

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 2**

*В данном сообщении рассматривается решение метрологической задачи сверхизбыточных измерений сопротивления резисторов и резистивных сенсоров в части получения не одного, а множества 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. Если в сообщении 1 была показана возможность определения параметров функции преобразования измерительного канала, его входного сопротивления, действительных значений нормированных по сопротивлению резисторов, погрешности вычислительной обработки данных, то в сообщении 2 основное внимание уделяется определению множества действительных значений искомой физической величины.*

*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 искомой физической величины и техническое решение измерителя сопротивления, реализующего метод сверхизбыточных измерений.*

*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 2**

*Abstract – In the given message the decision of a metrological problem of super-redundant measurements of resistance of resistors and resistive sensor controls is considered. One is received not, and sets base the equations of super-redundant measurements at practical use commutation or search of all variants of connections of three resistors —  $R_x$ ,  $R_{01}$  and  $R_{02}$  among themselves and their parallel connection to the entrance resistor  $R_{вх}$  of the measuring channel.*

*In the message 1 possibility of definition of parameters of function of transformation of the measuring channel, its entrance resistance, the valid values normalized on resistance of resistors has been shown, to an error of computing data processing. In the message 2 basic attention is given to definition of set of the valid values of required physical size.*

*The given metrological problem dares at linear function of transformation of the measuring channel. The essence of a method of supersuperfluous 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 superfluous measurements of required physical size and the technical decision of a measuring instrument of the resistance realising a method of supersuperfluous measurements are resulted.*

*Work is of interest for masters, experts and scientists, the interested supersuperfluous measurements of sizes of the different physical nature.*

*Keywords: supersuperfluous 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 работа по 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 – 14]. 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 одной–двух однородных физических величин. За счет получения новой информации, 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.

Впервые в мире в сообщении 1 приведен классический пример решения задачи сверхизбыточных измерения входного сопротивления измерительного канала, сопротивлений образцовых резисторов, действительное значение тока, текущего через резисторы, значения погрешностей, обусловленных вычислительной обработкой данных, а также значения коэффициента усиления в процессе эксплуатации цифрового измерителя сопротивления.

Было показано, что сверхизбыточность достигается за счет использования: а) комбинаторных схем включения нормированных по значению сопротивлений резисторов к измерительному каналу прибора; 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 возможно дополнительное комбинаторное увеличение числа результатов измерений более чем в 2 раза. Другими словами, сверхизбыточность достигается за счет сочетания разных соединений резисторов и режимов работы измерительного канала.

В сообщении 1 впервые в мире был описан метод сверхизбыточных измерений, обеспечивающий, при проведении первых четырех 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.

Было показано, что 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).

Сверхизбыточные измерения обеспечивают правильность измерений за счет автоматического исключения систематической составляющей погрешности: аддитивной составляющей, — путем использование операций вычитания результатов измерительного преобразования двух физических величин, а мультипликативной — 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. В результате 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 измерителя сопротивления.

В целом был сделан еще один шаг в развитии теории и методов сверхизбыточных измерений.

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

**Объект исследований** — процесс 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 комбинаторном соединении трех резисторов, —  $R_x$ ,  $R_{01}$  и  $R_{02}$ , и их параллельном подключении к входному резистору  $R_{вх}$  ИК.

**Результаты исследований**

В работе показана возможность автоматического исключения аддитивной и мультипликативной составляющих систематической погрешности измерения сопротивления исследуемого резистора или резистивного сенсора, а также влияния входного сопротивления измерительного канала на результат измерения. Показана возможность получения результатов измерений в количествах, необходимых и достаточных для статистической обработки с целью повышения точности сверхизбыточных измерений.

На рисунке приведена функциональная схема цифрового измерителя сопротивления, где 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;  $R_{вх}$  — неизвестное по значению входное сопротивление измерительного канала;  $R_d$  — 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.

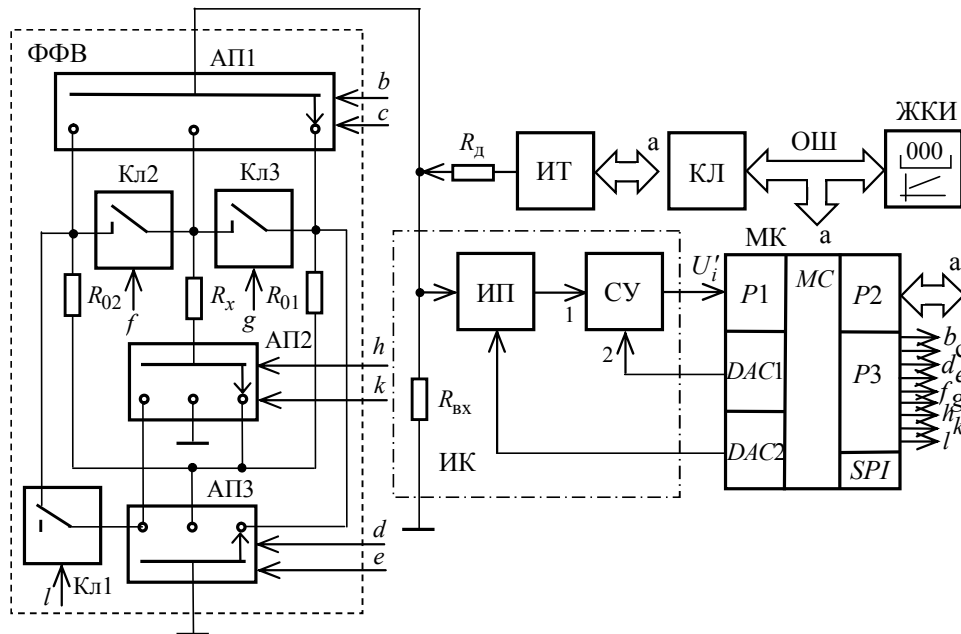


Рисунок. Функциональная схема цифрового измерителя сопротивления с расширенными функциональными возможностями

Работа цифрового измерителя сопротивления состоит из 12-ти тактов измерительного преобразования сопротивлений и тактов вычисления полученных данных.

Рассмотрим сущность метода сверхизбыточных измерений сопротивления резисторов или резистивного сенсора на примере работы цифрового измерителя (см. рисунок). Отметим, что выбор нулевого или заданного значения тока осуществляется по команде с микроконвертора МК, которая поступает через общую шину ОШ с выходов порта P3 на цифровые входы цифрууправляемого источника тока ИТ. В это же время на входы управления АП1, АП2 и АП3 и ключей Кл1, Кл2 и Кл3 формирователя физических величин ФФВ поступают сигналы с выходов «b», ..., «l» порта P3 микроконвертора МК. Эти сигналы обеспечивают коммутацию автоматических переключателей и ключей и получение двенадцати эквивалентных резисторов благодаря разным законам соединения пассивных элементов электрических цепей ФФВ.

Как было показано в [14], в цифровом измерителе сопротивления реализуется метод сверхизбыточных измерений, при котором, вместо трех, измеряется двенадцать физических величин (сопротивлений) при линейной функции преобразования ИК:

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

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

Указанные резисторы 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. Управление работой ФФВ осуществляется по команде с МК, устанавливающего соответствующие сигналы управления на выходах порта P3 МК.

Через резисторы пропускается стабильный по значению ток  $I_{01}$ , который генерируется источником тока ИТ (см. рисунок).. В измерительном преобразователе ИП Падение напряжения на эквивалентных резисторах усиливается в  $k_n$  раз. Через суммирующее устройство СУ выходное напряжение ИК поступает на вход встроенного в микроконвертор МК аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Каждый результат измерительного преобразования напряжений в виде кодов чисел поступает в ОЗУ МК и запоминается.

Работа цифрового измеритель сопротивления состоит из 12-ти тактов измерительного преобразования в напряжения, а затем и в код сопротивлений 12-ти эквивалентных резисторов. В 13-м такте осуществляется окончательная обработка результатов промежуточного преобразования физических величин. Часть полученных результатов может обрабатываться параллельно процессу измерительного преобразования сопротивлений резисторов при условии использования многоядерного микроконвертора МК.

Рассмотрим более подробно сущность метода сверхизбыточных измерений сопротивлений резисторов и резистивных сенсоров с учетом данных, полученных и приведенных в сообщении 1 [14], — об уравнениях избыточных измерений входного сопротивления измерительного преобразователя, крутизны преобразования, смещения и других данных.

В первом такте, по команде с порта P3 микроконвертора МК, три автоматических переключателя и три ключа устанавливаются в положение, показанное на рисунке. В результате ко входу ИК подключается замкнутая шина. В этом такте измеряется сопротивление  $R_1$ , значение которого равно сопротивлению параллельно соединенных резисторов  $r_3$  и  $R_{вх}$  (см табл.1, п.1). Оно и определяет значение напряжения смещения.  $U'_1$  ИК (см. табл 2, п.1). С помощью встроенного в МК АЦП напряжение смещения.  $U'_1$  преобразуется в код числа  $N_1 = S_0 U'_1$ , где  $S_0$  — крутизна преобразования АЦП, и запоминается в ОЗУ МК.

Во втором такте, по команде с выходов порта P3 микроконвертора МК, третий автоматический переключатель АПЗ устанавливается в среднее положение (см. рисунок). В результате первый нормированный по значению резистор  $R_{01}$  подключается параллельно входному резистору  $R_{вх}$  ИК и таким образом формируется второй эквивалентный (или результирующий) резистор  $R_2$  со значением сопротивления  $\{R_2\}$  (см. табл. 1, п. 2) . Падение напряжения на нем определяется уравнением величин, приведенным в табл. 2, п. 2. Падение напряжения на сопротивлении резистора  $R_2$  усиливается в  $k_n$  раз. Выходное напряжение ИК преобразуется в код числа  $N_2 = S_0 U'_2$  и запоминается.

В третьем такте, по команде с выходов порта P3 микроконвертора МК, АП1 устанавливается в третье (крайнее левое) положение. В результате параллельно входному резистору  $R_{вх}$  ИК подключается второй нормированный по значению резистор  $R_{02}$  и получают третий эквивалентный резистор  $R_3$  со значением сопротивления  $\{R_3\}$  (см. табл. 1, п. 3). Через резистор  $R_3$  пропускается ток  $I'_0$ . Падение напряжения на сопротивлении резистора  $R_3$  усиливается в  $k'_n$  раз, а полученное выходное напряжение  $U'_3$  ИК (см. табл. 2, п.3) преобразуется в код числа  $N_3 = S_0 U'_3$  с помощью АЦП и запоминается в ОЗУ МК.

В четвертом такте, по команде с выходов порта P3 микроконвертора МК, АП1 устанавливается в начальное положение, указанное на рисунке, первый ключ Кл1 — в положение, противоположное указанному на рисунке, а второй и третий автоматические переключатели АП2 и АП3 — в крайнее левое положение. В результате резисторы  $R_{01}$  и  $R_{02}$  соединяются последовательно и подключаются параллельно входному резистору  $R_{вх}$  ИК. Значение эквивалентного резистора  $R_4$  описывается уравнением числовых значений, приведенным в табл. 1, п.4. Через эквивалентный резистор  $R_4$  пропускается ток  $I'_0$ . Падение напряжения на сопротивлении резистора  $R_4$  усиливается в  $k'_n$  раз.. Полученное выходное напряжение  $U'_4$  ИК (см. табл. 2, п. 5) преобразуется в код числа  $N_4 = S_0 U'_4$  и запоминается.

