УДК 389: 638.011.54

В.Т. КОНДРАТОВ
Институт кибернетики им. В.М.Глушкова НАН Украины

ТЕОРИЯ ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ: УНИВЕРСАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

В работе приведены новые определения понятий образцовая физическая величина, операция сравнения, прямые и избыточные измерения, коэффициент связи и другие. Впервые получено и описано универсальное уравнение измерений и его разные формы записи, в том числе и для измерений I-го, II-го и III-го родов. Обращено внимание ученых на необходимость решения одной из важнейших проблем метрологии, – проблемы работы с метрологическими числами.

In paper new definitions of concepts exemplary physical quantities, comparison operation, direct and redundant measurements, coupling coefficient and others are resulted. For the first time the universal equation of measurements and its different forms of record, including for measurements of I-th, II-nd and III-rd sorts is received and described. The attention of scientists to necessity of the decision of one of the major problems of metrology, – problems of work with metrological numbers is paid.

Ключевые слова: физическая величина, измерение.

Введение

В 2001 году нами была предложена новая стратегия измерений [1], обеспечивающая получение результата измерений, инвариантного к воздействиям внешних дестабилизирующих факторов. Она была представлена в виде физической теории избыточных измерений (ТИИ) независимых и зависимых свойств, приращений свойств, зависимостей и характеристик [2-9]. Главной ее особенностью является измерение не одной физической величины (ФВ), а нескольких рядов ФВ искусственно сформированных из искомой и нормированной по значению, размеры которых подчинены определенным закономерностям. Такой подход обеспечил автоматическое исключение систематических составляющих погрешности результата избыточных измерений (ИИ) измерений при нелинейных и нестабильных функциях преобразования (ФП) измерительного канала (ИК), при сохранении высокой чувствительности используемых первичных измерительных преобразователей (сенсоров или биосенсоров). Проведение многократных измерений ФВ и статистической обработки полученных результатов обеспечивает существенное уменьшение и неопределенности конечного результата ИИ.

На сегодняшний день доказана фундаментальность физической ТИИ величин разной физической природы. Показано, что ТИИ отвечает основным требованиям фундаментальности физических теорий, приведенным в [10].

Настоящая статья является первой из серии статей, посвященных методам избыточных измерений физических величин и основным операциям измерений. В настоящей статье основное внимание уделено описанию универсального уравнения измерений. В то же время приводятся определения понятиям «измерение», «образцовая физическая величина» и «результат измерений» с общих позиций измерения величин разной физической природы.

Объект и предмет исследований

Объектом исследований являются прямые и избыточные измерения величин разной физической природы.

Предметом исследований являются уравнения прямых и избыточных измерений при нелинейной и нестабильной ФП ИК.

Постановка задачи (цель статьи)

Целью настоящей статьи является ознакомление ученых и специалистов в области метрологии и измери-

тельной техники с основой любых измерений – универсальным уравнением измерений и его частными видами, описывающими частные законы теории измерений.

Полученные результаты

1. ***Измерение и образцовая физическая величина установленного размера***

Согласно рекомендациям РМГ 29-99 [11], измерение ФВ – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу ФВ, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с её единицей и получение значения этой величины.

В данном определении понятие «измерение», как «совокупность операций по применению технического средства» не представлено через операции измерения. А так называемый гносеологический аспект[1], – «получение значения этой[2] величины» [11], не раскрывает сам процесс получения конечного результата и форму его представления. Без указания операций получения конечного результата измерений не корректно говорить об измерении, как о завершенном процессе получения количественной определенности свойства, причем в виде, удобном для восприятия. Кроме того, в определении [11]

[1] см. п. 5.1 РМГ 29-99.
[2] измеряемой (прим. автора)

отсутствует упоминание о первичных операциях процесса измерения – о восприятии и измерительном преобразовании ФВ.

В определении [11] не отражена и общая сущность измерений величин разной физической природы – как электрических, так и неэлектрических.

При измерении неэлектрических величин, например, состава и свойств веществ и материалов, используется операция сравнения с ФВ фиксированного размера, воспроизводимыми представляемыми стандартными образцами состава и свойств веществ и материалов, которые сами по себе не являются техническими средствами, а тем более мерой.

Стандартные образцы – вещества или материалы с достаточно точно известными и официально аттестованными значениями величин, характеризующих их химический состав (содержание элементов, соединений и пр.), свойства (термодинамические, оптические и др.) или некоторые физико-химические или технические параметры [12].

Под стандартными образцами принято понимать образцы веществ или материалов, химический состав или физические свойства которых типичны для данной группы веществ (материалов), определены с необходимой точностью, отличаются высоким постоянством и удостоверены сертификатом [13].

В сертификатах на тот или иной стандартный образец обязательно указывается срок годности, поскольку практически все вещества и материалы со временем изменяют свои свойства вследствие воздействия окружающей среды. От этого зависит достоверность результатов измерений.

В приведенных определениях понятия «стандартный образец» не говорится об обязательном единичном значении физических свойств веществ и материалов и их состава.

Исследования методов избыточных измерений показало, что от выбора размера ФВ, воспроизводимой мерой, зависит и точность измерений.

В определении «измерение ФВ» вместо понятия «единица ФВ, которой условно присвоено числовое значение, равное 1», предлагается использовать понятие «образцовая ФВ установленного размера» или «нормированная по значению ФВ» без указания ее числового значения. В общем случае измерения электрических и неэлектрических величин используемая образцовая ФВ может быть любого, а не только единичного значения.

Определение 1

Образцовая ФВ – это ФВ установленного размера, воспроизводимая мерой или стандартным образцом исследуемого вещества или материала с заданной точностью, в пределах диапазона измеряемых значений ФВ и применяемая для количественного выражения однородных ФВ одной группы веществ или материалов.

Определение 2

Нормированная по значению ФВ – образцовая ФВ установленного размера, воспроизводимого с заданной точностью и стабильностью в пределах диапазона измеряемых значений ФВ, и применяемая для сравнения с однородной ФВ неизвестного размера.

Для получения образцовых ФВ заданного размера (т.е. количественно и качественно определенного свойства) используются разные методы воспроизведения ФВ.

Определение

Метод воспроизведения свойства – это совокупность приемов использования физических явлений и эффектов с целью получения с заданной точностью выходного количественно и качественно определенного свойства (или информативного параметра сигнала определенного вида) из входного той же или иной физической природы.

Восприятие и измерительное преобразование образцовой ФВ, воспроизведенной (однозначной или многозначной) мерой или стандартным образцом, – это создание физического (или виртуального) образа[3] нормированной по значению ФВ, который в физическом (или в виртуальном) пространстве используется для сравнения с образами других ФВ (– установленными рядами ФВ) через равенства или соотношения.

В связи с изложенным, приведем несколько новых обобщенных определений понятия «измерение ФВ».

Определение (прямые измерения)

Измерение ФВ – совокупность операций восприятия и измерительного преобразования или не преобразования[4] искомой ФВ и образцовой ФВ установленного размера, воспроизводимой мерой или стандартным образцом исследуемого вещества или материала, нахождения соотношения (в явном или неявном виде) их размеров в соответствие с уравнением измерений, получения и отображения числового значения, характеризующего отношение значений указанных величин, в виде соответствующей числовой метки на оцифрованной шкале, а числового значения, характеризующего непосредственно искомую величину, – в цифровом виде, удобном для запоминания, отображения, восприятия и передачи на расстояние.

При отображении результата измерений на оцифрованной шкале, цена делений последней определяется размером образцовой ФВ x_0, воспроизводимой мерой или стандартным образцом. В случае отображения результата измерений в цифровом (не шкальном) виде, результат измерений получают равным

[3] В виде кода числа, представляющего результат преобразования

[4] Имеет место при непосредственном сравнении ФВ

увеличенному в $\{x_0\}$ раз коэффициенту связи (пропорциональности, масштабирования) значений сравниваемых ФВ. Он отображается, например, на экране жидкокристаллического дисплея десятичным числом, диаграммой, графиком или их комбинацией.

Определение 1 (избыточные измерения ФВ)

Избыточное измерение ФВ – совокупность операций восприятия и измерительного преобразования нескольких рядов закономерно связанных между собой ФВ, включающих в себя (непосредственно или опосредованно) искомую ФВ и образцовую (одну или несколько) ФВ установленного размера, опосредованного нахождения соотношения значений искомой и образцовой ФВ и получения действительного значения искомой ФВ[5] в соответствие с выбранным уравнением (и методом) избыточных измерений в виде, удобном для запоминания, обработки, отображения и передачи на расстояние.

Определение 2 (интеллектуальные измерения свойств и параметров уравнения состояния[6] ИС «ОИ – СИИ»)

Интеллектуальные измерения свойств и параметров уравнения состояния измерительной системы «ОИ – СИИ» – закономерная совокупность и последовательность операций воспроизведения и измерительного преобразования нескольких связанных между собой рядов ФВ, включающих в себя (непосредственно или опосредованно) искомую и образцовую (одну или несколько) ФВ, воспроизводимую мерой или стандартным образцом исследуемого (свойства) вещества или материала, опосредованного нахождения соотношения значений искомой и образцовой ФВ установленного размера и получения действительных значений свойств и параметров в соответствие с выбранными методами и выведенными уравнениями избыточных измерений в виде, удобном для запоминания, обработки, отображения, структурирования (с целью получения новых знаний) и передачи на расстояние.

