

**ТЕОРИЯ ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ: РЕШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ  
ЗАДАЧ ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН  
НЕНАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ С ПРИПИСЫВАЕМОЙ ОБЪЕКТУ  
ИЗМЕРЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ  
СООБЩЕНИЕ № 2.3**

*В сообщении 2.3 рассмотрены пути и методы решения метрологических задач избыточных измерений концентрации веществ в бинарных растворах на заданных длинах волн, с известными коэффициентами поглощения, с приписываемой объекту измерений нелинейной математической моделью, но при линейной функции преобразования оптико-электронного измерительного канала. Показана возможность исключения влияния на результат избыточных измерений не только параметров функции преобразования, но и некоторых параметров нелинейной математической модели, геометрических параметров оптических элементов и их отклонений от номинальных значений, а также показателей качества оптической части измерительного канала. В задачах данного типа, т.е. при измерениях на заданных длинах волн, широко используется метод эквивалентных воздействий.*

*Работа представляет интерес для ученых-метрологов, специалистов, магистров и аспирантов.*

*Ключевые слова: метрологические задачи, методы решения, избыточные измерения, концентрация веществ.*

V.T. KONDRATOV

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

**THE THEORY OF REDUNDANT MEASUREMENTS:  
THE DECISION OF METROLOGICAL PROBLEMS OF REDUNDANT MEASUREMENTS  
PHYSICAL QUANTITIES OF NOT DIRECTED ACTION WHEN A MATHEMATICAL MODEL  
OF THE MEASUREMENT OBJECT IS ASSIGNED  
THE MESSAGE № 2.3**

*Abstract – In work ways and methods of redundant measurements of physical quantities of not directed action with attributed to object of measurements by nonlinear mathematical model are considered and at linear function of transformation of the measuring channel.*

*Possibility of an exception of influence on result of redundant measurements not only parameters of transformation function, but also influencing parameters of nonlinear mathematical model, geometrical parameters of optical elements and their deviations from rating values, and also indicators of quality of an optical part of the measuring channel is shown. In problems of the given type, i.e. at measurements on the set lengths of waves, the method of equivalent influences is widely used. Examples of application of this method are given.*

*Definition is made of a method of the equivalent influences, used in redundant measurements, as sets of the operations, providing physical realization of mathematical model of process of measuring transformation of physically not realized "modeling" size, directed on change of conditions of process of measuring transformation for the purpose of an establishment of equivalence of reaction of the measuring channel on influence of "modeling" quantity.*

*The method of equivalent influences does possible effectively to solve many practically important metrological problems.*

*It is shown, that simple enough decision of the given problem takes place at use of numbers of the physical quantities which sizes are connected among themselves under the law of an arithmetic and geometrical progression.*

*The greatest accuracy of measurements is reached at use of a principle of symmetry, i.e. at a choice of numbers of the measured physical quantities differing among themselves for the sizes of binary increments  $+\Delta x_0$ ,  $-\Delta x_0$ , i.e.  $x_0 + \Delta x_0$ ,  $x_0 - \Delta x_0$ ,  $x_i + \Delta x_0$ ,  $x_i - \Delta x_0$ .*

*The received equations of redundant measurements of required concentration have that feature, that with their help the results of measurements led to an input of the measuring channel, instead of to an exit as it takes place at direct measurements are defined.*

*The maximum number of used numbers of physical quantities, – from four to six is shown, that, takes place at nonlinear dependence of result of measuring transformation on the measured quantity.*

*Only redundant measurements allow to carry out the decision of metrological problems. Reception of the additional information on parameters of linear function of transformation of the measuring channel gives the chance to carry out in time metrological self-checking and correction of its parameters and, thereby, to provide metrological super-reliability of work of corresponding measuring system.*

*For each concrete decision of a metrological problem or for each method of redundant measurements are resulted formalized informatively-redundancy model of the measuring channel which contain recommended numerical characteristics. These models expand our representations about redundant measurement methods and establish a positive feedback between developers of methods and measuring apparatuses and are the important attribute at creation of high-precision intellectual measuring systems.*

*The function charts of the digital measuring instruments realizing described methods of redundant measurements and ways of formation of numbers of measured physical quantities are developed.*

*It is shown, that many of the reduced schemes provide realization not one, and several methods of redundant measurements without structure change. The software of this or that method of measurements varies only.*

*All function charts of digital measuring instruments is, in our opinion, optimum and simple in realization. They provide an automatic exception of regular errors and, at realization of repeated measurements, reduction of casual components of an error of redundant measurements result.*

*Scientific break in fundamental metrology proceeds.*

**Введение**

Настоящее сообщение является завершающим в цикле статей по избыточным измерениям величин

разной физической природы при линейной функции преобразования измерительного канала. В работах [1, 2] рассмотрены пути и методы решения метрологических задач избыточных измерений физических величин направленного и ненаправленного действия с приписываемой объекту измерений математической моделью.

Представляет интерес рассмотрение путей и методов решения метрологических задач избыточных измерений физической величины ненаправленного действия, в частности, концентрации веществ в бинарных растворах для случаев, когда, с одной стороны, измерительный канал имеет линейную функцию преобразования, а математическая модель, приписываемая объекту измерений, является нелинейной. Пути и методы рассматриваются на примерах оптических измерений концентрации вещества в бинарных растворах. Оптические методы избыточных измерений, как и прямых, основаны на использовании явлений поглощения, отражения и рассеивания света, интерференции и дифракции, которые наблюдаются при воздействии потока оптического излучения той или иной длины волны или заданного спектрального состава на объект измерений. Ниже рассматриваются пути и методы решения метрологических задач с использованием явления поглощения потока оптического излучения исследуемым веществом. Измерительному преобразованию подвергается мощность ослабленного потока оптического излучения, прошедшего через бинарный раствор с исследуемым веществом и частично поглощенного. В настоящее время в теории избыточных измерений успешно развивается прикладное научное направление – избыточная концентратометрия. В работах [3– 12], например, нами описаны оптические измерения концентрации веществ в бинарных растворах с использованием методов избыточных измерений.

Избыточные измерения физических величин при приписываемой объекту измерений нелинейной математической модели также имеют свои особенности. Эти особенности связаны с видом конкретной математической модели, связывающей входные и выходные физические величины. Приписываемая объекту измерений нелинейная математическая модель описывает физическое явление или эффект, положенные в основу измерений, т.е. принцип измерений. В основу рассматриваемых метрологических задач положен принцип измерения на основе физического явления, которое математически описывается законом Бугера – Ламберта – Бера. Зависимость выходной и входной величин строго нелинейная.

При избыточных измерениях учитываются природа и характер измеряемой величины, вид ее зависимости от искомой величины, способы формирования необходимого и достаточного числа измеряемых физических величин, способы достижения эквивалентной реакции измерительного канала на воздействие, которое соответствует «модельной» физической величине, физически не воспроизводимой, а также параметры и факторы, определяющие условия и режимы измерений [2].

Показана возможность исключения влияния на результат избыточных измерений не только параметров функции преобразования, но и влияющих параметров нелинейной математической модели, геометрических параметров оптических элементов и их отклонений от номинальных значений при изготовлении, а также показателей качества оптической части канала.

Решение метрологических задач приводится без вывода и рассмотрения уравнений избыточных измерений для определения метрологических характеристик, параметров и показателей метрологической надежности. Достижение этих частных целей подробно описано в работе [13].

**Объект исследований** – процесс избыточных измерений концентрации с приписываемой объекту измерений нелинейной математической моделью.

**Предмет исследований** – процесс избыточных измерений концентрации веществ в бинарных растворах при решении метрологических задач с приписываемой объекту измерений математической моделью и при линейной функции преобразования измерительного канала.

**Целью работы** является ознакомление ученых и специалистов с путями и методами решения метрологических задач избыточных измерений физических величин ненаправленного действия на примере измерений концентрации веществ в бинарных растворах при приписываемой объекту измерений нелинейной математической модели и при линейной функции преобразования оптико-электронного измерительного канала.