В пятом такте, по команде с выходов порта P3 микроконвертора МК, АП1 устанавливается в среднее положение, Кл1 и Кл2 — в положение, противоположное указанному на рисунке. В результате нормированные по значениям резисторы  $R_{01}$  и  $R_{02}$  соединяются между собой и с входным резистором  $R_{вх}$  ИК параллельно. Через эквивалентный резистор  $R_5$  с значением сопротивления  $\{R_5\}$  (см. табл. 1, п. 5) пропускается ток  $I'_0$ . Падение напряжения на сопротивлении резистора  $R_5$  усиливается в  $k'_n$  раз. Полученное напряжение  $U'_5$  (см. табл. 2, п.5) преобразуется в код числа  $N_5 = S_0 U'_5$  и запоминается.

В шестом такте, по команде с выходов порта P3 микроконвертора МК, АП1 и АП2 устанавливаются в средние положения, а ключи Кл1, Кл2 и Кл3 — в положение, показанное на рисунке. В результате параллельно входному резистору  $R_{вх}$  ИК подключается резистор  $R_x$  с неизвестным значением сопротивления. Через резистор  $R_6$  с сопротивлением  $\{R_6\}$  (см. табл. 1, п. 6) пропускается нормированный

по значенню ток  $I_0'$ . Падение напряжения на сопротивлении резистора  $R_6$  усиливается в  $k_{\pi}'$  раз. Полученное напряжение (см. табл. 2, п. 6) преобразуется в код числа  $N_6 = S_0 U_6'$  и запоминается в ОЗУ МК.

В седьмом такте, по команде с выходов порта  $P3$  микроконвертора МК, АП1 устанавливается в среднее положение, АП2, АП3 и ключи Кл1, Кл2 и Кл3 — в начальное положение, показанное на рисунке. При этом резисторы  $R_x$  и  $R_{01}$  соединяются последовно между собой и подключаются параллельно входному резистору  $R_{\text{BX}}$  ИК. Через резистор  $R_7$  с сопротивлением  $\{R_7\}$  (см. табл. 1, п. 7) пропускается ток  $I_0'$ . Падение напряжения на сопротивлении резистора  $R_7$  усиливается в  $k_{\pi}'$  раз.. Полученное выходное напряжение  $U_7'$  ИК (см. табл. 2, п. 7) преобразуется в код числа  $N_7 = S_0 U_7'$  и запоминается.

Таблица 1

Так-ты	Соединения резисторов	Так-ты	Соединения резисторов
1	$\{R_1\} = \frac{\{r_3\} \{R_{\text{BX}}\}}{\{r_3\} + \{R_{\text{BX}}\}}$	7	$\{R_7\} = \frac{\{R_{\text{BX}}\} (\{R_x\} + \{R_{01}\})}{((\{R_x\} + \{R_{01}\}) + \{R_{\text{BX}}\})}$
2	$\{R_2\} = \frac{\{R_{01}\} \{R_{\text{BX}}\}}{\{R_{01}\} + \{R_{\text{BX}}\}}$	8	$\{R_8\} = \frac{\{R_x\} \{R_{01}\} \{R_{\text{BX}}\}}{(\{R_x\} \{R_{01}\} + \{R_{\text{BX}}\} (\{R_x\} + \{R_{01}\}))}$
3	$\{R_3\} = \{R_{02}\} \{R_{\text{BX}}\} / (\{R_{02}\} + \{R_{\text{BX}}\})$	9	$\{R_9\} = \{R_{\text{BX}}\} \frac{\{R_x\} + \{R_{02}\}}{(\{R_x\} + \{R_{02}\}) + \{R_{\text{BX}}\}}$
4	$\{R_4\} = \frac{\{R_{\text{BX}}\} (\{R_{01}\} + \{R_{02}\})}{\{R_{01}\} + \{R_{02}\} + \{R_{\text{BX}}\}}$	10	$\{R_{10}\} = R_{02} \frac{\{R_x\} \{R_{\text{BX}}\}}{\{R_x\} \{R_{02}\} + \{R_{\text{BX}}\} (\{R_x\} + \{R_{02}\})}$
5	$\{R_5\} = \frac{\{R_{01}\} \{R_{02}\} \{R_{\text{BX}}\}}{\{R_{01}\} \{R_{\text{BX}}\} + \{R_{02}\} \{R_{\text{BX}}\} + \{R_{01}\} \{R_{02}\}}$	11	$\{R_{11}\} = \{R_{\text{BX}}\} \frac{\{R_{01}\} + \{R_{02}\} + \{R_x\}}{\{R_{01}\} + \{R_{02}\} + \{R_x\} + \{R_{\text{BX}}\}}$
6	$\{R_6\} = \frac{\{R_x\} \{R_{\text{BX}}\}}{\{R_x\} + \{R_{\text{BX}}\}}$	12	$\{R_{12}\} = \frac{\{R_x\} \{R_{01}\} \{R_{02}\} \{R_{\text{BX}}\}}{\{R_{02}\} \{R_{\text{BX}}\} (\{R_{01}\} + \{R_x\}) + \{R_x\} \{R_{01}\} (\{R_{\text{BX}}\} + \{R_{02}\})}$

Таблица 2

Так-ты	Выходное напряжение ИП	Так-ты	Выходное напряжение ИП
1	$U_1' = k_{\text{yc}}' I_0' R_1 + \Delta U'$ или $U_1' = k_{\pi}' I_0' \frac{r_3 R_{\text{BX}}}{r_3 + R_{\text{BX}}} + \Delta U' = \Delta U' _{\{r_3\}=0}$	7	$U_7' = k_{\text{yc}}' I_0' R_7 + \Delta U'$ или $U_7' = k_{\pi}' I_{01}' \frac{(R_x + R_{01}) R_{\text{BX}}}{(R_x + R_{01}) + R_{\text{BX}}} + \Delta U'$
2	$U_2' = k_{\text{yc}}' I_0' R_2 + \Delta U'$ или $U_2' = k_{\pi}' I_{01}' \frac{R_{01} R_{\text{BX}}}{R_{01} + R_{\text{BX}}} + \Delta U'$	8	$U_8' = k_{\text{yc}}' I_0' R_8 + \Delta U'$ или $U_8' = k_{\pi}' I_{01}' \frac{R_x R_{01} R_{\text{BX}}}{R_x R_{01} + R_{\text{BX}} (R_x + R_{01})} + \Delta U'$
3	$U_3' = k_{\text{yc}}' I_0' R_3 + \Delta U'$ или $U_3' = k_{\pi}' I_0' \frac{R_{02} R_{\text{BX}}}{R_{02} + R_{\text{BX}}} + \Delta U'$	9	$U_9' = k_{\text{yc}}' I_0' R_9 + \Delta U'$ или $U_9' = k_{\pi}' I_{01}' \frac{(R_x + R_{02}) R_{\text{BX}}}{(R_x + R_{02}) + R_{\text{BX}}} + \Delta U'$
4	$U_4' = k_{\text{yc}}' I_0' R_4 + \Delta U'$ или $U_4' = k_{\pi}' I_{01}' \frac{(R_{01} + R_{02}) R_{\text{BX}}}{R_{01} + R_{02} + R_{\text{BX}}} + \Delta U'$	10	$U_{10}' = k_{\text{yc}}' I_0' R_{10} + \Delta U'$ или $U_{10}' = k_{\pi}' I_{01}' \frac{R_x R_{02} R_{\text{BX}}}{R_x R_{02} + R_{\text{BX}} (R_x + R_{02})} + \Delta U'$
5	$U_5' = k_{\text{yc}}' I_0' R_5 + \Delta U'$ или $U_5' = k_{\pi}' I_{01}' \frac{R_{01} R_{02} R_{\text{BX}}}{R_{01} R_{\text{BX}} + R_{02} R_{\text{BX}} + R_{01} R_{02}} + \Delta U'$	11	$U_{11}' = k_{\text{yc}}' I_0' R_{11} + \Delta U'$ или $U_{11}' = k_{\pi}' I_{01}' \frac{(R_{01} + R_{02} + R_x) R_{\text{BX}}}{R_{01} + R_{02} + R_x + R_{\text{BX}}} + \Delta U'$
6	$U_6' = k_{\text{yc}}' I_0' R_6 + \Delta U'$ или $U_6' = k_{\pi}' I_{01}' \frac{R_x R_{\text{BX}}}{R_x + R_{\text{BX}}} + \Delta U'$	12	$U_{12}' = k_{\text{yc}}' I_0' R_{12} + \Delta U'$ или $U_{12}' = k_{\pi}' I_{01}' \frac{R_x R_{01} R_{02} R_{\text{BX}}}{R_{02} R_{\text{BX}} (R_{01} + R_x) + R_x R_{01} (R_{\text{BX}} + R_{02})} + \Delta U'$

В восьмом такте, по команде с выходов порта  $P3$  микроконвертора МК, АП1, АП2 и АП3 устанавливаются в среднее положение, Кл1 и Кл2 — в положение, показанное на рисунке, а Кл3 — в замкнутое положение, которое противоположно показанному на рисунке. В зом такте резисторы  $R_x$  и  $R_{01}$

соединяются между собой параллельно и подключаются параллельно входному резистору  $R_{\text{вх}}$  ИК. Через резистор  $R_8$  с сопротивлением  $\{R_8\}$  (см. табл. 1, п. 8) пропускается ток  $I'_0$ . Падение напряжения на сопротивлении резистора  $R_8$  усиливается в  $k'_n$  раз.. Полученное выходное напряжение  $U'_8$  (см. табл. 2, п. 8) ИК преобразуется в код числа  $N_8 = S_0 U'_8$ , который запоминается.

В девятом такте, по команде с выходов порта  $P3$  микроконвертора МК, АП1 и АП2 устанавливаются в среднее положение, АП3 — в крайнее левое положение, а Кл1 — в замкнутое положение, противоположное указанному на рисунке. В этом такте резисторы  $R_x$  и  $R_{02}$  соединяются между собой последовательно и подключаются параллельно входному резистору  $R_{\text{вх}}$  ИК. Через резистор  $R_9$  с сопротивлением  $\{R_9\}$  (см. табл. 1, п. 9) пропускается ток  $I'_0$ . Падения напряжения на сопротивлении резистора  $R_9$  усиливается в  $k'_n$  раз.. Полу-ченное выходное напряжение  $U'_9$  (см. табл. 2, п. 9) ИК преобразовывается в код числа  $N_9 = S_0 U'_9$  и запоминается.

В десятом такте, по команде с выходов порта  $P3$  микроконвертора МК, АП1, АП2 и АП3 устанавливаются в среднее положение, Кл1 и Кл3 — в положение, показанное на рисунке, а Кл2 — в замкнутое положение, противоположное показанному на рисунке. В результате резисторы  $R_x$  и  $R_{02}$  соединяются между собой параллельно и подключаются к входного резистора  $R_{\text{вх}}$  ИК. Нормированный \ по значению ток  $I'_0$  пропускается через резистор  $R_{10}$  с сопротивлением  $\{R_{10}\}$  (см. табл. 1, п. 10). Падение напряжения на сопротивлении резистора  $R_{10}$  усиливается в  $k'_n$  раз. Полученное выходное напряжение  $U'_{10}$  ИК (см. табл. 2, п.10) преобразуется в код числа  $N_{10} = S_0 U'_{10}$  и запоминается в ОЗУ МК.