Определение 3 (системное, обобщенное)

ИИ ФВ и параметров функции состояния ИС – конечная совокупность операций восприятия, линейного или нелинейного измерительного преобразования одного или нескольких рядов однородных ФВ, сформированных по определенным правилам из искомой ФВ неизвестного размера и воспроизведенной образцовой ФВ одного или двух (реже трех и более) заданных размеров, нахождения соотношения между размерами измеряемой и образцовой ФВ в неявном (виртуальном) виде и получения действительного значения искомой ФВ и/или функционально измененного ее значения, а также действительных значений параметров функции состояния ИС в форме, удобной для дальнейшего использования.

Определение 4 (системное)

ИИ – совокупность операций восприятия и измерительного преобразования рядов однородных ФВ, включающих в себя в явном виде одну или несколько образцовых ФВ заданных размеров и в явном или неявном виде искомую ФВ, сравнения и нахождения соотношения между измеряемыми и образцовой ФВ в неявном (виртуальном) виде и представления значения искомой ФВ и значения параметров функции состояния ИС в форме, удобной для использования (с учетом выбранного способа отображения информации и используемого интеллектуального интерфейса, базы знаний или экспертной системы).

Определение 5 (обобщенное для всех методов измерений)

Измерение свойств и параметров состояния ИС «ОИ – СИИ» – совокупность операций восприятия и измерительного преобразования одной или конечного числа ФВ, закономерно связанных между собой, включающих в себя (в явном или неявном виде) искомую ФВ и образцовую ФВ одного или нескольких фиксированных размеров, воспроизводимую мерой или стандартным образцом исследуемого (свойства) вещества или материала, непосредственного или опосредованного нахождения соотношения значений искомой и образцовой ФВ в соответствие с выбранным методом и уравнениями измерений и представления полученных данных (числовых значений) в виде, удобном для запоминания, обработки, отображения, структурирования (с целью получения новых знаний) и передачи на расстояние.

Следует отметить, что данные результата сравнения, представляющие собой отношение значений искомой и образцовой ФВ, отображаются посредством числовых меток на оцифрованной шкале, а данные, представляющие собой значение коэффициента связи образцовой ФВ с искомой, увеличенное в $\{x_0\}$ раз, отображаются в цифровом (не шкальном) виде, как и данные (при избыточных измерениях), представляющие собой увеличенное в $\{x_0\}$ раз отношение двух результатов обработки функционально связанных между собой результатов промежуточных измерений рядов ФВ.

2. *Универсальное (фундаментальное) уравнение измерений и его частные случаи*

Определение

Универсальное уравнение измерений – это уравнение связи между искомой ФВ и одной или несколькими рядами однородных ФВ, включающих как искомую, так и образцовую (предварительно не преобразованных, преобразованных или измеренных), характеризующее процесс сравнения искомой и образцовой ФВ, а также способ установления коэффициента связи между ними.

Универсальное уравнение измерений описывается как через ФВ, так и через их числовые значения. Последняя форма записи классически называется «уравнением числовых значений» и используется при

[5] приведенной ко входу измерительного канала
[6] Уравнение состояния ИС – уравнение величин, описывающее состояние ИС при конкретном значении измеряемой ФВ.

обработке результатов измерительных преобразований или измерений рядов ФВ согласно уравнению измерений.

В результате развития ТИИ установлено, что уравнения избыточных (необходимых и достаточных) измерений I-го, II-го и III-го рода представляют собой более общий вид, чем уравнения прямых (необходимых) измерений. Они описывает как операции измерительного преобразования рядов ФВ, так и операции сравнения полученных и предварительно структурированных данных.

Установлено, что универсальное уравнение измерений I-го рода формализовано может быть записано через искомую и выходные ФВ, как

$$x_i = x_0 \left[\frac{F_x(y_{\text{н}1},\ldots,y_{\text{н}k},\ldots,y_{\text{н}n1},)}{F_0(y_{\text{н}0},\ldots,y_{\text{н}k},\ldots,y_{\text{н}n2},)} + k_{\text{с}0} \right], \tag{1}$$

где $F_x(y_{\text{н}1},...,y_{\text{н}k},...,y_{\text{н}n1},)$ – функция связи (числовых значений) величин $y_{\text{н}1},...,y_{\text{н}k},...,y_{\text{н}n1}$, содержащее, в том числе и искомую ФВ непосредственно или в аддитивной смеси ее с однородной образцовой ФВ установленного размера (на это указывает индекс «*x*»); $F_0(y_{\text{н}0},...,y_{\text{н}k},...,y_{\text{н}n2},)$ – функция связи (числовых значений) величин $y_{\text{н}0},...,y_{\text{н}k},...,y_{\text{н}n2}$, содержащее в том числе и образцовую ФВ непосредственно или в аддитивной смеси ее с искомой ФВ (см. индекс «0»); $y_{\text{н}0}$ – результат измерительного преобразования образцовой ФВ, воспроизводимой мерой или стандартным образцом; $k_{\text{с}0}$ – дополнительный коэффициент связи (или масштабный коэффициент), характеризующий изменение размера образцовой ФВ x_0 относительно первоначального или характеризующий используемую долю размера (часть значения) ФВ x_0. Может быть положительным или отрицательным числом.

В (1) результирующий коэффициент связи[7]

$$k_{\text{с}i} = k_{\text{с}x} - k_{\text{с}0} = \frac{F_x(y_{\text{н}1},...,y_{\text{н}k},...,y_{\text{н}n1},)}{F_0(y_{\text{н}0},...,y_{\text{н}k},...,y_{\text{н}n2},)} + k_{\text{с}0}, \tag{2}$$

где $k_{\text{с}x}$ и $k_{\text{с}0}$ – основной и дополнительный коэффициенты связи (размеров) ФВ x_i и x_0.

Результат измерений, полученный в соответствие с (1), должно записываться с учетом стандартной, суммарной стандартной или расширенной неопределенности, присущей значению ФВ, воспроизводимой мерой или стандартным образцом. В частности, например, результат измерений может быть записан в виде неидеального универсального уравнения измерений:

$$x_i = \left(x_0 + \begin{cases} +\Delta^A_{\text{м}p1} \\ -\Delta^A_{\text{м}p2} \end{cases} \right) \left[\frac{F_x(y_{\text{н}1},\ldots,y_{\text{н}k},\ldots,y_{\text{н}n1})}{F_0(y_{\text{н}0},\ldots,y_{\text{н}k},\ldots,y_{\text{н}n2})} + k_0 \right] = x_0 \left[\frac{F_x(y_{\text{н}1},\ldots,y_{\text{н}k},\ldots,y_{\text{н}n1})}{F_0(y_{\text{н}0},\ldots,y_{\text{н}k},\ldots,y_{\text{н}n2})} + k_0 \right] +$$

$$+ \left[\frac{F_x(y_{\text{н}1},\ldots,y_{\text{н}k},\ldots,y_{\text{н}n1})}{F_0(y_{\text{н}0},\ldots,y_{\text{н}k},\ldots,y_{\text{н}n2})} + k_0 \right] \cdot \begin{cases} +\Delta^A_{\text{м}p1} \\ -\Delta^A_{\text{м}p2} \end{cases} = x_0 \left[\frac{F_x(y_{\text{н}1},\ldots,y_{\text{н}k},\ldots,y_{\text{н}n1})}{F_0(y_{\text{н}0},\ldots,y_{\text{н}k},\ldots,y_{\text{н}n2})} + k_0 \right] + \begin{cases} +k^{\text{м}}_{01}\Delta^A_{\text{м}p1} \\ -k^{\text{м}}_{02}\Delta^A_{\text{м}p2} \end{cases}, \tag{3}$$

где $\Delta^A_{\text{м}p1}$ ($\Delta^A_{\text{м}p2}$) – стандартная неопределенность значения образцовой ФВ, воспроизводимой мерой или стандартным образцом при доверительной вероятности *p*; $k^{\text{м}}_{\text{о}1}$ ($k^{\text{м}}_{\text{о}2}$) – коэффициент охвата (индекс «м» – для значений образцовой ФВ, воспроизводимой мерой или стандартным образцом). В частном случае $k^{\text{м}}_{\text{о}1} = k^{\text{м}}_{\text{о}2} = k^{\text{м}}_{\text{о}}$, а $\Delta^A_{\text{м}p1} = \Delta^A_{\text{м}p2} = \Delta^A_{\text{м}p}$.

Для рассматриваемого случая выбран коэффициент охвата

$$k^{\text{м}}_{01} = +\Delta^A_{\text{м}p1} \cdot \left[\frac{F_x(y_{\text{н}1},...,y_{\text{н}k},...,y_{\text{н}n1})}{F_0(y_{\text{н}0},...,y_{\text{н}k},...,y_{\text{н}n2})} + k_0 \right] = +\Delta^A_{\text{м}p1} \cdot k_{\text{с}}. \tag{4}$$

и

$$k^{\text{м}}_{02} = -\Delta^A_{\text{м}p2} \cdot \left[\frac{F_x(y_{\text{н}1},...,y_{\text{н}k},...,y_{\text{н}n1})}{F_0(y_{\text{н}0},...,y_{\text{н}k},...,y_{\text{н}n2})} + k_0 \right] = -\Delta^A_{\text{м}p2} \cdot k_{\text{с}}. \tag{5}$$

Для представления коэффициента связи в виде рационального числа (целого или дробного), предлагается выражать его в виде дроби $k_0 = n_1/n_2$, где n_1 и n_2 – целые числа. Коэффициент связи характеризует собой используемую долю размера образцовой ФВ и может быть выражен любым числом, – целым или дробным, рациональным или иррациональным.

