная схема измерительной системы, реализующей метод избыточных измерений физической величины ненаправленного действия. В отличие от структурной схемы, приведенной на рис. 1, здесь используется стандартный образец СО, воспроизводящий одну физическую величину ненаправленного действия. Управление работой функциональных блоков системы осуществляется в соответствии с описанными процедурами по программе, записанной в память микроконтроллера МК. В ряде случаев вместо коммутатора каналов КК используется манипулятор, осуществляющий поочередное подведение ОИ и СО к входу ПИП (сенсора).

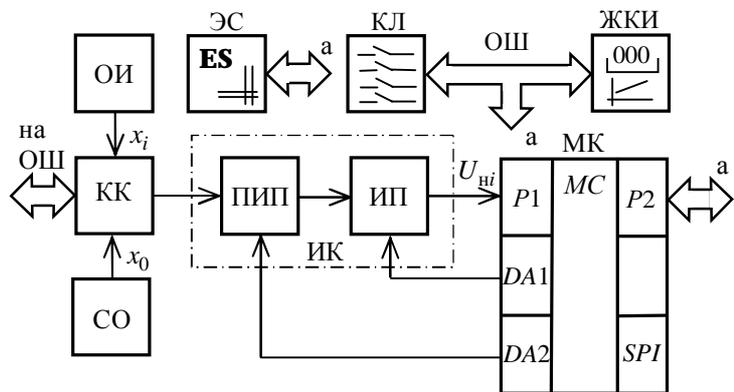


Рис. 3. Структурная схема измерительной системы, состояние которой изменяется в соответствии с (15)

Периодическое невыполнение тактов измерительных преобразований нормированных по значению физических величин, при ранее запомненных результатах, дает возможность повысить быстродействие избыточных измерений в два раза.

Таким образом, при линейной функции преобразования ИК наиболее просто решаются задачи формирования сопряженных физических величин ненаправленного действия за счет линейного

преобразования системы координат. Особое внимание уделяется физической реализации величин того или иного размера и использования сенсора (ПИП) с управляемым параметром  $S_{\text{л}}$ . Управление напряжением смещением целесообразно осуществлять в выходном усилительном каскаде измерительного преобразователя ИП, т.к. его значение больше значения напряжения смещения на выходе сенсора (ПИП). Такой подход обеспечивает более точную установку требуемого значения смещения функции преобразования.

### Метрологическая задача 9

Рассмотрим еще один пример избыточных измерений физической величины ненаправленного действия при использовании ряда физических величины, размеры которых составляют для одного ряда — геометрическую, а для другого ряда — арифметическую прогрессию:

$$\left. \begin{aligned} \{x_1\} &= \{\Delta x_0\}, \\ \{x_2\} &= k_2 \{\Delta x_0\}, \\ \{x_3\} &= \{x_i\} + \{\Delta x_0\}, \\ \{x_4\} &= \{x_i\} - \{\Delta x_0\}, \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где  $\Delta x_0$  — физическая величина, воспроизводимая мерой с принятым значением, не превышающем, например, первую четверть диапазона измерений, т.е.  $\{\Delta x_0\} = 0,25\{x_{i\max}\}$ .

Математическая модель процесса избыточных измерений, описывающая состояние измерительной системы «ОИ – СИИ», запишется, в данном случае, в виде следующей системы линейных уравнений величин:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{л1}}(x_1) &= S'_{\text{л}} \Delta x_0 + \Delta U'_{\text{л}}, \\ U_{\text{л2}}(x_2) &= S'_{\text{л}} k_2 \Delta x_0 + \Delta U'_{\text{л}}, \\ U_{\text{л3}}(x_3) &= S'_{\text{л}} (x_i + \Delta x_0) + \Delta U'_{\text{л}}, \\ U_{\text{л4}}(x_4) &= S'_{\text{л}} (x_i - \Delta x_0) + \Delta U'_{\text{л}}. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Решение системы (26) относительно неизвестных дает возможность получить следующие уравнения избыточных измерений (и их варианты):

$$S'_{\text{л}} = \frac{U_{\text{л2}} - U_{\text{л1}}}{(k_2 - 1) \Delta x_0} \quad (27)$$