В одиннадцатом такте, по команде с выходов порта  $P3$  микроконвертора МК, АП1 устанавливается в начальное положение, показанное на рисунке, АП2 — в среднее положение, АП3 — в крайнее левое положение, Кл1 и Кл2 — в замкнутое положение, противоположное показанному на рисунке, а Кл3 — в начальное положение, показанное на рисунке. В результате резисторы  $R_x$ ,  $R_{01}$  и  $R_{02}$  соединяются между собой последовательно и подключаются параллельно входному резистору  $R_{\text{вх}}$  ИК. Через резистор  $R_{11}$  с сопротивлением  $\{R_{11}\}$  (см. табл. 1, п.11) пропускается нормированный по значению ток  $I'_0$ . Падение напряжения на сопротивлении резистора  $R_{11}$  усиливается в  $k'_n$  раз.. Выходное напряжение  $U'_{11}$  ИК (см. табл. 2, п. 11) преобразуется в код числа  $N_{11} = S_0 U'_{11}$  и запоминается.

В двенадцатом такте, по команде с выходов порта  $P3$  микроконвертора МК, АП1, АП2 и АП3 устанавливаются в среднее положение, Кл1, Кл2 и Кл3 — в замкнутое положение, противоположное показанному на рисунке. В результате резисторы  $R_x$ ,  $R_{01}$  и  $R_{02}$  соединяются параллельно между собой и с входным резистором  $R_{\text{вх}}$  ИК. Через резистор  $R_{12}$  с сопротивлением  $\{R_{12}\}$  (см. табл. 1, п. 12) пропускается ток  $I'_0$ . Падение напряжения на сопротивлении  $\{R_{12}\}$  усиливается в  $k'_n$  раз.. Полученное выходное напряжение  $U'_{12}$  ИК (см. табл. 2, п. 12) преобразуется в код числа  $N_{12} = S_0 U'_{12}$  и запоминается в ОЗУ МК.

Таблица 3

Формализованная запись 50-ти вариантов решения подсистемы уравнений величин относительно $R_x$	
(6-1)/(2-1); (6-1)/(3-1); (6-1)/(3-2); (6-1)/(4-1); (6-1)/(4-2); (6-1)/(4-3); (6-1)/(5-1); (6-1)/(5-2); (6-1)/(5-3); (6-1)/(5-4); (6-2)/(2-1); (6-2)/(3-1); (6-2)/(3-2); (6-2)/(4-1); (6-2)/(4-2); (6-2)/(4-3); (6-2)/(5-1); (6-2)/(5-2); (6-2)/(5-3); (6-2)/(5-4); (6-3)/(2-1); (6-3)/(3-1); (6-3)/(3-2); (6-3)/(4-1); (6-3)/(4-2); (6-3)/(4-3); (6-3)/(5-1); (6-3)/(5-2); (6-3)/(5-3); (6-3)/(5-4); (6-4)/(2-1); (6-4)/(3-1); (6-4)/(3-2); (6-4)/(4-1); (6-4)/(4-2); (6-4)/(4-3); (6-4)/(5-1); (6-4)/(5-2); (6-4)/(5-3); (6-4)/(5-4); (6-5)/(2-1); (6-5)/(3-1); (6-5)/(3-2); (6-5)/(4-1); (6-5)/(4-2); (6-5)/(4-3); (6-5)/(5-1); (6-5)/(5-2); (6-5)/(5-3); (6-5)/(5-4)	
№ п/п	Уравнения избыточных измерений сопротивления резистора или резистивного сенсора
1	$R_{x1} = R_{01} \left( \frac{U'_6 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \frac{R_{\text{вх}}}{R_{01} + R_{\text{вх}}} \right) / \left( k_1 - \frac{U'_6 - U'_1}{U'_2 - U'_1} \frac{R_{01}}{R_{01} + R_{\text{вх}}} \right)$
2	$R_{x2} = R_{\text{вх}} \frac{U'_6 - U'_1}{U'_3 - U'_1} / \left[ \left( k_1 + \frac{R_{\text{вх}}}{R_{02}} \right) - \frac{U'_6 - U'_1}{U'_3 - U'_1} \right]$
3	$R_{x3} = R_{02} \frac{R_{\text{вх}} \left[ (R_{01} + R_{\text{вх}}) - \frac{R_{01}}{R_{02}} (R_{02} + R_{\text{вх}}) \right] \frac{U'_6 - U'_1}{U'_3 - U'_2}}{(R_{02} + R_{\text{вх}})(R_{01} + R_{\text{вх}}) - [R_{02}(R_{01} + R_{\text{вх}}) - R_{01}(R_{02} + R_{\text{вх}})] \frac{U'_6 - U'_1}{U'_3 - U'_2}}$

№ п/п	Уравнения избыточных измерений сопротивления резистора или резистивного сенсора
4	$R_{x4} = R_{\text{BX}} \frac{U'_6 - U'_1}{U'_4 - U'_1} \left/ \left( k_1 + \frac{R_{\text{BX}}}{R_{01} + R_{02}} - \frac{U'_6 - U'_1}{U'_4 - U'_1} \right) \right.$
5	$R_{x5} = R_{\text{BX}} \left( \frac{U'_6 - U'_1}{U'_4 - U'_2} \right) \left/ \left( \frac{(R_{01} + R_{02} + R_{\text{BX}})(R_{01} + R_{\text{BX}})}{R_{02} R_{\text{BX}}} - \frac{U'_6 - U'_1}{U'_4 - U'_2} \right) \right.$
6	$R_{x6} = R_{\text{BX}} \left( \frac{U'_6 - U'_1}{U'_4 - U'_3} \right) \left/ \left( \frac{(R_{01} + R_{02} + R_{\text{BX}})(R_{02} + R_{\text{BX}})}{R_{01} R_{\text{BX}}} - \frac{U'_6 - U'_1}{U'_4 - U'_3} \right) \right.$
7	$R_{x7} = R_{01} \frac{U'_6 - U'_1}{U'_5 - U'_1} \left/ \left( k_1 + \frac{R_{01}}{R_{02}} + \frac{R_{01}}{R_{\text{BX}}} \frac{U'_5 - U'_6}{U'_5 - U'_1} \right) \right., \quad (89)$
8	$R_{x8} = R_{\text{BX}} \frac{\frac{R_{01} R_{01} R_{\text{BX}}}{(R_{01} R_{\text{BX}} + R_{02} R_{\text{BX}} + R_{01} R_{02})(R_{01} + R_{\text{BX}})} \cdot \frac{U'_6 - U'_1}{U'_5 - U'_2}}{\frac{R_{01} R_{01} R_{\text{BX}}}{(R_{01} R_{\text{BX}} + R_{02} R_{\text{BX}} + R_{01} R_{02})(R_{01} + R_{\text{BX}})} \cdot \frac{U'_6 - U'_1}{U'_5 - U'_2} - k_1}$
9	$R_{x9} = R_{\text{BX}} \frac{\frac{R_{02} R_{02} R_{\text{BX}}}{(R_{01} R_{\text{BX}} + R_{02} R_{\text{BX}} + R_{01} R_{02})(R_{02} + R_{\text{BX}})} \cdot \frac{U'_6 - U'_1}{U'_3 - U'_5}}{k_1 + \frac{R_{02} R_{02} R_{\text{BX}}}{(R_{01} R_{\text{BX}} + R_{02} R_{\text{BX}} + R_{01} R_{02})(R_{02} + R_{\text{BX}})} \cdot \frac{U'_6 - U'_1}{U'_5 - U'_3}}$
10	$R_{x10} = R_{\text{BX}} \frac{\frac{R_{\text{BX}} (R_{01} R_{01} + R_{02} R_{01} + R_{02} R_{02})}{(R_{01} R_{\text{BX}} + R_{02} R_{\text{BX}} + R_{01} R_{02})(R_{01} + R_{02} + R_{\text{BX}})} \cdot \frac{U'_6 - U'_1}{U'_5 - U'_4}}{\frac{R_{\text{BX}} (R_{01} R_{01} + R_{02} R_{01} + R_{02} R_{02})}{(R_{01} R_{\text{BX}} + R_{02} R_{\text{BX}} + R_{01} R_{02})(R_{01} + R_{02} + R_{\text{BX}})} \cdot \frac{U'_6 - U'_1}{U'_5 - U'_4} - k_1}$
11	$R_{x11} = R_{01} R_{\text{BX}} \left( k_1 + R_{\text{BX}} \frac{U'_2 - U'_6}{U'_2 - U'_1} \right) \left/ \left( \frac{U'_6 - U'_2}{U'_2 - U'_1} R_{01} - R_{\text{BX}} \right) \right.$
12	$R_{x12} = R_{02} \left( \frac{(R_{01} + R_{\text{BX}}) \frac{U'_6 - U'_2}{(R_{02} + R_{\text{BX}}) \frac{U'_3 - U'_1}{R_{02}}} - \frac{R_{01}}{R_{02}} \right) \left/ \left( k_1 - \frac{R_{02}}{R_{\text{BX}}} \frac{(R_{01} + R_{\text{BX}}) \frac{U'_6 - U'_2}{(R_{02} + R_{\text{BX}}) \frac{U'_3 - U'_1}{R_{02}}}}{k_1} \right) \right.$
13	$R_{x13} = R_{01} \left( \frac{R_{\text{BX}} \frac{(R_{01} - R_{02}) \frac{U'_6 - U'_2}{(R_{02} + R_{\text{BX}}) \frac{U'_3 - U'_2}{R_{01}}} - k_1}{\left( \frac{R_{02} - R_{01}}{(R_{02} + R_{\text{BX}}) \frac{U'_3 - U'_2}{R_{01}}} - k_1 \right)} \right) \left/ \left( \frac{R_{02} - R_{01}}{(R_{02} + R_{\text{BX}}) \frac{U'_3 - U'_2}{R_{01}}} - k_1 \right) \right.$
14	$R_{x14} = R_{01} \left( k_1 + \frac{(R_{01} + R_{02})(R_{01} + R_{\text{BX}})}{R_{01}(R_{01} + R_{02} + R_{\text{BX}})} \cdot \frac{U'_6 - U'_2}{U'_4 - U'_1} \right) \left/ \left( k_1 - \frac{(R_{01} + R_{02})(R_{01} + R_{\text{BX}})}{(R_{01} + R_{02} + R_{\text{BX}}) R_{\text{BX}}} \cdot \frac{U'_6 - U'_2}{U'_4 - U'_1} \right) \right.$
15	$R_{x15} = R_{01} \left( k_1 + \frac{R_{\text{BX}} R_{02}}{R_{01}(R_{01} + R_{02} + R_{\text{BX}})} \cdot \frac{U'_6 - U'_2}{U'_4 - U'_2} \right) \left/ \left( k_1 - \frac{R_{02}}{(R_{01} + R_{02} + R_{\text{BX}})} \cdot \frac{U'_6 - U'_2}{U'_4 - U'_2} \right) \right.$
16	$R_{x16} = R_{01} \left( k_1 + \frac{R_{\text{BX}} (R_{01} + R_{\text{BX}})}{(R_{02} + R_{\text{BX}})(R_{02} + R_{\text{BX}})} \cdot \frac{U'_6 - U'_2}{U'_4 - U'_3} \right) \left/ \left( k_1 - \frac{R_{01} (R_{01} + R_{\text{BX}})}{(R_{02} + R_{\text{BX}})(R_{02} + R_{\text{BX}})} \cdot \frac{U'_6 - U'_2}{U'_4 - U'_3} \right) \right.$
17	$R_{x17} = R_{01} \frac{k_1 + \frac{R_{02} (R_{01} + R_{\text{BX}})}{(R_{01} R_{\text{BX}} + R_{02} R_{\text{BX}} + R_{01} R_{02})} \cdot \frac{U'_6 - U'_2}{U'_5 - U'_1}}{k_1 - \frac{R_{01} R_{02} (R_{01} + R_{\text{BX}})}{(R_{01} R_{\text{BX}} + R_{02} R_{\text{BX}} + R_{01} R_{02}) R_{\text{BX}}} \cdot \frac{U'_6 - U'_2}{U'_5 - U'_1}}$
18	$R_{x18} = R_{01} \frac{k_1 - \frac{R_{\text{BX}}}{R_{01}} \frac{R_{01} R_{01}}{(R_{01} R_{\text{BX}} + R_{02} R_{\text{BX}} + R_{01} R_{02})} \cdot \frac{U'_6 - U'_2}{U'_5 - U'_2}}{k_1 + \frac{R_{01} R_{01}}{(R_{01} R_{\text{BX}} + R_{02} R_{\text{BX}} + R_{01} R_{02})} \cdot \frac{U'_6 - U'_2}{U'_5 - U'_2}}$