Известно, что иррациональные числа (нерациональные алгебраические числа и трансцендентные числа) не могут быть представлены в виде обыкновенной несократимой дроби. С другой стороны, результат измерений параметров геометрических фигур может быть получен в виде иррационального числа.

[7] Индекс «*i*» показывает, что *i*-му значению ФВ соответствует *i*-е значение коэффициента связи.

Например, отношение длины диагонали квадрата к длине его стороны равно $\sqrt{2}$, а отношение длины окружности к длине её диаметра равно иррациональному числу π [14]. Иррациональные числа могут быть вычислены с любой точностью, но не могут быть заменены рациональным числом. Полагаем, что при изучении свойств сверхмалых объектов той или иной физической природы, существующих в наномире, не исключена возможность измерения ФВ, размеры которых также являются иррациональными числами. В этом случае могут появиться и меры, воспроизводящие ФВ с размерами, представляющими собой иррациональные числа. Для возможности представления коэффициента связи в виде иррационального числа будем использовать его исходное обозначение «k_0». Отметим, что если вещественные числа могут быть записаны бесконечными десятичными дробями (например, $n_0 = N_{\text{н}l} / N_{\text{н}m} = 10/6 = 1,66(6) \approx 1,667$), то иррациональные числа записываются только непериодическими бесконечными десятичными дробями, например, $\pi = 3,14159...$ с требуемой точностью.

На шкалах средств измерений (СИ) иррациональные числа не отмечаются числовыми отметками из-за нецелесообразности и по причине округления получаемых результатов, но предполагается, что они существуют. В цифровых многоразрядных и прецизионных СИ результат измерения может быть представлен иррациональным числом с заданной точностью.

При практическом определении действительного значения искомой ФВ (реализации уравнения измерений) используется числовой эквивалент уравнения измерений, – в виде уравнений числовых значений:

$$\{x_i\} = \{x_0\} \left[\frac{F_x(\{y_{\text{н}1}\},...,\{y_{\text{н}k}\},...,\{y_{\text{н}n1}\},)}{F_0(\{y_{\text{н}0}\},...,\{y_{\text{н}k}\},...,\{y_{\text{н}n2}\},)} + k_0 \right] \tag{6}$$

и

$$N_{xi} = N_{x0} \left[\frac{F_x(N_{\text{н}1},...,N_{\text{н}k},...,N_{\text{н}n1})}{F_0(N_{\text{н}0},...,N_{\text{н}k},...,N_{n2})} + k_0 \right], \tag{7}$$

где $F_x(N_{\text{н}1},...,N_{\text{н}k},...,N_{\text{н}n1},)$ – функция связи числовых значений результатов промежуточных измерений или результатов восприятий и измерительных преобразований одной совокупности ФВ в коды чисел $N_{\text{н}1},...,N_{\text{н}k},...,N_{\text{н}n1}$, содержащих в том числе и результат измерений или измерительного преобразования искомой ФВ непосредственно или в аддитивной смеси ее с однородной образцовой ФВ; $F_0(N_{\text{н}0},...,N_{\text{н}k},...,N_{\text{н}n2},)$ – функция связи числовых значений результатов промежуточных измерений или результатов измерительного преобразования другой совокупности ФВ в коды чисел $N_{\text{н}0},...,N_{\text{н}k},...,N_{\text{н}n2}$, которые содержат результат измерения или измерительного преобразования образцовой ФВ, непосредственно или в аддитивной смеси ее с искомой ФВ (см. индекс «0»).

В виде уравнения числовых значений результат измерений записывается, как правило, с учетом, например, расширенной неопределенности, следующим образом

$$N_{xi} = N_{x0} \left[\frac{F_x(N_{\text{н}1},...,N_{\text{н}k},...,N_{\text{н}n1})}{F_0(N_{\text{н}0},...,N_{\text{н}k},...,N_{n2})} + k_0 \right] + \begin{cases} +k_{\text{o}1}^{\text{м}}\{\Delta_{\text{м}p1}^{A}\} \\ -k_{\text{o}2}^{\text{м}}\{\Delta_{\text{м}p2}^{A}\} \end{cases}. \tag{8}$$

Нами установлено, что при сложных ФП ИК или при измерениях ФВ с присваиваемой математической моделью, уравнение ИИ часто выводится и записывается в неявном виде. Для указанных выше случаев и универсальное уравнение измерений может иметь разные формы представления в неявном виде. Одним из примеров представления универсального уравнения измерения в общем, но неявном виде, является запись через входные и выходные ФВ ИК, –

$$\frac{F_1(y_{\text{н}0}, y_{\text{н}1},..., y_{\text{н}k},..., y_{\text{н}n1}, k_{\text{л}1}, k_{\text{л}2})}{F_3(y_{\text{н}1},..., y_{\text{н}l},..., y_{\text{н}n3}, k_{\text{л}3})} = \frac{F_2(y_{\text{н}1},..., y_{\text{н}k},..., y_{\text{н}n2}, k_{\text{л}1}, k_{\text{л}2})}{F_4(y_{\text{н}0},..., y_{\text{н}m},..., y_{\text{н}n4}, k_{\text{л}3})}, \tag{9}$$

где F_1, F_2, F_3, F_4 – некоторые функции, описывающие взаимосвязи между собой выходных величин ИК ($y_{\text{н}0}, y_{\text{н}1},..., y_{\text{н}k}$ и т.д.) вместе с некоторыми коэффициентами ($k_{\text{л}1}, k_{\text{л}2}, k_{\text{л}3}$) и образцовой ФВ (одной или нескольких), воспроизводимой, например, регулируемой мерой, или запись через числовые значения результатов восприятия и измерительного преобразования рядов ФВ, –

$$\frac{F_1(\{y_{\text{н}0}\},\{y_{\text{н}1}\},...,\{y_{\text{н}k}\},...,\{y_{\text{н}n1}\}, k_{\text{л}1}, k_{\text{л}2})}{F_3(\{y_{\text{н}1}\},...,\{y_{\text{н}l}\},...,\{y_{\text{н}n3}\}, k_{\text{л}3})} = \frac{F_2(\{y_{\text{н}1}\},...,\{y_{\text{н}k}\},...,\{y_{\text{н}n2}\}, k_{\text{л}1}, k_{\text{л}2})}{F_4(\{y_{\text{н}0}\},...,\{y_{\text{н}m}\},...,\{y_{\text{н}n4}\}, k_{\text{л}3})} \tag{10}$$

и

$$\frac{F_1(N_{\text{н}0}, N_{\text{н}1},..., N_{\text{н}k},..., N_{\text{н}n1}, k_{\text{л}1}, k_{\text{л}2})}{F_3(N_{\text{н}1},..., N_{\text{н}l},..., N_{\text{н}n3}, k_{\text{л}3})} = \frac{F_2(N_{\text{н}1},..., N_{\text{н}k},..., N_{\text{н}n2}, k_{\text{л}1}, k_{\text{л}2})}{F_4(N_{\text{н}0},..., N_{\text{н}m},..., N_{\text{н}n4}, k_{\text{л}3})}. \tag{11}$$

В приведенных равенствах индексы $n1 - n4$ указывают на разное число составляющих в числителях и знаменателях, как и разное число коэффициентов $k_{л1}, k_{л2}, \ldots$.

На рис. 1 приведены графические построения, показывающие взаимосвязи между универсальным уравнением измерений, его частными случаями и операциями сравнения. На данном рисунке охвачены основные методы прямых измерений.

На первой верхней строке рис. 1 приведены уравнения избыточных измерений в явном и неявном виде соответственно, а на второй, в качестве практического примера, приведено конкретное уравнение избыточных измерений концентрации вещества в бинарном растворе. Эти уравнения избыточных измерений полностью отражают вид универсальное уравнение измерений.

Напротив стрелки 1 приведен первый частный случай универсального уравнения измерений (см. рис. 1) в виде уравнения избыточных измерений ФВ x_i при линейной ФП ИК. Эти и нижеприведенные уравнения измерений описывают также операцию сравнения искомой и образцовой ФВ.

Напротив стрелки 2 (рис. 1) приведено аналитическое выражение, описывающее уравнение измерений и операцию сравнения для метода коинциденции (двух совпадений). Условия совпадения для каждого частного случая измерения ФВ индивидуальны.

В методе непосредственной оценки используется операция сравнения, описываемая уравнениям измерений, приведенного напротив стрелки 3. Результат измерений отсчитывается по числовой отметке $n_ш$ на шкале. Цена делений равна $\Delta x_ц$.