#### **Результаты исследований**

##### **Метрологическая задача 1.18**

Рассмотрим пути и методы решения метрологической задачи избыточных измерений концентрации веществ в бинарных растворах спектрометрическими методами. В основу измерений положим физическое явление ослабления мощности параллельного монохроматического потока оптического излучения, проходящего через поглощающую среду. Данное физическое явление математически описывается законом Бугера – Ламберта – Бера вида

$$\Phi_x = \Phi_0 \cdot e^{-k_\lambda C_x l}, \quad (1)$$

где  $\Phi_x$  – мощность потока монохроматического излучения до и после прохождения им исследуемого вещества;  $k_\lambda$  – коэффициент поглощения исследуемого вещества на заданной длине волны;  $C_x$  – концентрация исследуемого вещества;  $l$  – толщина слоя вещества, который представляет собой нелинейную зависимость мощности потока оптического излучения на заданной длине волны от концентрации вещества в бинарном растворе.

При использовании бинарных растворов поток оптического излучения поглощается как

исследуемым веществом, так и растворителем. В этой связи, в заданном объеме раствора концентрация двух веществ рассматривается как одно целое, т.е. равная «1» или «100 %». В последнем случае концентрация поглощающего технологического растворителя определяется в процентах как  $(100 - C_x)$ . Учитывая вышеизложенное, закон Бугера – Ламберта – Бера запишем в виде:

$$\Phi_x = \Phi_0 \cdot e^{-(k_{\lambda 1} C_x + k_{\lambda 2} (100 - C_x)) l_k} \quad (2)$$

где  $k_{\lambda 1}$  и  $k_{\lambda 2}$  – коэффициенты поглощения потока оптического излучения на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  соответственно;  $l_k$  – длина кюветы заданного поперечного сечения (или диаметра).

Известно, что поток оптического излучения поглощается не только бинарным раствором, но и оптическими элементами оптико-электронного канала. Это связано с их загрязнением, запотеванием, отклонением значений их геометрических параметров от оптимальных и т.д. Окончательно, с учетом указанных процессов, ослабленный поток оптического излучения запишется уравнением величин

$$\Phi_x = \Phi_0 e^{-(k_{\lambda 1} C_x + k_{\lambda 2} (100 - C_x)) l_k + B_{\text{оп}} + B_{\text{пз}}}, \quad (3)$$

где  $B_{\text{оп}}$  – показатель ослабления, вносимого оптическими элементами, а  $B_{\text{пз}}$  – показатель загрязнения и запотевания оптических элементов.

При линейной функции преобразования измерительного канала получим нелинейную зависимость выходного напряжения от измеряемой ФВ  $C_x$ :

$$U_x = S'_l \Phi_0 e^{-(k_{\lambda 1} C_x + k_{\lambda 2} (100 - C_x)) l_k - B_{\text{оп}} - B_{\text{пз}}} + \Delta U', \quad (4)$$

где  $S'_l$  – крутизна преобразования ( $\{S'_l\} = \{S_l\}(1 + \gamma_l)$ );  $S_l$  – номинальная по значению крутизна преобразования,  $\Delta U'$  – смещение функции преобразования ( $\{\Delta U'\} = \{\Delta U\} + \{\Delta_{\text{ад}}\}$ );  $\Delta U$  – номинальное по значению смещение;  $\Delta_{\text{ад}}$  – аддитивная составляющая погрешности преобразования.

Решение данной метрологической задачи предполагает исключение влияния на результат избыточных измерений

не только абсолютных значений параметров функции преобразования оптико-электронного измерительного канала и их отклонений от номинальных значений, но и влияния загрязнения и запотевания оптических элементов, отклонения значений их геометрических параметров от номинальных при изготовлении.

Достаточно простое решение данной задачи имеет место при использовании рядов физических величин, размеры которых связаны между собой по закону арифметической прогрессии.

Наибольшая точность измерений достигается при использовании принципа симметрии, т.е. при выборе рядов измеряемых физических величин с равноотстоящими на числовой оси размерами, –

$$\left. \begin{aligned} \{C_1\} &= \{C_0\} + \{\Delta C_0\}, \{C_2\} = \{C_0\} - \{\Delta C_0\}, \\ \{C_3\} &= \{C_x\} + \{C_0\} + \{\Delta C_0\}, \{C_4\} = \{C_x\} + \{C_0\} - \{\Delta C_0\}, \{C_5\} = 100. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $C_0$  – нормированная по значению концентрация искомого вещества в технологическом растворе (или концентрация стандартного бинарного раствора вещества);  $\Delta C_0$  – нормированное по значению приращение концентрации.

Как видно из (5), при выборе размеров физической величины  $C_x$  (концентрации) используются симметричные бинарные приращения с размерами  $\pm\{\Delta C_0\}$  относительно размеров физических величин  $C_0$  и  $C_x + C_0$ , а также «модельной» величины  $C_5$  с нереальным значением концентрации. Равенство  $\{C_5\} = 100$  (см. (5)) физически реализовать не возможно. Однако возможно сформировать и получить выходной сигнал, характеризующий состояние измерительной системы, соответствующее данному условию. Для этого используется метод эквивалентных воздействий.

#### Определение

*Метод эквивалентных воздействий* – это совокупность операций, обеспечивающая физическую реализацию математической модели процесса измерительного преобразования «модельной» величины, физически не реализуемой, направленная на изменение условий процесса измерительного преобразования с целью установления эквивалентности реакции измерительной системы на воздействие «модельной» величиной.

При избыточных измерениях реализация процесса измерительного преобразования физически не реализуемых величин, осуществляется путем измерительного преобразования физической величиной нулевого или заранее рассчитанного размера, или сопряженной величины иной физической природы, чем измеряемая, например, электрической. В качестве примера можно привести нормированное изменение чувствительности сенсора (или измерительного канала в целом) на наперед заданное (нормированное) значение, при котором получают исходную и нормированно измененную (эквивалентную) реакцию

измерительного канала при воздействии на его вход одной и той же неэлектрической величины. В данном случае используется воздействие не на «сигнальный» вход сенсора, а на его управляющий вход. Вторым примером. Согласно математической модели избыточных измерений (5) необходимо осуществить измерительное преобразование мощности потока оптического излучения заданной длины волны, прошедшего через раствор с концентрацией  $C_5$ , причем  $\{C_5\}=100$ . Физически стопроцентную концентрацию многих веществ в бинарном растворе практически создать невозможно. С другой стороны известно, что при такой концентрации поток оптического излучения заданной длины волны должен быть полностью поглощен и воздействие на вход измерительного канала будет отсутствовать. Практически этот эффект можно реализовать двумя путями: а) при невозможности отключения сенсора – путем выключения источника потока оптического излучения, проходящего через объект исследований и б) при возможности отключения сенсора – путем подачи на вход измерительного канала (после сенсора) сигнала нулевого уровня. В этом случае воздействия осуществляются на блоки, формирующие сигналы, эквивалентные по своему действию входным «модельным».

Физические величины, воздействующие на параметры измерительного канала и обеспечивающие необходимую эквивалентную реакцию его на сформированные нормированные воздействия, называются сопряженными.

Метод эквивалентных воздействий делает возможным эффективно решать многие практически важные метрологические задачи измерения неэлектрических величин.

В описанных ниже спектральных методах измерения концентрации метод эквивалентных воздействий реализуется путем воздействия на исследуемый объект потоком оптического излучения нулевой мощности ( $\{\Phi_0\}=0$ ). Это эквивалентно прохождению потока через бинарный раствор со стопроцентной концентрацией искомого вещества. Появление выходного напряжения, соответствующего смещению функции преобразования измерительного канала, и является реакцией последнего на входное воздействие.

При выборе рядов измеряемых физических величин с размерами (5), состояние измерительной системы опишется системой нелинейных уравнений величин вида

$$\left. \begin{aligned} U_{x1} &= S'_л \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1}(C_0 + \Delta C_0) + k_{\lambda 2}(100 - (C_0 + \Delta C_0))]l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x2} &= S'_л \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1}(C_0 - \Delta C_0) + k_{\lambda 2}(100 - (C_0 - \Delta C_0))]l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x3} &= S'_л \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1}(C_x + (C_0 + \Delta C_0)) + k_{\lambda 2}(100 - (C_x + (C_0 + \Delta C_0)))]l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x4} &= S'_л \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1}(C_x + (C_0 - \Delta C_0)) + k_{\lambda 2}(100 - (C_x + (C_0 - \Delta C_0)))]l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x5} &= \Delta U'. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Решение системы нелинейных уравнений величин (6) и ей подобных весьма сложно и требует определенных навыков и внимательности. Опишем один из путей решения данной системы нелинейных уравнений величин.

