

УДК 681.3

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

© Е.И. Глинкин

E.I. Glinkin. *Instrument devices*. The article looks at instrument devices of informational technology to design measuring computing systems, their development vector in the correction of the primary measuring converter, input-output interfaces and instrument microprocessors, calibrations of the range of checking the measuring computing systems and identifications with the installed error for characteristics of materials.

Заключительным этапом проектирования является создание метрологических средств измерительных-вычислительных систем (ИВС) по математической модели контроля физических процессов в первичном измерительном преобразователе (ПИП). Сущностью метрологического обеспечения является программное управление по диапазону контроля с заданной точностью на материалах с нормированными характеристиками.

Метрологические средства включают модели идентификации и алгоритмы коррекции, градуировки и калибровки. Градуировка служит для приведения измеряемых величин к действительным значениям и достаточно полно освещена в учебниках по метрологии [1 - 9], как самостоятельная операция в настоящей работе не рассматривается. Кроме того, при контроле состава и свойств веществ по эталонным материалам с нормированными параметрами, она интегрируется с операциями коррекции и калибровки. Наибольший интерес при организации метрологических средств представляет создание способов коррекции и калибровки, позволяющих оптимизировать контроль состава и качества по критерию точности [10 - 12].

1. СПОСОБЫ КОРРЕКЦИИ

Одним из заключительных этапов технологии проектирования ИВС является коррекция контролируемых параметров. Коррекция позволяет достичь максимальную достоверность контроля характеристик в одной точке диапазона относительно единственного эталона с нормированными параметрами. Повышение достоверности и воспроизводимости измерений коррекция обеспечивает за счет исключения случайной и систематической погрешностей. Случайная погрешность обусловлена температурным, временным и параметрическим дрейфами в канале контроля и наиболее опасна на выходе ПИП до нормирования сигнала. Из-за отсутствия усиления помеха соизмерима с информационными параметрами, поэтому для снижения влияния помехи входные преобразователи интерфейсов размещают в измерительном зонде как можно ближе к ПИП.

Коррекция в измерительном зонде реализуется аппаратными [2 - 5] и программными [6 - 9] средствами за счет управления конструктивными и пара-

метрическими характеристиками ПИП. При реализации ПИП по жесткой структуре стабилизируют характеристики технологическими и схемными решениями. Технологические способы стабилизации заключаются в изготовлении идеального ПИП из материалов с заданными свойствами, не подверженными влиянию дрейфов. Использование уникальных материалов и технологий экономически неэффективно из-за высокой стоимости обширной номенклатуры [2, 3] узкоспециализированных датчиков. Схемные решения снижают влияние помех за счет избыточных связей и элементов, организованных в структуру, адаптированную к дрейфам.

В основе схемных решений наиболее часто используется принцип компенсационных измерений. В жесткой структуре этот принцип реализуется дифференциальной схемой включения четного числа ПИП. Простейшее решение [4, 5] содержит последовательное соединение встречно включенных генераторов: рабочего и нормируемого. Генератор нормируемого ПИП предназначен для регистрации только дрейфов, а рабочий ПИП измеряет информационный сигнал на фоне этих же помех. Встречное включение рабочего и нормируемого ПИП за счет вычитания одинаковых возмущений, находящихся в противофазе, позволяет дифференцировать информационный сигнал без дрейфов. Для исключения температурных возмущений данный способ использован в измерительном зонде ИВС для контроля ТФХ при регистрации избыточной температуры микротермопарами, расположенными на поверхности исследуемого материала. Рабочая термопара фиксируется от линейного нагревателя на расстоянии x , а нормируемая - отнесена от него на максимально возможное расстояние, ограниченное габаритами измерительного зонда. Данное решение [9] используется для активных ПИП, генерирующих амплитудные и временные сигналы тока и напряжения.

