

УДК 535.08; 681.7.08

В.Т. КОНДРАТОВ

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

**ТЕОРИЯ ИЗБЫТОЧНЫХ И СВЕРХИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ:  
СВЕРХИЗБЫТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ  
РЕЗИСТОРОВ И РЕЗИСТИВНЫХ СЕНСОРОВ  
СООБЩЕНИЕ 1**

*В работе рассмотрено решение метрологической задачи сверхизбыточных измерений сопротивления резисторов и резистивных сенсоров в части получения не одного, а множества фундаментальных (или базовых) уравнений избыточных измерений при практическом использовании, коммутировании или переборе всех вариантов соединений трех резисторов —  $R_x$ ,  $R_{01}$  и  $R_{02}$  между собой и их параллельном подключении к входному резистору  $R_{вх}$  измерительного канала. Показана возможность определения параметров функции преобразования измерительного канала, его входного сопротивления, действительных значений нормированных по сопротивлению резисторов, погрешности вычислительной обработки данных и т.п.*

*Данная метрологическая задача решается при линейной функции преобразования измерительного канала. Описаны сущность метода сверхизбыточных измерений и его математические модели с учетом влияния входного сопротивления измерительного канала на конечный результат измерений. Приведены соответствующие уравнения избыточных измерений и техническое решение омметра, реализующего метод сверхизбыточных измерений.*

*В первом сообщении основное внимание уделено вопросу определения множества значений входного сопротивления измерительного канала.*

*Работа представляет интерес для магистров, специалистов и ученых, интересующихся сверхизбыточными измерениями величин разной физической природы.*

*Ключевые слова: сверхизбыточные измерения, резистивный сенсор, функция преобразования.*

V.T. KONDRATOV

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

**THE THEORY REDUNDANT AND SUPER-REDUNDANT MEASUREMENTS: SUPER-REDUNDANT  
MEASUREMENTS OF RESISTANCE OF RESISTORS AND RESISTIVE SENSORS  
THE MESSAGE 1**

*Abstract - In paper the decision of a problem of super-redundant measurements of resistance of resistors and resistive sensor controls regarding reception not one, but set fundamental (or base) the equations of redundant measurements is considered at practical use, commutation or search of all variants of connections of three resistors —  $R_x$ ,  $R_{02}$  and  $R_{01}$  among themselves and their parallel connection to the entrance resistor  $R_{вх}$  of the measuring channel.*

*Possibility of definition of parameters of function of transformation of the measuring channel, its entrance resistance, the valid values of resistor normalized by the value of resistance is shown, to an error of computing data processing, etc.*

*The given metrological problems solving at linear function of transformation of the measuring channel. The essence of a method of super-redundant measurements and its mathematical models taking into account influence of entrance resistance of the measuring channel on an end result of measurements are described. The corresponding equations of redundant measurements and the technical decision of the digital ohmmeter realizing a method of super-redundant measurements are resulted.*

*In the first message the basic attention is given a question of definition of set of values of entrance resistance of the measuring channel.*

*Work is of interest for masters, experts and scientists, the interested super-redundant measurements of quantities of the different physical nature.*

*Keywords: super-redundant measurements, a resistive sensor control, transformation function.*

**Введение**

О создании теории и методов избыточных измерений было заявлено автором в 2001 году [1]. Отдельные методы избыточных измерений величин разной физической природы были опубликованы в работах автора еще до защиты докторской диссертации, т.е. в 1986 – 2001 гг. Первая редакция теории избыточных измерений была опубликована в 2002 году [2]. Далее последовал период углубленной разработки теории и методов избыточных измерений. Некоторые из работ приведены в перечне литературы (см. [3 – 10]), а другие можно найти в Интернете и на сайте «<http://kondratov.com.ua>», раздел «главные труды 2013 ») и в работах [12, 13]. О создании теории сверхизбыточных измерений было заявлено автором в 2013 году и подана заявка на патент Украины по сверхизбыточным измерениям сопротивления резисторов и резистивных сенсоров, который был получен в 2015 году [11].

Сверхизбыточные или суперизбыточные измерения — это новейшее направление в теории избыточных измерений, развиваемого автором [11 – 13]. В XXI веке фундаментальная наука метрология получила новый качественный скачок в своем развитии. Одновременно со стратегией прямых измерений, стала развиваться стратегия избыточных и сверхизбыточных измерений. В то же время коллеги-метрологи

не спешат осваивать и развивать стратегию избыточных измерений.

Теория избыточных и сверхизбыточных измерений изучает как философские аспекты теории, так и методы и технические решения соответствующих средств измерений [11, 12]. Методы сверхизбыточных измерений отличаются от методов избыточных измерений дополнительным введением в используемый ряд однородных физических величин. За счет получения новой информации о состоянии параметров функции преобразования измерительного канала, достигается возможность получения конечного множества результатов измерений искомой физической величины, параметров измерительного канала и его функции преобразования. Это позволяет повысить точность определения действительного или (квази)истинного значения физической величины за счет дополнительной обработки и усреднения полученных данных.

В статье описывается сущность уникального по возможностям метода сверхизбыточных измерений сопротивления резистора или резистивного сенсора.

**Объект исследований** — процесс высокоточного измерения физических величин на основе стратегии избыточных и сверхизбыточных измерений.

**Предмет исследований** — метод сверхизбыточных (суперизбыточных) измерений сопротивления резистора или резистивного сенсора при линейной функции преобразования измерительного канала (ИК) с исключением влияния его входного сопротивления на конечный результат.

**Целью работы** является ознакомление ученых с сущностью и возможностями метода сверхизбыточных измерений сопротивления резистора или резистивного сенсора физических величин, обеспечивающего получение несколько десятков, сотен и даже тысяч результатов измерений при измерительном преобразовании трех резисторов, —  $R_x$ ,  $R_{01}$  и  $R_{02}$ , и их параллельном подключении к входному резистору  $R_{вх}$  ИК.

В работе показана возможность автоматического исключения аддитивной и мультипликативной составляющих систематической погрешности измерения сопротивления исследуемого резистора или резистивного сенсора, влияния входного сопротивления измерительного канала на результат измерения, возможность определения действительных значений входного сопротивления и значений параметров линейной функции преобразования измерительного канала, причем в количествах, необходимых и достаточных для статистической обработки с целью повышения прецизионности сверхизбыточных измерений.

#### Результаты исследований

*Сверхизбыточные измерения* — это процесс, включающий в себя [1]:

1) повторяющиеся ограниченное число раз ( $1, \dots, n$ ) измерительные преобразования расширенного ряда физических величин, закономерно связанных между собой по размерам, в том числе и с физическими величинами принятого размера;

2) усреднение (при многократных преобразованиях) преобразованных величин по «малому» или «большому»<sup>1</sup> кругу;

3) обработку их по одному или по статистически достоверной совокупности априори полученных  $n$  уравнений избыточных измерений искомой величины, параметров функции преобразования измерительного канала и его характеристик;

4) усреднение ансамбля результатов избыточных измерений с использованием традиционных и нетрадиционных методов<sup>2</sup>;

5) оценку текущего состояния измерительного канала используемого средства избыточных измерений (метрологических характеристик и метрологической исправности) на протяжении всего времени его эксплуатации;

6) структуризацию уравнений избыточных измерений и их модификацию;

7) параллельную обработку показателей модифицированной структуры уравнения избыточных измерений (или уравнения числовых значений);

8) представление окончательной формы записи уравнения избыточных измерений (или уравнения числовых значений) в виде уравнения связи значения искомой физической величины с нормированной по значению величиной через безразмерный коэффициент пропорциональности;

9) анализ погрешностей вычислительной обработки и усреднения данных и выдачу рекомендаций по их уменьшению;

10) переосмысление модели объекта исследований и модификацию метода сверхизбыточных измерений в случае получения результатов не достаточно высокого качества.

#### Задачи научных исследований

В рамках теории сверхизбыточных измерений развиваются и решаются следующие задачи научных исследований:

1) изучение соответствия реальной и принятой или приписанной объекту исследований математической модели, взаимосвязей ее параметров между собой и с параметрами окружающей среды;

2) изучение соответствия реальной и принятой математической модели функции преобразования измерительного канала;

3) изучение возможностей сверхизбыточных измерений при увеличении количества измеряемых физических величин в используемом ряде, размеры которых связаны между собой по определенному закону

<sup>1</sup> в каждом такте или по истечении  $n$  циклов

<sup>2</sup> развиваются автором

(по закону арифметической и/или геометрической прогрессии, по законам соединения элементов пассивной электрической цепи и другими законами) с целью получения дополнительной информации об искомой физической величине, о состоянии измерительного канала средства измерения и о конечном множестве уравнений избыточных измерений;

4) изучение преимуществ и эффективности замены операции усреднения во времени операцией усреднения по ансамблю данных при решении задач повышения прецизионности (сверх)избыточных измерений;

5) изучение возможностей сверхизбыточных измерений при решении метрологических задач с использованием стратегии преобразования системы координат;

6) создание основ теории структурного анализа уравнений избыточных измерений и их ансамблей;

7) анализ и исследование алгоритмов параллельной обработки объединений числовых значений физических величин и коэффициентов.

8) метрологическое обеспечение процесса обработки данных путем:

а) использования правил округления значений показателей объединений взаимосвязанных между собой физических величин и коэффициентов;

б) подбора пар нормированных по значению физических величин, имеющих равные по значению, но противоположные по знаку погрешности воспроизведения этих величин;

в) осуществления равноточных измерительных преобразований рядов входных физических величин и др.

*Базовые (независимые) и зависимые уравнения избыточных измерений*

*Базовыми* будем называть уравнения избыточных измерений, которые обеспечивают автоматическое исключение влияния на конечный результат всех параметров линейной функции преобразования измерительного канала (ИК).