В методе противопоставления, – при параллельном воздействии сравниваемых сигналов на устройство сравнения, и в методе замещение, – при последовательном воздействии, используется операция сравнения, описываемая уравнением измерений, представленном напротив стрелки 4. В данном случае для формирования образцовой ФВ x_0 используется регулируемая многозначная мера.

При реализации метода уравновешивания с использованием одноканальной многозначной меры, используется операция сравнения, описываемая уравнением измерений, представленным напротив стрелки 5. Уравновешивание осуществляется с погрешностью, достигаемой половины цены деления.

В нулевом методе измерения, при использовании нерегулируемой образцовой меры, операция сравнения описывается уравнением измерений, представленным напротив стрелки 6 (рис. 1). Ниже приведено уравнение величин, описывающее процесс сравнения значений ФВ, – путем подбора значений чисел n_1 и n_2, частное от деления которых равно значению коэффициента связи $k_{сх}$.

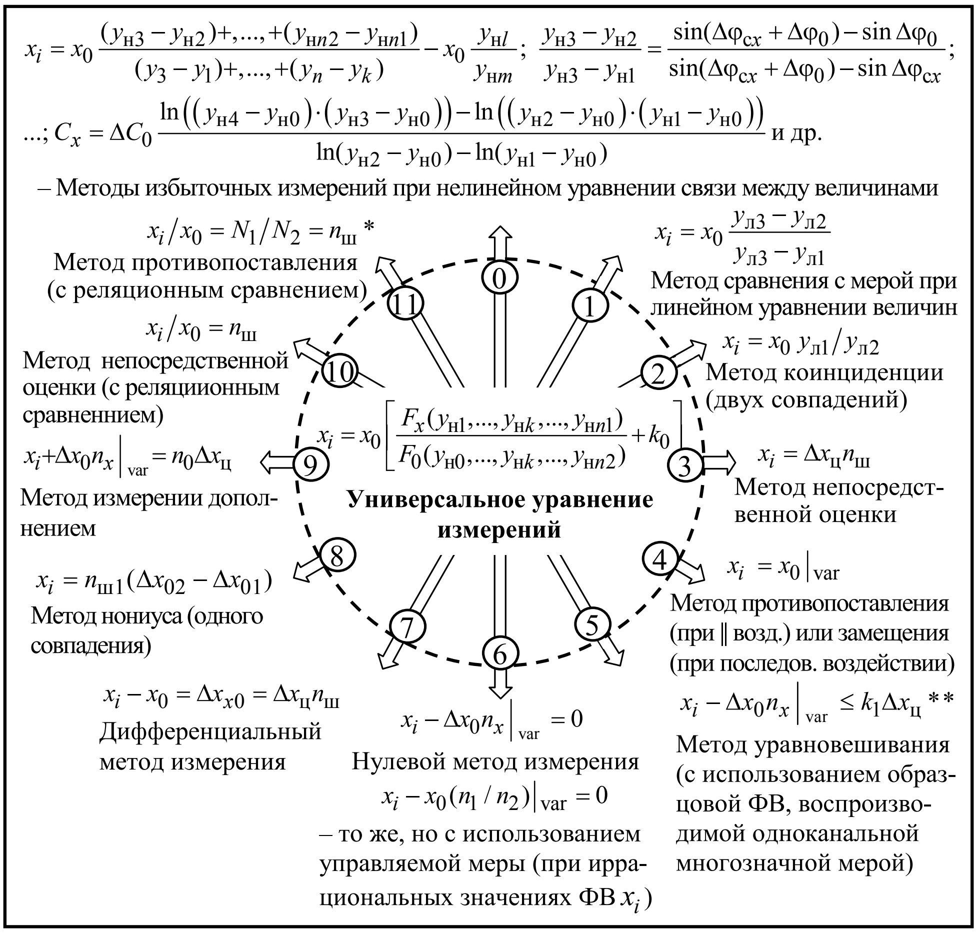

Рис. 1. Графические построения, показывающие взаимосвязи между универсальным уравнением измерений, его частными случаями и операциями сравнения.

тут: * $n_ш$ – числовая отметка шкалы деления, ** n_x – показание регулируемой меры, $k_1 = 0,5$

Операция сравнения в дифференциальном методе описывается уравнением измерений, приведенному напротив стрелки 7. Измерениям подлежит разность искомой и образцовой ФВ.

В методе нониуса (одного совпадения) операция сравнения описывается уравнением измерений, приведенному напротив стрелки 8, где $n_{ш1}$ – номер совпавших меток шкал. Согласно приведенному уравнению измерений конечный результат определяется по однократному совпадению меток шкал.

В методе измерений дополнением сравнение осуществляется согласно уравнения величин, приведенного напротив стрелки 9. Момент сравнения наступает, когда сумма результатов измерений искомой и образцовой ФВ будет равна некоторому заданному постоянному числу n_0 или априори заданному показанию прибора.

В прямых методах измерений операция сравнения, основанная на использовании реляции (отношения) числовых значений результатов измерений, приведенных к входу ИК, описывается уравнениями величин, приведенными напротив стрелок 10 и 11, где N_1 и N_2 – числовые значения искомой и образцовой ФВ.

Из приведенных построений видно, что каждому методу измерений присущи соответствующие операции непосредственного или опосредованного сравнения значений ФВ.

При измерениях II-го рода универсальное уравнение измерений формализовано может быть записано через искомую и выходные ФВ, как

$$\overline{x_i} = \frac{x_0}{m}\sum_{j=1}^{m} x_{ij} = \frac{x_0}{m}\sum_{j=1}^{m}\left[\frac{F_x(y_{н1j},\ldots,y_{нkj},\ldots,y_{нn1j},)}{F_0(y_{н0j},\ldots,y_{нkj},\ldots,y_{нn2j},)}\right] + x_0 k_0 \tag{12}$$

где m – число измерительных преобразований или измерений ФВ в каждом такте, и

$$\overline{x_i} = \frac{x_0}{m}\sum_{j=1}^{m} x_{ij} = x_0\left[\frac{\sum_{j=1}^{m} F_x(y_{н1j},\ldots,y_{нkj},\ldots,y_{нn1j})}{\sum_{j=1}^{m} F_0(y_{н0j},\ldots,y_{нkj},\ldots,y_{нn2j})} + k_0\right], \tag{13}$$

– при последовательном многократном измерительном преобразовании или измерении рядов ФВ, или

$$\overline{x_i} = x_0\left[\frac{F_x(\overline{y_{н1}},\ldots,\overline{y_{нk}},\ldots,\overline{y_{нn1}})}{F_0(\overline{y_{н0}},\ldots,\overline{y_{нk}},\ldots,\overline{y_{нn2}})} + k_0\right], \tag{14}$$

– при многократном измерительном преобразовании или измерении каждой ФВ в соответствующем такте. В (12) и (13) $\overline{x_i}$ – искомая ФВ, получаемая путем усреднения m результатов вычислений текущих значений ФВ x_i; в (14) $\overline{x_i}$ – искомая ФВ, получаемая в результате обработки предварительно усредненных по значениям выходных ФВ $\overline{y_{н1}},\ldots,\overline{y_{нk}},\ldots,\overline{y_{нn1}}$ и $\overline{y_{н0}},\ldots,\overline{y_{нk}},\ldots,\overline{y_{нn2}}$ ИК в соответствии с (1).

Универсальное уравнение измерений (12), (13) и (14) запишем через две формы записи уравнений числовых значений в виде:

$$\overline{\{x_i\}} = \frac{\{x_0\}}{m}\sum_{j=1}^{m}\left[\frac{F_x(\{y_{н1j}\},\ldots,\{y_{нkj}\},\ldots,\{y_{нn1j}\},)}{F_0(\{y_{н0j}\},\ldots,\{y_{нkj}\},\ldots,\{y_{нn2j}\},)}\right] + \{x_0\}k_0, \tag{15}$$

$$\overline{\{x_i\}} = \{x_0\}\left[\frac{\sum_{j=1}^{m} F_x(\{y_{н1j}\},\ldots,\{y_{нkj}\},\ldots,\{y_{нn1j}\})}{\sum_{j=1}^{m} F_0(\{y_{н0j}\},\ldots,\{y_{нkj}\},\ldots,\{y_{нn2j}\})} + k_0\right], \tag{16}$$

$$\{\overline{x_i}\} = \{x_0\}\left[\frac{F_x(\{\overline{y_{н1}}\},\ldots,\{\overline{y_{нk}}\},\ldots,\{\overline{y_{нn1}}\},)}{F_0(\{\overline{y_{н0}}\},\ldots,\{\overline{y_{нk}}\},\ldots,\{\overline{y_{нn2}}\},)} + k_0\right] \tag{17}$$

и

$$N_{xср} = \frac{N_{x0}}{m}\sum_{j=1}^{m}\left[\frac{F_x(N_{1j},\ldots,N_{kj},\ldots,N_{n1j})}{F_0(N_{0j},\ldots,N_{jk},\ldots,N_{n2j})}\right] + N_{x0}k_0, \tag{18}$$

$$N_{x\text{ср}} = N_{x0}\left[\frac{\sum\limits_{j=1}^{m} F_x(N_{1j},\ldots,N_{kj},\ldots,N_{n1j})}{\sum\limits_{j=1}^{m} F_0(N_{0\text{j}},\ldots,N_{jk},\ldots,N_{n2j})} + k_0\right], \tag{19}$$

$$N_{x\text{ср}} = N_{x0}\left[\frac{F_x(N_{\text{ср}1},\ldots,N_{\text{ср}k},\ldots,N_{\text{ср}n1})}{F_0(N_{\text{ср}0},\ldots,N_{\text{ср}k},\ldots,N_{\text{ср}2})} + k_0\right], \tag{20}$$

где $\{y_{\text{н}0j}\},\ldots,\{y_{\text{н}n2j}\}$ – числовые значения ФВ $y_{\text{н}0j},\ldots,y_{\text{н}n2j}$; $N_{\text{ср}1},\ldots,N_{\text{ср}k},\ldots,N_{\text{ср}n1}$ и $N_{\text{ср}0},\ldots,N_{\text{ср}k},\ldots,N_{\text{ср}n2}$ – усредненные числовые значения результатов многократных измерительных преобразований или измерений ФВ в каждом такте; N_{x0} – числовое значение образцовой ФВ x_0, воспроизводимой мерой или стандартным образцом.