№ п/п	Уравнения избыточных измерений сопротивления резистора или резистивного сенсора
19	$R_{x19} = R_{BX} \frac{\frac{R_{02}R_{02}(R_{01} + R_{BX})}{(R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02})(R_{02} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_2}{U'_5 - U'_3} - \frac{R_{01}}{R_{BX}}}{\frac{R_{02}R_{02}(R_{01} + R_{BX})}{(R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02})(R_{02} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_2}{U'_5 - U'_3} - k_1}$
20	$R_{x20} = \frac{R_{BX} \frac{(R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02})(R_{01} + R_{BX})}{(R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02})(R_{01} + R_{02} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_2}{U'_5 - U'_4} - R_{01}}{\frac{(R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02})(R_{01} + R_{BX})}{(R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02})(R_{01} + R_{02} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_2}{U'_5 - U'_4} - k_1}$
21	$R_{x21} = R_{01} \left[ \frac{R_{02}}{R_{01}} + \frac{(R_{02} + R_{BX})}{(R_{01} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_2 - U'_1} \right] \left/ \left[ k_1 - \frac{R_{01}(R_{02} + R_{BX})}{R_{BX}(R_{01} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_2 - U'_1} \right] \right.$
22	$R_{x22} = R_{02} \left[ k_1 + \frac{U'_6 - U'_3}{U'_3 - U'_1} \right] \left/ \left[ k_1 - \frac{U'_6 - U'_3}{U'_3 - U'_1} \cdot \frac{R_{02}}{R_{BX}} \right] \right.$
23	$R_{x23} = R_{02} \left( \frac{k_1}{R_{02}} + \frac{R_{BX}}{R_{02}} \cdot \frac{R_{02} - R_{01}}{R_{01} + R_{BX}} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \right) \left/ \left( k_1 - \frac{R_{02} - R_{01}}{R_{01} + R_{BX}} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \right) \right.$
24	$R_{x24} = R_{02} \frac{k_1 + \frac{(R_{01} + R_{02})(R_{02} + R_{BX})}{R_{02}(R_{01} + R_{02} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_4 - U'_1}}{k_1 - \frac{(R_{01} + R_{02})(R_{02} + R_{BX})}{R_{BX}(R_{01} + R_{02} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_4 - U'_1}}$
25	$R_{x25} = R_{02} \frac{k_1 + \frac{R_{BX}(R_{02} + R_{BX})}{(R_{01} + R_{02} + R_{BX})(R_{01} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_4 - U'_2}}{k_1 - \frac{R_{02}(R_{02} + R_{BX})}{(R_{01} + R_{02} + R_{BX})(R_{01} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_4 - U'_2}}$
26	$R_{x26} = R_{01} \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} + \frac{R_{BX}}{(R_{02} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_4 - U'_3} \right) \left/ \left( k_1 - \frac{R_{01}}{(R_{02} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_4 - U'_3} \right) \right.$
27	$R_{x27} = R_{02} \frac{k_1 + \frac{R_{01}(R_{02} + R_{BX})}{(R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_5 - U'_1}}{k_1 - \frac{R_{01}R_{02}(R_{02} + R_{BX})}{R_{BX}(R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_5 - U'_1}}$
28	$R_{x28} = R_{02} \frac{\frac{R_{BX}}{R_{02}} \frac{R_{01}R_{01}(R_{02} + \{R_{BX}\})}{(R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02})(R_{01} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_5 - U'_2} - k_1}{\frac{R_{01}R_{01}(R_{02} + \{R_{BX}\})}{(R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02})(R_{01} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_5 - U'_2} - k_1}$
29	$R_{x29} = R_{02} \frac{\frac{R_{02}R_{BX}}{(R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_5 - U'_3} - k_1}{\frac{R_{02}R_{02}}{(R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_5 - U'_3} - k_1}$
30	$R_{x30} = R_{02} \frac{\frac{R_{BX}}{R_{02}} \frac{(R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02})(R_{02} + \{R_{BX}\})}{(R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02})(R_{01} + R_{02} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_5 - U'_4} - k_1}{\frac{(R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02})(R_{02} + \{R_{BX}\})}{(R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02})(R_{01} + R_{02} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_3}{U'_5 - U'_4} - k_1}$
31	$R_{x31} = R_{01} \frac{k_1 + \frac{R_{02}}{R_{01}} + \frac{(R_{01} + R_{02} + R_{BX})}{(R_{01} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_4}{U'_2 - U'_1}}{k_1 - \frac{R_{01}(R_{01} + R_{02} + R_{BX})}{R_{BX}(R_{01} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_4}{U'_2 - U'_1}}$



№ п/п	Уравнения избыточных измерений сопротивления резистора или резистивного сенсора
32	$R_{x32} = R_{02} \frac{\frac{(R_{01} - R_{02})(R_{01} + R_{02} + R_{BX})}{R_{02}(R_{02} + R_{BX})} + \frac{U'_6 - U'_4}{U'_3 - U'_1}}{\frac{R_{02} + R_{BX}}{R_{01} + R_{02} + R_{BX}} - \frac{R_{02}}{R_{BX}} \cdot \frac{U'_6 - U'_4}{U'_3 - U'_1}}$
33	$R_{x33} = \frac{(R_{01} + R_{02}) + R_{BX} \frac{(R_{02} - R_{01})(R_{01} + R_{02} + R_{BX})}{(R_{01} + R_{BX})(R_{02} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_4}{U'_3 - U'_2}}{k_1 - \frac{(R_{02} - R_{01})(R_{01} + R_{02} + R_{BX})}{(R_{01} + R_{BX})(R_{02} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_4}{U'_3 - U'_2}}$
34	$R_{x34} = (R_{01} + R_{02}) \left( k_1 + \frac{U'_6 - U'_4}{U'_4 - U'_1} \right) \left/ \left( k_1 - \frac{(R_{01} + R_{02})}{R_{BX}} \cdot \frac{U'_6 - U'_4}{U'_4 - U'_1} \right) \right.$
35	$R_{x35} = \left( (R_{01} + R_{02}) + R_{BX} \frac{R_{02}}{(R_{01} + R_{BX})} \frac{U'_6 - U'_4}{U'_4 - U'_2} \right) \left/ \left( k_1 - \frac{R_{02}}{(R_{01} + R_{BX})} \frac{U'_6 - U'_4}{U'_4 - U'_2} \right) \right.$
36	$R_{x36} = \left( (R_{01} + R_{02}) + R_{BX} \frac{R_{01}}{(R_{02} + R_{BX})} \frac{U'_6 - U'_4}{U'_4 - U'_3} \right) \left/ \left( k_1 - \frac{R_{01}}{(R_{02} + R_{BX})} \frac{U'_6 - U'_4}{U'_4 - U'_3} \right) \right.$
37	$R_{x37} = R_{01} \frac{\frac{R_{01} + R_{02}}{R_{01}} + \frac{R_{02}(R_{01} + R_{02} + R_{BX})}{R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02}} \cdot \frac{U'_6 - U'_4}{U'_5 - U'_1}}{k_1 - \frac{R_{01}}{R_{BX}} \frac{R_{02}(R_{01} + R_{02} + R_{BX})}{R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02}} \cdot \frac{U'_6 - U'_4}{U'_5 - U'_1}}$
38	$R_{x38} = R_{01} \frac{k_1 - \frac{R_{BX}}{R_{01} + R_{BX}} \frac{R_{01}(R_{01} + R_{02} + R_{BX})}{R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02}} \cdot \frac{U'_6 - U'_4}{U'_5 - U'_2} + \frac{R_{02}}{R_{01}}}{k_1 - \frac{R_{01}}{R_{01} + R_{BX}} \frac{R_{01}(R_{01} + R_{02} + R_{BX})}{R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02}} \cdot \frac{U'_6 - U'_4}{U'_5 - U'_2}}$
39	$R_{x39} = R_{02} \frac{k_1 - \frac{R_{BX}}{R_{02} + R_{BX}} \frac{R_{02}(R_{01} + R_{02} + R_{BX})}{R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02}} \cdot \frac{U'_6 - U'_4}{U'_5 - U'_3} + \frac{R_{01}}{R_{02}}}{k_1 - \frac{R_{02}}{R_{02} + R_{BX}} \frac{R_{02}(R_{01} + R_{02} + R_{BX})}{R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02}} \cdot \frac{U'_6 - U'_4}{U'_5 - U'_3}}$
40	$R_{x40} = \frac{(R_{01} + R_{02}) - R_{BX} \frac{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}}{R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02}} \cdot \frac{U'_6 - U'_4}{U'_5 - U'_4}}{k_1 - \frac{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}}{R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02}} \cdot \frac{U'_6 - U'_4}{U'_5 - U'_4}}$
41	$R_{x41} = R_{01} \frac{R_{02} + \frac{R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02}}{R_{01} + R_{BX}} \cdot \frac{U'_6 - U'_5}{U'_2 - U'_1}}{(R_{01} + R_{02}) - R_{01} \frac{R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02}}{R_{BX}(R_{01} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_5}{U'_2 - U'_1}}$
42	$R_{x42} = R_{01} \frac{k_1 + \frac{R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02}}{R_{01}(R_{02} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_5}{U'_3 - U'_1}}{k_1 + \frac{R_{01}}{R_{02}} - \frac{R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02}}{R_{BX}(R_{02} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_5}{U'_3 - U'_1}}$
43	$R_{x43} = R_{02} \frac{k_1 + \frac{R_{BX}}{R_{02}} \frac{(R_{02} - R_{01})(R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02})}{R_{01}(R_{02} + R_{BX})(R_{01} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_5}{U'_3 - U'_2}}{k_1 + \frac{R_{02}}{R_{01}} - \frac{(R_{02} - R_{01})(R_{01}R_{BX} + R_{02}R_{BX} + R_{01}R_{02})}{R_{01}(R_{02} + R_{BX})(R_{01} + R_{BX})} \cdot \frac{U'_6 - U'_5}{U'_3 - U'_2}}$