Базовые уравнения избыточных измерений описывают фундаментальные закономерные связи между однородными физическими величинами, константами и коэффициентами и характеризуют состояние измерительного канала в дискретные моменты времени при априори выбранных входных воздействиях. При этом достигается инвариантность результата избыточных измерений к изменениям параметров функции преобразования ИК при воздействиях на него дестабилизирующих факторов.

*Зависимые уравнения избыточных измерений* — это уравнения избыточных измерений, обеспечивающие автоматическое исключение влияния на конечный результат всех параметров линейной функции преобразования измерительного канала ИК, но не исключающие влияния, например, его входного сопротивления или какой-либо иного параметра по причине неполноты используемых рядов входных физических величин. При этом предполагается, что влияющая физическая величина может быть определена путем введения дополнительного такта измерения или измерительного преобразования еще одной входной физической величины и решения уточненной математической модели процесса избыточных измерений, т.е. новой системы уравнений величин.

Установлено, что при принятой математической модели, описывающей сверхизбыточные состояния измерительного канала в дискретные моменты времени, не сложно получить множество (несколько десятков, сотен, тысяч и даже десятки тысяч) уравнений избыточных измерений.

Рассмотрим сущность метода сверхизбыточных измерений на примере работы цифрового омметра, функциональная схема которого приведена на рисунке.

Сверхизбыточные измерения — это избыточные измерения при расширенном числе измеряемых входных физических величин и нескольких дискретно изменяемых значений параметров функции преобразования измерительного канала с сенсором (режимов работы измерительного канала).

При сверхизбыточных измерениях оптимальное число резисторов, нормированных по значению сопротивления и которое необходимо для проведения избыточных измерений, увеличивается на один, два или более резисторов. Кроме того, сверхизбыточность может быть достигнута как путем дискретного изменения чувствительности измерительного канала, так и путем изменения режима работы цифрового омметра, например, путем использования не одного, а двух нормированных по значению токов, протекающих через измеряемые резисторы непосредственно или через их электрические соединения.

В работе приведено решение следующих задач: 1) высокоточное определение сопротивления искомого резистора или резистивного сенсора; 2) высокоточное определение значений входного сопротивления измерительного канала; 3) определение коэффициента усиления измерительного канала и смещения функции преобразования; 4) определение погрешности вычисления действительных значений образцовых резисторов; 5) получение ограниченного множества уравнений избыточных измерений при практическом использовании, коммутировании и переборе всех вариантов соединений трех резисторов —  $R_x$ ,  $R_{01}$  и  $R_{02}$  между собой и их параллельном подключении к входному резистору  $R_{вх}$  ИК.

На рисунке используется следующая аббревиатура функциональных блоков и элементов: ФФВ — формирователь физических величин; Кл1, Кл2, Кл3 — первый, второй и третий ключи;  $R_{01}$  и  $R_{02}$  — первый и второй резисторы с нормированными значениями сопротивлений ( $\{R_{01}\} \neq \{R_{02}\}$ );  $R_x$  — исследуемый резистор с неизвестным значением сопротивления; АП1, АП2 и АП3 — первый, второй и третий автоматические переключатели;  $R_{вх}$  — входное сопротивление измерительного канала неизвестного значения;  $R_d$  — дополнительный резистор; ИК — измерительный канал с линейной функцией преобразования, включающий в себя измерительный преобразователь ИП и суммирующее устройство СУ;

ИТ — источник стабильного тока; МК — микроконвертор; ЖКИ — жидкокристаллический индикатор; КЛ — клавиатура; ОШ — общая шина.

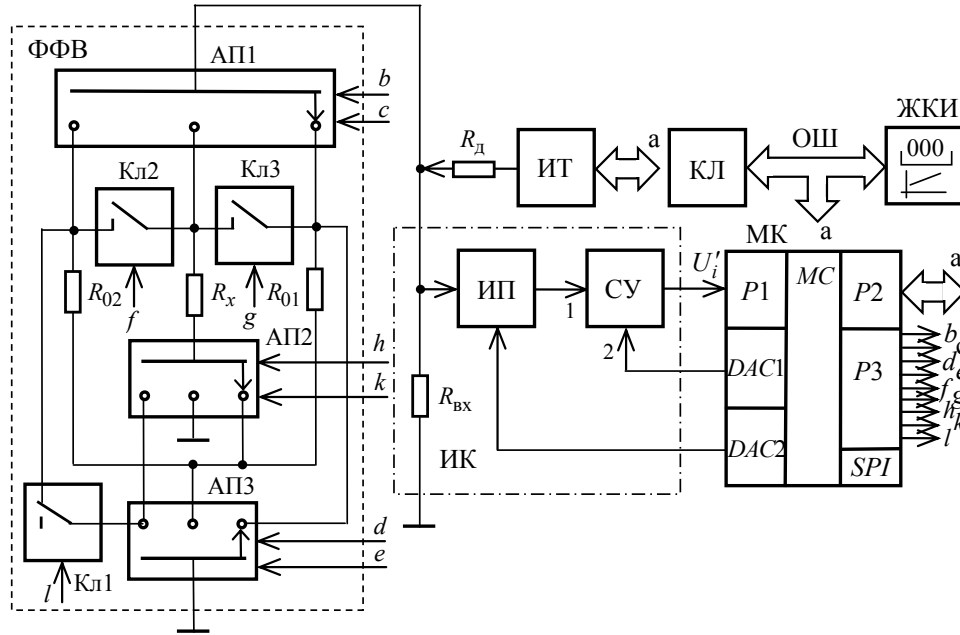


Рисунок. Функциональная схема цифрового омметра с расширенными функциональными возможностями

В цифровом омметре реализован метод сверхизбыточных измерений, при котором, вместо трех, используется двенадцать физических величин (сопротивлений), подлежащих измерительному преобразованию.

Предположим, что общая функция преобразования измерительного канала ИК имеет вид

$$U'_x = k'_{yc} I'_0 R_x + \Delta U' \quad (1)$$

где  $k'_{yc}$  — коэффициент усиления ИК ( $k'_{yc} = k_{yc}(1 + \gamma)$ ,  $k_{yc}$  — коэффициент усиления ИК на момент ввода омметра в эксплуатацию после изготовления или поверки);  $\Delta U'$  — напряжение, равное смещению функции преобразования и дрейфа нуля (аддитивной составляющей погрешности);  $I'_0$  — реальный ток с учетом погрешности воспроизведения его мерой или источником тока.

В основу описываемого метода сверхизбыточных измерений положено измерительное преобразование двенадцати физических величин:  $R_1 (\{R_1\} = \{R_{00}\} = 0)$ ,  $R_2 (\{R_2\} = \{R_{01}\})$ ,  $R_3 (\{R_3\} = \{R_{02}\})$ ,  $R_4 (\{R_4\} = (R_{01}) + (R_{02}))$ ,  $R_5 (\{R_5\} = \{R_{01}\} \{R_{02}\} / (\{R_{01}\} + \{R_{02}\}))$ ,  $R_6 (\{R_6\} = \{R_x\})$ ,  $R_7 (\{R_7\} = \{R_x\} + \{R_{01}\})$ ,  $R_8 (\{R_8\} = \{R_x\} \{R_{01}\} / (\{R_x\} + \{R_{01}\}))$ ,  $R_9 (\{R_9\} = \{R_x\} + \{R_{02}\})$ ,  $R_{10} (\{R_{10}\} = \{R_x\} \{R_{02}\} / (\{R_x\} + \{R_{02}\}))$ ,  $R_{11} (\{R_{11}\} = \{R_{01}\} + \{R_{02}\} + \{R_{вх}\})$  и  $R_{12} (\{R_{12}\} = \{R_x\} \{R_{01}\} \{R_{02}\} / [\{R_x\} (\{R_{01}\} + \{R_{02}\}) + \{R_{01}\} \{R_{02}\}])$  при значении стабильного тока —  $I_{01}$ . Эти величины получают с помощью формирователя физических величин ФФВ (см. рисунок). Последний включает в себя три резистора, три ключа и три автоматических переключателя, соединенные, как показано на рисунке. При этом все резисторы подключаются параллельно входному резистору, что приводит к изменению результирующего сопротивления. Все это учитывается в данном методе.

Как будет показано ниже, данная совокупность физических величин обеспечивает широкие функциональные возможности метода в части получения не одного, а множества значений искомой физической величины и параметров функции преобразования измерительного канала. В результате их усреднения получают дополнительное повышение точности измерений.

Работа цифрового омметра состоит из 12-ти тактов измерительного преобразования сопротивлений приведенного ряда резисторов в напряжения с последующим аналого-цифровым преобразованием полученных значений напряжений в коды чисел. В 13-м такте осуществляется окончательная обработка результатов промежуточного преобразования физических величин. Часть полученных результатов, как правило, обрабатываются параллельно процессу измерительного преобразования сопротивлений резисторов при условии использования многоядерного микроконвертора МК.

Первые пять тактов выполняются с целью получения информации о состоянии измерительного канала ИК, в частности, о значениях параметров функции преобразования ИК, о сопротивлении входного резистора  $R_{вх}$ , о значении коэффициента усиления  $k'_{yc}$  измерительного преобразователя ИП и отклонении его значения от номинального  $k_{yc}$ , о дрейфе нуля ИК и т.д.