и

$$S'_{\text{л}} = \frac{U_{\text{л3}} - U_{\text{л4}}}{k_2 \Delta x_0}; \quad (28)$$

$$\Delta U'_{\text{л}} = U_{\text{л1}} - S'_{\text{л}} \Delta x_0 = U_{\text{л1}} - \frac{1}{k_2 - 1} (U_{\text{л2}} - U_{\text{л1}}), \quad (29)$$

$$\Delta U'_{\text{л}} = U_{\text{л2}} - S'_{\text{л}} k_2 \Delta x_0 = U_{\text{л2}} - \frac{k_2}{k_2 - 1} (U_{\text{л2}} - U_{\text{л1}}), \quad (30)$$

$$\Delta U'_{\text{л}} = U_{\text{л1}} - S'_{\text{л}} \Delta x_0 = U_{\text{л1}} - \frac{1}{k_2} (U_{\text{л3}} - U_{\text{л4}}), \quad (31)$$

и

$$\Delta U'_{\text{л}} = U_{\text{л2}} - S'_{\text{л}} k_2 \Delta x_0 = U_{\text{л2}} - \frac{k_2}{k_2} (U_{\text{л3}} - U_{\text{л4}}); \quad (32)$$

$$x_i = \Delta x_0 (k_2 - 1) \frac{U_{\text{л3}} - U_{\text{л1}}}{U_{\text{л2}} - U_{\text{л1}}}, \quad (33)$$

и

$$x_i = k_2 \Delta x_0 \frac{U_{\text{л3}} - U_{\text{л1}}}{U_{\text{л3}} - U_{\text{л4}}}, \quad (34)$$

а также полусумму левой и правой частей уравнений избыточных измерений (33) и (34) —

$$x_i = \Delta x_0 \left[ \frac{k_2 - 1}{k_2} \frac{U_{\text{л3}} - U_{\text{л1}}}{(U_{\text{л2}} - U_{\text{л1}})} + \frac{U_{\text{л3}} - U_{\text{л1}}}{U_{\text{л3}} - U_{\text{л4}}} \right]. \quad (35)$$

Реализация метода избыточных измерений, в основу которого положены математические модели (27) – (35), может быть осуществлена с помощью СИИ, структурная схема которого подобна приведенной на рис. 3, с тем исключением, что используется стандартный образец, воспроизводящий ФВ  $\Delta x_0$ , и уравнения избыточных измерений иного вида.

Измерительное преобразование ФВ  $x_0$ , осуществляемое при двух значениях крутизны

преобразования ( $S'_{л1}$  и  $S''_{л1} = k_{л1} S'_{л1}$ ) дает возможность сформировать напряжение смещения

$$U_0 = {}^1S_{ц1} N_0 = {}^1S_{ц1} \frac{N_{л2} - N_{л1}}{k_{л1} - 1} = \frac{U_{л2} - U_{л1}}{k_{л1} - 1} = \frac{U_{л2} - U_{л1}}{k_{л1} - 1} = \frac{S'_{л1} \Delta x_0 (k_{л1} - 1)}{k_{л1} - 1} = S'_{л1} \Delta x_0, \quad (36)$$

в котором отсутствует составляющая  $\Delta U'_{л1}$ . В результате обеспечивается идеальное смещение линейной функции преобразования вверх и вниз на  $U_0$ . Измерительные преобразования ФВ  $x_i$  при смещенной на  $\pm\{U_0\}$  функции преобразования ИК обеспечивают получение результатов, эквивалентных воздействию на его вход физических величин  $x_3$  и  $x_4$  соответственно.

Из уравнений избыточных измерений (33) – (35) видно, что исключение аддитивной составляющей систематической погрешности результата измерений искомой ФВ  $x_i$ , достигается, как и в предыдущих случаях, за счет выполнения операций вычитания результатов промежуточных измерений, а мультипликативной составляющей — за счет выполнения операции деления.