Вначале определим разность напряжений  $U_{x1}$  и  $U_{x5}$ ,  $U_{x2}$  и  $U_{x5}$  (с целью исключения влияния напряжения смещения  $\Delta U'$ ), математически прологарифмируем их, затем определим разность и сумму полученных равенств. Разность решим относительно  $l_k$ . В результате получим уравнений избыточных измерений длины кюветы в виде

$$l_k = \frac{\ln[(U_{x2} - U_{x5}) / (U_{x1} - U_{x5})]}{k_2(k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2})\Delta C_0}, \quad (7)$$

где  $k_2 = 2$ .

Аналогичный результат можно получить, если выражения для разностей напряжений  $U_{x1}$  и  $U_{x5}$ ,  $U_{x2}$  и  $U_{x5}$ , разделить между собой, затем прологарифмировать и также решить относительно  $l_k$ :

$$l_k = \frac{\ln[(U_{x1} - U_{x5}) / (U_{x2} - U_{x5})]}{k_2[k_{\lambda 2} - k_{\lambda 1}]\Delta C_0}. \quad (8)$$

Сумму полученных равенств запишем в виде

$$\ln[(U_{x1} - U_{x5})(U_{x2} - U_{x5})] = k_2 \ln(S'_л \Phi_0) - k_2[k_{\lambda 1}C_0 + k_{\lambda 2}(100 - C_0)]l_k - k_2B_{оп} - k_2B_{пз}. \quad (9)$$

Аналогично определим разность напряжений  $U_{x3}$  и  $U_{x5}$ ,  $U_{x4}$  и  $U_{x5}$ , и математически прологарифмируем их. В результате получим:

$$\ln(U_{x3} - U_{x5}) = \ln(S'_л \Phi_0) - [k_{\lambda 1}(C_x + (C_0 + \Delta C_0)) + k_{\lambda 2}(100 - (C_x + (C_0 + \Delta C_0)))]l_k - B_{оп} - B_{пз} \quad (10)$$

$$\ln(U_{x4} - U_{x5}) = \ln(S'_л \Phi_0) - [k_{\lambda 1}(C_x + (C_0 - \Delta C_0)) + k_{\lambda 2}(100 - (C_x + (C_0 - \Delta C_0)))]l_k - B_{оп} - B_{пз}. \quad (11)$$

Сумму левых и правых частей равенств (10) и (11) запишем через логарифм произведения в виде:

$$\ln[(U_{x3} - U_{x5})(U_{x4} - U_{x5})] = k_2 \ln(S'_л \Phi_0) + k_2 [k_{\lambda 1}(C_x + C_0) + k_{\lambda 2}(100 - (C_x - C_0))] l_k + k_2 B_{оп} + k_2 B_{пз}. \quad (12)$$

Вычтем из равенства (12) равенство (9), а полученную разность решим относительно измеряемой величины  $C_x$  с подстановкой выражения (7) для  $l_k$ . Окончательно уравнение избыточных измерений концентрации искомого вещества

в бинарном растворе получим в виде

$$C_x = \Delta C_0 \frac{\ln \frac{(U_{x3} - U_{x5})(U_{x4} - U_{x5})}{(U_{x1} - U_{x5})(U_{x2} - U_{x5})}}{\ln \frac{(U_{x2} - U_{x5})}{(U_{x1} - U_{x5})}}. \quad (13)$$

Как видно из полученного уравнения избыточных измерений (13), на конечный результат влияет только погрешность воспроизведения нормированных по значению концентраций  $C_1$  и  $C_2$  ( $\{\Delta C_0\} = 0,5(\{C_1\} - \{C_2\})$ ) с помощью стандартных растворов веществ. Результат измерений получают «приведенным» к входу измерительного канала, а не к выходу.

Если априори известно, что смещение функции равно нулю, т.е.  $\{\Delta U'\} = 0$ , уравнение избыточных измерений упростится и примет вид:

$$C_x = \Delta C_0 \frac{\ln(U_{x3} U_{x4} / U_{x1} U_{x2})}{\ln(U_{x2} / U_{x1})}. \quad (14)$$

Из системы нелинейных уравнений величин (6) может быть оценена стабильность разности коэффициентов поглощения технологического раствора и исследуемого вещества, обусловленная изменениями длины  $l_k$  составной кюветы. Для этого используется уравнение измерений

$$\Delta k_{\lambda}(l_k) = k_{\lambda 2} - k_{\lambda 1} = \ln \left( \frac{U_{x1} - U_{x5}}{U_{x2} - U_{x5}} \right) / k_2 \Delta C_0 l_k, \quad (15)$$

полученное в результате решения отношения разностей первого и пятого, второго и пятого равенств системы (6) относительно  $\Delta k_{\lambda}$ .

Оценка значения крутизны преобразования измерительного канала осуществляется по уравнению величин

$$S'_л = \frac{U_{x1} - U_{x5}}{\Phi_0 e^{-(B_{оп} + B_{пз})} e^{-[k_{\lambda 1}(C_0 + \Delta C_0) + k_{\lambda 2}(100 - (C_0 + \Delta C_0))] l_k}} \quad (16)$$

при условии, что известны значения коэффициентов поглощения, принятые значения концентрации стандартного раствора, длина кюветы и показатели поглощения оптических элементов.

Если пренебречь затуханием потока оптического излучения в оптических элементах, то крутизны преобразования может быть определена по уравнению величин вида

$$S'_л = \frac{U_{x1} - U_{x5}}{\Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1}(C_0 + \Delta C_0) + k_{\lambda 2}(100 - (C_0 + \Delta C_0))] l_k}}. \quad (17)$$

Уравнение измерений смещения функции преобразования выводится из первого или из второго уравнений величин системы (6). Если, например, второе уравнение величин решить относительно смещения и подставить в него выражения для  $S'_л$  (16) и  $l_k$  (7), то получим уравнение измерений в виде

$$\Delta U' = U_{x2} - (U_{x1} - U_{x5}) \frac{e^{-[k_{\lambda 1}(C_0 - \Delta C_0) + k_{\lambda 2}(100 - (C_0 - \Delta C_0))] l_k}}{e^{-[k_{\lambda 1}(C_0 + \Delta C_0) + k_{\lambda 2}(100 - (C_0 + \Delta C_0))] l_k}} = U_{x2} - (U_{x1} - U_{x5}) \frac{e^{-[(C_0 - \Delta C_0)(k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2}) + k_{\lambda 2} 10]}}{e^{-[(C_0 + \Delta C_0)(k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2}) + k_{\lambda 2} 10]}} \quad (18)$$

С учетом (7), окончательно получим

$$\Delta U' = U_{x2} - (U_{x1} - U_{x5}) \frac{e^{-\left[ \frac{C_0(k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2}) + 100k_{\lambda 2} - 1}{\Delta C_0(k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2})} \right] \frac{1}{k_2} \ln \frac{U_{x2} - U_{x5}}{U_{x1} - U_{x5}}}}{e^{-\left[ \frac{C_0(k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2}) + 100k_{\lambda 2} + 1}{\Delta C_0(k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2})} \right] \frac{1}{k_2} \ln \frac{U_{x2} - U_{x5}}{U_{x1} - U_{x5}}}}. \quad (19)$$

В тех случаях, когда необходимо определить значение крутизны преобразования с высокой точностью, вводится дополнительный, обычно первый, такт измерительного преобразования при незаполненных (пустых) камерах составной кюветы, что соответствует нулевому значению концентрации, т.е.  $\{C_0\} = 0$ . Такой прием также является разновидностью метода эквивалентных воздействий.