Пассивные ПИП реагируют на внесение воздействия изменением параметров: сопротивления и проводимости в активной и реактивной форме, - в цепи генератора постоянного и переменного питания. Дифференциальная схема из пассивных ПИП создается по мостовой схеме с источником питания в одной диагонали. Измерительная диагональ образуется средними точками двух делителей напряжения с нормируемыми параметрами (сопротивле-

ние, емкость, индуктивность), причем параметр рабочего плеча моста функционально зависит от информационного сигнала. При условии равновесия моста разностный сигнал в измерительной диагонали компенсирует дрейфы источника питания и мостовой схемы, а зависит только от информационного сигнала. Это решение эффективно используется в ИВС серии ТЕМП при регулировании температуры и контроля ТФХ в широком температурном диапазоне [12].

Повышение чувствительности активных ПИП достигается в четырехзондовом способе включения, когда информация определяется изменениями тока и напряжения [4, 9, 12]. Наибольшая эффективность достигается в импульсном режиме при частоте генерации пропорциональной времени релаксации исследуемых состава и свойств веществ. Временные параметры импульсного сигнала в меньшей степени зависят от случайных возмущений, чем амплитуда, и имеют высокую помехозащищенность в процессе передачи информации на значительные расстояния от периферийных ПИП к микропроцессорным измерительным приборам (МИП). Это особенно ценно при организации независимых контуров регулирования одной ИВС. Данное решение неоднократно реализовано при электрофизическом, электрохимическом и теплофизическом контроле характеристик электродов, электролитов и изоляторов ИВС серии ТЕРМИС и ТЕМП.

Коррекция параметров интерфейсов ИВС аппаратными средствами [6 - 9] осуществляется поблочным в процессе изготовления, при настройке и поверке каналов МИП. Аналогоимпульсные преобразователи (АИП) выполняют на операционных усилителях и компараторах, являющихся электронными мостами с огромным коэффициентом усиления, охваченных глубокой отрицательной или положительной обратной связью. Коррекцию АИП осуществляют по балансировке моста соответствующими цепочками по питанию и измерительной диагонали. Корректирующие цепочки предусмотрены в серийных микросхемах заводами-изготовителями.

В интерфейсах время импульсного преобразования [4, 9, 12], например, частотного типа, имеющее нижний F_n и верхний F_b порог линейного преобразования, коррекцию осуществляют вычитанием из текущего значения F частоты F_n нормируемого порога. Дифференциальный сигнал ΔF пропорционален информационному сигналу. Следует отметить периодичность функционирования дискретных и аналогоимпульсных блоков. Стабильные результаты интерфейсов невозможны без их циклической работы, когда устанавливаются (усредняются) параметры переходных процессов. Суммарный дрейф переходных процессов соответствует математическому ожиданию, которое тем ближе к нулю, чем больше число переключений.

Одиночные измерения возбуждают ударные переходные процессы одного знака, длительность которого изменяется случайным образом. Практика показала [9, 12], что при отсутствии циклического измерения случайная погрешность от переключения микросхем составляет 35 - 40 % от погрешности регистрации измеряемой величины и приводит к неопределенности контроля, т.к. после обработки составляет 70 - 120 %. При инициируемом обмене информацией для исключения промахов измерения,

вызванных первым переключением микросхем, первое измерение не регистрируется за счет задержки на время переходных процессов импульса синхронизации преобразования.

Коррекция контролируемых параметров [7 - 9, 12], получаемых по измеренным значениям в процессе расчета, в простейших ИВС может достигаться аппаратными средствами. При этом контроль ведут на исследуемом и нормированном образцах по двум идентичным каналам или последовательно по одному каналу. По измеримым величинам нормируемого X_0 и исследуемого образцов X находят из функциональной зависимости $V = A \cdot F(B \cdot X_0)$

расчетные значения \tilde{V} :

$$\begin{cases} \tilde{V}_0 = A \cdot F(B \cdot X_0) \\ \tilde{V} = A \cdot F\left(\begin{matrix} 0 \\ B \cdot X \end{matrix}\right), \end{cases} \quad (1)$$

где A, B - неизмеряемые параметры измерительного зонда, например, расстояние от нагревателя до термодатчика, сила тока или напряжение, импедансы ячейки и т.д. Расчетные значения с действительными в одной точке контроля [12] пропорциональны коэффициенту неопределенности k :

$$\begin{cases} \tilde{V} = k \cdot V \\ \tilde{V} = k \cdot V \end{cases} \quad (2)$$