Следует отметить, что использование универсального уравнения измерений, записанного в виде (12), (13) и (14) или (15),…, и (20), приводит к получению незначительно отличающихся между собой значений неопределенности результата измерений искомой ФВ. Выбор определяется характером внешних случайных воздействий.

Запишем один из примеров представления универсального уравнения измерения (II-го рода) в общем, но неявном виде, следующим образом:

$$\frac{\frac{1}{m}\sum\limits_{j=1}^{m} F_1(y_{\text{н}0j}, y_{\text{н}1j},\ldots,y_{\text{н}kj},\ldots,y_{\text{н}n1j},k_{\text{л}1},k_{\text{л}2})}{\frac{1}{m}\sum\limits_{j=1}^{m} F_3(y_{\text{н}1j},\ldots,y_{\text{н}lj},\ldots,y_{\text{н}n3j},k_{\text{л}3})} = \frac{\frac{1}{m}\sum\limits_{j=1}^{m} F_2(y_{\text{н}1j},\ldots,y_{\text{н}kj},\ldots,y_{\text{н}n2j},k_{\text{л}1},k_{\text{л}2})}{\frac{1}{m}\sum\limits_{j=1}^{m} F_4(y_{\text{н}0j},\ldots,y_{\text{н}tj},\ldots,y_{\text{н}n4j},k_{\text{л}3})}, \tag{21}$$

$$\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\frac{F_1(y_{\text{н}0j}, y_{\text{н}1j},\ldots,y_{\text{н}kj},\ldots,y_{\text{н}n1j},k_{\text{л}1},k_{\text{л}2})}{F_3(y_{\text{н}1j},\ldots,y_{\text{н}lj},\ldots,y_{\text{н}n3j},k_{\text{л}3})} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\frac{F_2(y_{\text{н}1j},\ldots,y_{\text{н}kj},\ldots,y_{\text{н}n2j},k_{\text{л}1},k_{\text{л}2})}{F_4(y_{\text{н}0j},\ldots,y_{\text{н}tj},\ldots,y_{\text{н}n4j},k_{\text{л}3})}, \tag{22}$$

$$\frac{F_1(\overline{y_{\text{н}0}}, \overline{y_{\text{н}1}},\ldots,\overline{y_{\text{н}k}},\ldots,\overline{y_{\text{н}n1}},k_{\text{л}1},k_{\text{л}2})}{F_3(\overline{y_{\text{н}1}},\ldots,\overline{y_{\text{н}l}},\ldots,\overline{y_{\text{н}n3}},k_{\text{л}3})} = \frac{F_2(\overline{y_{\text{н}1}},\ldots,\overline{y_{\text{н}k}},\ldots,\overline{y_{\text{н}n2}},k_{\text{л}1},k_{\text{л}2})}{F_4(\overline{y_{\text{н}0}},\ldots,\overline{y_{\text{н}m}},\ldots,\overline{y_{\text{н}n4}},k_{\text{л}3})}, \tag{23}$$

Запишем (21), (22) и (23) в виде уравнений числовых значений:

$$\frac{\frac{1}{m}\sum\limits_{j=1}^{m} F_1(N_{0j}, N_{1j},\ldots,N_{kj},\ldots,N_{n1j},k_{\text{л}1},k_{\text{л}2})}{\frac{1}{m}\sum\limits_{j=1}^{m} F_3(N_{1j},\ldots,N_{lj},\ldots,N_{n3j},k_{\text{л}3})} = \frac{\frac{1}{m}\sum\limits_{j=1}^{m} F_2(N_{1j},\ldots,N_{kj},\ldots,N_{n2j},k_{\text{л}1},k_{\text{л}2})}{\frac{1}{m}\sum\limits_{j=1}^{m} F_4(N_{0j},\ldots,N_{tj},\ldots,N_{n4j},k_{\text{л}3})}, \tag{24}$$

$$\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\frac{F_1(N_{0j}, N_{1j},\ldots,N_{kj},\ldots,N_{n1j},k_{\text{л}1},k_{\text{л}2})}{F_3(N_{1j},\ldots,N_{lj},\ldots,N_{n3j},k_{\text{л}3})} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\frac{F_2(N_{1j},\ldots,N_{kj},\ldots,N_{n2j},k_{\text{л}1},k_{\text{л}2})}{F_4(N_{0j},\ldots,N_{tj},\ldots,N_{n4j},k_{\text{л}3})}, \tag{25}$$

$$\frac{F_1(\{\overline{y_{\text{н}0}}\}, \{\overline{y_{\text{н}1}}\},\ldots,\{\overline{y_{\text{н}k}}\},\ldots,\{\overline{y_{\text{н}n1}}\},k_{\text{л}1},k_{\text{л}2})}{F_3(\{\overline{y_{\text{н}1}}\},\ldots,\{\overline{y_{\text{н}l}}\},\ldots,\{\overline{y_{\text{н}n3}}\},k_{\text{л}3})} = \frac{F_2(\{\overline{y_{\text{н}1}}\},\ldots,\{\overline{y_{\text{н}k}}\},\ldots,\{\overline{y_{\text{н}n2}}\},k_{\text{л}1},k_{\text{л}2})}{F_4(\{\overline{y_{\text{н}0}}\},\ldots,\{\overline{y_{\text{н}m}}\},\ldots,\{\overline{y_{\text{н}n4}}\},k_{\text{л}3})}, \tag{26}$$

$$\frac{F_1(N_{\text{ср}0}, N_{\text{ср}1},\ldots,N_{\text{ср}k},\ldots,N_{\text{ср}n1},k_{\text{л}1},k_{\text{л}2})}{F_3(N_{\text{ср}1},\ldots,N_{\text{ср}l},\ldots,N_{\text{ср}n3},k_{\text{л}3})} = \frac{F_2(N_{\text{ср}1},\ldots,N_{\text{ср}k},\ldots,N_{\text{ср}n2},k_{\text{л}1},k_{\text{л}2})}{F_4(N_{\text{ср}0},\ldots,N_{\text{ср}m},\ldots,N_{\text{ср}n4},k_{\text{л}3})}. \tag{27}$$

Использование универсальных уравнений измерений II-го рода и соответствующих уравнений числовых значений определяется временным характером стационарных эргодических и неэргодических случайных помех, а также возможностями микропроцессора, обеспечивающего обработку данных в реальном масштабе времени.

Универсальное уравнение измерений III-го рода отличается от универсального уравнения измерений II-го рода тем, что проводятся еще m циклов измерений, а полученные результаты усредняются. Ниже приводятся только некоторые из них:

$$\overline{\overline{x_i}} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}(\overline{x_i})_j = \frac{x_0}{m}\sum_{j=1}^{n}\left[\frac{F_x(\overline{y_{\text{н}1j}},\ldots,\overline{y_{\text{н}kj}},\ldots,\overline{y_{\text{н}n1j}})}{F_0(\overline{y_{\text{н}0j}},\ldots,\overline{y_{\text{н}kj}},\ldots,\overline{y_{\text{н}n2j}})}\right] + x_0 k_0, \tag{28}$$

или

$$\overline{\overline{x_i}} = x_0 \left[\frac{F_x(\overline{\overline{y_{н1}}},\dots,\overline{\overline{y_{нk}}},\dots,\overline{\overline{y_{нn1}}})}{F_0(\overline{\overline{y_{н0}}},\dots,\overline{\overline{y_{нk}}},\dots,\overline{\overline{y_{нn2}}})} + k_0 \right]. \tag{29}$$

Универсальное уравнение измерений (29) запишем в виде уравнений числовых значений

$$\{\overline{\overline{x_i}}\} = \{x_0\} \left[\frac{F_x(\{\overline{\overline{y_{н1}}}\},\dots,\{\overline{\overline{y_{нk}}}\},\dots,\{\overline{\overline{y_{нn1}}}\},)}{F_0(\{\overline{\overline{y_{н0}}}\},\dots,\{\overline{\overline{y_{нk}}}\},\dots,\{\overline{\overline{y_{нn2}}}\},)} + k_0 \right] \tag{30}$$

и

$$N'_{xср} = N_{x0} \left[\frac{F_x(N'_{ср1},\dots,N'_{срk},\dots,N'_{cp1})}{F_0(N'_{ср0},\dots,N'_{срk},\dots,N'_{ср2})} + k_0 \right]. \tag{31}$$

В (29) и (30) два штриха означают, что полученные в результате многократных измерительных преобразований или измерений числовые значения рядов ФВ дважды усреднены.