В этом случае в математическую модель (5) добавится еще одна составляющая – ФВ  $C_6$  и она примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \{C_1\} = 0, \{C_2\} = \{C_0\} + \{\Delta C_0\}, \\ \{C_3\} = \{C_0\} - \{\Delta C_0\}, \{C_4\} = \{C_x\} + \{C_0\} + \{\Delta C_0\}, \\ \{C_5\} = \{C_x\} + \{C_0\} - \{\Delta C_0\}, \{C_6\} = 100. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

При выборе рядов измеряемых физических величин с размерами (20), состояние измерительного системы опишется системой нелинейных уравнений величин вида

$$\left. \begin{aligned} U_{x1} &= S'_л \Phi_0 e^{-(B_{оп} + B_{пз})} + \Delta U', \\ U_{x2} &= S'_л \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1}(C_0 + \Delta C_0) + k_{\lambda 2}(100 - (C_0 + \Delta C_0))]l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x3} &= S'_л \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1}(C_0 - \Delta C_0) + k_{\lambda 2}(100 - (C_0 - \Delta C_0))]l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x4} &= S'_л \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1}(C_x + (C_0 + \Delta C_0)) + k_{\lambda 2}(100 - (C_x + (C_0 + \Delta C_0)))]l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x5} &= S'_л \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1}(C_x + (C_0 - \Delta C_0)) + k_{\lambda 2}(100 - (C_x + (C_0 - \Delta C_0)))]l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x6} &= \Delta U'. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

В данном случае уравнение избыточных измерений крутизны преобразования

$$S'_л = \frac{U_{x1} - U_{x6}}{\Phi_0 e^{-(B_{оп} + B_{пз})}} \quad (22)$$

не зависит от значений коэффициентов поглощения, принятых значений концентрации стандартного раствора и от длины кюветы.

Для технического решения первого варианта поставленной задачи может быть использована информативно-избыточная модель измерительного канала цифрового измерителя концентрации вещества в бинарном растворе, которая в общем виде записывается следующим образом:

$$G_{0\lambda} \xrightarrow[\Phi_{\lambda 0}]{AM} \prod_{i=1}^{i=n} \Phi_{xi} \xrightarrow[\tau_{пр, c}]{\% \text{, ppm/час}} U_{ли} \xrightarrow[\Delta f, \text{кГц}]{\substack{k_{yc} \\ \Delta U_{л}, \text{В АЦП, дв.р.} \\ f_d, \text{кГц}}} N_{xi} \Big|_{i=1}^{i=n} \quad (23)$$

Формализованная информативно-избыточная модель (21) читается следующим образом: 1) для измерений используется поток оптического излучения заданной длины волны  $\lambda_0$ ; 2) осуществляется измерение концентрации исследуемого вещества в бинарном растворе; 3) измерительному преобразованию подлежат  $n$  однородных физических величин с установленными размерами; 4) используется амплитудная модуляция (AM) потока оптического излучения; 5) модулированные потоки оптического излучения  $\Phi_{xi}$  поочередно преобразуются в соответствующие напряжения; 6) измерительному каналу приписана линейная функция преобразования; 7) задается расчетное значение нестабильности  $\% \text{}$  параметров функции преобразования измерительного канала (предпочтительно  $S'_л$ ); 8) задается время преобразования  $\tau_{пр}$  в секундах, при котором осуществляется такт измерительного преобразования физической величины (концентрации); 9) при решении метрологической задачи осуществляется управление (в данном случае аналоговое) крутизной преобразования и смещением функции преобразования измерительного канала; 10) рассчитывается и записывается рекомендуемое значение коэффициента усиления  $k_{yc}$  измерительного канала (или значение параметра  $S'_л$ ); 11) рассчитывается и устанавливается рекомендуемое значение полосы пропускания  $\Delta f$  (в килогерцах) измерительного канала; 12) аналого-цифровое преобразование выходного сигнала измерительного канала осуществляется многоразрядным АЦП; 13) рекомендуемая частота дискретизации АЦП  $f_d$  (в килогерцах). 14) результаты промежуточных преобразования в виде кодов чисел  $N_{xi}$  запоминаются в памяти процессора.

Допускаются нововведения в формализованную модель, обеспечивающие приближенность ее к реальной физической модели.

Для рассматриваемого случая может быть рекомендована следующая конкретная информативно-избыточная модель измерительного канала цифрового измерителя концентрации вещества в бинарном растворе:

$$G_{0\lambda}^{AM} \Rightarrow \prod_{\Phi_0}^{C_{xi}|_{i=1}^{i=5}} \Rightarrow U_{\Pi i} \left| \begin{array}{l} \% \leq 5 \text{ ppm/час} \\ \tau_{\text{пр}} \leq 0,2 \text{ с} \end{array} \right. = S'_{\Pi} C_{xi} + \Delta U'_{\Pi} \left| \begin{array}{l} k_{\text{ус}} \approx 1 \cdot 10^3 \\ \Delta U_{\text{л}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ В} \\ \Delta f = 100 \text{ кГц} \end{array} \right. \Rightarrow N_{xi}|_{i=1}^{i=5} \quad (24)$$

На рис. 1. приведена функциональная схема цифрового измерителя концентрации вещества в бинарных растворах по данным работы [9] (без системы управления наполнением кювет), где ИМИ – источник монохроматического излучения; ФЛ1 и ФЛ2 – фокусирующие линзы; СК – составная кювета; РК – рабочая камера для исследуемого раствора; КС – камера для стандартного раствора; ФП – фотоприемник; Ус – усилитель; ИК – измерительный канал; МК – микроконтроллер. Отметим, что на сегодняшний день перспективно использовать как микроконтроллеры, так и микроконвертеры, функциональные возможности которых достаточны для решения метрологических задач

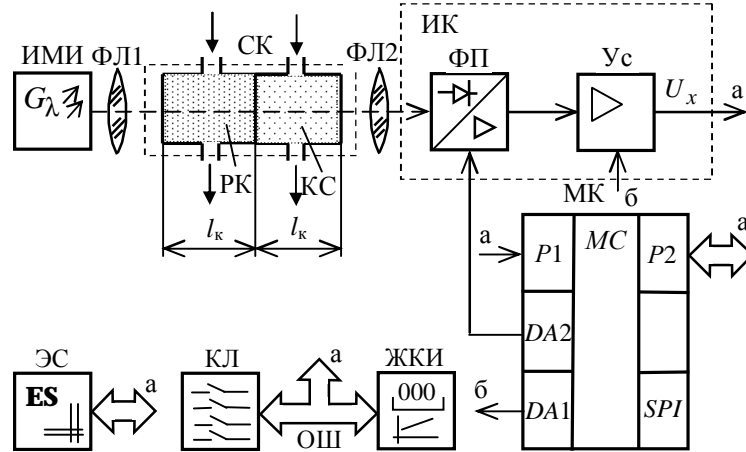


Рис. 1. Функциональная схема цифрового измерителя концентрации вещества в бинарных растворах

Рабочую камеру РК заполняют бинарным раствором с неизвестной концентрации искомого вещества, а камеру стандартного раствора КС – технологическим раствором с принятым значением концентрации искомого вещества. Порядок заполнения камер устанавливается в соответствии с очередностью измерительного преобразования физических величин, размеры которых связаны между собой согласно математической модели (5) или (18). Выходные сигналы встроенных в микроконтроллер МК цифроаналоговых преобразователей (см. порты DA1 и DA2) используются для решения задачи метрологического самоконтроля, т.е. для подстройки значений параметров  $S'_{\Pi}$  и  $\Delta U'_{\Pi}$ .

В цифровых измерителях концентрации вещества в бинарных растворах операции заполнения камер составной кюветы растворами, операции контроля уровня и слива осуществляются автоматически с помощью системы клапанов и гидронасоса, управляемых по командам, поступающим с МК (на рис. 1 не показано).