Решение двух систем уравнений (1-2) дает соотношение:

$$\frac{V_0}{\tilde{V}} = \frac{A \cdot F(B \cdot X)}{A \cdot F\left(\begin{matrix} 0 \\ B \cdot X \end{matrix}\right)} = \frac{k \cdot V}{k \cdot V},$$

т.е. отношения действительных и расчетных значений равны, тогда искомые характеристики \tilde{V} относительно эталона с нормированными значениями V_0 определяются по формуле:

$$\tilde{V} = V_0 \frac{F\left(\begin{matrix} 0 \\ B \cdot X \end{matrix}\right)}{F(B \cdot X_0)}. \quad (3)$$

Это соответствует коррекции коэффициента $A = V_0 / F(B \cdot X_0)$ по эталону или контролю параметров \tilde{V} исследуемого вещества в одной точке диапазона с точностью, определяемой погрешностью нормированных параметров $V_0 + |\epsilon|$ эталона. Контроль относительно эталона устраняет систематическую погрешность, а частота регистрации параметра A пропорциональна эффективности компенсации случайной составляющей, вызванной дрейфом.

Коррекция контролируемых параметров в неявном виде может компенсировать конструктивные и параметрические неточности, определяющие нелинейность и чувствительность, достоверность и воспроизводимость сигнала ПИП, интерфейсов и ИВС в целом.

2. МОДЕЛЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИВС

Программное управление ИВС по диапазону измерения является основной задачей метрологического обеспечения определения состава и свойств веществ [6, 9, 10]. Гибкость и адаптируемость ИВС определяются математической моделью процесса измерения и контроля искомых параметров по модели идентификации в калиброванном диапазоне по материалам с нормированными значениями. Задача сводится к синтезу модели идентификации, связывающей функциональную зависимость известные нормированные эталоны $X_0 = \{X_{01}, X_{02}, X_{03}, \dots, X_{0n}\}$ с действительными измеренными величинами $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ с минимальной погрешностью в процессе калибровки (рис. 1).

Нужно найти функцию $y = f(X, A)$, зависящую от X и от n параметров $\{a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}\}$ матрицы A , график которой как можно лучше приближается к точкам (X_j, X_{0j}) , где $j = \overline{0, n-1}$. Эти параметры выбираются так, чтобы величина

$$Q(A) = \sum_{j=0}^{n-1} [f(X_j, A) - X_{0j}]^2$$

была наименьшей [5, 6].

Наиболее часто в задачах идентификации из-за гибкости и универсальности [4, 5] функция f выбирается относительно X степенным полиномом:

$$f(A, X) = \sum_{k=0}^{n-1} a_k X^k.$$

С позиций динамического программирования [9, 11] постановка задачи калибровки формулируется следующим образом.

Согласно схеме в фазовых координатах (рис. 2) измерения ПИП при переходе из состояния X_{k+1} в состояние X_k могут быть представлены системой уравнений:

$$\begin{cases} X_{1k+1}^0 = X_{1k}^0 - \sum_{i=0}^{k-1} a_{ik} X_{i1k} \\ X_{2k+1}^0 = X_{2k}^0 - \sum_{i=0}^{k-1} a_{ik} X_{i2k} \\ \dots \\ X_{jk+1}^0 = X_{jk}^0 - \sum_{i=0}^{k-1} a_{ik} X_{ijk} \\ \dots \\ X_{n,k+1}^0 = X_{nk}^0 - \sum_{i=0}^{k-1} a_{ik} X_{ink}, \end{cases}$$

где X_{jk}^0, X_{jk} - составляющие векторов X^0, X и соответственно $a_{ik} \in A, k = \overline{1, n}$. Требуется определить закон, минимизирующий сумму квадратов погрешностей контроля:

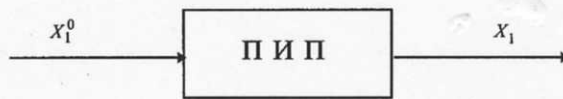
$$Q = \sum_{k=1}^n \left(\sum_{j=1}^k X_{jk}^0 \right)^2.$$

Другими словами, нужно найти оптимальную матрицу $A^* = \{a_{ij}^*\}_{ij=1}^n$, для которой