Следующие три такта направлены на определение значений искомого сопротивления при

измерительном преобразовании сопротивления резистора  $R_x$  при разных его соединениях с резисторами  $R_{01}$  и  $R_{Bx}$ . Девятый и десятый такты проводятся для определения сопротивления  $R_x$  при разных соединениях трех резисторов ( $R_x$ ,  $R_{02}$  и  $R_{Bx}$ ), а одиннадцатый и двенадцатый такты проводятся для оценки возможности определения значения искомого сопротивления резистора  $R_x$  в режиме подключения к входному резистору  $R_{Bx}$  последовательно или параллельно соединенных резисторов  $R_x$ ,  $R_{01}$  и  $R_{02}$ .

Система линейных уравнений величин, описывающая работу омметра в дискретные моменты времени, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} U'_1 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{r_3 R_{Bx}}{r_3 + R_{Bx}} + \Delta U' = \Delta U' & U'_7 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{(R_x + R_{01}) R_{Bx}}{(R_x + R_{01}) + R_{Bx}} + \Delta U', \\ U'_2 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{R_{01} R_{Bx}}{R_{01} + R_{Bx}} + \Delta U', & U'_8 &= k'_{yc} I'_{01} R_{Bx} \frac{R_x R_{01}}{R_x R_{01} + R_{Bx} (R_x + R_{01})} + \Delta U', \\ U'_3 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{R_{02} R_{Bx}}{R_{02} + R_{Bx}} + \Delta U', & U'_9 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{(R_x + R_{02}) R_{Bx}}{(R_x + R_{02}) + R_{Bx}} + \Delta U', \\ U'_4 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{(R_{01} + R_{02}) R_{Bx}}{R_{01} + R_{02} + R_{Bx}} + \Delta U', & U'_{10} &= k'_{yc} I'_{01} R_{Bx} \frac{R_x R_{02}}{R_x R_{02} + R_{Bx} (R_x + R_{02})} + \Delta U', \\ U'_5 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{R_{01} R_{02} R_{Bx}}{R_{01} R_{Bx} + R_{02} R_{Bx} + R_{01} R_{02}} + \Delta U', & U'_{11} &= k'_{yc} I'_{01} \frac{(R_{01} + R_{02} + R_x) R_{Bx}}{R_{01} + R_{02} + R_x + R_{Bx}} + \Delta U', \\ U'_6 &= k'_{yc} I'_{01} \frac{R_x R_{Bx}}{R_x + R_{Bx}} + \Delta U', & U'_{12} &= k'_{yc} I'_{01} \frac{R_x R_{01} R_{02} R_{Bx}}{R_{02} R_{Bx} (R_{01} + R_x) + R_x R_{01} (R_{Bx} + R_{02})} + \Delta U'. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Все такты измерительного преобразования сопротивлений резисторов направлены на получение сверхизбыточной информации об искомом сопротивлении резистора  $R_x$  или резистивного сенсора. Это необходимо для доказательства возможности перехода от усреднения данных, полученных во времени, к усреднению множества данных, полученных по ансамблю (в пространстве) в результате комбинаторных объединений уравнений величин в подсистемы и решении последних относительно искомой физической величины.

Рассмотрим последовательность работы цифрового омметра во времени (по тактам). Отметим, что выбор нулевого или заданного значения тока осуществляется по команде с микроконвертора МК, поступающей через общую шину ОШ с выходов порта P2 на цифровые входы цифрууправляемого источника тока ИТ. В то же время на управляющие входы ключей Кл1, Кл2 и Кл3, автоматических переключателей АП1, АП2 и АП3 ФВВ поступают сигналы с выходов «b», ..., «l» порта P3 МК. Они обеспечивают коммутацию ключей и автоматических переключателей и получение указанных выше двенадцати резисторов с известными и неизвестными значениями сопротивлений. Последние обусловлены используемыми законами соединений элементов электрических цепей. Выход АП1 соединен с выходом ИТ через дополнительный резистор  $R_d$  и подключен ко входу измерительного преобразователя ИП с входным сопротивлением  $R_{Bx}$ . В каждом такте на выходе АП1 появляется напряжение (1), полученное в результате протекания тока  $I'_0$  через тот или иной резистор, кроме первого. Это напряжение с помощью встроенного в МК АЦП преобразуется в код числа. Обработка результатов измерительного преобразования сопротивлений резисторов осуществляется в арифметико-логическом устройстве МК. Отсчет результатов измерения производится с помощью жидкокристаллического индикатора ЖКИ, который, как и клавиатура КЛ, подключены к выходам порта P2 МК. С помощью клавиатуры КЛ осуществляется включение и выключение омметра, выбор режимов работы, связанных с реализацией части или всего метода сверхизбыточных измерений, выбор режима борьбы с помехами, с оповещением оператора, с типом сигнализации и т.п., а также с выбором той или иной сервисной программы.

В исходном положении, т.е. до начала измерительных преобразований, Кл1, Кл2 и Кл3, АП1, АП2 и АП3 находятся в положениях, указанных на рисунке. В результате вход измерительного канала ИК замыкается на земляную шину (см. рисунок). При нулевом значении смещения на ЖКИ отобразится информация о готовности омметра к проведению измерений. В противном случае, автоматически, по команде с МК, на второй вход СУ с выхода DAC1 поступает напряжение, которое компенсирует дрейф нуля до получения нулевого значения выходного напряжения ИК.

В первом такте входы ИК замкнуты на землю с помощью АП1 и АП3. На выходе ИК появляется напряжение  $U'_1$  (см. систему (2), первое уравнение величин), где  $r_3$  — близкое к нулю значение переходного сопротивления автоматического переключателя ( $r_3 \sim 0$  Ом), осуществляющего замыкание входа ИК на земляную шину.

Напряжение смещения  $U'_1$ , полученное при короткозамкнутом входе измерительного канала ИК, преобразуется в код числа

$$N_1 = \{S_0\} \{U'_1\} = \{S_0\} \left( k'_{yc} \{I'_0\} \frac{\{r_3\} \{R_{BX}\}}{\{r_3\} + \{R_{BX}\}} + \{\Delta U'\} \right) = \Delta N, \quad (3)$$

который запоминается в оперативной памяти МК.

При этом используются АЦП с линейной функцией преобразования. В (3) и в других уравнениях числовых значений фигурные скобки характеризуют числовые значения физических величин.

По команде с МК на выходе ИТ устанавливается значение тока  $I'_{01}$ . Во втором такте АПЗ устанавливается в среднее положение (см. рисунок). В результате ток  $I'_{01}$  от ИТ поступит на резистор  $R_{01}$ . На выходе ИК формируются напряжение  $U'_2$  (см. систему (2), второе уравнение величин). С помощью АЦП это напряжение преобразуется в код числа

$$N_2 = \{S_0\} \{U'_2\} = \{S_0\} k'_{yc} \{I'_{01}\} \frac{\{R_{01}\} \{R_{BX}\}}{\{R_{01}\} + \{R_{BX}\}} + \Delta N, \quad (4)$$

и запоминается в оперативной памяти МК.

Как правило, числовые значения  $N_1$  (3) и  $N_2$  (4) напряжений  $U'_1$  и  $U'_2$  используются, соответственно, для установки нуля выходного напряжения ИК и исходного (номинального) значения тока. Для это полученные числовые значения сравниваются с их номинальными значениями  $N_{01}$  и  $N_{02}$ , полученными при вводе цифрового омметра в эксплуатацию. В случае отклонения значений от номинальных, например, при жестких условиях эксплуатации цифрового омметра, осуществляется их автоматическая метрологическая самопроверка.

По результатам сравнения формируются соответствующие напряжения, которые с выходов DAC1 и DAC2 встроенных в МК ЦАП поступают, соответственно, на управляющий вход измерительного преобразователя ИП и второй вход суммирующего устройства СУ, изменяя, тем самым, значения крутизны (коэффициента усиления) и смещения функции преобразования ИК до номинальных значений.

В третьем такте, АП1 переводится в крайнее левое положение (см. рисунок). В результате ток  $I'_{01}$  от источника тока ИТ будет протекать через резистор  $R_{02}$ . На выходе ИК формируются напряжение  $U'_3$  (см. систему (2), третье уравнение величин). С помощью АЦП это напряжение преобразуется в код числа

$$N_3 = \{S_0\} \{U'_3\} = \{S_0\} k'_{yc} \{I'_{01}\} \frac{\{R_{02}\} \{R_{BX}\}}{\{R_{02}\} + \{R_{BX}\}} + \Delta N \quad (5)$$

и запоминается в оперативной памяти МК.

Решение подсистемы, состоящей из первого, второго и третьего уравнений величин (см. уравнений величин для  $U'_1$ ,  $U'_2$  и  $U'_3$  системы (2)) относительно  $R_{BX}$ , с учетом различных сочетаний уравнений величин, дает возможность получить четыре уравнения избыточных измерений входного сопротивления ИК (см. табл. 1):

Табл.1

Формализованная запись первых 4-х вариантов решения подсистем уравнений величин относительно $R_{BX}$	
(3-1)/(2-1); (3-1)/(3-2); (3-2)/(2-1); (3-2)/(3-1)	
№ п/п	Уравнения избыточных измерений входного сопротивления измерительного канала
1	$R_{BX} = R_{01} \left( k_1 - \frac{U'_3 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right) / \left( \frac{R_{01}}{R_{02}} \frac{U'_3 - U'_1}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right)$
2	$R_{BX} = R_{01} / \left( \frac{R_{02} - R_{01}}{R_{02}} \frac{U'_3 - U'_1}{U'_3 - U'_2} - k_1 \right)$
3	$R_{BX} = R_{02} \left( \frac{R_{01}}{R_{02} - R_{01}} \frac{U'_3 - U'_2}{U'_2 - U'_1} \right) / \left( \left( k_1 - \frac{R_{01}}{R_{02} - R_{01}} \frac{U'_3 - U'_2}{U'_2 - U'_1} \right) \right)$
4	$R_{BX} = R_{02} \left( \frac{R_{01}}{R_{02} - R_{01}} \frac{U'_3 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \right) / \left( k_1 - \frac{R_{02}}{R_{02} - R_{01}} \frac{U'_3 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \right)$