Запишем также один из примеров представления универсального уравнения измерения (III-го рода) и соответствующих уравнений числовых значений в неявном виде:

$$\frac{F_1(\overline{\overline{y_{н0}}},\overline{\overline{y_{н1}}},\dots,\overline{\overline{y_{нk}}},\dots,\overline{\overline{y_{нn1}}},k_{л1},k_{л2})}{F_3(\overline{\overline{y_{н1}}},\dots,\overline{\overline{y_{нl}}},\dots,\overline{\overline{y_{нn3}}},k_{л3})} = \frac{F_2(\overline{\overline{y_{н1}}},\dots,\overline{\overline{y_{нk}}},\dots,\overline{\overline{y_{нn2}}},k_{л1},k_{л2})}{F_4(\overline{\overline{y_{н0}}},\dots,\overline{\overline{y_{нm}}},\dots,\overline{\overline{y_{нn4}}},k_{л3})} \tag{32}$$

и

$$\frac{F_1(\{\overline{\overline{y_{н0}}}\},\{\overline{\overline{y_{н1}}}\},\dots,\{\overline{\overline{y_{нk}}}\},\dots,\{\overline{\overline{y_{нn1}}}\},k_{л1},k_{л2})}{F_3(\{\overline{\overline{y_{н1}}}\},\dots,\{\overline{\overline{y_{нl}}}\},\dots,\{\overline{\overline{y_{нn3}}}\},k_{л3})} = \frac{F_2(\{\overline{\overline{y_{н1}}}\},\dots,\{\overline{\overline{y_{нk}}}\},\dots,\{\overline{\overline{y_{нn2}}}\},k_{л1},k_{л2})}{F_4(\{\overline{\overline{y_{н0}}}\},\dots,\{\overline{\overline{y_{нm}}}\},\dots,\{\overline{\overline{y_{нn4}}}\},k_{л3})}, \tag{33}$$

$$\frac{F_1(N'_{ср0},N'_{ср1},\dots,N'_{срk}\dots,N'_{срn1},k_{л1},k_{л2})}{F_3(N'_{ср1},\dots,N'_{срl}\dots,N'_{срn3},k_{л3})} = \frac{F_2(N'_{ср1},\dots,N'_{срk},\dots,N'_{срn2},k_{л1},k_{л2})}{F_4(N'_{ср0},\dots,N'_{срm},\dots,N'_{срn4},k_{л3})}. \tag{34}$$

Формально универсальные уравнения измерений (28),…, (34) III-го рода должны сопровождаться условиями проведения дополнительных циклов измерительных преобразований или измерений рядов ФВ и временными границами, в пределах которых достигается сведение к нулю или к минимуму влияния математического ожидания нестационарной случайной помехи или наводки на результат измерений. На практике методы ИИ III-го рода реализуются при условиях обнаружения периодической помехи и известности способов ее выделения из информативного сигнала.

Таким образом, во всех видах измерений главная роль принадлежит уравнению измерений, описывающему процесс сравнения преобразованных ФВ и представления результатов измерений в форме, удобной для восприятия.

В заключение рассмотрим, коротко, понятие «результат измерений» и связанные с ним проблемы. Рассмотрение операций восприятия и измерительного преобразования нами вынесено в самостоятельную статью.

Результат измерений и проблема работы с метрологическими числами

РМГ 29 – 99 [11] рекомендует следующее определения понятия «результат измерений» – это «значение величины, полученное путем ее измерения». Данное определение устарело. Оно не связано с понятием неопределенность или погрешность измерения и не отражает сам процесс измерений. С учетом развития новой стратегии измерений, предла-

гаем следующее, более емкое и универсальное понятие «результат измерений».

Определение 1

Результат измерений – это представленное в узаконенных единицах с указанием полосы неопределенности действительное[8] значение искомой ФВ, полученное в результате проведения конечного числа операций измерительного преобразования одной или нескольких рядов однородных ФВ и сравнения с образцовой ФВ, воспроизводимой мерой или стандартным образцом.

Поскольку класс точности средства измерений характеризуется завышенными значениями доверительных границ нормированных погрешностей (в том числе с учетом коэффициента метрологического запаса, устанавливаемого для обеспечения требуемой метрологической надежности (заданного значения времени наработки СИ на метрологический отказ), то конкретный результат измерений должен записываться только с указанием неопределенности или погрешности измерений. В противном случае результат измерений является недоопределенным. Он не отражает основное качество измерений и не может быть использован совместно с другими результатами, например, косвенных или совместных измерений.

Будущее приборостроения связано с *правильным* представлением результата измерений, т. е. в виде

[8] Отличается от истинного на значение неопределенности или погрешности результата измерений.

метрологических чисел [16].

При однократных прямых измерениях конечному результату может быть приписана погрешность (неопределенность), соответствующая классу точности средства измерений. Погрешность, как и результат измерений, приведена к выходу ИК. При однократных избыточных измерениях конечному результату приписывается неопределенность, равная увеличенной в $k_0^{\text{м}}$ раз неопределенности воспроизведения значения образцовой ФВ мерой или стандартным образцом. В этом случае результат измерений и неопределенность (погрешность) получают приведенными к входу ИК.

Результат измерений имеет шесть характерных особенностей[9]:

- определяется экспериментально-расчетным путем;
- представляется в узаконенных единицах;
- представляет собой именованное или неименованное число с определенным числом десятичных знаков до и после запятой;
- содержит показатель точности (неопределенность или погрешность) с тем же количеством знаков после запятой;
- является приведенным к выходу (при прямых измерениях) или к входу (при избыточных измерениях) ИК;
- записывается в виде метрологического числа;
- содержит, в некоторых случаях, и результат идентификации исследуемого сигнала той или иной физической природы и его модели.

Результат измерений всегда должен представляться в узаконенных единицах с указанием, как правило, неопределенности или погрешности результата измерений, т.е. в виде метрологического числа.

В ТИИ, как и в метрологии в целом, существует проблема работы с метрологическими числами [16]. Действительно, если, например, результат определения концентрации веществ в бинарных растворах осуществляется согласно уравнению ИИ II-го рода вида

$$\overline{C_x} = \Delta C_0 \frac{\ln\left[\left(\overline{y_{\text{н}4}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y41}\\ -\Delta_{y42}\end{matrix}\right. - \overline{y_{\text{н}0}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y01}\\ -\Delta_{y02}\end{matrix}\right.\right)\cdot\left(\overline{y_{\text{н}3}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y31}\\ -\Delta_{y32}\end{matrix}\right. - \overline{y_{\text{н}0}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y01}\\ -\Delta_{y02}\end{matrix}\right.\right)\right]}{\ln\left[\overline{y_{\text{н}2}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y21}\\ -\Delta_{y22}\end{matrix}\right. - \overline{y_{\text{н}0}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y01}\\ -\Delta_{y02}\end{matrix}\right.\right] - \ln\left[\overline{y_{\text{н}1}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y11}\\ -\Delta_{y12}\end{matrix}\right. - \overline{y_{\text{н}0}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y01}\\ -\Delta_{y02}\end{matrix}\right.\right]} -$$

$$-\Delta C_0 \frac{\ln\left[\left(\overline{y_{\text{н}2}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y21}\\ -\Delta_{y22}\end{matrix}\right. - \overline{y_{\text{н}0}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y01}\\ -\Delta_{y02}\end{matrix}\right.\right)\cdot\left(\overline{y_{\text{н}1}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y11}\\ -\Delta_{y12}\end{matrix}\right. - \overline{y_{\text{н}0}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y01}\\ -\Delta_{y02}\end{matrix}\right.\right)\right]}{\ln\left[\overline{y_{\text{н}2}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y21}\\ -\Delta_{y22}\end{matrix}\right. - \overline{y_{\text{н}0}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y01}\\ -\Delta_{y02}\end{matrix}\right.\right] - \ln\left[\overline{y_{\text{н}1}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y11}\\ -\Delta_{y12}\end{matrix}\right. - \overline{y_{\text{н}0}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y01}\\ -\Delta_{y02}\end{matrix}\right.\right]} = \Delta C_0 \frac{\ln(Y_{\text{н}43}Y_{\text{н}21})}{\ln Y_{\text{н}20} - \ln Y_{\text{н}10}} + \left\{\begin{matrix}+\Delta_{y1}\\ -\Delta_{y2}\end{matrix}\right., \quad (35)$$

где $\overline{y_{\text{н}0}}, \ldots, \overline{y_{\text{н}4}}$ – усредненные по значению выходные величины ИК с верхними ($+\Delta_{y01}$ и $+\Delta_{y41}$) и нижними ($-\Delta_{y02}$ и $-\Delta_{y42}$) границами полосы неопределенности; $+\Delta_{y1}$ и $-\Delta_{y2}$ – величины, характеризующие результирующие границы полосы неопределенности; $Y_{\text{н}10}, Y_{\text{н}20}, Y_{\text{н}43}$ и $Y_{\text{н}21}$ – величины, полученные после обработки, т.е. представляет собой систему из пяти метрологических чисел. При их обработке возникает проблема выполнения указанных действий над метрологическими числами и получения усредненного результата измерений с корректно определенными верхней и нижней границами полосы неопределенности.