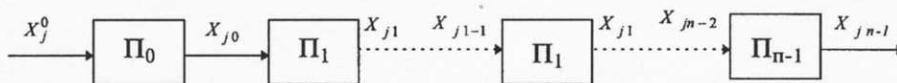
$$Q(A^*) = \min Q(A, X^0, X).$$

Решение поставленной задачи найдено [4, 5] в виде:

$$\sum_{j=1}^{n-1} X_{kj}^0 X_{kj} = \sum_{j=1}^{n-1} X_{kj} \sum_{i=0}^{n-1} a_{ij}^* X_{ij}; \quad k = \overline{0, n-2}$$



а)



б)

Рис. 1. Структурная схема ПИП: а) интегрированная; б) дифференцированная.

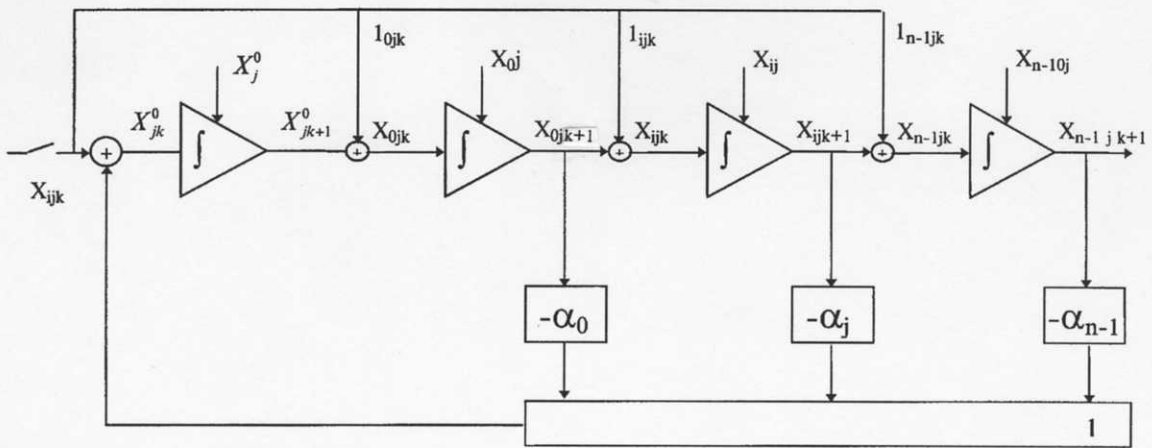
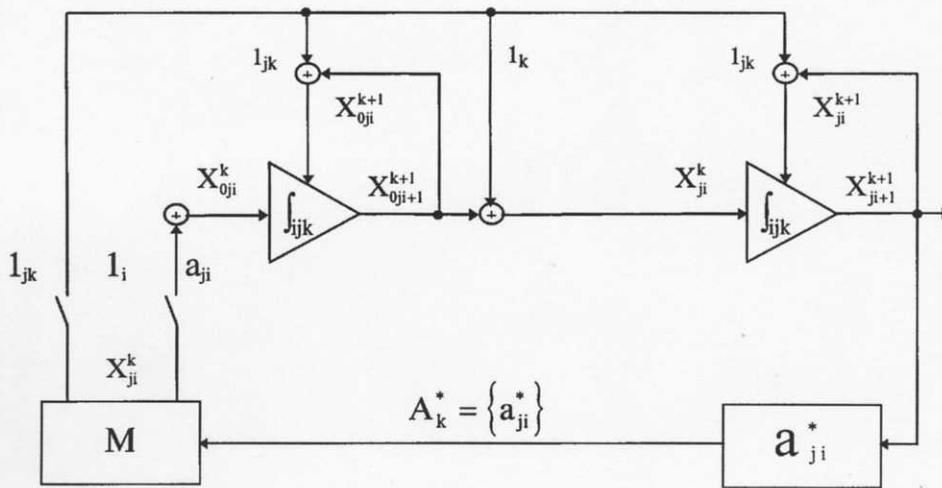
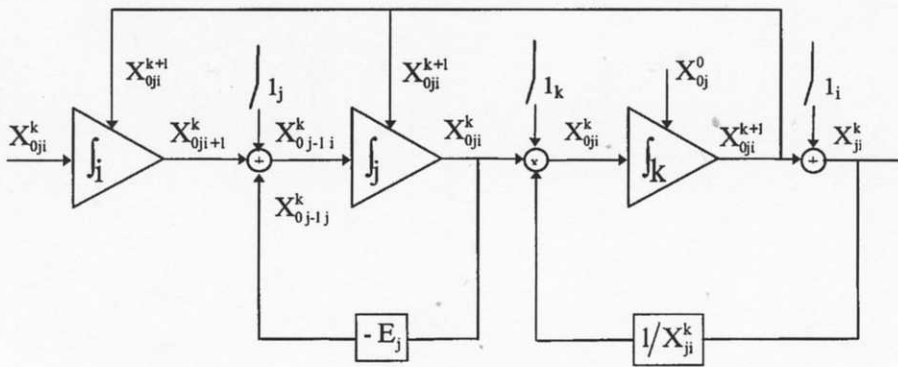