Числовые значения  $N_2$  (4), и  $N_3$  (5) напряжений  $U'_2$  и  $U'_3$  могут быть использованы, при необходимости, для контроля и установления нулевого значения выходного напряжения ИК и значения коэффициента усиления ИК. Решая подсистему, состоящую из второго и третьего уравнений величин (см. систему линейных уравнений величин (2)), получим уравнение избыточных измерений коэффициента усиления ИК, при заданном значении тока  $I'_{01}$ , в виде:

$$k'_{yc} = \frac{U'_2 - U'_3}{I'_{01} R_{Bx}} \cdot \frac{(R_{01} + R_{Bx})(R_{01} + R_{Bx})}{R_{Bx}(R_{01} - R_{02})}. \quad (6)$$

Соответствующее уравнение числовых значений имеет вид:

$$k'_{yc} = \frac{N_2 - N_3}{\{S_0\} \{I'_{01}\} \{R_{Bx}\}} \cdot \frac{(\{R_{01}\} + \{R_{Bx}\})(\{R_{01}\} + \{R_{Bx}\})}{\{R_{Bx}\}(\{R_{01}\} - \{R_{02}\})}, \quad (7)$$

где  $R_{Bx}$  и  $\{R_{Bx}\}$  определяются согласно уравнениям измерений, приведенным в табл. 1 и табл.2.

Решение подсистемы из трех линейных уравнений величин (см. (2), первое, второе, третье), относительно нормированных по значению резисторов  $R_{01}$  и  $R_{02}$ , дает возможность определять действительные значения сопротивлений резисторов  $R_{01}$  и  $R_{02}$  (при формализованном описании процесса обработки — (3-1)/(2-1); (3-2)/(2-1); (3-2)/(3-1)) согласно уравнениям избыточных измерений:

$$R'_{01} = \frac{R_{Bx}}{\left[ \frac{U'_3 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \left( k_1 + \frac{R_{Bx}}{R_{02}} \right) - k_1 \right]} \quad (8)$$

и

$$R'_{02} = R_{01} R_{Bx} \frac{U'_3 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \left/ \left( (R_{Bx} + R_{01}) - \frac{U'_3 - U'_1}{U'_2 - U'_1} R_{01} \right) \right., \quad (9)$$

$$R'_{01} = \frac{R_{02}}{\frac{U'_3 - U'_2}{U'_2 - U'_1} \left( \frac{R_{02}}{R_{Bx}} + k_1 \right) + k_1} \quad (10)$$

и

$$R'_{02} = R_{01} \left( \frac{U'_3 - U'_2}{U'_2 - U'_1} + k_1 \right) \left/ \left( k_1 - \frac{R_{01}}{R_{Bx}} \frac{U'_3 - U'_2}{U'_2 - U'_1} \right) \right.; \quad (11)$$

$$R'_{01} = R_{02} \left( k_1 + \frac{U'_3 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \right) \left/ \left( \frac{U'_3 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \frac{R_{02}}{R_{Bx}} + k_1 \right) \right. \quad (12)$$

и

$$R'_{02} = \frac{R_{01}}{\left[ k_1 + \frac{U'_3 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \left( k_1 - \frac{R_{01}}{R_{Bx}} \right) \right]}, \quad (13)$$

где  $R_{Bx}$  определяется по выше- или нижеприведенным уравнениям избыточных измерений,

В четвертом такте АП1 устанавливается в исходное положение, указанное на рисунке, КлЗ — в положение, противоположное указанному на рисунке, а АП2 и АП3 — в крайние левые положения. В результате ток  $I'_{01}$  потечет через последовательно соединенные резисторы  $R_{01}$  и  $R_{02}$ , подключенные параллельно с резисторами  $R_x$  и  $R_{Bx}$ . На выходе ИК появится напряжение  $U'_4$  (см. систему (2), девятое уравнение величин), которое преобразуется с помощью АЦП в код числа

$$N_4 = \{S_0\} k'_{yc} \{I'_{01}\} \frac{(\{R_{01}\} + \{R_{02}\}) \{R_{Bx}\}}{\{R_{01}\} + \{R_{02}\} + \{R_{Bx}\}} + \Delta N. \quad (14)$$

Решение подсистем, полученных в результате сочетания по три из четырех уравнений величин (см. уравнений величин для  $U'_1$ ,  $U'_2$ ,  $U'_3$  и  $U'_4$  системы (2)) относительно  $R_{Bx}$ , дает возможность получить еще 15-ь вариантов уравнений избыточных измерений входного сопротивления ИК (табл. 2, формализованная запись 15-и вариантов решения подсистем уравнений величин и сами уравнения избыточных измерений) и соответствующих уравнений числовых значений.

Особенностью приведенных в табл. 1 и табл. 2 уравнений избыточных измерений входного

сопротивления  $R_{\text{вх}}$  является независимость результата от параметров функции преобразования ИК и от нормированного значения тока, протекающего через резисторы. Соответствующие уравнения числовых значений используются для высокоточного определения входного сопротивления измерительного канала.

Табл.2

Формализованная запись 15-ти вариантов решения подсистем уравнений величин относительно $R_{\text{вх}}$	
(4-1)/(2-1); (4-1)/(3-1); (4-1)/(3-2); (4-1)/(4-2); (4-1)/(4-3); (4-2)/(2-1); (4-2)/(3-1); (4-2)/(3-2); (4-2)/(4-1); (4-2)/(4-3); (4-3)/(2-1); (4-3)/(3-1); (4-3)/(3-2); (4-3)/(4-1); (4-3)/(4-2);	
1	2
№ п/п	Уравнения избыточных измерений входного сопротивления измерительного канала
1	$R_{\text{вх}} = R_{01} \left( \frac{U'_4 - U'_1}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right)$
2	$R_{\text{вх}} = R_{02} \left( \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_1} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{R_{02}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_1} \right)$
3	$R_{\text{вх}} = \frac{(R_{01} + R_{02}) \left( k_1 - \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_2} \right)}{k_2 \left( \frac{R_{02} - R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_2} - k_1 \right)} \pm \sqrt{\left[ \frac{(R_{01} + R_{02}) \left( k_1 - \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_2} \right)}{k_2 \left( \frac{R_{02} - R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_2} - k_1 \right)} \right]^2 + \frac{R_{01} R_{02}}{\left( \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_2} \frac{R_{02} - R_{01}}{R_{01} + R_{02}} - k_1 \right)}}$
4	$R_{\text{вх}} = R_{01} / \left( \frac{R_{02}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_4 - U'_2} - k_1 \right)$
5	$R_{\text{вх}} = \frac{R_{01} \left( k_2 \frac{R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_4 - U'_3} \right)}{\frac{R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_4 - U'_3} - k_1} \pm \sqrt{\left[ \frac{R_{01} \left( k_2 \frac{R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_4 - U'_3} \right)}{\frac{R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_4 - U'_3} - k_1} \right]^2 + \frac{R_{02} R_{02}}{\left( \frac{R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_4 - U'_3} - k_1 \right)}}$
6	$R_{\text{вх}} = \left( (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_4 - U'_2}{U'_2 - U'_1} \frac{R_{01}}{R_{02}} \right) / \left( k_1 - \frac{R_{01}}{R_{02}} \frac{U'_4 - U'_2}{U'_2 - U'_1} \right)$
7	$R_{\text{вх}} = R_{02} \frac{k_1 - \frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \left( k_2 \frac{R_{01}}{R_{02}} + k_1 \right)}{\frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_1} - k_1} \pm \sqrt{\left[ \frac{k_1 - \frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \left( k_2 \frac{R_{01}}{R_{02}} + k_1 \right)}{\frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_1} - k_1} \right]^2 - \frac{R_{01} (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_1}}{\frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_1} - k_1}}$
8	$R_{\text{вх}} = R_{02} \left( \frac{(R_{02}^2 - R_{01}^2) \frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_2} - k_1}{R_{02}^2} \right) / \left( \frac{R_{01} - R_{02}}{R_{02}} \frac{U'_4 - U'_2}{U'_3 - U'_2} + k_1 \right)$
9	$R_{\text{вх}} = \frac{(R_{01} + R_{02}) \left( k_1 - \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_1} \frac{k_2 R_{01} + R_{02}}{R_{02}} \right)}{k_2 \left( \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_1} \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} - k_1 \right)} \pm \sqrt{\left[ \frac{(R_{01} + R_{02}) \left( k_1 - \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_1} \frac{k_2 R_{01} + R_{02}}{R_{02}} \right)}{k_2 \left( \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_1} \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} - k_1 \right)} \right]^2 - R_{01} \frac{\frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_1} \frac{(R_{01} + R_{02})^2}{R_{02}}}{\frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_1} \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} - k_1}}$
10	$R_{\text{вх}} = \frac{R_{02} - \left( \frac{R_{01}^2}{R_{02}} + \frac{R_{01}}{k_2} \right) \cdot \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_3}}{\frac{R_{01}}{R_{02}} \cdot \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_3} - k_1} \pm \sqrt{\left[ \frac{R_{02} - \left( \frac{R_{01}^2}{R_{02}} + \frac{R_{01}}{k_2} \right) \cdot \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_3}}{\frac{R_{01}}{R_{02}} \cdot \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_3} - k_1} \right]^2 + R_{02} R_{02} \frac{k_1 - \frac{R_{01} R_{01}}{R_{02} R_{02}} \cdot \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} \cdot \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_3}}{\frac{R_{01}}{R_{02}} \cdot \frac{U'_4 - U'_2}{U'_4 - U'_3} - k_1}}$