№ п/п	Уравнения избыточных измерений сопротивления резистора или резистивного сенсора
44	$R_{x44} = \frac{R_{01}R_{02} + (R_{01} + R_{02}) \frac{R_{01}R_{Bx} + R_{02}R_{Bx} + R_{01}R_{02}}{R_{01} + R_{02} + R_{Bx}} \cdot \frac{U'_6 - U'_5}{U'_4 - U'_1}}{(R_{01} + R_{02}) - (R_{01} + R_{02}) \frac{(R_{01}R_{Bx} + R_{02}R_{Bx} + R_{01}R_{02})}{R_{Bx}(R_{01} + R_{02} + R_{Bx})} \cdot \frac{U'_6 - U'_5}{U'_4 - U'_1}}$
45	$R_{x45} = \frac{R_{02} + R_{Bx} \frac{R_{02}(R_{01}R_{Bx} + R_{02}R_{Bx} + R_{01}R_{02})}{R_{01}(R_{01} + R_{02} + R_{Bx})(R_{01} + R_{Bx})} \cdot \frac{U'_6 - U'_5}{U'_4 - U'_2}}{k_1 + \frac{R_{02}}{R_{01}} - \frac{R_{02}(R_{01}R_{Bx} + R_{02}R_{Bx} + R_{01}R_{02})}{R_{01}(R_{01} + R_{02} + R_{Bx})(R_{01} + R_{Bx})} \cdot \frac{U'_6 - U'_5}{U'_4 - U'_2}}$
46	$R_{x46} = R_{01} \frac{R_{02} + R_{Bx} \frac{R_{01}R_{Bx} + R_{02}R_{Bx} + R_{01}R_{02}}{(R_{02} + R_{Bx})(R_{02} + R_{Bx})} \cdot \frac{U'_6 - U'_5}{U'_4 - U'_3}}{(R_{01} + R_{02}) - R_{01} \frac{R_{01}R_{Bx} + R_{02}R_{Bx} + R_{01}R_{02}}{(R_{02} + R_{Bx})(R_{02} + R_{Bx})} \cdot \frac{U'_6 - U'_5}{U'_4 - U'_3}}$
47	$R_{x47} = R_{02} \left( k_1 + \frac{U'_6 - U'_5}{U'_5 - U'_1} \right) \left/ \left( k_1 + \frac{R_{02}}{R_{01}} - \frac{R_{02}}{R_{Bx}} \frac{U'_6 - U'_5}{U'_5 - U'_1} \right) \right.$
48	$R_{x48} = R_{01} \left( R_{02} - R_{01} \frac{R_{Bx}}{(R_{01} + R_{Bx})} \frac{U'_6 - U'_5}{U'_5 - U'_2} \right) \left/ \left( (R_{01} + R_{02}) - \frac{R_{01}R_{01}}{(R_{01} + R_{Bx})} \frac{U'_6 - U'_5}{U'_5 - U'_2} \right) \right.$
49	$R_{x49} = R_{02} \left( R_{01} - R_{02} \frac{R_{Bx}}{R_{02} + \{R_{Bx}\}} \frac{U'_6 - U'_5}{U'_5 - U'_3} \right) \left/ \left( (R_{01} + R_{02}) + R_{02} \frac{R_{02}}{R_{02} + \{R_{Bx}\}} \frac{U'_6 - U'_5}{U'_5 - U'_3} \right) \right.$
50	$R_{x50} = R_{01} \frac{\frac{R_{02}(R_{01} + R_{02} + R_{Bx})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} - \frac{R_{Bx}}{R_{01}} \cdot \frac{U'_6 - U'_5}{U'_5 - U'_4}}{\frac{(R_{01} + R_{02})(R_{01} + R_{02} + R_{Bx})}{R_{01}R_{01} + R_{02}R_{01} + R_{02}R_{02}} + \frac{U'_6 - U'_5}{U'_5 - U'_4}}$

В тринадцатом такте осуществляется обработка результатов измерений сопротивлений. Как было показано в работе [14], описанный метод сверхизбыточных измерений обеспечивает получение 55-и действительных значений входного сопротивления  $R_{Bx}$  ИК, двух действительных значений тока, генерируемого источником тока ИТ, и десяти действительных значений сопротивлений 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 с видом функции преобразования ИК (с квазилинейной, а не линейной функцией преобразования) [14].

Каким же образом выводится множество уравнений избыточных измерений (УИИ) сопротивления искомого резистора или резистивного сенсора?

Первые 50 УИИ сопротивления искомого резистора или резистивного сенсора определяются путем решения относительно  $R_x$  подсистемы, состоящей из шести уравнений величин:  $U'_1, U'_2, U'_3, U'_4, U'_5$  и  $U'_6$  (см. табл. 2, верхние уравнения величин). Ввиду ограниченного объема статьи, запишем их решения относительно  $R_x$  в упрощенном формализованном виде, как: (6-1)/(2-1); (6-1)/(3-1); ...; (6-5)/(5-4) (см. табл. 3), где цифры представляют собой указанные выше шесть уравнений величин, полученных в первые шесть тактов. Так, например, первая формализованная запись (6-1)/(2-1) означает отношение напряжений, т.е.  $(U'_6 - U'_1)/(U'_2 - U'_1)$ .

Если в каждое из 50-ти УИИ (табл. 3) подставить по 55 УИИ входного сопротивления  $R_{Bx}$  ИП, то получим 2750 ( $55 \times 50 = 2750$ ) УИИ искомого сопротивления исследуемого резистора или резистивного сенсора. Полученные значения запоминаются в ОЗУ МК.

По результатам первых семи тактов измерений сопротивлений можно определить ещё 90 базовых УИИ, которые получают путем решения относительно  $R_x$  подсистемы, состоящей из 3 семи уравнений величин  $U'_1, U'_2, U'_3, U'_4, U'_5, U'_6$  и  $U'_7$  (см. табл. 2, верхние уравнения величин). Формализовано они записаны в табл. 4.

Формализованная запись 50-ти вариантов решения подсистемы уравнений величин относительно $R_x$
(7-1)/(2-1); (7-1)/(3-1); (7-1)/(3-2); (7-1)/(4-1); (7-1)/(4-2); (7-1)/(4-3); (7-1)/(5-1); (7-1)/(5-2); (7-1)/(5-3); (7-1)/(5-4); (7-1)/(6-1); (7-1)/(6-2); (7-1)/(6-3); (7-1)/(6-4); (7-1)/(6-5); (7-2)/(2-1); (7-2)/(3-1); (7-2)/(3-2); (7-2)/(4-1); (7-2)/(4-2); (7-2)/(4-3); (7-2)/(5-1); (7-2)/(5-2); (7-2)/(5-3); (7-2)/(5-4); (7-2)/(6-1); (7-2)/(6-2); (7-2)/(6-3); (7-2)/(6-4); (7-2)/(6-5); (7-3)/(2-1); (7-3)/(3-1); (7-3)/(3-2); (7-3)/(4-1); (7-3)/(4-2); (7-3)/(4-3); (7-3)/(5-1); (7-3)/(5-2); (7-3)/(5-3); (7-3)/(5-4); (7-3)/(6-1); (7-3)/(6-2); (7-3)/(6-3); (7-3)/(6-4); (7-3)/(6-5); (7-4)/(2-1); (7-4)/(3-1); (7-4)/(3-2); (7-4)/(4-1); (7-4)/(4-2); (7-4)/(4-3); (7-4)/(5-1); (7-4)/(5-2); (7-4)/(5-3); (7-4)/(5-4); (7-4)/(6-1); (7-4)/(6-2); (7-4)/(6-3); (7-4)/(6-4); (7-4)/(6-5); (7-5)/(2-1); (7-5)/(3-1); (7-5)/(3-2); (7-5)/(4-1); (7-5)/(4-2); (7-5)/(4-3); (7-5)/(5-1); (7-5)/(5-2); (7-5)/(5-3); (7-5)/(5-4); (7-5)/(6-1); (7-5)/(6-2); (7-5)/(6-3); (7-5)/(6-4); (7-5)/(6-5); (7-6)/(2-1); (7-6)/(3-1); (7-6)/(3-2); (7-6)/(4-1); (7-6)/(4-2); (7-6)/(4-3); (7-6)/(5-1); (7-6)/(5-2); (7-6)/(5-3); (7-6)/(5-4); (7-6)/(6-1); (7-6)/(6-2); (7-6)/(6-3); (7-6)/(6-4); (7-6)/(6-5);

Підставляють в кожне з 90 УИИ по 55 УИИ входного опору  $R_{вх}$  ІК і додатково отримують 4950 ( $55 \times 90 = 4950$ ) УИИ опору досліджуваного резистора  $R_x$  або резистивного сенсора. Отримані значення запам'ятовуються.

По результатам восьми тактов измерительного преобразования сопротивлений эквивалентных резисторов (см. табл. 2, уравнения величин пп. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, и 8, дополнительно определяется еще 147 базовых уравнений избыточных измерений, которые получают путем решения подсистемы из восьми уравнений величин, —  $U'_1, U'_2, U'_3, U'_4, U'_5, U'_6, U'_7, U'_8$  относительно  $R_x$ . В табл. 5 они записаны в формализованном виде.

Таблица 5

Формализованная запись 147-ми вариантов решения подсистемы уравнений величин относительно $R_x$
(8-1)/(2-1); (8-1)/(3-1); (8-1)/(3-2); (8-1)/(4-1); (8-1)/(4-2); (8-1)/(4-3); (8-1)/(5-1); (8-1)/(5-2); (8-1)/(5-3); (8-1)/(5-4); (8-1)/(6-1); (8-1)/(6-2); (8-1)/(6-3); (8-1)/(6-4); (8-1)/(6-5); (8-1)/(7-1); (8-1)/(7-2); (8-1)/(7-3); (8-1)/(7-4); (8-1)/(7-5); (8-1)/(7-6); (8-2)/(2-1); (8-2)/(3-1); (8-2)/(3-2); (8-2)/(4-1); (8-2)/(4-2); (8-2)/(4-3); (8-2)/(5-1); (8-2)/(5-2); (8-2)/(5-3); (8-2)/(5-4); (8-2)/(6-1); (8-2)/(6-2); (8-2)/(6-3); (8-2)/(6-4); (8-2)/(6-5); (8-2)/(7-1); (8-2)/(7-2); (8-2)/(7-3); (8-2)/(7-4); (8-2)/(7-5); (8-2)/(7-6); (8-3)/(2-1); (8-3)/(3-1); (8-3)/(3-2); (8-3)/(4-1); (8-3)/(4-2); (8-3)/(4-3); (8-3)/(5-1); (8-3)/(5-2); (8-3)/(5-3); (8-3)/(5-4); (8-3)/(6-1); (8-3)/(6-2); (8-3)/(6-3); (8-3)/(6-4); (8-3)/(6-5); (8-3)/(7-1); (8-3)/(7-2); (8-3)/(7-3); (8-3)/(7-4); (8-3)/(7-5); (8-3)/(7-6); (8-4)/(2-1); (8-4)/(3-1); (8-4)/(3-2); (8-4)/(4-1); (8-4)/(4-2); (8-4)/(4-3); (8-4)/(5-1); (8-4)/(5-2); (8-4)/(5-3); (8-4)/(5-4); (8-4)/(6-1); (8-4)/(6-2); (8-4)/(6-3); (8-4)/(6-4); (8-4)/(6-5); (8-4)/(7-1); (8-4)/(7-2); (8-4)/(7-3); (8-4)/(7-4); (8-4)/(7-5); (8-4)/(7-6); (8-5)/(2-1); (8-5)/(3-1); (8-5)/(3-2); (8-5)/(4-1); (8-5)/(4-2); (8-5)/(4-3); (8-5)/(5-1); (8-5)/(5-2); (8-5)/(5-3); (8-5)/(5-4); (8-5)/(6-1); (8-5)/(6-2); (8-5)/(6-3); (8-5)/(6-4); (8-5)/(6-5); (8-5)/(7-1); (8-5)/(7-2); (8-5)/(7-3); (8-5)/(7-4); (8-5)/(7-5); (8-5)/(7-6); (8-6)/(2-1); (8-6)/(3-1); (8-6)/(3-2); (8-6)/(4-1); (8-6)/(4-2); (8-6)/(4-3); (8-6)/(5-1); (8-6)/(5-2); (8-6)/(5-3); (8-6)/(5-4); (8-6)/(6-1); (8-6)/(6-2); (8-6)/(6-3); (8-6)/(6-4); (8-6)/(6-5); (8-6)/(7-1); (8-6)/(7-2); (8-6)/(7-3); (8-6)/(7-4); (8-6)/(7-5); (8-6)/(7-6); (8-7)/(2-1); (8-7)/(3-1); (8-7)/(3-2); (8-7)/(4-1); (8-7)/(4-2); (8-7)/(4-3); (8-7)/(5-1); (8-7)/(5-2); (8-7)/(5-3); (8-7)/(5-4); (8-7)/(6-1); (8-7)/(6-2); (8-7)/(6-3); (8-7)/(6-4); (8-7)/(6-5); (8-7)/(7-1); (8-7)/(7-2); (8-7)/(7-3); (8-7)/(7-4); (8-7)/(7-5); (8-7)/(7-6);

С учетом 55 УИИ входного сопротивления  $R_{вх}$  ІК, по базовым УИИ получают ещё 8085 ( $55 \times 147 = 8085$ ) УИИ искомого сопротивления исследуемого резистора или резистивного сенсора. Полученные по этим уравнениям 8085 числовых значений сопротивления исследуемого резистора или резистивного сенсора запоминаются в ОЗУ МК.