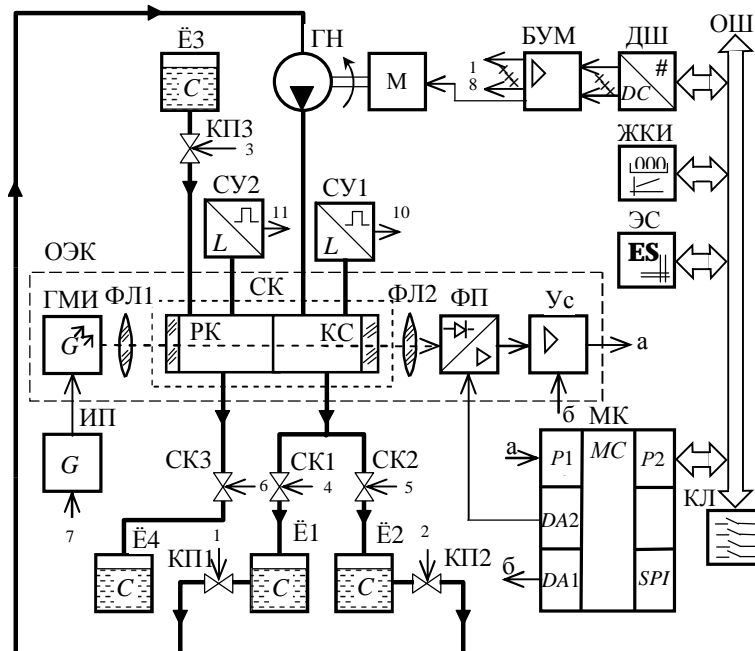


Рис. 2. Функциональная схема автоматического цифрового измерителя концентрации веществ в бинарных растворах

В качестве примера на рис 2 приведена функциональная схема автоматического цифрового измерителя концентрации, где ИП – источник питания; ОЭК – оптико-электронный канал; ГМИ – генератор монохроматического излучения; ФЛ1 – фокусирующая линза; СК – составная кювета; РК – рабочая камера; КС – камера для стандартного раствора; ФЛ2 – вторая фокусирующая линза; ФП – фотоприемник с предусилителем, Ус – усилитель; МК – микроконвертор, ДШ – дешифратор (с предварительной установкой кода), БУМ – блок усилителей мощности, ЖКИ – жидкокристаллический индикатор, Ё1, Ё2, Ё3 и Ё4 – ёмкости с растворами известной ( $C_1, C_2$ ) и неизвестной ( $C_x$ ) концентраций исследуемого вещества, ГН – гидронасос с двигателем, КП1, КП2 и КП3 – первый, второй и третий клапаны подачи раствора, СК1, СК2 и СК3 – первый, второй и третий сливные клапана, СУ1 и СУ2 – первый и второй сенсоры уровня, М – двигатель.

По функциональной схеме, приведенной на рис. 2, не сложно понять сущность процесса измерения концентрации в соответствии с математическими моделями (6) или (21). Подробно работа измерителя рассматривается в работе [10]. В патентах [3– 12] описаны методы избыточных измерений и технические решения цифровых измерителей концентрации при линейной и нелинейной функциях преобразования измерительного канала. Выходные сигналы встроенных цифроаналоговых преобразователей (см. порты DA1 и DA2) используются для решения задачи метрологического самоконтроля, т.е. для подстройки значений параметров  $S'_n$  и  $\Delta U'$ .

Особое внимание при решении метрологических задач избыточных измерений свойств объекта измерений с приписываемой математической моделью следует уделять корректному составлению адекватной математической модели состояния измерительной системы в дискретные моменты времени и ее решению. Это всегда окупается хорошими достигаемыми результатами по точности, метрологической надежности и быстродействию.

**Метрологическая задача 1.19**

Рассмотрим другой путь решения метрологической задачи избыточных измерений концентрации веществ в бинарных растворах при использовании минимально возможного числа измеряемых физических величин. За основу выберем ряды физических величин, размеры которых составляют возрастающую арифметическую прогрессию

$$\left. \begin{aligned} \{C_1\} = 0, \{C_2\} = \{C_0\} + \{\Delta C_0\}, \\ \{C_3\} = \{C_x\} + \{C_0\}, \{C_4\} = 100. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

В данной задаче также используется метод эквивалентных воздействий. При выборе рядов измеряемых физических величин с размерами (25), состояние измерительной системы опишется следующей математической моделью:

$$\left. \begin{aligned} U_{x1} = S'_n \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1} C_0 + k_{\lambda 2} (100 - C_0)] l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x2} = S'_n \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1} (C_0 + \Delta C_0) + k_{\lambda 2} (100 - (C_0 + \Delta C_0))] l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x3} = S'_n \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1} (C_x + C_0) + k_{\lambda 2} (100 - (C_x + C_0))] l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x4} = \Delta U'. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Вначале находятся разности напряжений  $U_{x1}$  и  $U_{x4}$ ,  $U_{x2}$  и  $U_{x4}$ ,  $U_{x3}$  и  $U_{x4}$ , математически логарифмируются и определяются разности полученных равенств, которые решаются относительно  $l_k$ . В результате получают два уравнения избыточных измерений длины кюветы, выраженные через напряжения, концентрации и коэффициенты поглощения, в виде:

$$l_k = \frac{1}{(k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2}) C_x} \ln \frac{U_{x3} - U_{x4}}{U_{x1} - U_{x4}} \quad (27)$$

и

$$l_k = \frac{1}{(k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2}) \Delta C_0} \ln \frac{U_{x1} - U_{x4}}{U_{x2} - U_{x4}}. \quad (28)$$

Правые части равенств (27) и (28) приравняются между собой с целью определения  $C_x$ . Уравнение избыточных измерений примет, окончательно, вид:

$$C_x = \Delta C_0 \left[ \ln \frac{U_{x3} - U_{x4}}{U_{x1} - U_{x4}} / \ln \frac{U_{x1} - U_{x4}}{U_{x2} - U_{x4}} \right]. \quad (29)$$

Из (29) видно, что для определения концентрации искомого вещества необходимо меньшее число операций, чем в метрологической задаче 1.18. Результат измерений зависит только от погрешности воспроизведения концентрации  $\Delta C_0$ . Результат измерений получают «приведенным» к входу измерительного канала, а не к выходу, как это имеет место при прямых измерениях.



Крутизна преобразования измерительного канала определяется согласно уравнению избыточных измерений

$$S'_л = \frac{U_{x1} - U_{x4}}{\Phi_0 e^{-(B_{оп} + B_{пз})} e^{-\frac{k_{\lambda 1} C_0 + k_{\lambda 2} (100 - C_0)}{(k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2}) \Delta C_0} \ln \frac{U_{x1} - U_{x4}}{U_{x2} - U_{x4}}}} \quad (30)$$

при условии, что известны значения коэффициентов поглощения  $k_{\lambda 1}$  и  $k_{\lambda 2}$ , принятые значения концентраций  $\Delta C_0$  и  $C_0$  стандартного раствора, длина кюветы  $l_k$  и показатели  $B_{оп}$  и  $B_{пз}$  ослабления и загрязнения оптических элементов.

Уравнение измерений смещения функции преобразования выводится из второго уравнения величин системы (24) путем решения его относительно  $\Delta U'$ , подстановки вместо  $S'_л$  и  $l_k$  соответствующих уравнений величин (30) и (28) и

приведения подобных членов. В результате уравнение измерений примет вид:

$$\Delta U' = U_{x2} - (U_{x1} - U_{x4}) e^{-\frac{[k_{\lambda 1}(C_0 + \Delta C_0) + k_{\lambda 2}(100 - (C_0 + \Delta C_0))] \ln \frac{U_{x1} - U_{x4}}{U_{x2} - U_{x4}}}{(k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2}) \Delta C_0}} \frac{e^{-\frac{k_{\lambda 1} C_0 + k_{\lambda 2} (100 - C_0)}{(k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2}) \Delta C_0} \ln \frac{U_{x1} - U_{x4}}{U_{x2} - U_{x4}}}}{e^{-\frac{k_{\lambda 1} C_0 + k_{\lambda 2} (100 - C_0)}{(k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2}) \Delta C_0} \ln \frac{U_{x1} - U_{x4}}{U_{x2} - U_{x4}}}}}. \quad (31)$$

Для технического решения данной метрологической задачи может быть рекомендована информативно-избыточная модель измерительного канала вида:

$$G_{0\lambda}^{\overline{AM}} \Rightarrow_{\Phi_0} \prod_{A_m}^{C_{xi} \Big|_{i=1}^{i=4}} \Rightarrow_{m} \Phi_{xi} \Big|_{\tau_{пр} \leq 0,1 \text{ с}} \Rightarrow_{U_{ли}} \Phi_{xi} \Big|_{\% \leq 1 \text{ ppm/час}} = S'_л C_{xi} + \Delta U'_л \left| \begin{array}{l} k_{yc} \cong 1 \cdot 10^3 \\ \Delta U_{л} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ В} \quad \text{АЦП14} \\ \Delta f = 200 \text{ кГц} \quad \Rightarrow_{f_{д} = 100 \text{ кГц}} N_{xi} \Big|_{i=1}^{i=4} \end{array} \right. \quad (32)$$

Метод избыточных измерений, описанный системой математических моделей (25) – (31), реализуется с помощью цифрового измерителя концентрации веществ в бинарных растворах, структурная схема которого приведена на рис. 2.