1	2
11	$R_{\text{BX}} = R_{01} \frac{k_1 - \frac{k_2 R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_2 - U'_1}}{k_2 \left( \frac{U'_4 - U'_3}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right)} \pm R_{01} \sqrt{\left[ \frac{k_1 - \frac{k_2 R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_2 - U'_1}}{\frac{U'_4 - U'_3}{U'_2 - U'_1} - k_1} \right]^2 - \frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \frac{\frac{U'_4 - U'_3}{U'_2 - U'_1}}{\frac{U'_4 - U'_3}{U'_2 - U'_1} - k_1}}$
12	$R_{\text{BX}} = \frac{k_1 - \frac{k_2 R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_1}}{\frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_1} - k_1} \pm \sqrt{\left[ \frac{k_1 - k_2 \frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_1}}{\frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_1} - k_1} \right]^2 + R_{02} R_{02} \frac{\frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_1}}{k_1 - \frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_1}}}$
13	$R_{\text{BX}} = R_{02} \left[ \frac{R_{01}}{R_{02}} - \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} - k_1 \right) \right] / \left[ \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} - k_1 \right) - k_1 \right]$
14	$R_{\text{BX}} = R_{01} \frac{\frac{R_{01} + R_{02}}{k_2} \left( k_1 - k_2 \frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_1} \right)}{(R_{01} + R_{02}) \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_1} - R_{01}} \pm \sqrt{\left[ \frac{\frac{R_{01} + R_{02}}{k_2} \left( k_1 - k_2 \frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_1} \right)}{(R_{01} + R_{02}) \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_1} - R_{01}} \right]^2 - \frac{\frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_1}}{R_{01} (R_{01} + R_{02}) \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_1} - R_{01}}}$
15	$R_{\text{BX}} = \frac{\left( R_{01} + \frac{R_{02}}{k_2} \right) - R_{02} \frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_2}}{\frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_2} - k_1} \pm \sqrt{\left[ \frac{\left( R_{01} + \frac{R_{02}}{k_2} \right) - R_{02} \frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_2}}{\frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_2} - k_1} \right]^2 - R_{02}^2 \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_4 - U'_3}{U'_4 - U'_2} - \frac{R_{01}^2}{R_{02}^2} \frac{R_{01}}{R_{02}} \right)}$

По окончании четвертого такта могут быть определены действительные значения резисторов  $R_{01}$  и  $R_{02}$  или отношение действительных значений этих резисторов путем приравнивая той или иной пары уравнений избыточных измерений входного сопротивления, например, первого и второго (см. табл.2). В результате получим уравнение избыточных измерений в неявном виде:

$$R_{01} = R_{02} \frac{\left( \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_1} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{R_{02}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_1} \right)}{\left( \frac{U'_4 - U'_1}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right)}, \quad (15)$$

а

$$R_{02} = R_{01} \frac{\left( \frac{U'_4 - U'_1}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{R_{01}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right)}{\left( \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_1} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{R_{02}}{R_{01} + R_{02}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_3 - U'_1} \right)}. \quad (16)$$

или в виде уравнений числовых значений

$$\{R_{01}\} = \{R_{02}\} \frac{\left( \frac{N_4 - N_1}{N_3 - N_1} - 1 \right) / \left( 1 - \frac{\{R_{02}\}}{\{R_{01}\} + \{R_{02}\}} \frac{N_4 - N_1}{N_3 - N_1} \right)}{\left( \frac{N_4 - N_1}{N_2 - N_1} - 1 \right) / \left( 1 - \frac{\{R_{01}\}}{\{R_{01}\} + \{R_{02}\}} \frac{N_4 - N_1}{N_2 - N_1} \right)} \quad (17)$$

и

$$\{R_{02}\} = \{R_{01}\} \frac{\left(\frac{N_4 - N_1}{N_2 - N_1} - 1\right) \left/ \left(1 - \frac{\{R_{01}\}}{\{R_{01}\} + \{R_{02}\}} \frac{U'_4 - U'_1}{U'_2 - U'_1}\right)}{\left(\frac{N_4 - N_1}{N_3 - N_1} - 1\right) \left/ \left(1 - \frac{\{R_{02}\}}{\{R_{01}\} + \{R_{02}\}} \frac{N_4 - N_1}{N_3 - N_1}\right)} \right. \quad (18)$$

Решение уравнений числовых значений (17) и (18) осуществляется путем перебора числовых значений сопротивления  $\{R_{01}\} (\{R_{02}\})$  при заданном значении  $\{R_{02}\} (\{R_{01}\})$ . Момент равенства числовых значений правой и левой частей равенств (17) и (18) соответствует искомому значению сопротивления.

Комбинируя разные пары уравнений избыточных измерений можно получить ансамбль более, чем из 1000 данных.

Погрешность вычисления (отклонение результата от номинального значения) может быть определена по уравнениям измерений:

$$\overline{\Delta_{B1}} = \overline{R'_{01}} - R_{01} \quad (19)$$

и

$$\overline{\Delta_{B2}} = \overline{R'_{02}} - R_{02} \quad (20)$$

где  $\overline{R'_{01}}$  и  $\overline{R'_{02}}$  — усредненные по значениям сопротивления резисторов, при условии, что объемы вычислений сопротивлений резисторов  $R_{01}$  и  $R_{02}$ ,  $R_x$  и  $R_{Bx}$  равны или близки между собой по количеству операций.

В пятом такте, по команде с МК, АПЗ устанавливается в среднее положение, а ключи Кл2 и Кл3 — в замкнутое положение. При прохождении тока  $I'_{01}$  через параллельно соединенные резисторы  $R_{01}$ ,  $R_{02}$  и  $R_{Bx}$  на выходе ИК формируются падение напряжения  $U'_5$ . Полученное падение напряжения преобразуется в код числа

$$N_5 = \{S_0\} \{U'_5\} = \{S_0\} k'_{yc} \{I'_{01}\} \frac{\{R_{01}\} \{R_{02}\} \{R_{Bx}\}}{\{R_{01}\} \{R_{Bx}\} + \{R_{02}\} \{R_{Bx}\} + \{R_{01}\} \{R_{02}\}} + \Delta N \quad (21)$$

и запоминается.

Впервые в мире установлено, что по результатам пяти тактов измерительного преобразования можно определить, дополнительно к предыдущим 15-ти, еще 36 значений входного сопротивления измерительного канала. Формализованная запись 36-ти вариантов процедур обработки подсистем уравнений величин приведена в табл. 3 (через цифровые обозначения уравнений номера величин, приведенных в (2)). В табл. 1 приведены также все 36 разновидностей уравнений избыточных измерений входного сопротивления.

Табл.3

Формализованная запись 36-ти вариантов решения подсистем уравнений величин относительно $R_{Bx}$	
(5-1)/(2-1); (5-1)/(3-1); (5-1)/(3-2); (5-1)/(4-1); (5-1)/(4-2); (5-1)/(4-3); (5-1)/(5-2); (5-1)/(5-3); (5-1)/(5-4); (5-2)/(2-1); (5-2)/(3-1); (5-2)/(3-2); (5-2)/(4-1); (5-2)/(4-2); (5-2)/(4-3); (5-2)/(5-1); (5-2)/(5-3); (5-2)/(5-4); (5-3)/(2-1); (5-3)/(3-1); (5-3)/(3-2); (5-3)/(4-1); (5-3)/(4-2); (5-3)/(4-3); (5-3)/(5-1); (5-3)/(5-2); (5-3)/(5-4); (5-4)/(2-1); (5-4)/(3-1); (5-4)/(3-2); (5-4)/(4-1); (5-4)/(4-2); (5-4)/(4-3); (5-4)/(5-1); (5-4)/(5-2); (5-4)/(5-3).	
1	2
№ п/п	Уравнения избыточных измерений входного сопротивления измерительного канала
1	$R_{Bx} = R_{01} \left( \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right) \left/ \left( k_1 - \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right) \right.$
2	$R_{Bx} = R_{01} R_{02} \left( \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_1} - k_1 \right) \left/ \left( R_{01} - (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_1} \right) \right.$
3	$R_{Bx} = \sqrt{\left[ \frac{\left( \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_2} (R_{02} - R_{01}) - (R_{02} + R_{01}) \right)^2}{\frac{k_1}{k_2} \left( k_1 - \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_2} \frac{R_{02}^2 - R_{01}^2}{R_{01} R_{02}} \right)} \right]} + \frac{R_{01} R_{02}}{\left( \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_2} \frac{R_{02}^2 - R_{01}^2}{R_{01} R_{02}} - k_1 \right)} + \frac{\left( \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_2} (R_{02} - R_{01}) - (R_{02} + R_{01}) \right)}{\frac{k_1}{k_2} \left( k_1 - \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_2} \frac{R_{02}^2 - R_{01}^2}{R_{01} R_{02}} \right)}$