При этом необходимо учитывать, что в общем случае случайная составляющая погрешности нелинейного измерительного преобразования рядов ФВ является стационарным эргодическим или неэргодическим процессом с разными законами распределения, а результат их преобразований получают в каждом такте измерений с разной доверительной вероятностью. Для таких случаев проблема работы с метрологическими числами еще не решена. Использование всякого рода допущений не дает корректных результатов.

На сегодняшний день установлено [16, 17], что современная компьютерная технология вообще не умеет работать с метрологическими и приближенными числами и даже не умеет записывать их в компьютерном представлении. Для работы с метрологическими и приближенными числами она использует только их номинальные значения, отбрасывая метрологическую характеристику, превращает полученные номинальные значения в действительное число и работает только с ними. Метрологи, работающие с метрологическими числами, производят расчеты вручную, используя, например, рекомендации [18] о действиях над метрологическими числами. При этом чаще всего используется предположение, что распределение вероятности отсчетов измеряемой физической величины подчиняется закону распределения Гаусса (нормальному распределению).

На практике законы распределения погрешностей результатов измерительных преобразования или измерений весьма разнообразны и очень часто далеки от нормального, особенно при ограниченном числе

[9] Четыре взяты из [15], а три последние установлены автором.

измерений в каждом такте (– до 10-34). Большое разнообразие законов распределения погрешностей обуславливает практическую сложность определения доверительных значений погрешностей, так как необходимо располагать таблицами квантилей для всех разновидностей распределений [17]. Математики пока не в состоянии представить метрологам таблицы квантилей для всего разнообразия практически встречаемых законов распределения. Отсутствие даже приближенных уравнений связи между погрешностями результатов прямых измерений при разных законах их распределения, но при одних и тех же параметрах ФП ИК, приводит к трудностям определения доверительного интервала.

Основной задачей теоретической метрологии является составление таблиц квантилей для всех разновидностей практически встречаемых законов распределения и вывод уравнений связи между погрешностями результатов измерительных преобразований при разных законах их распределения.

Практически метрологические данные имеют точность, характеризующуюся тремя (четырьмя) десятичными знаками (относительная погрешность 0,1 % (0,01 %)), что соответствует примерно 10 (14) двоичным разрядам. Компьютер же ведет обработку данных, представленных тридцатью двумя и более двоичными разрядами (до шестидесяти четырех). При этом подавляющая часть компьютерных ресурсов тратится на обработку не полезной информации, а шумов.

Компьютерная технология отстает от вычислительных технологий, которые использовали сотни лет назад Ньютон, Непер, Кеплер [17].

Основными задачами развития вычислительной техники в XXI веке являются: создание теоретических основ и методологии работы с метрологическими и приближенными числами, создание языков высокого уровня, разработка пакетов прикладных программ и мультипроцессоров, обеспечивающих решение метрологических задач, задач метрологической надежности и других задач метрологии [16].

Установлено, что на результат измерения влияет выбор абсолютного значения образцовой ФВ. Результат измерений может быть записан в виде уравнения измерения в виде

$$x_i = x_0 \frac{N_1}{N_2} = x_0 \cdot \mathrm{tg}\alpha_i = x_0 k_{ci}, \qquad (36)$$

где k_{ci} – коэффициент связи искомой и образцовой ФВ.

Анализ уравнения измерений (36) показал, что результат измерений может быть получен:

1) при постоянном значении коэффициента связи и значениях образцовой ФВ, воспроизводимой одноканальной многозначной мерой. Уравнение измерений имеет вид

$$x_i = x_{0\,\mathrm{var}} k_{ci\mathrm{const}}; \qquad (37)$$

2) при переменном значении коэффициента связи и установленном значении образцовой ФВ. В этом случае уравнение измерений имеет вид

$$x_i = x_{0\mathrm{const}} k_{ci\,\mathrm{var}}. \qquad (38)$$

В этой связи все методы измерений могут быть разделены на методы с постоянным значением коэффициента связи (или с изменяемыми значениями образцовой ФВ), и на методы с переменным коэффициентом связи (или с фиксированным значением образцовой ФВ).

Выбор значения образцовой ФВ влияет и на диапазон значений коэффициента связи. Если значение образцовой ФВ выбрать в начале, середине или в конце диапазона значений искомой ФВ x_i, то, соответственно, необходимо изменять диапазон значений коэффициента связи (рис. 2).

Действительно, при $\{x_{01}\}=1$, $\{k_{ci}\}=\{x_{im}\}/\{x_{01}\}=10/1=10$; при $\{x_{02}\}=5$, $\{k_{ci}\}=\{x_{im}\}/\{x_{02}\}=10/5=2$, а при $\{x_{03}\}=10$, $\{k_{ci}\}=\{x_{im}\}/\{x_{03}\}=10/10=1$.

Из этого следует, что при неизвестном значении x_i и заданном значении x_0 необходимо обеспечить соответствующее значение коэффициента связи (рис. 2).

При постоянном значении образцовой ФВ x_0, выбранном, например, посередине диапазона значений измеряемой ФВ, результат получают путем установления необходимого значения коэффициента связи в диапазоне, не превышающем 2 ($k_{ci} \le 2$) (рис. 3).

Причем, при выборе максимального значения образцовой ФВ, уменьшаются требования к диапазону значений коэффициента связи. Его верхняя граница не превышает единицы, т.е. $k_{ci} \le 1$ (рис. 4), и, наоборот, при малых значениях образцовой ФВ x_0 необходимо обеспечить широкий диапазон изменения значений коэффициента связи (рис. 5), например, $0{,}1 \le k_{ci} \le 100$ при $\{x_0\} = 0{,}1$ и $0{,}01 \le \{x_i\} \le 10$.

Установлено, что при избыточных измерениях и нелинейной ФП ИК погрешность измерения существенно уменьшается при значениях искомой ФВ x_i близких к x_0. Благодаря этому можно обеспечить весьма высокую точность измерений в узком диапазоне значений ФВ x_i.

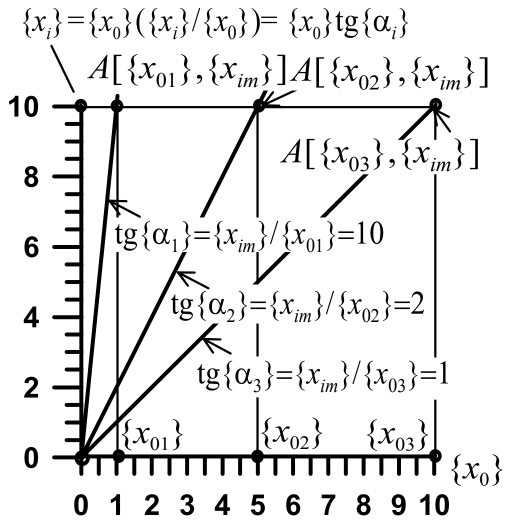

Рис. 2. Графики, характеризующие зависимость результата измерения от выбора значения образцовой ФВ x_0 в начале, в середине и в конце диапазона измерений

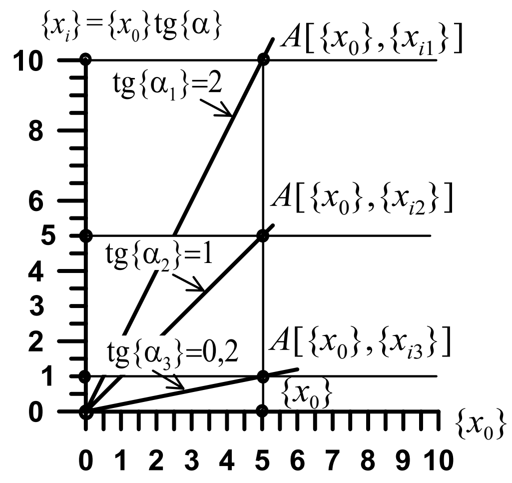

Рис. 3. Графики, характеризующие зависимость результата измерения от значения коэффициента связи при постоянном значении ФВ x_0

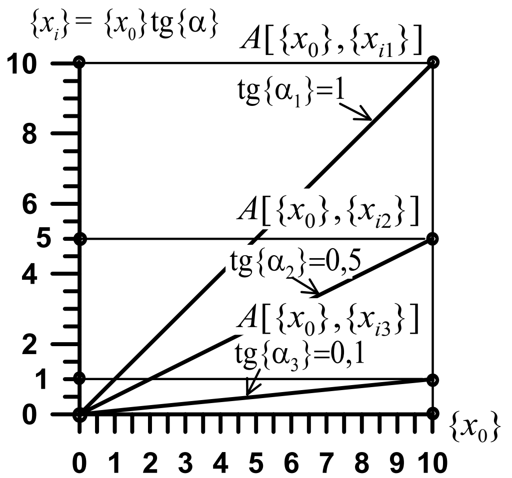

Рис. 4. Графики, характеризующие зависимость результата измерения от значения коэффициента связи при выборе значения образцовой ФВ x_0 в конце диапазона измерений

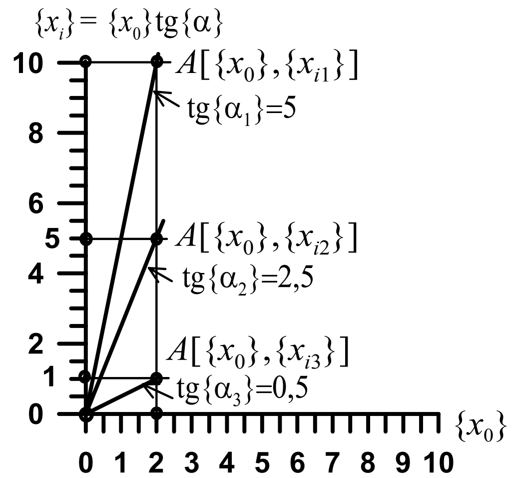

Рис. 5. Графики, характеризующие зависимость результата измерения от значения коэффициента связи при выборе значения образцовой ФВ x_0 в начале диапазона измерений

Приведенные выше графические построения в декартовой системе координат для ФВ, приведенных к входу ИК, характеризуют шкалу отношений, представляющею собой отношение размеров искомой и образцовой ФВ, т.е.

$$\{k_{ci}\} = tg\{\alpha_i\} = \{x_i\} / \{x_0\}, \tag{39}$$

где k_{ci} – числовые отметки на шкале, а $\{x_0\}$ – цена делений.