Рис. 2. Схема ПИП в фазовых координатах.



а)



б)

Рис. 3. Схема ПИП в фазовых координатах: а) общая; б) интегратора \int_{ijk} .

и представляет n -мерную систему уравнений относительно коэффициентов аппроксимации a_{ij}^* , заданных в неявной форме. Известные решения методом Гаусса [5, 6] сложны и не приемлемы из-за громоздкости численных алгоритмов при калибровке ИВС.

Для поиска решения в явном виде по аналитической модели предлагается [10, 12] нормировка исходных уравнений относительно степенных полиномов на каждом шаге аппроксимации. Исходные уравнения относительно векторов $\{X^0, X\}$ представляются в полиномах вида $X_{0,ji+1}^{k+1}, X_{ji}^{k+1}$, соответствующих нормированию векторов $X_{0,ji+1}^k, X_{ji+1}^{*k}$ относительно векторов $X_{0,ji+1}^k$ более низкого ранга. На нулевом ранге нормировка сводится к соотношению начальных значений $X_{0,j}^0, X_j^0$.

В поле фазовых координат (рис. 3) измерения ПИП при переходе из состояния $X_{0,ji+1}^k$ в состояние $X_{0,ji}^k$ запишутся следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} X_{0i+1}^0 = X_{0i}^0 - a_{0i} X_i^0, & i = \overline{1, n} \\ X_{0i+1}^1 = X_{0i}^1 - a_{1i} X_{1i}^1, & i = \overline{2, n} \\ \dots \\ X_{0,ji+1}^k = X_{0,jk}^k - a_{ji} X_{ji}^k, & i = \overline{j+1, n} \\ \dots \\ X_{0n-1,i+1}^{n-1} = X_{0n-1,i}^{n-1} - a_{n-1,i} X_{n-1,i}^{n-1}, & i = n \end{cases} \quad (4)$$

Уравнения (4) переходных состояний в дискретной форме соответствуют дифференциальным уравнениям $dX_0/dX = a$. Из системы (4) видно, что $j = \overline{0, n-1}$, $k = j$, причем на нулевом ранге $i = \overline{1, n}$, а на высшем ранге $i = n$. Последнее аналогично треугольной матрице из n слагаемых верхней строки и первого слагаемого нижней строки.

Нормировка исходного уравнения относительно вектора X_{ji}^k повышает ранг j -го уравнения на единицу, т.к. $X_{0,ji}^{k+1} = X_{0,ji}^k / X_{ji}^k$, и соответствует уравнениям вида:

$$\begin{cases} X_{0,ji+1}^{k+1} = X_{0,ji}^{k+1} - a_{ji}; \\ i = \overline{j+1}, \quad j = \overline{0, n} \end{cases} \quad (5)$$

идентичных j -му уравнению системы (4). Очевидно, что решения системы (4) и (5) должны быть равны на каждом шаге оптимизации, т.к. системы идентичны в целом и отличаются по виду за счет нормировки.