1	2
4	$R_{\text{BX}} = R_{01} \left( k_1 - \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_1} \right) / \left( \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} \left[ \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_1} - \frac{R_{01} R_{02}}{(R_{01} + R_{02})^2} \right] \right)$
5	$R_{\text{BX}} = \frac{R_{02} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_2} - (R_{01} + R_{02} + R_{01})}{\frac{k_1}{k_2} - \frac{R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_2}} \pm \sqrt{\left[ \frac{R_{02} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_2} - (R_{01} + R_{02} + R_{01})}{\frac{k_1}{k_2} - \frac{R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_2}} \right]^2 - \frac{(R_{01} + R_{02}) R_{01}}{k_1 - k_2} \frac{R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_2}}$
6	$R_{\text{BX}} = R_{02} \left( R_{\text{BX}} \left( k_2 - \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_3} \right) \right) / \left( \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_3} - \frac{R_{02}}{R_{01}} \right)$
7	$R_{\text{BX}} = R_{01} / \left( \frac{R_{01}}{R_{02}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_5} - k_1 \right)$
8	$R_{\text{BX}} = R_{02} / \left( \frac{U'_5 - U'_1}{U'_3 - U'_5} \frac{R_{02}}{R_{01}} - k_1 \right)$
9	$R_{\text{BX}} = (R_{01} + R_{02}) / \left[ \left( \frac{R_{01}}{R_{02}} + \frac{R_{02}}{R_{01}} + k_1 \right) \frac{U'_5 - U'_1}{U'_4 - U'_5} - k_1 \right]$
10	$R_{\text{BX}} = \frac{R_{01} R_{01} \left( \frac{U'_5 - U'_2}{U'_2 - U'_1} + k_1 \right)}{(R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_1 - U'_2} - R_{01}} \pm \sqrt{R_{01}^2 \frac{\left( \frac{U'_5 - U'_2}{U'_2 - U'_1} + k_1 \right)^2}{(R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_1 - U'_2} - R_{01}} - R_{01}^2 \frac{R_{02} \frac{U'_5 - U'_2}{U'_2 - U'_1}}{(R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_2 - U'_1} + R_{01}}}$
11	$R_{\text{BX}} = \frac{R_{02} \left( \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \frac{k_2 R_{02} + R_{01}}{R_{01}} + k_1 \right)}{k_2 \left( k_1 - \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} + \frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \right) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \right)} \pm \sqrt{\left[ \frac{R_{02} \left( \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \frac{k_2 R_{02} + R_{01}}{R_{01}} + k_1 \right)}{k_2 \left( k_1 - \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} + \frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \right) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_1} \right)} \right]^2 - \frac{R_{02}^2 \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_1}}{\left( \frac{R_{02}}{R_{01}} + \frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \right) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_1} - k_1}}$
12	$R_{\text{BX}} = R_{02} \left( k_1 + \frac{R_{02} - R_{01}}{R_{01}} \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_2} \right) / \left( k_1 - \frac{R_{02}^2 - R_{01}^2}{R_{01} R_{01}} \frac{U'_5 - U'_2}{U'_3 - U'_2} \right)$
13	$R_{\text{BX}} = \frac{(R_{01} + R_{02}) \left( k_1 + k_2 \frac{R_{02}}{R_{01}} \right) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_1} - k_1}{k_2 (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_1} - R_{01} R_{01} - k_2} \pm \sqrt{\left[ \frac{(R_{01} + R_{02}) \left( k_1 + k_2 \frac{R_{02}}{R_{01}} \right) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_1} - k_1}{k_2 (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_1} - R_{01} R_{01} - k_2} \right]^2 + \frac{R_{02} (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_1}}{(R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_1} - R_{01} R_{01} - k_1}}$
14	$R_{\text{BX}} = \left( R_{01} + R_{02} \left[ k_1 + \frac{R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_2} \right] \right) / \left( \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} + \frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \right) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_2} - k_1 \right)$
15	$R_{\text{BX}} = \sqrt{\left[ \frac{R_{01} \left( k_2 R_{02} + k_1 \right) \left( \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_3} + k_1 \right)}{k_2 (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_3} + R_{01}} \right]^2 - R_{01} R_{02} \frac{R_{01} \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_3} + (R_{01} + R_{02})}{(R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_3} + R_{01}} - R_{01} \frac{(k_2 R_{02} + k_1) \left( \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_3} + k_1 \right)}{k_2 (R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_2}{U'_4 - U'_3} + R_{01}}}$
16	$R_{\text{BX}} = R_{02} \frac{U'_2 - U'_5}{U'_5 - U'_1} / \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} \frac{U'_5 - U'_2}{U'_5 - U'_1} + k_1 \right)$

1	2
17	$R_{\text{BX}} = R_{02} \left( k_1 - \frac{U'_5 - U'_2}{U'_5 - U'_3} \frac{R_{02}}{R_{01}} \right) / \left( \frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \frac{U'_5 - U'_2}{U'_5 - U'_3} - k_1 \right)$
18	$R_{\text{BX}} = (R_{01} + R_{02}) \left[ k_1 - \left( k_1 + \frac{R_{02}^2}{R_{01}(R_{01} + R_{02})} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_2}{U'_5 - U'_4} \right] / \left( k_1 + \frac{R_{02}}{R_{01}} + \frac{R_{02}^2}{R_{01}^2} \cdot \frac{U'_5 - U'_2}{U'_5 - U'_4} - k_1 \right)$
19	$R_{\text{BX}} = R_{01} \left( k_1 + \frac{R_{02} - R_{01}}{R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \right) / \left( k_1 - \frac{R_{02}^2 - R_{01}^2}{R_{02}^2} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \right)$
20	$R_{\text{BX}} = \frac{\frac{R_{01}}{k_2} \left[ k_1 - \left( \frac{k_2 R_{01}}{R_{02}} + \frac{R_{02}}{R_{02}} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_2 - U'_1} \right]}{(R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_3}{U'_2 - U'_1} \frac{R_{01}}{R_{02} R_{02}} + k_1} \pm \sqrt{\frac{\left[ k_1 - \frac{R_{01}}{k_2} \left[ \left( \frac{k_2 R_{01}}{R_{02}} + \frac{R_{02}}{R_{02}} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_2 - U'_1} \right] \right]^2}{(R_{01} + R_{02}) \frac{R_{01}}{R_{02} R_{02}} \frac{U'_5 - U'_3}{U'_2 - U'_1} + k_1}} + \frac{R_{01}^2 \frac{U'_5 - U'_3}{U'_2 - U'_1}}{(R_{01} + R_{02}) \frac{U'_5 - U'_3}{U'_2 - U'_1} - R_{02} R_{02}}$
21	$R_{\text{BX}} = \sqrt{\frac{\left[ k_1 + \left( k_1 + k_2 \frac{R_{01}}{R_{02}} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_1} \right]^2}{k_2 R_{02} + k_2 (R_{01} + R_{02}) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_1}}} - R_{01} \frac{R_{02} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_1}}{\left( \frac{R_{01}}{R_{02}} + k_1 \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_1} + k_1} - \frac{\left( k_1 + k_2 \frac{R_{01}}{R_{02}} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_1} + k_1}{k_2 (R_{01} + R_{02}) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_1} + k_2 R_{02}}$
22	$R_{\text{BX}} = \sqrt{\frac{R_{02} (k_2 R_{01} + R_{02}) \cdot \left( \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_2} + k_1 \right)}{\frac{R_{02}}{k_2} \left( \frac{R_{01}}{R_{02}} + k_1 \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_2} + k_1}} - R_{01} \frac{(R_{01} + R_{02}) + R_{02} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_2}}{\left( \frac{R_{01}}{R_{02}} + \frac{R_{02}}{R_{02}} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_2} + k_1} - \frac{(k_2 R_{01} + R_{02}) \cdot \left( \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_2} + k_1 \right)}{\left( \frac{R_{01}}{k_2 R_{02}} + \frac{k_1}{k_2} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_2} + \frac{k_1}{k_2}}$
23	$R_{\text{BX}} = - \frac{\frac{R_{01} + R_{02}}{k_2} \left( k_1 + \frac{(k_2 R_{01} + R_{02})}{R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_1} \right)}{k_1 - \frac{(R_{01} + R_{02})^2}{R_{02} R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_1}} \pm \sqrt{\frac{\left[ \frac{R_{01} + R_{02}}{k_2} \left( k_1 + \frac{(k_2 R_{01} + R_{02})}{R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_1} \right) \right]^2}{k_1 - \frac{(R_{01} + R_{02})^2}{R_{02} R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_1}} - \frac{R_{01} (R_{01} + R_{02}) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_1}}{k_1 - \frac{(R_{01} + R_{02})^2}{R_{02} R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_1}}}$
24	$R_{\text{BX}} = R_{01} \left( \frac{R_{01}}{R_{02}} \frac{U'_5 - U'_3}{U'_3 - U'_4} - \frac{R_{02}}{R_{01}} \right) / \left( k_1 - \frac{R_{01} (R_{01} + R_{02})}{R_{02} R_{02}} \frac{U'_5 - U'_3}{U'_4 - U'_3} \right)$
25	$R_{\text{BX}} = R_{01} \frac{U'_3 - U'_5}{U'_5 - U'_1} / \left( \frac{R_{01}}{R_{02}} \frac{U'_5 - U'_3}{U'_5 - U'_1} + k_1 \right)$
26	$R_{\text{BX}} = R_{01} \left( \frac{U'_5 - U'_3}{U'_5 - U'_2} \frac{R_{01}}{R_{02}} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{U'_5 - U'_3}{U'_5 - U'_2} \frac{R_{01}^2}{R_{02}^2} \right)$
27	$R_{\text{BX}} = (R_{01} + R_{02}) \left( k_1 - \left( \frac{R_{01}}{R_{02}} + \frac{R_{02}}{R_{01} + R_{02}} \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_5 - U'_4} \right) / \left[ \left( \frac{R_{01}^2}{R_{02}^2} + \frac{R_{01}}{R_{02}} + k_1 \right) \cdot \frac{U'_5 - U'_3}{U'_5 - U'_4} - k_1 \right]$
28	$R_{\text{BX}} = \frac{R_{01}}{k_2} \left( \frac{(R_{01} R_{01} + k_3 R_{01} R_{02} + R_{02} R_{02})}{R_{01} R_{01} + R_{02} R_{01} + R_{02} R_{02}} \frac{U'_5 - U'_4}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right) / \left( \frac{R_{01} (R_{01} + R_{02})}{R_{01} R_{01} + R_{02} R_{01} + R_{02} R_{02}} \frac{U'_4 - U'_5}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right)$
29	$R_{\text{BX}} = \left( k_1 + \frac{(R_{01} + R_{02})^2}{R_{01} R_{01} + R_{02} R_{01} + R_{02} R_{02}} \frac{U'_5 - U'_4}{U'_1 - U'_4} \right) / \left( R_{01} R_{02} \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{01} R_{01} + R_{02} R_{01} + R_{02} R_{02}} \frac{U'_5 - U'_4}{U'_4 - U'_1} \right)$
30	$R_{\text{BX}} = R_{01} \left( k_1 + \frac{k_1}{R_{01} R_{01} + R_{02} R_{01} + R_{02} R_{02}} \frac{U'_5 - U'_4}{U'_4 - U'_2} \right) / \left( \frac{R_{02} (R_{01} + R_{02})}{R_{01} R_{01} + R_{02} R_{01} + R_{02} R_{02}} \frac{U'_5 - U'_4}{U'_2 - U'_4} + k_1 \right)$