Общее число делений на шкале отношений определяется при $\{x_i\}=\{x_m\}$, когда $k_{ci}=k_{cm}$. Как видно из (39), данное соотношение представляет собой именованную безразмерную величину.

Если взять отношение значений выходной ФВ ИК (при НФП) и образцовой, то получим размерный коэффициент связи:

$$k_{\text{св}i} = \{y_{\text{н}i}\} / \{x_0\}, \tag{40}$$

где $y_{\text{н}i}$ – выходная величина ИК, соответствующая входной ФВ x_i.

Приведенные графические построения (рис. 2, …, рис. 5) могут быть использованы для выбора оптимальных значений образцовой ФВ.

При постоянном значении коэффициента связи используется образцовая ФВ, воспроизводимая регулируемой многозначной мерой, а при использовании образцовой ФВ установленного размера осуществляется изменение значения коэффициента связи.

Исходя из введенного понятия и роли коэффициента связи, можно записать два новых определения понятия «измерение».

Определение 1 (универсальное – измерение величин любой физической природы)

Измерение – это совокупность операций, направленных на установление такого значения коэффициента связи искомой и образцовой ФВ, при котором, в процессе сравнении, выполняется равенство,

$$\{x_0\}k_{\mathrm{cx\,var}} \Rightarrow \{x_0\}k_{\mathrm{c}i} = \{x_i\}, \tag{41}$$

где $k_{\mathrm{c}i}$ – установленное значение коэффициента связи, при заданном значении образцовой ФВ x_0, воспроизводимой мерой или стандартным образцом.

Определение 2 (измерение ФВ, единица которой может быть воспроизведена регулируемой многозначной мерой)

Измерение – это совокупность операций, направленная на установления такого значения образцовой ФВ, воспроизводимой многозначной мерой[10], при котором, в процессе сравнения, выполняется равенство

$$\{x_{0\,\mathrm{var}}\}k_{\mathrm{cx}} \Rightarrow \{x_{0i}\}k_{\mathrm{cx}} = \{x_i\}, \tag{42}$$

где $\{x_{0i}\}$ – установленное значение образцовой меры, при заданном значении коэффициента связи k_{cx}.

Выводы

Впервые в мире, благодаря развитию теории и методов ИИ, записано универсальное уравнение измерений и его разные формы записи, – для измерений I-го, II-го и III-го родов. Универсальное уравнение измерений является обобщением уравнений избыточных измерений ФВ при нелинейных функциях преобразования ИК разной степени сложности. Получение универсального уравнения измерений и разных форм его записи еще раз подтверждает фундаментальность ТИИ.

Установлено, что все частные уравнения прямых и избыточных измерений могут быть выведены на основе универсального уравнения измерений. Этим подтверждается многообразие методов прямых и избыточных измерений.

Из приведенного универсального уравнения измерений и его частных случаев видно, что операция сравнения формализовано (математически) описывается посредством знака равенства непосредственно двух числовых значений, равенства нулю разности или равенства отношения числовых значений двух ФВ, одна из которых является образцовой, значению коэффициента связи, равному единице или некоторому иному значению коэффициента связи.

Показано, что в методах ИИ широко используется сравнение ФВ в виртуальном пространстве в виде операции отношения (реляции).

Приведены новые определения понятий «образцовая ФВ», «метод воспроизведения свойства», «прямые измерения», «избыточные измерения», «интеллектуальные измерения свойств и параметров уравнения состояния ИС «ОИ – СИИ», системное определение понятия «избыточные измерения», системное, обобщенное определение понятия «избыточные измерения ФВ и параметров функции состояния ИС», «результат измерений», «универсальное уравнение измерений», которые расширяют наши представления об измерениях, обогащают ТИИ и ее философские аспекты новыми понятиями и определениями.

Получены два новых определения понятия «измерение» на основе фундаментальных понятий: «образцовая ФВ», «операция сравнения» и «коэффициент связи». Показано, что для получения конечного результата измерений при постоянном значении коэффициента связи, используется образцовая ФВ, воспроизводимая регулируемой многозначной мерой, а при использовании образцовой ФВ одного установленного размера, производится изменение значения коэффициента связи.

Существование универсального уравнения измерений и его разных форм записи позволит по-новому подходить к решению измерительных задач, даст новый толчок к развитию теории и методов избыточных измерений в XXI веке.

Подчеркивается необходимость решения одной из важнейших проблем метрологии, – проблемы работы с метрологическими числами, которая неразрывно связана с разработкой теоретических основ и методологии работы с метрологическими и приближенными числами, с созданием языком высокого уровня и специального прикладного программного обеспечения, с решением задач автоматического ввода-вывода метрологических чисел в микропроцессор и их автоматической обработки.

Объединение усилий ученых-метрологов, математиков и программистов обеспечит решение проблемы работы с метрологическими числами и даст возможность осуществить новый прорыв в научном и прецизионном приборостроении.

[10] Создание стандартных образцов веществ и материалов, воспроизводимых с заданной погрешностью ряд значений ФВ в заданном диапазоне значений пока проблематично.

Литература

1. Кондратов В.Т. Новая стратегия измерений // Законодательная и прикладная метрология. – 2008. – № 3. – С. 101-121.

2. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – № 1. – С. 7-24.

3. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений /В сб. докладов международной научно-технической конференции „Метрологическое обеспечение измерительных систем”. Под ред. А.А.Данилова. – Пенза, 2005. – С.191-210.

4. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. 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, 2006. – С. 23-33.

5. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений – стратегическая теория XXI века // Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2007 – спецвипуск. Науково-технічний журнал. Черкаси: ЧДТУ, 2007. – С. 120-122.

6. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений – теория мирового значения // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2007. – № 1. – С. 152-160.

7. Кондратов В.Т. Фундаментальная теория избыточных измерений: особенности и обобщенная структура. Сообщение 1 // Законодательная и прикладная метрология. – 2009. – № 4. – С. 15-30.

8. Кондратов В.Т. Фундаментальная теория избыточных измерений // Официальный каталог. V-я Международная специализированная выставка-конкурс средств измерений, испытательного и лабораторного оборудования «МЕТРОЛОГИЯ-2009». Первый Всероссийского симпозиума метрологов. М.: ВВЦ. 19-21 мая 2009. – Москва. – С. 36-37.

9. Кондратов В.Т. Фундаментальная теория избыточных измерений: обобщенная структура и ее особенности. Сообщение 2.1 // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2009. – № 3. – С. 116-130.

10. Кондратов В.Т. Признаки фундаментальности физических теорий // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2009. – № 4. – С. 81-92.

11. РМГ 29-99. Метрология. Основные термины и определения. Издание официальное. Минск, 2002. – 44 с.

12. Стандартные образцы. Стандартные растворы для спектрального анализа. Калибровочные растворы. http://labtest.su/spectrometer/list-standards.html.

13. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. http://www. xumuk.ru/ssm/99.html.

14. Иррациональные числа. http://www.bymath.net/ studyguide/alg/sec/alg18.html.

15. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – К.: Вища шк., 1976. – 432 с.

16. Кондратов В.Т. Проблема работы с метрологическими числами – проблема, которая объединит метрологию, информатику и вычислительную технику // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2008. – № 7. – С. 13-22.

17. Юровицкий В.М. Компьютерная катастрофа приближается. Третья вычислительная революция / http://www.Ibe.ru/cgi– bin/href/Yurovitsky? 171.

18. Метрологическое обеспечение качества текстильных материалов и товаров / Методические указания к лабораторным работам по курсам „Общая теория измерений”, „Метрология, стандартизация и сертификация” и „Стандартизация, метрология и сертификация” для студентов специальностей 200503 – стандартизация и сертификация, 080401– товароведение и экспертиза товаров, 080301 – коммерция (торговое дело) и 220501 – управление качеством. – Иваново, 2004. – 24 с.

Надійшла 22.11.2009 р.