По результатам девяти тактов измерительного преобразования сопротивлений определяется ещё 224 базовых УИИ, которые получают путем решения подсистемы из девяти уравнений величин (см. табл. 2, пп. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. 8 и 9) относительно  $R_x$ . В упрощенном формализованном виде они представлены в табл. 6, где цифры означают номера первых девяти уравнений величин для напряжений, —  $U'_1, U'_2, U'_3, U'_4, U'_5, U'_6, U'_7, U'_8$  и  $U'_9$ .

При подстановке в каждое из полученных 224-х УИИ по 55 УИИ входного сопротивления  $R_{вх}$  ІК, получают 12320 ( $55 \times 224 = 12320$ ) УИИ искомого сопротивления  $R_x$  исследуемого резистора или резистивного сенсора. Полученные по этим уравнениям 12320 значений сопротивления запоминаются.

По результатам десяти тактов измерительного преобразования сопротивлений определяется еще 324 УИИ.

Последние получают путем решения подсистемы из десяти уравнений величин, —  $U'_1, U'_2, U'_3, U'_4, U'_5, U'_6, U'_7, U'_8, U'_9$  и  $U'_{10}$  относительно  $R_x$ . В упрощенном формализованном виде полученные результаты записаны в табл. 7. В каждое из 324 УИИ сопротивления резистора или резистивного сенсора подставляют по 55 УИИ входных сопротивлений  $R_{вх}$  ІК и получают 17820 ( $55 \times 324 = 17820$ ) УИИ искомого сопротивления. Полученные по ним 17820 числовых значений сопротивления исследуемого резистора или резистивного сенсора запоминаются.

Таблица 7

---

18
ISSN 2219-9365
*Measuring and Computing Devices in Technological Processes*
*Issue 4' 2017 (60)*

По результатам одиннадцяти тактов измерительного преобразования сопротивлений эквивалентных резисторов (см. табл. 2, пп. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 и 11), определяют 450 УИИ. Последние получают путем решения подсистемы из одиннадцати уравнений величин, —  $U'_1, U'_2, U'_3, U'_4, U'_5, U'_6, U'_7, U'_8, U'_9, U'_{10}$  и  $U'_{11}$  относительно  $R_x$ . В табл. 8 они приведены в упрощенном и формализованном виде, где цифры представляют собой первые одиннадцать из полученных уравнений величин.

Таблица 8

Формализованная запись 450 вариантов решения подсистемы уравнений величин относительно $R_x$
<p>(11-1)/(2-1); (11-1)/(3-1); (11-1)/(3-2); (11-1)/(4-1); (11-1)/(4-2); (11-1)/(4-3); (11-1)/(5-1); (11-1)/(5-2); (11-1)/(5-3); (11-1)/(5-4); (11-1)/(6-1); (11-1)/(6-2); (11-1)/(6-3); (11-1)/(6-4); (11-1)/(6-5); (11-1)/(7-1); (11-1)/(7-2); (11-1)/(7-3); (11-1)/(7-4); (11-1)/(7-5); (11-1)/(7-6); (11-1)/(8-1); (11-1)/(8-2); (11-1)/(8-3); (11-1)/(8-4); (11-1)/(8-5); (11-1)/(8-6); (11-1)/(8-7); (11-1)/(9-1); (11-1)/(9-2); (11-1)/(9-3); (11-1)/(9-4); (11-1)/(9-5); (11-1)/(9-6); (11-1)/(9-7); (11-1)/(9-8); (11-1)/(10-1); (11-1)/(10-2); (11-1)/(10-3); (11-1)/(10-4); (11-1)/(10-5); (11-1)/(10-6); (11-1)/(10-7); (11-1)/(10-8); (11-1)/(10-9); (11-2)/(2-1); (11-2)/(3-1); (11-2)/(3-2); (11-2)/(4-1); (11-2)/(4-2); (11-2)/(4-3); (11-2)/(5-1); (11-2)/(5-2); (11-2)/(5-3); (11-2)/(5-4); (11-2)/(6-1); (11-2)/(6-2); (11-2)/(6-3); (11-2)/(6-4); (11-2)/(6-5); (11-2)/(7-1); (11-2)/(7-2); (11-2)/(7-3); (11-2)/(7-4); (11-2)/(7-5); (11-2)/(7-6); (11-2)/(8-1); (11-2)/(8-2); (11-2)/(8-3); (11-2)/(8-4); (11-2)/(8-5); (11-2)/(8-6); (11-2)/(8-7); (11-2)/(9-1); (11-2)/(9-2); (11-2)/(9-3); (11-2)/(9-4); (11-2)/(9-5); (11-2)/(9-6); (11-2)/(9-7); (11-2)/(9-8); (11-2)/(10-1); (11-2)/(10-2); (11-2)/(10-3); (11-2)/(10-4); (11-2)/(10-5); (11-2)/(10-6); (11-2)/(10-7); (11-2)/(10-8); (11-2)/(10-9); (11-3)/(2-1); (11-3)/(3-1); (11-3)/(3-2); (11-3)/(4-1); (11-3)/(4-2); (11-3)/(4-3); (11-3)/(5-1); (11-3)/(5-2); (11-3)/(5-3); (11-3)/(5-4); (11-3)/(6-1); (11-3)/(6-2); (11-3)/(6-3); (11-3)/(6-4); (11-3)/(6-5); (11-3)/(7-1); (11-3)/(7-2); (11-3)/(7-3); (11-3)/(7-4); (11-3)/(7-5); (11-3)/(7-6); (11-3)/(8-1); (11-3)/(8-2); (11-3)/(8-3); (11-3)/(8-4); (11-3)/(8-5); (11-3)/(8-6); (11-3)/(8-7); (11-3)/(9-1); (11-3)/(9-2); (11-3)/(9-3); (11-3)/(9-4); (11-3)/(9-5); (11-3)/(9-6); (11-3)/(9-7); (11-3)/(9-8); (11-3)/(10-1); (11-3)/(10-2); (11-3)/(10-3); (11-3)/(10-4); (11-3)/(10-5); (11-3)/(10-6); (11-3)/(10-7); (11-3)/(10-8); (11-3)/(10-9); (11-4)/(2-1); (11-4)/(3-1); (11-4)/(3-2); (11-4)/(4-1); (11-4)/(4-2); (11-4)/(4-3); (11-4)/(5-1); (11-4)/(5-2); (11-4)/(5-3); (11-4)/(5-4); (11-4)/(6-1); (11-4)/(6-2); (11-4)/(6-3); (11-4)/(6-4); (11-4)/(6-5); (11-4)/(7-1); (11-4)/(7-2); (11-4)/(7-3); (11-4)/(7-4); (11-4)/(7-5); (11-4)/(7-6); (11-4)/(8-1); (11-4)/(8-2); (11-4)/(8-3); (11-4)/(8-4); (11-4)/(8-5); (11-4)/(8-6); (11-4)/(8-7); (11-4)/(9-1); (11-4)/(9-2); (11-4)/(9-3); (11-4)/(9-4); (11-4)/(9-5); (11-4)/(9-6); (11-4)/(9-7); (11-4)/(9-8); (11-4)/(10-1); (11-4)/(10-2); (11-4)/(10-3); (11-4)/(10-4); (11-4)/(10-5); (11-4)/(10-6); (11-4)/(10-7); (11-4)/(10-8); (11-4)/(10-9); (11-5)/(2-1); (11-5)/(3-1); (11-5)/(3-2); (11-5)/(4-1); (11-5)/(4-2); (11-5)/(4-3); (11-5)/(5-1); (11-5)/(5-2); (11-5)/(5-3); (11-5)/(5-4); (11-5)/(6-1); (11-5)/(6-2); (11-5)/(6-3); (11-5)/(6-4); (11-5)/(6-5); (11-5)/(7-1); (11-5)/(7-2); (11-5)/(7-3); (11-5)/(7-4); (11-5)/(7-5); (11-5)/(7-6); (11-5)/(8-1); (11-5)/(8-2); (11-5)/(8-3); (11-5)/(8-4); (11-5)/(8-5); (11-5)/(8-6); (11-5)/(8-7); (11-5)/(9-1); (11-5)/(9-2); (11-5)/(9-3); (11-5)/(9-4); (11-5)/(9-5); (11-5)/(9-6); (11-5)/(9-7); (11-5)/(9-8); (11-5)/(10-1); (11-5)/(10-2); (11-5)/(10-3); (11-5)/(10-4); (11-5)/(10-5); (11-5)/(10-6); (11-5)/(10-7); (11-5)/(10-8); (11-5)/(10-9); (11-6)/(2-1); (11-6)/(3-1); (11-6)/(3-2); (11-6)/(4-1); (11-6)/(4-2); (11-6)/(4-3); (11-6)/(5-1); (11-6)/(5-2); (11-6)/(5-3); (11-6)/(5-4); (11-6)/(6-1); (11-6)/(6-2); (11-6)/(6-3); (11-6)/(6-4); (11-6)/(6-5); (11-6)/(7-1); (11-6)/(7-2); (11-6)/(7-3); (11-6)/(7-4); (11-6)/(7-5); (11-6)/(7-6); (11-6)/(7-7); (11-6)/(8-1); (11-6)/(8-2); (11-6)/(8-3); (11-6)/(8-4); (11-6)/(8-5); (11-6)/(8-6); (11-6)/(8-7); (11-6)/(9-1); (11-6)/(9-2); (11-6)/(9-3); (11-6)/(9-4); (11-6)/(9-5); (11-6)/(9-6); (11-6)/(9-7); (11-6)/(9-8); (11-6)/(10-1); (11-6)/(10-2); (11-6)/(10-3); (11-6)/(10-4); (11-6)/(10-5); (11-6)/(10-6); (11-6)/(10-7); (11-6)/(10-8); (11-6)/(10-9); (11-7)/(2-1); (11-7)/(3-1); (11-7)/(3-2); (11-7)/(4-1); (11-7)/(4-2); (11-7)/(4-3); (11-7)/(5-1); (11-7)/(5-2); (11-7)/(5-3); (11-7)/(5-4); (11-7)/(6-1); (11-7)/(6-2); (11-7)/(6-3); (11-7)/(6-4); (11-7)/(6-5); (11-7)/(7-1); (11-7)/(7-2); (11-7)/(7-3); (11-7)/(7-4); (11-7)/(7-5); (11-7)/(7-6); (11-7)/(8-1); (11-7)/(8-2); (11-7)/(8-3); (11-7)/(8-4); (11-7)/(8-5); (11-7)/(8-6); (11-7)/(8-7); (11-7)/(9-1); (11-7)/(9-2); (11-7)/(9-3); (11-7)/(9-4); (11-7)/(9-5); (11-7)/(9-6); (11-7)/(9-7); (11-7)/(9-8); (11-7)/(10-1); (11-7)/(10-2); (11-7)/(10-3); (11-7)/(10-4); (11-7)/(10-5); (11-7)/(10-6); (11-7)/(10-7); (11-7)/(10-8); (11-7)/(10-9); (11-8)/(2-1); (11-8)/(3-1); (11-8)/(3-2); (11-8)/(4-1); (11-8)/(4-2); (11-8)/(4-3); (11-8)/(5-1); (11-8)/(5-2); (11-8)/(5-3); (11-8)/(5-4); (11-8)/(6-1); (11-8)/(6-2); (11-8)/(6-3); (11-8)/(6-4); (11-8)/(6-5); (11-8)/(7-1); (11-8)/(7-2); (11-8)/(7-3); (11-8)/(7-4); (11-8)/(7-5); (11-8)/(7-6); (11-8)/(8-1); (11-8)/(8-2); (11-8)/(8-3); (11-8)/(8-4); (11-8)/(8-5); (11-8)/(8-6); (11-8)/(8-7); (11-8)/(9-1); (11-8)/(9-2); (11-8)/(9-3); (11-8)/(9-4); (11-8)/(9-5); (11-8)/(9-6); (11-8)/(9-7); (11-8)/(9-8); (11-8)/(10-1); (11-8)/(10-2); (11-8)/(10-3); (11-8)/(10-4); (11-8)/(10-5); (11-8)/(10-6); (11-8)/(10-7); (11-8)/(10-8); (11-8)/(10-9); (11-9)/(2-1); (11-9)/(3-1); (11-9)/(3-2); (11-9)/(4-1); (11-9)/(4-2); (11-9)/(4-3); (11-9)/(5-1); (11-9)/(5-2); (11-9)/(5-3); (11-9)/(5-4); (11-9)/(6-1); (11-9)/(6-2); (11-9)/(6-3); (11-9)/(6-4); (11-9)/(6-5); (11-9)/(7-1); (11-9)/(7-2); (11-9)/(7-3); (11-9)/(7-4); (11-9)/(7-5); (11-9)/(7-6); (11-9)/(8-1); (11-9)/(8-2); (11-9)/(8-3); (11-9)/(8-4); (11-9)/(8-5); (11-9)/(8-6); (11-9)/(8-7); (11-9)/(9-1); (11-9)/(9-2); (11-9)/(9-3); (11-9)/(9-4); (11-9)/(9-5); (11-9)/(9-6); (11-9)/(9-7); (11-9)/(9-8); (11-9)/(10-1); (11-9)/(10-2); (11-9)/(10-3); (11-9)/(10-4); (11-9)/(10-5); (11-9)/(10-6); (11-9)/(10-7); (11-9)/(10-8); (11-9)/(10-9); (11-10)/(2-1); (11-10)/(3-1); (11-10)/(3-2); (11-10)/(4-1); (11-10)/(4-2); (11-10)/(4-3); (11-10)/(5-1); (11-10)/(5-2); (11-10)/(5-3); (11-10)/(5-4); (11-10)/(6-1); (11-10)/(6-2); (11-10)/(6-3); (11-10)/(6-4); (11-10)/(6-5); (11-10)/(7-1); (11-10)/(7-2); (11-10)/(7-3); (11-10)/(7-4); (11-10)/(7-5); (11-10)/(7-6); (11-10)/(8-1); (11-10)/(8-2); (11-10)/(8-3); (11-10)/(8-4); (11-10)/(8-5); (11-10)/(8-6); (11-10)/(8-7); (11-10)/(9-1); (11-10)/(9-2); (11-10)/(9-3); (11-10)/(9-4); (11-10)/(9-5); (11-10)/(9-6); (11-10)/(9-7); (11-10)/(9-8); (11-10)/(10-1); (11-10)/(10-2); (11-10)/(10-3); (11-10)/(10-4); (11-10)/(10-5); (11-10)/(10-6); (11-10)/(10-7); (11-10)/(10-8); (11-10)/(10-9).</p>