1	2
31	$R_{\text{вх}} = \sqrt{\left[ \frac{R_{02}}{k_2} \frac{k_1 + \frac{(R_{01}R_{01} + k_3 R_{01}R_{02} + R_{02}R_{02})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_1}}{k_1 + \frac{(R_{01}R_{01} + k_3 R_{01}R_{02} + R_{02}R_{02})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_1}} \right]^2 - R_{01}R_{02} \frac{\frac{R_{02}(R_{01} + R_{02})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_1}}{k_1 + \frac{(R_{01}R_{01} + k_3 R_{01}R_{02} + R_{02}R_{02})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_1}}}$
32	$R_{\text{вх}} = \sqrt{\left[ \frac{\frac{R_{01} + R_{02}}{k_2} - \frac{R_{01} - R_{02}}{k_2} \frac{R_{01}R_{01} + k_3 R_{01}R_{02} + R_{02}R_{02}}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_2}}{k_1 - \frac{R_{01}^2 - R_{02}^2}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_2}} \right]^2 - R_{01}R_{02} - \frac{\frac{R_{01} - R_{02}}{k_2} \frac{R_{01}R_{01} + k_3 R_{01}R_{02} + R_{02}R_{02}}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_2} \cdot \frac{R_{01} + R_{02}}{k_2}}{\frac{R_{01}^2 - R_{02}^2}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_3 - U'_2}} - k_1}$
33	$R_{\text{вх}} = R_{01} \left( \frac{R_{01}R_{01} + k_3 R_{01}R_{02} + R_{02}R_{02}}{k_2 (R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02})} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_4 - U'_3} + \frac{R_{02}}{R_{01}} \right) \pm \sqrt{\left[ \frac{R_{01}}{k_2} \frac{R_{01}R_{01} + k_3 R_{01}R_{02} + R_{02}R_{02}}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_4 - U'_3} + R_{02} \right]^2 + R_{02} \left( \frac{R_{01}^2}{R_{02}^2 + R_{01}(R_{01} + R_{02})} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_4 - U'_3} + R_{02} \right)}$
34	$R_{\text{вх}} = \left( \frac{U'_4 - U'_5}{U'_5 - U'_1} \frac{R_{01}R_{02}(R_{01} + R_{02})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \right) / \left( k_1 + \frac{R_{01}R_{02}}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_5 - U'_1} \right)$
35	$R_{\text{вх}} = R_{01} \left( k_1 - \frac{R_{01}(R_{01} + R_{02})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_5 - U'_2} \right) / \left( \frac{R_{01}R_{01}}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_5 - U'_2} - k_1 \right)$
36	$R_{\text{вх}} = R_{02} \left( k_1 - \frac{R_{02}(R_{01} + R_{02})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_5 - U'_3} \right) / \left( \frac{R_{02}R_{02}}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} \cdot \frac{U'_5 - U'_4}{U'_5 - U'_3} - k_1 \right)$

Описанный метод сверхизбыточных измерений обеспечивает получение 55-и действительных значений входного сопротивления ИК, двух действительных значений тока, генерируемого источников тока ИТ, и десяти действительных значений сопротивления резисторов  $R'_{01}$  и  $R'_{02}$ .

Не исключаемая систематическая погрешность сверхизбыточных измерений определяется погрешностями воспроизведения значений образцовых резисторов. Методическая погрешность связана с некорректным выбором значений образцовых резисторов с требуемой погрешностью воспроизведения номинального значения сопротивления и вида функции преобразования измерительного канала (с квазилинейной, а не линейной функцией преобразования).

Ввиду ограничений по объему публикации, следующие такты измерительного преобразования физических величин, в частности, сопротивления исследуемого резистора или резистивного сенсора будут рассмотрены в сообщении 2.

В заключение отметим, что все приведенные 55 вариантов уравнений избыточных измерений входного сопротивления измерительного канала подвергаются структурному анализу.

Структурный анализ уравнений избыточных и сверхизбыточных измерений (УИИ) — новое научное направление в метрологии, направленное на дальнейшее развитие теории избыточных и сверхизбыточных измерений с целью повышения точности, быстродействия и достоверности вычислительной обработки данных.

Приведем пример структурного анализа первого уравнения избыточных измерений входного сопротивления (см. табл.3, №1).

Как видно из табл. 4, структурный анализ включает в себя такие этапы:

1) анализ полученного УИИ по признаку упорядоченности структуры: полностью или частично упорядоченная структура (табл. 4, №1);

2) декомпозицию (упорядочение) структуры УИИ и получение ее в виде, удобном как для выделения физических величин и коэффициентов, объединенных ограниченным числом операций, так и для анализа погрешностей (табл. 4, №2);

3) конституювання<sup>3</sup> структури, описання модифіцированої структури через константи і варіанти методу і другі коефіцієнти (табл. 4, №3);

4) остаточну форму запису рівняння избыточних вимірювань, відповідної методу порівняння з мірою (табл. 4, №4);

5) запис алгоритму (процедури) паралельної обробки даних по модифіцированому рівнянню избыточних вимірювань (табл. 4, №5).

Приведемо для читача визначення двох понять «константа методу» і «варіанта методу».

*Константа методу* избыточних і сверхизбыточных вимірювань — характеристика об'єднання частин нормованих по значенням фізических величин, фундаментальних фізических констант, постійних коефіцієнтів, входять в структуру рівняння (сверх)избыточных вимірювань с априори установленними зв'язями (математическими операціями), которая виражається числовим значенням і значеннями не виключених складових погрешности обробки і погрешности округлення її числового значення.

Табл. 4

**Структурний аналіз рівнянь избыточних вимірювань входного опору ІК**

№ п/п	Форми представлення рівнянь избыточних вимірювань
1	Не повністю (частично) упорядочена структура УИИ $R_{\text{вх}} = R_{01} \left( \frac{(U'_5 - U'_2)}{U'_2 - U'_1} \right) / \left( k_1 - \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right)$
2	Структура УИИ після декомпозиції (упорядочення), зручна для виділення об'єднань і аналізу погрешностей $R_{\text{вх}} = R_{01} \left( \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1} - k_1 \right) / \left( k_1 - \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}} \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \right)$
3	Структура, отримана в результаті конституювання і використовується для обробки даних $R_{\text{вх}} = R_{01} \frac{k_x - k_1}{k_1 - k_0 k_x},$ где $k_x = \frac{U'_5 - U'_1}{U'_2 - U'_1}$ — варіанта методу; $k_0 = \frac{R_{01} + R_{02}}{R_{02}}$ — константа методу
4	Остаточна форма запису рівняння избыточних вимірювань $R_{\text{вх}} = R_{01} \frac{k_{п1}}{k_{п2}} = R_{01} k_{п3} \text{ или } N_{\text{вх}} = N_{01} \frac{k_{п1}}{k_{п2}} = N_{01} k_{п3},$ где производные константы метода $k_{п1} = k_x - k_1$ , $k_{п2} = k_1 - k_0 k_U$ , $k_{п3} = k_{п1} / k_{п2}$
5	Алгоритм (процедура) паралельної обробки даних по модифіцированому рівнянню избыточних вимірювань $(k_U - k_1) \Rightarrow k_{п1} \quad \square$ $\quad \quad \quad \cdot k_{п3} \Rightarrow \times \{R_{01}\} \Rightarrow \{R_{\text{вх}}\}$ $(k_1 - k_{x_0} k_U) \Rightarrow k_{п2} \quad \square$

*Варіанта методу* — характеристика об'єднання преобразованих входних величин і коефіцієнтів, которая виражається числовим значенням варіанта, значеннями систематических і случайных складових погрешности измерительного преобразования рядов фізических величин (без или со статистической обробкою даних), погрешностью вычисления, а также погрешностью округлення полученного числового значення варіанта.

Структурний аналіз рівнянь избыточних вимірювань, його сутність, терміни і визначення будуть описані окремою статтею.

Таким образом, описаний метод сверхизбыточных вимірювань опору резисторів і резистивных датчиков забезпечує розширення функціональних можливостей средства измерения і рішення поставленої технічної задачі. Метод забезпечує: автоматическое виключення аддитивной і

<sup>3</sup> конституювання — складання, установлення, визначення складу, змісту

мультипликативной составляющих систематической погрешности измерения входного сопротивления измерительного канала, определение действительных значений сопротивлений образцовых резисторов, действительного значения тока, текущего через резисторы, погрешности, обусловленные вычислительной обработкой данных, значения коэффициента усиления в процессе эксплуатации омметра и другие.

### Выводы

Дальнейшее развитие получили философские аспекты сверхизбыточных измерений, даны определения понятиям «константа метода» и «варианта метода», расширено понятие «сверхизбыточные измерения».