Определим закон аппроксимации, минимизирующий сумму квадратов погрешностей измерения

$$Q = \sum_{i=1}^{n-1} Q_j;$$

$$Q_j = \left(\sum_{i=j+1}^n X_{0,ji+1}^j \right)^2 \quad (6)$$

для разности

$$X_{ji}^k = X_{j-1,j}^k - X_{j-1,i}^k \quad (7)$$

векторов X_{ji}^k и $X_{0,ji}^k$. Это соответствует критерию наименьших квадратов в области пространства фазовых координат, то есть нахождению функции, график которой (рис. 4) по кратчайшей траектории соединяет точки, определяемые векторами $\{X_{0,ji}^k, X_{ji}^k\}$. Другими словами, необходимо найти оптимальную матрицу $A^* = \{a_{ji}^*\}$, для которой

$$Q(A^*) = \min Q(A, X^0, X), \quad (8)$$

где $X_{ji}^k \in X^0$ и заданы системами уравнений (4) и (5).

В силу принципа оптимальности [11] искомое значение минимума можно искать последовательно для j -го шага.

На нулевом шаге

$$\theta_0 = Q_0 = \sum_{j=0}^n \left(\sum_{i=1}^n X_{0i+1}^0 \right)^2 = \left[\sum_{i=1}^n (X_{0i}^0 - X_i^0 a_{0i}) \right]^2,$$

и для уравнения (5)

$$\theta_0 = \left[\sum_{i=1}^n (X_{0i}^1 - a_{0i}) \right]^2.$$

Находя производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_0}{\partial a_{0j}} &= 2 \left\{ \sum_{i=1}^n (X_{0i}^0 - a_{0i}^* \cdot X_i^0) \right\}; \\ \frac{\partial \theta_0}{\partial a_{0j}} &= 2 \left\{ \sum_{i=1}^n (X_{0i}^1 - a_{0i}^*) \sum_{i=1}^n (-1) \right\}. \end{aligned}$$

Приравнивая их к нулю, находим

$$a_{0i}^* = X_{0i}^* / X_i^0 = X_{0i}^0; \quad i = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Согласно формулам (4) и (5) по алгоритму (9) измерения из начального состояния $\{X_{0i}^0, X_i^0\}$ переходят в измерения с координатами $\{X_{0i}^1, X_i^1\}$ за счет оптимального коэффициента аппроксимации a_{0i}^* . С позиций метрологии, оптимизация на нулевом шаге соответствует коррекции измеренного значения X_i^0 по эталону X_{0i}^0 в i -той точке диапазона.