[illegible]

Формализованная запись 605 вариантов решения подсистем уравнений величин относительно $R_x$
(12-6)/(11-2); (12-6)/(11-3); (12-6)/(11-4); (12-6)/(11-5); (12-6)/(11-6); (12-6)/(11-7); (12-6)/(11-8); (12-6)/(11-9); (12-9)/(11-10); (12-10)/(2-1); (12-9)/(3-1); (12-9)/(3-2); (12-9)/(4-1); (12-9)/(4-2); (12-9)/(4-3); (12-9)/(5-1); (12-9)/(5-2); (12-9)/(5-3); (12-10)/(5-4); (12-9)/(6-1); (12-9)/(6-2); (12-9)/(6-3); (12-9)/(6-4); (12-9)/(6-5); (12-9)/(7-1); (12-9)/(7-2); (12-9)/(7-3); (12-10)/(7-4); (12-9)/(7-5); (12-9)/(7-6); (12-9)/(8-1); (12-9)/(8-2); (12-9)/(8-3); (12-9)/(8-4); (12-9)/(8-5); (12-9)/(8-6); (12-10)/(8-7); (12-9)/(9-1); (12-9)/(9-2); (12-9)/(9-3); (12-9)/(9-4); (12-9)/(9-5); (12-9)/(9-6); (12-9)/(9-7); (12-9)/(9-8); (12-10)/(10-1); (12-9)/(10-2); (12-9)/(10-3); (12-9)/(10-4); (12-9)/(10-5); (12-9)/(10-6); (12-9)/(10-7); (12-9)/(10-8); (12-10)/(10-9); (12-10)/(11-1); (12-6)/(11-2); (12-6)/(11-3); (12-6)/(11-4); (12-6)/(11-5); (12-6)/(11-6); (12-6)/(11-7); (12-6)/(11-8); (12-10)/(11-9); (12-10)/(12-10); (12-11)/(2-1); (12-9)/(3-1); (12-9)/(3-2); (12-9)/(4-1); (12-9)/(4-2); (12-9)/(4-3); (12-9)/(5-1); (12-9)/(5-2); (12-9)/(5-3); (12-11)/(5-4); (12-9)/(6-1); (12-9)/(6-2); (12-9)/(6-3); (12-9)/(6-4); (12-9)/(6-5); (12-9)/(7-1); (12-9)/(7-2); (12-9)/(7-3); (12-11)/(7-4); (12-9)/(7-5); (12-9)/(7-6); (12-9)/(8-1); (12-9)/(8-2); (12-9)/(8-3); (12-9)/(8-4); (12-9)/(8-5); (12-9)/(8-6); (12-11)/(8-7); (12-9)/(9-1); (12-9)/(9-2); (12-9)/(9-3); (12-9)/(9-4); (12-9)/(9-5); (12-9)/(9-6); (12-9)/(9-7); (12-9)/(9-8); (12-11)/(10-1); (12-9)/(10-2); (12-9)/(10-3); (12-9)/(10-4); (12-9)/(10-5); (12-9)/(10-6); (12-9)/(10-7); (12-9)/(10-8); (12-11)/(10-9); (12-11)/(11-1); (12-6)/(11-2); (12-6)/(11-3); (12-6)/(11-4); (12-6)/(11-5); (12-6)/(11-6); (12-6)/(11-7); (12-6)/(11-8); (12-6)/(11-9); (12-10)/(11-10).

В каждое из 450 УИИ подставляют по 55 УИИ входных сопротивлений  $R_{вх}$  ИК и получают 24750 ( $55_{вх} \times 450_{\text{х}} = 24750$ ) УИИ искомого резистора или резистивного сенсора. Полученные по этим УИИ 24750 числовых значений сопротивления исследуемого резистора или резистивного сенсора и запоминаются в ОЗУ МК.

По результатам двенадцати тактов измерительного преобразования сопротивлений определяется еще 605 базовых УИИ. Последние получают путем решения системы из двенадцати уравнений величин, приведенных в табл. 2 (или смотри систему (2)), относительно  $R_x$ .

В табл. 9 приведена их запись в формализованном виде., где цифры представляют собой номера каждого из двенадцати уравнений величин для  $U'_1, U'_2, U'_3, U'_4, U'_5, U'_6, U'_7, U'_8, U'_9, U'_{10}, U'_{11}$  и  $U'_{12}$ . В каждое из 605 базовых УИИ подставляют по 55 УИИ входных сопротивлений  $R_{вх}$  ИК. Полученные по этим уравнениям 33275 ( $55_{вх} \times 605_{\text{х}} = 33275$ ) числовых значений искомого сопротивления исследуемого резистора или резистивного сенсора запоминаются в ОЗУ МК.

Как правило, полученные массивы УИИ группируются в ансамбли по тем или иным критериям, например, по количеству вычислительных операций (по критерию минимального или приблизительно одинакового количества вычислительных операций, по критерию одинакового количества вычислительных операций при определении, например, нормированных по значениям сопротивлений  $R_{01}$  или  $R_{02}$  и  $R_x$  и т.д.), по критерию отсутствия квадратного корня в уравнении числовых значений или числового значения  $N_1$  напряжения  $U'_1$ , по критерию одинаковых или разных значений входного сопротивления и др.

По полученным ансамблям уравнений числовых значений определяются числовые значения сопротивлений. Усредняются они с использованием известных методов, например, метода статистического усреднения данных, метода динамического усреднения, метода цифрового суммирования, метода усреднения путем цифрового интегрирования за разные или одинаковые промежутки времени, метода двойного цифрового интегрирования, метода скользящего (переменного) суммирования, комбинированных методов и т.д. Несмотря на их схожесть (подобие) по целевой функции, данные методы имеют и существенные отличия, которые приводят к получению разных значений результатов измерений при их использовании. Выбор того или иного метода усреднения зависит от характера случайных погрешностей и осуществляется разработчиком приборов.

По результатам усреднения судят об истинном значении сопротивлений исследуемого резистора или резистивного сенсора, о действительном значении входного сопротивления ИК и т.д., но при  $r_3 = 0$ .