Повышение быстродействия избыточных измерений более чем в два раза может быть достигнута при стабильных параметрах измерительного канала и при выполнении первого, второго и четвертого тактов измерительных преобразований (однократных или многократных) физических величин  $C_1$  и  $C_2$  принятых размеров только один раз за 10 мин., за 1 час или за 8 часов.

**Метрологическая задача 1.20**

Рассмотрим решение метрологической задачи избыточных измерений концентрации веществ в бинарных растворах при использовании первого такта измерительного преобразования искомой концентрации для оценки поддиапазона измерений. В этом случае осуществляется измерительное преобразование искомой физической величины  $C_x$ . За основу выбирается минимальное число рядов физических величин, размеры которых связаны между собой по закону возрастающей арифметической прогрессии:

$$\left. \begin{array}{l} \{C_1\} = \{C_x\}, \{C_2\} = \{C_0\}, \\ \{C_3\} = \{C_x\} + \{C_0\}, \{C_4\} = 100. \end{array} \right\} \quad (33)$$

В систему размеров физических величин (33) введена и ФВ  $C_4$  с размером  $\{C_4\} = 100$ . Реализации процесса измерительного преобразования данной физической величины, как было показано выше, осуществляется с использованием метода эквивалентных воздействий (при нулевом значении потока оптического излучения в четвертом такте). В данном случае состояние измерительной системы опишется следующей математической моделью:

$$\left. \begin{array}{l} U_{x1} = S'_л \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1} C_x + k_{\lambda 2} (100 - C_x)] l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x2} = S'_л \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1} C_0 + k_{\lambda 2} (100 - C_0)] l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x3} = S'_л \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1} (C_x + C_0) + k_{\lambda 2} \{100 - (C_x + C_0)\}] l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x4} = \Delta U'. \end{array} \right\} \quad (34)$$

Как и в предыдущей задаче, вначале находятся разности напряжений  $U_{x1}$  и  $U_{x4}$ ,  $U_{x2}$  и  $U_{x4}$ ,  $U_{x3}$  и  $U_{x4}$ , которые математически логарифмируются. Затем попарно определяются разности третьего и второго,

третьего и первого логарифмов. Они решаются относительно  $l_k$ . В результате получают два уравнения избыточных измерений длины кюветы, выраженные через напряжения, концентрации и коэффициенты поглощения:

$$l_k = \frac{\ln(U_{x3} - U_{x4}) - \ln(U_{x2} - U_{x4})}{(k_{\lambda 2} - k_{\lambda 1})C_x} \quad (35)$$

и

$$l_k = \frac{\ln(U_{x3} - U_{x4}) - \ln(U_{x1} - U_{x4})}{(k_{\lambda 2} - k_{\lambda 1})C_0} \quad (36)$$

Уравнение избыточных концентрации искомого вещества в бинарном растворе получают в результате приравнивания правых частей равенств (34) и (35) и решения нового равенства относительно  $C_x$ :

$$C_x = C_0 \frac{\ln(U_{x3} - U_{x4}) - \ln(U_{x2} - U_{x4})}{\ln(U_{x3} - U_{x4}) - \ln(U_{x1} - U_{x4})} \quad (37)$$

Погрешность метода определяется только погрешностью воспроизведения нормированной по значению концентрации  $C_0$ . Уменьшение случайной составляющей погрешности измерений обеспечивается многократными измерениями рядов физических величин с последующей статистической обработкой полученных результатов промежуточных измерений, но это уже относится к избыточным измерениям второго рода.

В рассматриваемом случае определение значения крутизны линейной функции преобразования измерительного канала осуществляется путем нахождения разности напряжений  $U_{x3}$  и  $U_{x1}$  и решения их относительно  $S'_l$ . В результате получим уравнение измерений

$$S'_l = \frac{U_{x3} - U_{x1}}{\Phi_0 e^{-(B_{оп} + B_{пз}) - k_{\lambda 2} 100 l_k} e^{-C_x (k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2}) l_k} [e^{-C_0 (k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2}) l_k} - 1]}} \quad (38)$$

Смещение функции преобразования определяется из второго уравнения величин системы (34) путем решения его относительно  $\Delta U'$ , подстановки вместо  $S'_l$  соответствующего уравнения величин (38) и приведения подобных членов. Уравнение измерений примет вид:

$$\Delta U' = U_{x2} - \left[ (U_{x3} - U_{x1}) \frac{e^{-C_0 [k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2}] l_k}}{e^{-C_x (k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2}) l_k} [e^{-C_0 (k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2}) l_k} - 1]}} \right] \quad (39)$$

Для технического решения данной метрологической задачи может быть использована информативно-избыточная модель измерительного канала вида (32).

Метод избыточных измерений, описанный системой математических моделей (34) – (39), также реализуется с помощью цифрового измерителя концентрации веществ в бинарных растворах, структурная схема которого приведена на рис. 2.

### Метрологическая задача 1.21

Рассмотрим вариант решения метрологической задачи избыточных измерений концентрации веществ в бинарных при использовании рядов физических величин, размеры которых связаны между собой по закону возрастающих арифметической и геометрической прогрессий, т.е.

$$\left. \begin{aligned} \{C_1\} &= \{C_0\}, \\ \{C_2\} &= k_l \{C_0\}, \\ \{C_3\} &= \{C_x\} + \{C_0\}, \\ \{C_4\} &= 100. \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

где значение коэффициента локальной линеаризации  $k_l$  известно с установленной погрешностью.

В данном случае состояние измерительной системы «ОИ – СИИ» опишется следующей системой нелинейных уравнений величин:

$$\left. \begin{aligned} U_{x1} &= S'_l \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1} C_0 + k_{\lambda 2} (100 - C_0)] l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x2} &= S'_l \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1} k_l C_0 + k_{\lambda 2} (100 - k_l C_0)] l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x3} &= S'_l \Phi_0 e^{-[k_{\lambda 1} (C_x + C_0) + k_{\lambda 2} \{100 - (C_x + C_0)\}] l_k - B_{оп} - B_{пз}} + \Delta U', \\ U_{x4} &= \Delta U'. \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Решим систему нелинейных уравнений величин (41) относительно  $C_x$ . Для этого находятся разности напряжений  $U_{x1}$  и  $U_{x4}$ ,  $U_{x2}$  и  $U_{x4}$ ,  $U_{x3}$  и  $U_{x4}$ , которые математически логарифмируются. Затем

попарно определяются разности третьего и первого, второго и первого логарифмов, которые решаются относительно  $l_k$ . В результате получают два уравнения избыточных измерений длины кюветы в виде:

$$l_k = \frac{\ln(U_{x1} - U_{x4}) - \ln(U_{x3} - U_{x4})}{C_x(k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2})}, \quad (42)$$

$$l_k = \frac{\ln(U_{x1} - U_{x4}) - \ln(U_{x2} - U_{x4})}{(k_{\lambda} - 1)(k_{\lambda 1} - k_{\lambda 2})C_0}. \quad (43)$$

Уравнение избыточных измерений концентрации искомого вещества в бинарном растворе получим, разделив (42) на (43) и решив полученное равенство относительно искомой величины:

$$C_x = C_0(k_{\lambda} - 1) \frac{\ln(U_{x3} - U_{x4}) - \ln(U_{x1} - U_{x4})}{\ln(U_{x2} - U_{x4}) - \ln(U_{x1} - U_{x4})}. \quad (44)$$

Определение значения крутизны преобразования осуществляется таким же образом, как и в метрологической задаче 1.19.