Техническое решение измерительного канала для рассматриваемой метрологической задачи может быть формализовано описано информативно-избыточной моделью следующего вида:

$$x_i \left| \begin{matrix} i=2 \\ i=1 \end{matrix} \right. \begin{matrix} x \\ \text{вм} \end{matrix} \Rightarrow U_{лi} \left| \begin{matrix} \% \text{н} \leq 0,2 \\ \text{ррм/час} \\ \tau_{\text{пр}} \leq 0,15 \text{ с} \end{matrix} \right. = \left. \begin{matrix} S'_{л1} \\ S'_{л2} \end{matrix} \right\} x_i + \Delta U'_{л1} \left. \begin{matrix} \uparrow U_s \\ \uparrow U_{\Delta} \end{matrix} \right\} \left. \begin{matrix} k_{\text{ус1,2}} = \begin{cases} 4,5 \cdot 10^2 \\ 5,4 \cdot 10^2 \end{cases} \\ \Delta U_{л1,2} = \begin{cases} 2 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} \\ 2 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3} \end{cases} \\ \Delta f = 150 \text{ кГц} \end{matrix} \right\} \begin{matrix} \text{АЦП 6} \\ \Rightarrow N_i \left| \begin{matrix} i=4 \\ i=1 \end{matrix} \right. \\ f_{\Delta} = 200 \text{ кГц} \end{matrix} \right. \quad (37)$$

На рис. 4 приведен другой вариант структурной схемы измерительной системы «ОИ – СИИ», реализующая метод избыточных измерений физической величины ненаправленного действия с использованием приведенных выше уравнений измерений. В отличие от структурной схемы, приведенной на рис. 2, здесь используется стандартный образец, воспроизводящий ФВ  $\Delta x_0$  с размером  $\{\Delta x_0\} \leq \{x_0\} / k_{л1}$  и иное программное обеспечение.

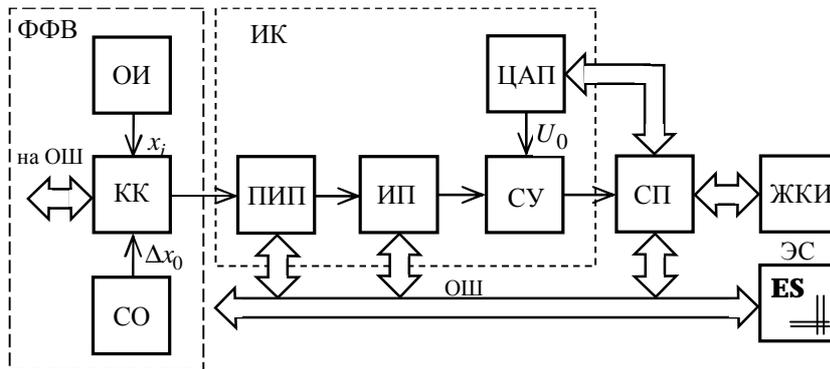


Рис. 4. Структурная схема измерительной системы, состояние которой изменяется в соответствии с (26)

Согласно (26) и (37), в первом и втором тактах осуществляется измерительное преобразование ФВ  $\Delta x_0$  при двух значениях параметра  $S'_{л1}$ . Полученные напряжения  $U_{л1}$  и  $U_{л2}$  преобразуются в коды чисел и запоминаются. Затем формируется напряжение смещения  $U_0$  согласно (36). В третьем и четвертом тактах осуществляется измерительное преобразование ФВ  $x_i$  при двух значениях смещения, т.е. при  $\Delta U'_{л1}$  ( $\{\Delta U'_{л1}\} = \{\Delta U'_{л1}\} + \{U_0\}$ ) и при  $\Delta U'_{л2}$  ( $\{\Delta U'_{л2}\} = \{\Delta U'_{л1}\} - \{U_0\}$ ). Полученные напряжения  $U_{л3}$  и  $U_{л4}$  преобразуются в коды чисел и запоминаются. Искомая физическая величина и параметры функции преобразования измерительного канала определяются в соответствии с априори выведенными уравнениями избыточных измерений, например, (27) – (35). Следует отметить, что в систематическую погрешность измерений свой вклад вносят погрешности формирования коэффициента локальной линеаризации  $k_{л1}$  и напряжения смещения  $U_0$ . Поэтому к точности их установки предъявляются более жесткие требования.