В случаях, когда сопротивление  $r_3$  двух ключей или автоматических переключателей в замкнутом состоянии не равно нулю, т.е.  $r_3 \neq 0$  ( $r_3 = r_{31} + r_{32} = \text{const} > 0$ ), определяют его действительное значение по УИИ

$$r_3 = R_{вх} - R_{01} \left( \frac{U'_2 - U'_0}{U'_3 - U'_0} - k_1 \right) / \left( \frac{U'_2 - U'_0}{U'_3 - U'_0} - \frac{R_{01}}{R_{02}} \right), \quad (133)$$

где  $k_1 = 1$ ;  $U'_0$  — выходное напряжение ИК при  $r_3 \neq 0$  и нормованном по значению током  $I'_{01}$ ;  $R_{вх}$  — входное сопротивление ИК, которое определяется по вышеприведенным УИИ или, например, из 17-го УИИ

$$R_{вх17} = R_{02} \left[ \frac{R_{01}}{R_{02}} - \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} - k_1 \right) \right] / \left[ \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} - k_1 \right) - k_1 \right], \quad (134)$$

которое получено после четвертого такта измерительного преобразования сопротивлений и при котором УИИ сопротивления

$$r_3 = \left[ R_{02} \left[ \frac{R_{01}}{R_{02}} - \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} - k_1 \right) \right] \right] / \left[ \frac{U'_4 - U'_3}{U'_3 - U'_2} \left( \frac{R_{02}}{R_{01}} - k_1 \right) - k_1 \right] - R_{01} \left( \frac{U'_2 - U'_0}{U'_3 - U'_0} - k_1 \right) / \left( \frac{U'_2 - U'_0}{U'_3 - U'_0} - \frac{R_{01}}{R_{02}} \right) \quad (135)$$

не содержит напряжение  $U'_1$ .

В этой связи исключают из ансамблей УИИ те, которые содержат напряжение  $U'_1$ . О действительном значении каждого из нормированных по значениям сопротивлений резисторов, об истинном значении исследуемого резистора или резистивного сенсора судят по уменьшенным на значение сопротивления  $r_3$  результатам обработки числовых значений сопротивлений, нормированных по значению резисторов, и напряжений, входящих в УИИ (см. табл. 10).

Таблица 10

№ п/п	Уравнения величин	№ п/п	Уравнения величин
1	$R'_{01i} = R_{01i} - r_3 \quad (136)$	4	$\overline{R'_{01i}} = \frac{k_1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} (R_{01i} - r_3) \quad (139)$
2	$R'_{02i} = R_{02i} - r_3 \quad (137)$	5	$\overline{R'_{02i}} = \frac{k_1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} (R_{02i} - r_3) \quad (140)$
3	$R'_{xi} = R_{xi} - r_3 \quad (139)$	6	$\overline{R'_{xi}} = \frac{k_1}{n_3} \sum_{i=1}^{n_3} (R_{xi} - r_3) \quad (141),$ где $n_1, n_2, n_3$ — разные к-ва усредняемых данных.

При необходимости метрологического самоконтроля параметров ИК, после проведения трёх тактов измерительных преобразований сопротивлений, определяется и запоминается значение коэффициента усиления ИК по УИИ

$$k'_{yc} = \frac{U'_2 - U'_3}{I'_{01} R_{вх}} \cdot \frac{(R_{01} + R_{вх})(R_{02} + R_{вх})}{R_{вх}(R_{01} - R_{02})}, \quad (142)$$

где  $R_{вх}$  — входное сопротивление ИК, полученное по одному 17-му ( $R_{вх17}$ ) (134) (19-му, 36-му, 37-му, 40-му и т.д.) или по всем усредненным УИИ, которые не используют напряжение  $U'_1$ .

После этого определяется разница полученного и номинального (выходного) значений коэффициентов усиления, т.е.  $\Delta k'_{yc} = k'_{yc} - k_{ycн}$ , а также разница полученного напряжения  $U'_1$  (при нулевом значении тока —  $\{I'_0\} = 0$ ) и номинального  $U_n$  напряжений смещения ИК ( $\Delta_{3м} = \Delta U' - \Delta U_n = U'_1 - U_n$ ).

По результатам сравнения изменяют значение коэффициента усиления  $k'_{yc}$  ИК и смещение  $U'_1$  функции преобразования до равенства нулю полученных разностей  $\Delta k'_{yc}$  и  $\{\Delta_{3м}\}$ , т.е. до номинальных значений, когда  $\{\Delta_{3м}\} = \{\Delta U'\} - \{\Delta U_n\} = 0$  при  $\{U'_1\} = \{U_n\}$ , а  $\Delta k'_{yc} = k'_{yc} - k_{ycн} = 0$  при  $k'_{yc} = k_{ycн}$ .

Таким образом, описанный метод сверхизбыточных измерений сопротивлений резисторов и резистивных сенсоров обеспечивает расширение функциональных возможностей цифрового измерителя сопротивлений резистора или резистивного сенсора, а именно: автоматическое исключение аддитивной и мультипликативной составляющих систематической погрешности измерений, обусловленных действием внешних дестабилизирующих факторов, исключение влияния входного сопротивления ИК на результат измерений, определение действительного значения входного сопротивления ИК и значения тока, протекающего через резисторы, определение значений сопротивлений ключей в закрытом состоянии, а также получение конечного количества массивов (ансамблей) УИИ для сокращения времени общего цикла измерений и обеспечение усреднения по ансамблям данных априори выбранным методом.

#### Выводы

В XXI веке фундаментальная метрология осуществила новый качественный скачок в части создания и развития теории сверхизбыточных измерений.

Теория сверхизбыточных измерений обеспечивает широкие функциональные возможности. Ее методы измерений: обеспечивают решение задач измерений не только искомой физической величины и определения



значений параметров функции преобразования измерительного канала, но и значений входного сопротивления измерительного канала, образцовых мер, погрешностей, обусловленных вычислительной обработкой данных, значений стабильного тока, протекающего через резисторы, а также получение ансамбля уравнений избыточных измерений в количестве, необходимом и достаточном для осуществления усреднения данных и их статистической обработки с целью повышения точности измерений.

Описанный метод сверхизбыточных измерений сопротивлений резисторов или резистивных сенсоров — классический пример, поясняющий сущность сверхизбыточных измерений, его достоинства и недостатки.

Методическая погрешность методов сверхизбыточных измерений, как и избыточных, обусловлена некорректным выбором значений образцовых мер (со значениями, соответствующими началу, середине или концу диапазона измерений), особенно при нелинейной функции преобразования измерительного канала и погрешностей воспроизведения нормированных значений первой и второй меры.

В работе показано, что, благодаря комбинаторным соединениям искомого, двух нормированных по значению образцовых резисторов между собой и с входным резистором измерительного канала, получают двенадцать эквивалентных резисторов и такое же количество тактов измерительного преобразования.

Показано, что при решении системы, состоящей только из шести (при двенадцати) уравнений величин получают 50 вариантов уравнений избыточных измерений искомого физической величины, а с учетом 55 разновидностей уравнений избыточных измерений входного сопротивления измерительного канала получают ансамбль из 2750 уравнений избыточных измерений искомого сопротивления резистора или резистивного сенсора. По результатам семи тактов измерительного преобразования сопротивлений и решения соответствующей системы уравнений величин получают 4950 уравнений избыточных измерений искомого резистора, а при решении системы из всех двенадцати уравнений величин — 33275.

Методы сверхизбыточных измерений, как и методы избыточных измерений, обеспечивают метрологический самоконтроль параметров измерительного канала, а также оценку его метрологической надежности.

Описанный цифровой измеритель сопротивления не сложен в реализации, использует современные средства вычислительной техники — микроконвертор, жидкокристаллический индикатор, цифрууправляемый источник тока, ключи и автоматические переключатели и т.д.

На сегодняшний день недостатком сверхизбыточных измерений является отсутствие методов и пакетов прикладных программ по обработке ансамблей большого количества данных, которые учитывали бы вид функции преобразования измерительного канала и обеспечивали выделение составляющих погрешности, обусловленных вычислительной обработкой данных. Разработка нового аппарата обработки результатов сверхизбыточных измерений и соответствующих пакетов прикладных программ — задача нового поколения ученых-метрологов.

## 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.: МГУПИ, 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. Меганука метрологія / 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 obchislyvalna tekhnika v tekhnologichnykh protsesakh (VOTTP-14-2015). Materialy XIV mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy 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>.

14. Кондратов В.Т. Теория избыточных и сверхизбыточных измерений: Сверхизбыточные измерения сопротивления резисторов и резистивных сенсоров. Сообщение 1/В.Т.Кондратов/Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2015. — №4. — С. 3 – 11.

#### References

1. Kondratov V.T. Strategicheskaja teorija XXI veka /V.T.Kondratov/Vymiryuvalna ta obchislyvalna tekhnika v technologicheskikh protsesakh. — 2001. — № 2. — S. 11 – 16.

2. Kondratov V.T. Metody izbytochnykh izmerenij fizicheskikh velichin /V.T.Kondratov // Zasoby kompyuternoi 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 obchislyvalna 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-prakticheskoy konferentsii “Fundamentalnye i prikladnye problemy prirostoeniya, informatiki i ekonomiki”. Otv. red. V.D.Ivchenko. — M.: MGUP, 2006. Dopolnitelnyj sbornik “Prirostoeniye”. — 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.-tekhn. konf. «Fundamentalnye i prikladnye problemy prirostoeniya, informatiki i ekonomiki”. Kniga «Prirostoeniye». — M.: MGUP, 2007. — S. 134–143.

6. Kondratov V.T. Teorija izbytochnykh izmerenij: uravneniya izbytochnykh izmerenij II-go i III-go rodov. Vymiryuvalna ta obchislyvalna tekhnika v technologicheskikh protsesakh. Materialy XIV mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 5-10 chervnja 2015 r., m. Odesa, 2015. — S. 20 – 22.

7. Kondratov V.T. Klassifikashon matematicheskikh modelej izbytochnykh izmerenij fizicheskikh velichin /V.T.Kondratov // Nauchnye trudy X Yubilejnoy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Fundamentalnye i prikladnye problemy prirostoeniya, informatiki i ekonomiki”. Kniga «Prirostoeniye». — M.: MGUP, 2007. — S. 127 – 134.

8. Kondratov V.T. Teorija i metody izbytochnykh izmerenij / V.T.Kondratov // Vymiryuvalna ta obchislyvalna tekhnika v technologicheskikh protsesakh. — 2012. — № 3. — S. 14 – 22

9. Kondratov V.T. Meganauka metrologija / 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. Vymiryuvalna ta obchislyvalna tekhnika v tekhnologichnykh protsesakh (VOTTP-14-2015). Materialy XIV mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 5-10 iyunja, 2015 g, Odessa, 2015. — PP. 17 – 19.

11. Kondratov V.T. Sposib ponadnadlyshkovykh (supernadlyshkovykh) vymiryuvan oporu rezistoriv i rezystivnykh sensoriv. Patent Ukrainy na vynakhid № 108581 S2. Byul. № 9, 12.05.2015.

12. Kondratov V.T. Sverkhizbytochnyye izmereniya. Rezhim dostupa: <http://kondratov.com.ua/index.php/nauchnye-trudy-111/glavnye-trudy-2013>.

13. Kondratov V.T. Nauchnyj proryv v fundamentalnoj metrologii. Rezhim dostupa: <http://kondratov.com.ua/index.php/fundamental-metrology-11/scientific-break-in-fundamental-metrology>.

14. Kondratov V.T. Teoriya izbytochnykh i sverkhizbytochnykh izmere-niy: Sverkhizbytochnyye izmereniya sopro-tivleniya rezistorov i rezistivnykh sensorov. Soobshcheniye 1 / V.T.Konndratov // Vimiroyuval'na i obchislyuval'na tekhnika v tekhnologichnikh protse-sakh. - 2015. - №4. - S. 3 - 11.

Рецензія/Peer review : 09.11.2017 р.

Надрукована/Printed :20.01.2018 р.

Стаття рецензована редакційною колегією