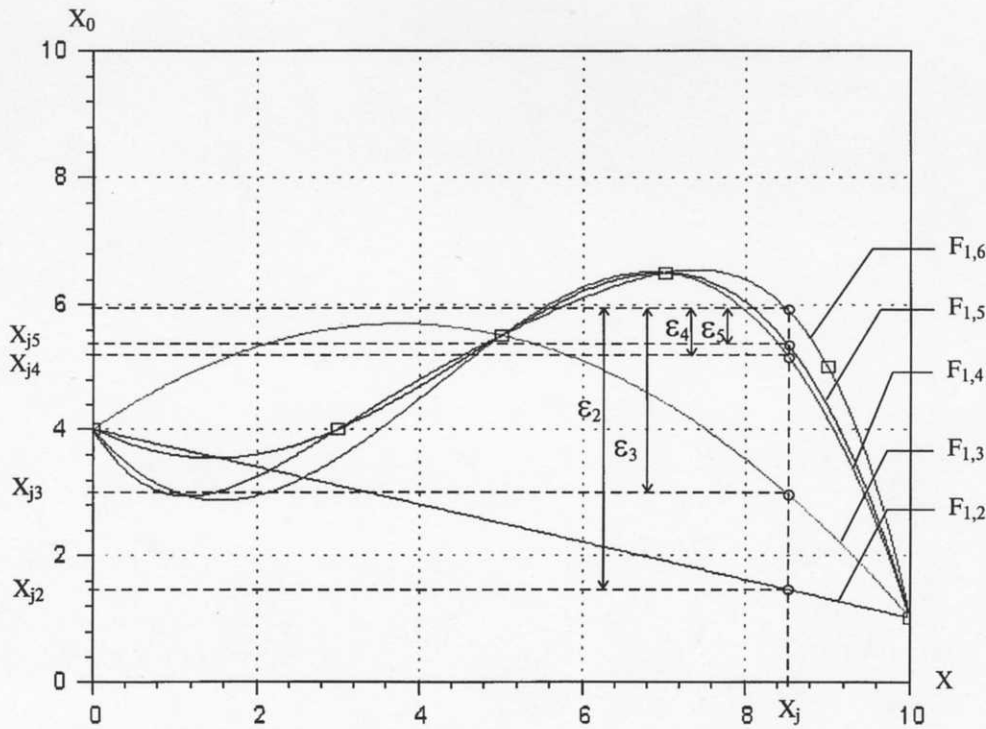


Рис. 4. Идентификация при калибровке по n -эталоном.

Аналогично проведем оптимизацию на первом шаге:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= Q_0 + Q_1 = Q_0 + \left(\sum_{i=2}^n X_{01i+1} \right)^2 = \\ &= Q_0 + \left[\sum_{i=2}^n (X_{01i} - a_{1i} X_{1i}) \right]^2; \end{aligned}$$

используя равенство (7), получим:

$$Q_1 = \left\{ \sum_{i=2}^n (X_{01}^1 - X_{0i}^1) - a_{1i} (X_1^1 - X_i^1) \right\}^2.$$

Для системы уравнений (5) находим :

$$\begin{aligned} \theta_1^1 &= Q_0^1 + Q_1^1 = Q_0^1 + \left(\sum_{i=2}^n X_{01i+1}^2 \right)^2 = \\ &= Q_0^1 + \left[\sum_{i=2}^n (X_{01i}^2 - a_{1i}) \right]^2. \end{aligned}$$

Вычисляя производные:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial a_{1i}} = 2 \left\{ \sum_{i=2}^n [(X_{01}^1 - X_{0i}^1) - a_{1i}^* (X_1^1 - X_i^1)] \sum_{i=2}^n (X_i^1 - X_1^1) \right\};$$

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial a_{1i}} = 2 \left\{ \sum_{i=2}^n (X_{01i}^2 - a_{1i}^*) \sum_{i=2}^n (-1) \right\}.$$

и приравняв их к нулю, находим:

$$a_{1i}^* = \frac{X_{01}^i - X_{0i}^{j,i}}{X_1^1 - X_i^1} = \frac{X_{01i}^{1i}}{X_{1i}^1} = X_{01i}^2; \quad i = \overline{2, n}.$$

Используя решение (9) и принимая $X_i^1 = X_i^{*0} / X_i^0 = \epsilon_{0i}^*$, можно записать:

$$a_{1i}^* = \frac{a_{01}^* - a_{0i}^*}{\epsilon_{01}^* - \epsilon_{0i}^*}; \quad i = \overline{2, n}. \quad (10)$$

Выражение (10) показывает, что коэффициент аппроксимации a_{1i}^* , оптимальный на первом шаге, пропорционален отношению разницы коэффициентов аппроксимации $a_{0i}^*, \epsilon_{0i}^*$, оптимизированных на нулевом шаге.

Для измерений $j > 2$

$$a_{2i}^* = \frac{X_{012}^2 - X_{01i}^2}{X_{12}^2 - X_{1i}^2} = \frac{X_{02i}^2}{X_{2i}^2} = X_{03i}^3; \quad i = \overline{3, n},$$

$$a_{n-1, n}^* = \frac{X_{0n-2, n-1}^{n-1} - X_{0n-2, n}^{n-1}}{X_{n-2, n-1}^{n-1} - X_{n-2, n}^{n-1}} = \frac{X_{0n-1, n}^{n-1}}{X_{n-1, n}^{n-1}} = X_{0n-1, n}^n.$$

Таким образом, оптимальный закон аппроксимации по точности на j -м шаге имеет вид

$$a_{ji}^* = \frac{X_{0j-1, j}^j - X_{0j-1, i}^j}{X_{j-1, j}^j - X_{j-1, i}^j} = \frac{X_{0j, i}^j}{X_{ji}^j} = X_{0ji}^{j+1}, \quad i = \overline{j+1, n}.$$