Для технического решения данной метрологической задачи может быть использована информативно-избыточная модель измерительного канала вида:

$$G_{0\lambda} \stackrel{AM}{\Rightarrow} \prod_{\Phi_0} \downarrow \prod_{A_m}^{C_{xi}} \Phi_{xi} \Rightarrow U_{\lambda i} \left| \begin{array}{l} \% \leq 1 \text{ ppm/час} \\ \tau_{\text{пр}} \leq 0,1 \text{ с} \end{array} \right. = S'_{\lambda} C_{xi} + \Delta U'_{\lambda} \left| \begin{array}{l} k_{yc} \cong 1 \cdot 10^3 \\ \Delta U_{\lambda} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ В} \\ \Delta f = 200 \text{ кГц} \end{array} \right. \stackrel{AЦП16}{\Rightarrow} N_{xi} \Big|_{i=1}^{i=4}. \quad (45)$$

Реализации процессов измерительного преобразования выбранных физических величин осуществляется так же, как и в предыдущей задаче.

Сам метод избыточных измерений, описанный системой математических моделей (40) – (44), реализуется, как и предыдущий, с помощью цифрового измерителя концентрации веществ, структурная схема которого приведена на рис. 2.

Возможны и другие варианты решения метрологических задач при использовании рядов физических величин, размеры которых связаны между собой комбинированным образом, – по закону арифметической и геометрической прогрессий, например:

$$\left. \begin{array}{l} \{C_1\} = \{C_0\}, \{C_2\} = k_{\lambda} \{C_0\}, \\ \{C_3\} = \{C_x\} + k_{\lambda} \{C_0\}, \{C_4\} = 100. \end{array} \right\} \quad (46)$$

В частности, задачи избыточных измерений концентрации вещества в бинарном растворе при использовании рядов физических величин, размеры которых связаны между собой только по закону геометрической прогрессии с возрастающей (при  $k_{\lambda} > 1$ ) или убывающей (при  $k_{\lambda} < 1$ ) последовательности, т.е. при

$$\left. \begin{array}{l} \{C_1\} = \{C_0\}, \{C_2\} = k_{\lambda} \{C_0\}, \\ \{C_3\} = \{C_x\}, \{C_4\} = k_{\lambda} \{C_x\}, \{C_5\} = 100, \end{array} \right\} \quad (47)$$

решаются при  $k_{\lambda} = 2$ , т.е. путем использования двух идентичных кювет. При других значениях коэффициента локальной линеаризации  $k_{\lambda}$  физически достаточно сложно (и трудоемко) подготовить раствор с концентрацией  $k_{\lambda} \{C_x\}$  или осуществить эквивалентное преобразование, обеспечивающее получение выходного сигнала измерительного канала, соответствующего мощности ослабленного потока оптического излучения, прошедшего через технологический раствор с концентрацией искомого вещества  $C_4 = k_{\lambda} C_x$ .

Таким образом, в избыточных измерениях при линейной функции преобразования измерительного канала существуют свои особенности и ограничения, особенно при нелинейной математической модели, приписываемой объекту измерений. Более подробно разные подходы и методы избыточных измерений концентрации описаны в работах [3-12].

Ознакомиться с теорией и методами избыточных измерений можно по работам, приведенным в [14].

**Выводы**

Завершен цикл статей по путям и методам избыточных измерений физических величин направленного и ненаправленного действия с приписываемой объекту измерений математической моделью и при линейной функции преобразования измерительного канала.

Показана возможность исключения влияния на результат избыточных измерений не только параметров функции преобразования, но и влияющих параметров нелинейной математической модели,

геометрических параметров оптических элементов и их отклонений от номинальных значений, а также показателей качества оптической части измерительного канала. В задачах данного типа, т.е. при измерениях на заданных длинах волн, широко используется метод эквивалентных воздействий. Приведены примеры применения этого метода.

Дано определение методу эквивалентных воздействий, используемого в избыточных измерениях, как совокупности операций, обеспечивающая физическую реализацию математической модели процесса измерительного преобразования физически не реализуемой «модельной» величины, направленная на изменение условий процесса измерительного преобразования с целью установления эквивалентности реакции измерительного канала на воздействие «модельной» величины.

Метод эквивалентных воздействий делает возможным эффективно решать многие практически важные метрологические задачи.

Показано, что достаточно простое решение данной задачи имеет место при использовании рядов физических величин, размеры которых связаны между собой по закону арифметической и/или геометрической прогрессии.

Наибольшая точность измерений достигается при использовании принципа симметрии, т.е. при выборе рядов измеряемых физических величин, отличающихся между собой на размеры бинарных приращений  $+\Delta x_0$  и  $-\Delta x_0$ , т.е.  $x_0 + \Delta x_0$ ,  $x_0 - \Delta x_0$ ,  $x_i + \Delta x_0$ ,  $x_i - \Delta x_0$  и т.п.

Полученные уравнения избыточных измерений искомой концентрации имеют ту особенность, что с их помощью определяются результаты измерений, «приведенные» к входу измерительного канала, а не к выходу, как это имеет место при прямых измерениях.

Рассмотрено ряд вариантов решения метрологических задач, отличающиеся между собой способами формирования рядов измеряемых физических величин, размеры которых составляют арифметическую и/или геометрическую прогрессии. Рассмотрены методы избыточных измерений при условии невозможности формирования физической величины нулевого размера.

Показано, что максимальное число используемых рядов физических величин, – от четырех до шести, имеет место при нелинейной зависимости результата измерительного преобразования от измеряемой величины.

Только избыточные измерения позволяют осуществить решение метрологических задач. Получение дополнительной информации о параметрах линейной функции преобразования измерительного канала дает возможность вовремя осуществить метрологический самоконтроль и коррекцию его параметров и, тем самым, обеспечить метрологическую сверхнадежность работы соответствующей измерительной системы.

Для каждого конкретного решения метрологической задачи или для каждого метода избыточных измерений приведены формализованные информативно-избыточные модели измерительного канала, которые содержат рекомендуемые числовые характеристики. Эти модели расширяют наши представления о методах избыточных измерений и устанавливают положительную обратную связь между разработчиками методов и средств измерений и являются важным атрибутом при создании высокоточных интеллектуальных измерительных систем.

Разработаны функциональные схемы цифровых измерителей, реализующие описанные методы избыточных измерений и способы формирования рядов измеряемых физических величин.

Показано, что многие из приведенных схем обеспечивают реализацию не одного, а нескольких методов избыточных измерений без изменения структуры. Меняется только ряд измеряемых физических величин и программное обеспечение того или иного метода измерений.

Все функциональные схемы цифровых измерителей является, на наш взгляд, оптимальными и простыми в реализации. Они обеспечивают автоматическое исключение систематических погрешностей и, при осуществлении многократных измерений, уменьшение случайных составляющих погрешности результата избыточных измерений.

Научный прорыв в фундаментальной метрологии продолжается.

## Литература

1. Кондратов В. Т. Теория избыточных измерений: решение метрологических задач избыточных измерений физических величин направленного действия с приписываемой объекту измерений математической моделью. Сообщение 2.1 / В. Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – № 1 – С. 194–200.
2. Кондратов В. Т. Теория избыточных измерений: решение метрологических задач избыточных измерений физических величин ненаправленного действия с приписываемой объекту измерений математической моделью. Сообщение № 2.2 / В. Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – № 2 – С. 180-190.
3. Декларацийний пат. 66644 Україна, МПК G01N 21/85, G01J 3/00. Спосіб визначення концентрації речовин / Кондратов В.Т., Сітар В. Б.; заявник и патентовласник Інститут кібернетики НАН України. – № 2003087738; заявл. 14.08.03; опубл. 15.03.06, Бюл. № 3.
4. Декларацийний пат. 68679 Україна, МПК G01J 1/44, G01N 21/85. Пристрій для вимірювання концент-рації речовин / Кондратов В.Т., Сітар В. Б.; заявник и патентовласник Інститут кібернетики НАН

України. – № 2003098743; заявл. 25.09.03; опубл. 16.08.04, Бюл. № 8.