Впервые в мире приведен классический пример решения задачи сверхизбыточных измерений входного сопротивления измерительного канала.

Показано, что сверхизбыточность достигается за счет использования: а) комбинаторных схем включения нормированных по значению сопротивлений резисторов к измерительному каналу цифрового омметра; б) измерительного преобразования полученных сопротивлений в напряжения при одном значении стабильного тока. Если использовать измерительное преобразование сопротивлений резисторов при другом значении стабильного тока ( $\{I_{02}\} \neq \{I_{01}\}$ ), то это даст дополнительное комбинаторное увеличение числа результатов измерений более чем в 2 раза. Другими словами, избыточность достигается за счет сочетания разных соединений резисторов и режимов работы измерительного канала.

Впервые в мире описан метод сверхизбыточных измерений, обеспечивающий, при проведении первых четырех пяти тактов измерительного преобразования сопротивлений, получение ансамбля из 19-ти уравнений избыточных измерений, а пяти тактов — из 36-и уравнений избыточных измерений и, получение, соответственно, 55-и значений входного сопротивления измерительного канала. Это расширяет возможности метода по статистической обработке полученных результатов с целью уменьшения случайной составляющей погрешности.

Систематическая погрешность сверхизбыточных измерений определяется погрешностями воспроизведения значений образцовых резисторов, нормированного по значению тока и кратковременной стабильностью параметров функции преобразования измерительного канала. Методическая погрешность обусловлена некорректным выбором значений образцовых резисторов с требуемой погрешностью воспроизведения номинального значения сопротивления и установлением вида функции преобразования измерительного канала (с квазилинейной, а не линейной функцией преобразования).

Описанный метод позволяет определять действительные значения сопротивлений образцовых резисторов, действительное значение тока, текущего через резисторы, значения погрешностей, обусловленных вычислительной обработкой данных, а также значения коэффициента усиления в процессе эксплуатации цифрового омметра.

Сверхизбыточные измерения обеспечивают правильность измерений за счет автоматического исключения систематической составляющей погрешности: аддитивной составляющей, — путем использование операций вычитания результатов измерительного преобразования двух физических величин, и мультипликативной составляющей. — за счет деления одного из полученных значений разностей этих пар величин на другое.

Дополнительное использование второго резистора с нормированным по значению сопротивлением обеспечило получение сверхизбыточности по количеству уравнений избыточных измерений и, соответственно, по количеству результатов измерений входного сопротивления измерительного канала. Стало возможным проведение статистической обработки полученных данных и, следовательно, повышение прецизионности измерений, т.е. обеспечить близость друг к другу независимых результатов избыточных измерений, полученных в конкретных регламентированных условиях эксплуатации цифрового омметра.

Сделан еще один шаг в развитии теории и методов сверхизбыточных измерений.

### Литература

1. Кондратов В.Т. Стратегическая теория XXI века /В.Т.Кондратов//Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2001. – № 2. – С. 11 – 16.
2. Кондратов В.Т. Методы избыточных измерений физических величин /В.Т.Кондратов // Засоби комп'ютерної техніки з віртуальними функціями і нові інформаційні технології. Зб. наук. праць / НАН України. Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова, Наук. рада НАН України з проб. „Кібернетика, Редкол.: Романов В.О. (відп. ред.) та ін. – Київ, 2002.– Т.1. С. 38 – 44.
3. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений /В.Т.Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – № 1. – С. 7 – 24.
4. Кондратов В.Т. Методы избыточных измерений: определения и классификация /В.Т.Кондратов // Научные труды IX Международной научно-практической конференции “Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики”. Отв. ред. В.Д. Ивченко. – М.: МГУПИ, 2006. Дополнительный сборник “Приборостроение”. – С. 42 – 57.
5. Кондратов В.Т. Математические модели избыточных измерений I-го, II-го и III-го родов /В.Т.Кондратов // Научные труды X-й Юбилейной Междунар. науч.-техн. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики». Книга «Приборостроение». — М.: МГУПИ, 2007. — С. 134 –143.
6. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений: уравнения избыточных измерений II-го и III-го родов. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції. 5-10 червня 2015 р., м. Одеса, 2015. – С. 20 – 22.

7. Кондратов В.Т. Классификация математических моделей избыточных измерений физических величин / В.Т.Кондратов // Научные труды X-й Юбилейной Международной научно-технической конференции „Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики”. Книга „Приборостроение”. – М.: МГУ ПИ, 2007. – С. 127 – 134.
8. Кондратов В.Т. Теория и методы избыточных измерений / В.Т.Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012.– № 3 – С. 14 – 22
9. Кондратов В.Т. Меганаука метрология / В.Т.Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2014. — № 4. — С. 69 – 84.
10. Kondratov V.T, Theory of redundant measurements — strategic theory of XXI century. Vymiryuvakna ta obchislyuvalna tekhnika v tekhnologichnykh protsesakh (VOTTP-14-2015). Materialy XIV mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferentsii. 5-10 iyunja, 2015 g, Odessa, 2015. – PP. 17 – 19/
11. Кондратов В.Т. Спосіб понаднадлишкових (супернадлишкових) вимірювань опору резисторів і резистивних сенсорів. Патент України на винахід № 108581 С2. Бюл. № 9, 12.05.2015.
12. Кондратов В.Т. Сверхизбыточные измерения. Режим доступа: <http://kondratov.com.ua/index.php/nauchnye-trudy-111/glavnye-trudy-2013>.
13. Кондратов В.Т. Научный прорыв в фундаментальной метрологии. Режим доступа: <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamental-metrology-11/scientific-break-in-fundamental-metrology>.

#### References

1. Kondratov V.T. Strategicheskaja teorija XXI veka /V.T.Kondratov//Vymiryuvalna ta obchislyuvalna tekhnika v technologicheskikh protsesakh. — 2001. — № 2. — S. 11 – 16.
2. Kondratov V.T. Metody izbytochnykh izmerenij fizicheskikh velichin /V.T.Kondratov // Zasoby kompyuternoj tekhniki z virtualnymi funktsijami i novi informatsijni tekhnologii. Zb. nauk. prats / NAN Ukrainy. In-t kibernetiky im. V.M. Glushkova, Nauk. rada NAN Ukrainy z prob. „Kibernetika, Pedkol.: Romanov V.O. (vidp. red.) ta in. — Kyiv, 2002. — T.1. S. 38 – 44.
3. Kondratov V.T. Teorija izbytochnykh izmerenij/V.T.Kondratov // Vymiryuvalna ta obchislyuvalna tekhnika v technologicheskikh protsesakh. — 2005. — № 1. — S. 7 – 24.
4. Kondratov V.T. Metody izbytochnykh izmerenij: opredelenija i klasifikatsija /V.T.Kondratov // Nauchnye trudy IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferentsii “Fundamentalnye i prikladnye problemy priborostroenija, informatiki i ekonomiki”. Otv. red. V.D.Ivchenko. — М.: MGUPI, 2006. Dopolnitelnyj sbornik “Priborostroenije”. — S. 42 – 57.
5. Kondratov V.T. Matematicheskiye modeli izbytochnykh izmerenij I-go, II-go i III-go rodov /V.T.Kondratov // Nauchnye trudy X Yubilejnoy Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. «Fundamentalnye i prikladnye problemy priborostroenija, informatiki i ekonomiki”. Kniga «Priborostroenije». — М.: МГУ ПИ, 2007. — S. 134 –143.
6. Kondratov V.T. Teorija izbytochnykh izmerenij: uravnenija izbytochnykh izmerenij II-go i III-go rodov. Vymiryuvalna ta obchislyuvalna tekhnika v technologicheskikh protsesakh. Materialy XIV mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferentsii. 5-10 chervnja 2015 r., m. Odesa, 2015. — S. 20 – 22.
7. Kondratov V.T. Классификация математических моделей избыточных измерений физических величин /V.T.Kondratov // Nauchnye trudy X Yubilejnoy Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. «Fundamentalnye i prikladnye problemy priborostroenija, informatiki i ekonomiki”. Kniga «Priborostroenije». — М.: МГУ ПИ, 2007. — S. 127 – 134.
8. Kondratov V.T. Teorija i metody izbytochnykh izmerenij / V.T.Kondratov // Vymiryuvalna ta obchislyuvalna tekhnika v technologicheskikh protsesakh. — 2012. — № 3. — S. 14 – 22
9. Kondratov V.T. Меганаука метрология / V.T.Kondratov // Visnyk Khmel'nitskogo natsionalnogo universitetu. Tekhnichni nauky. — 2014. — № 4. — S. 69 – 84.
10. Kondratov V.T, Theory of redundant measurements — strategic theory of XXI century. Vymiryuvakna ta obchislyuvalna tekhnika v tekhnologichnykh protsesakh (VOTTP-14-2015). Materialy XIV mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferentsii. 5-10 iyunja, 2015 g, Odessa, 2015. — PP. 17 – 19.
11. Kondratov V.T. Sposib ponadnadlyshkovykh (supernadlyshkovykh) vymiryuvan oporu rezistoriv i rezystyvnykh sensoriv. Patent Ukrainy na vynakhid № 108581 S2. Byul. № 9, 12.05.2015.
12. Kondratov V.T. Sverkhizbytochnyje izmerenija. Rezhim dostupa: <http://kondratov.com.ua/index.php/nauchnye-trudy-111/glavnye-trudy-2013>.
13. Kondratov V.T. Nauchnyj proryv v fundamentalnoj mertologii. Rezhim dostupa: <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamental-metrology-11/scientific-break-in-fundamental-metrology>.

Рецензія/Peer review : 24.11.2015 р.

Надрукована/Printed :12.12.2015 р.