Как и при решении предыдущей метрологической задачи, в результате измерительного преобразования ФВ  $\Delta x_0$  и  $x_i$ , а также выполнения дополнительных операций по изменению значения чувствительности и смещения функции преобразования измерительного канала, получают не два, а четыре результата измерительного преобразования ФВ  $\{x_0\}$  и  $\{\Delta x_0\}: N_1, \dots, N_4$  (см. (37)).

Задача уменьшения времени избыточных измерений в два раза решается, при необходимости, известным методом.

Таким образом, описанные возможные пути и методы решения задач избыточных измерений

физических величин ненаправленного действия без приписываемой объекту измерений математической модели при линейной функции преобразования ИК обеспечивают возможность высокоточного определения действительного значения искомой физической величины и параметров линейной функции преобразования.

### Выводы

Даны определения понятиям «составная», «сопряженная» и «сопряжено-составная» физические величины.

При составлении математических моделей методов избыточных измерений основное внимание должно уделяться вопросам физической реализации величин направленного и ненаправленного действия, созданию сенсоров с управляемыми параметрами, коммутаторов каналов и манипуляторов в миниатюрном исполнении.

Установлено, что в рассмотренных метрологических задачах широко используется опосредованное формирования физических величин методом линейного преобразования системы координат, — методом поворота системы координат и методом смещения. В первом случае обеспечивается формирование физической величины, сопряженной с преобразуемой, за счет изменения значения крутизны преобразования  $S'_л$ , а во втором, — физической величины, отличающейся от преобразуемой на наперед заданное значение  $x_0$  или  $\Delta x_0$ . В этой связи особое значение при измерениях величин ненаправленного действия имеет высокоточное изменение значений параметров  $S'_л$  и  $\Delta U'_{л1}$ .

Различия в методах физической реализации «составных» физических величин обуславливают необходимость различать измерительные системы «ОИ – СИИ» и СИИ по признаку «метод формирования физических величин направленного и ненаправленного действия».

Констатируется, что сложить величины ненаправленного действия практически не возможно. Доказана возможность формирования такого воздействия на сенсор или измерительный канал, которое вызывает такую же реакцию, как действие по его вход суммарной по значению физической величины.

Показана возможность исключения влияния смещения функции преобразования и дрейфа нуля на результат формирования составной физической величины.

Установлено, что важным преимуществом методов избыточных измерений, использующих сопряженные и сопряжено-составные физические величины, является возможность получения по двум входным физическим величинам четыре результата промежуточных преобразований, соответствующих заданной математической модели рядов физических величин. Это достигается благодаря реализации измерительного преобразования ФВ  $x_0$  и  $x_i$ , а также дополнительных операций по изменению значения чувствительности и смещения функции преобразования измерительного канала.

Констатируется, что периодическое невыполнение измерительных преобразований нормированных по значению физических величин (установленного значения), при ранее запомненных результатов предыдущих измерений, дает возможность в два раза повысить быстродействие избыточных измерений искомой физической величины, т.е. уменьшить число тактов измерительного преобразования физических величин с 4-х до 2-х.

Приведенные структурные схемы измерительных систем имеют одну и ту же базовую схему. Отличия заключаются только в выполнении операций формирования рядов физических величин.

Настоящая статья представляет интерес для специалистов, разработчиков измерительных систем и средств избыточных измерений, реализующих методы избыточных измерений I-го, II-го и III-го родов, а также для магистров, аспирантов и докторантов, разрабатывающих прикладные научные направления теории избыточных измерений, методы избыточных измерений величин разной физической природы, в том числе и для задач наноизмерений.

### Литература

1. Кондратов В. Т. Теория избыточных измерений: решение измерительных задач без приписываемой объекту измерений математической модели. Сообщение 1.2 / В. Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2012.– № 5. – С. 191–200.

2. Кондратов В. Т. Теория избыточных измерений: решение метрологических задач при линейной функции преобразования измерительного канала. Сообщение 1.1 / В. Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2012. – № 4. – С. 125–137.

3. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Сопряжение>

Надійшла 13.11.2012 р.

Статтю представляє: д.т.н. Кондратов В.Т.