5. Пат. 75180 Україна, МПК G01N 21/27, G01N 21/00. Спосіб визначення концентрації речовин / Кондратов В.Т., Сітар В. Б.; заявник и патентовласник Інститут кібернетики НАН України. – № 2004021114; заявл. 16.02.04; опубл. 15.03.06, Бюл. № 3.

6. Пат. 75703 Україна, МПК G01N 21/61. Цифровий вимірювач концентрації речовин / Кондратов В.Т., Сітар В. Б.; заявник и патентовласник Інститут кібернетики НАН України. – № 2004032055; заявл. 19.03.04; опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.

7. Пат. 77858 Україна, МПК G01N 21/85, G01J 3/00. Спосіб визначення концентрації речовин / Кондратов В.Т., Сітар В. Б.; заявник и патентовласник Інститут кібернетики НАН України. – № a200503474; заявл. 13.04.05; опубл. 15.01.07, Бюл. № 1.

8. Пат. 78065 Україна, МПК G01N 21/85, G01J 3/00. Спосіб визначення концентрації речовин/Кондратов В.Т., Сітар В. Б.; заявитель и патентовласник Інститут кібернетики НАН України. – № a200500302; заявл. 13.01.05; опубл. 15.02.07, Бюл. № 2.

9. Пат. 78633 Україна, МПК G01N 21/85, G01J 3/00. Спосіб визначення концентрації речовин / Кондратов В.Т., Сітар В. Б.; заявник и патентовласник Інститут кібернетики НАН України. – № a200507006; заявл. 15.07.05; опубл. 10.04.07, Бюл. № 4.

10. Пат. 80030 Україна, МПК G01N 21/61. Цифровий вимірювач концентрації речовин / Кондратов В.Т., Сітар В. Б.; заявник и патентовласник Інститут кібернетики НАН України. – № a200509363; заявл. 05.10.05; опубл. 10.08.07, Бюл. № 12.

11. Пат. 80037 Україна, МПК G01N 21/85, G01J 3/00. Спосіб надлишкових вимірювань концентрації речовин / Кондратов В.Т., Сітар В. Б.; заявник и патентовласник Інститут кібернетики НАН України. – № a200510445; заявл. 07.11.05; опубл. 10.08.07, Бюл. № 12.

12. Пат. 80050 Україна, МПК G01J 1/44, G01N 21/01. Цифровий вимірювач концентрації речовин / Кондратов В.Т., Сітар В. Б.; заявник и патентовласник Інститут кібернетики НАН України. – № a200511775; заявл. 09.12.05; опубл. 10.08.07, Бюл. № 12.

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

14. Фундаментальная метрология [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://kondratov.com.ua/>.

#### References

1. Kondratov V.T. Teoria izbytochnykh izmerenij: reshenie metrologicheskikh zadach izbytochnykh izmerenij fizicheskikh velichin napravlennoho dejstviya s pripisyvaemoj obektu izmerenij matematicheskoy modeli. Soobshhenie 2.1 / V.T.Kondratov // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, Khmelnytsky, 2013, Issue 1, Volume 1, pp. 194-200.

2. Kondratov V.T. Teoria izbytochnykh izmerenij: reshenie metrologicheskikh zadach izbytochnykh izmerenij fizicheskikh velichin nenapravlennoho dejstviya s pripisyvaemoj obektu izmerenij matematicheskoy modeli. Soobshhenie 2.2 / V.T.Kondratov // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, Khmelnytsky, 2013, Issue 1, Volume 2, pp. 180-190.

3. Deklaratsionnyi patent 66644 Ukraina, MPK G01N 21/85, G01J 3/00. Sposib vyznachennia kontsentratsii rehovyn / Kondratov V.T., Sitar V. B.; zaiavitel i patentovlasnyk Kyivskiy natsionalnyi institute tekhnologii I dyzainu. – № 2003087738; zaiavleno 14.08.03; opublikovano 15.03.06, Biuleten № 3.

4. Deklaratsionnyi patent 68679 Ukraina, MPK G01J 1/44, G01N 21/85. Pristrii dlia vymiriuvannia kontsentratsii rehovyn / Kondratov V.T., Sitar V. B.; zaiavitel i patentovlasnyk Kyivskiy natsionalnyi institute tekhnologii I dyzainu. – № 2003098743; zaiavleno 25.09.03; opublikovano 16.08.04, Biuleten № 8.

5. Patent. 75180 Ukraina, MPK G01N 21/27, G01N 21/00. Sposib vyznachennia kontsentratsii rehovyn / Kondratov V.T., Sitar V. B.; zaiavitel i patentovlasnyk Instytut kibernetiky NAN Ukrainy. – № 2004021114; zaiavleno 16.02.04; opublikovano 15.03.06, Biuleten № 3.

6. Patent. 75703 Ukraina, MPK G01N 21/61. Tsyfrovyy vymiriuvach kontsentratsii rehovyn / Kondratov V.T., Sitar V. B.; zaiavitel i patentovlasnyk Instytut kibernetiky NAN Ukrainy. – № 2004032055; zaiavleno 19.03.04; opublikovano 15.05.06, Biuleten № 5.

7. Patent. 77858 Ukraina, MPK G01N 21/85, G01J 3/00. Sposib vyznachennia kontsentratsii rehovyn / Kondratov V.T., Sitar V. B.; zaiavitel i patentovlasnyk Instytut kibernetiky NAN Ukrainy. – № a200503474; zaiavleno 13.04.05; opublikovano 15.01.07, Biuleten № 1.

8. Patent. 78065 Ukraina, MPK G01N 21/85, G01J 3/00. Sposib vyznachennia kontsentratsii rehovyn / Kondratov V.T., Sitar V. B.; zaiavitel i patentovlasnyk Instytut kibernetiky NAN Ukrainy. – № a200500302; zaiavleno 13.01.05; opublikovano 15.02.07, Biuleten № 2.

9. Patent. 78633 Ukraina, MPK G01N 21/85, G01J 3/00. Sposib vyznachennia kontsentratsii rehovyn / Kondratov V.T., Sitar V. B.; zaiavitel i patentovlasnyk Instytut kibernetiky NAN Ukrainy. – № a200507006; zaiavleno 15.07.05; opublikovano 10.04.07, Biuleten № 4.

10. Patent. 80030 Ukraina, MPK G01N 21/61. Tsyfrovyy vymiriuvach kontsentratsii rehovyn / Kondratov V.T., Sitar V. B.; zaiavitel i patentovlasnyk Instytut kibernetiky NAN Ukrainy. – № a200509363; zaiavleno 05.10.05; opublikovano 10.08.07, Biuleten № 12.

11. Patent. 80037 Ukraina, MPK G01N 21/85, G01J 3/00. Sposib nadlyshkovykh vymiriuvan kontsentratsii rehovyn / Kondratov V.T., Sitar V. B.; zaiavitel i patentovlasnyk Instytut kibernetiky NAN Ukrainy. – № a200510445; zaiavleno 07.11.05; opublikovano 10.08.07, Бюл. № 12.

12. Patent. 80050 Ukraina, MPK G01J 1/44, G01N 21/01. Tsyfrovyy vymiriuvach kontsentratsii rehovyn / Kondratov V.T., Sitar V. B.; zaiavitel i patentovlasnyk Instytut kibernetiky NAN Ukrainy. – № a200511775; zaiavleno 09.12.05; opublikovano 10.08.07, Biuleten № 12.

13. Kondratov V.T. Teoria izbytochnykh izmerenij: reshenie metrologicheskikh zadach pri linejnoy funkczii preobrazovaniya izmeritelnogo kanala. Soobshhenie 1.1 / V.T.Kondratov // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, Khmelnytsky, 2012, Issue 1, Volume 4, pp. 125-137.

14. Fundamentalnaia metrologiia. Rezhym dostupu: <http://kondratov.com.ua/>.

Рецензія/Peer review : 11.3.2013 р.

Надрукована/Printed : 22.4.2013 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. И.В. Троцишин