Принимая во внимание, что

$$X_{0j-1,i}^j = X_{0j-1,i}^{j-1} / X_{j-1,i}^{j-1} = a_{j-1,i}^*,$$

$$X_{j-1,i}^j = X_{j-1,i}^{*j-1} / X_{j-1,i}^{j-1} = e_{j-1,i}^*,$$

находим:

$$a_{ji}^* = \frac{a_{j-1,j}^* - a_{j-1,i}^*}{e_{j-1,j}^* - e_{j-1,i}^*}; \quad \begin{matrix} i = \overline{j+1, n} \\ j = \overline{0, n-1} \end{matrix} \quad (11)$$

Следовательно, коэффициенты аппроксимации j -го ранга связаны рекуррентным соотношением с коэффициентами аппроксимации $(j-1)$ -го ранга. Другими словами, оптимизированная матрица A^* n - n -ранга включает оптимальные матрицы $(n-1)$ - $(n-1)$ -рангов. Рекуррентная модель (11) аналитически связывает между собой j, i -тые коэффициенты аппроксимации a_{ji}^* в явном виде.

Явная аналитическая зависимость рекуррентного вида позволяет синтезировать компактные и простые, универсальные и гибкие алгоритмы и программы оптимальных по точности и быстродействию ИВС.

Следует отметить, что модель идентификации (11) с метрологической точки зрения представляет коэффициенты аппроксимации j -го ранга в виде нормировки по коэффициентам j -го ранга. Это позволяет говорить о метрологической симметрии нормировки на интегральном и дифференциальном уровнях, а модель идентификации (11) следует признать изящной из-за ее соответствия метрологической симметрии.

Анализ решения исходного уравнения на j -том шаге:

$$\sum_{i=j+1}^n (X_{0j-1,j}^j - X_{0j-1,i}^j) = \sum_{i=j+1}^n (X_{j-1,j}^j - X_{j-1,i}^j) a_{ji}^*$$

указывает на инвариантность i -тых уравнений системы, полученных в процессе оптимизации, что обусловлено равенством $a_{ji}^* = a_{ji+1}^*$ коэффициентов и произвольностью выбора порядкового номера i . Вес оптимизированных коэффициентов аппроксимации нормируется n уравнениями по n полиномам, и для произвольного $j = \overline{0, n-1}$ соответствующий коэффициент a_j^* не зависит от порядка нормировки $i = \overline{1, n}$ выбранного уравнения.

3. АЛГОРИТМ КАЛИБРОВКИ

Изменение начальных условий системы уравнений (5) за счет нормировки на k -тый полином X_{ji}^k , где $k = \overline{0, n-1}$ в i -том уравнении соответствует j задач относительно ранга коэффициента a_j .

Решение j -задач методом динамического программирования аналогично выше описанной процедуре и приводит к решению идентичному (11), но с учетом веса коэффициента оптимизации.

$$a_{jik}^* = \frac{a_{j-1,j,k}^* - a_{j-1,i,k}^*}{e_{j-1,j,k}^* - e_{j-1,i,k}^*};$$

$$k = \overline{j, 0, n-1}, \quad i = \overline{j+1, n}. \quad (12)$$

Из решений (12) следует, что вес оптимизированных коэффициентов аппроксимации $a_{jik}^* \in A^*$ рекуррентно связан лишь с начальными условиями и определяется k -тым рангом полинома X_{ji}^k . Другими словами, значимость a_{jik}^* k -раз нормирована k -тым полиномом и определяется исключительно начальными условиями.

Проанализируем формулы расчета коэффициентов аппроксимации по алгоритму калибровки.

1. С позиций математики формула (12) представляет расчет в дискретной форме производной n -го порядка. Это видно из следующих рассуждений. Числитель алгоритма (12) является разницей $\Delta a_j = a_{j-1,j,k} - a_{j-1,i,k}$ между j -ым и i -ым значениями j -ой ординаты n -мерного пространства. Знаменатель в поле n -мерных координат интерпретируется разницей $\Delta b_{j-1} = b_{j-1,j,k} - b_{j-1,i,k}$ $(j-1)$ -ой абсциссы. Отношение $\Delta a_j / \Delta b_{j-1}$ соответствует $\operatorname{tg} \alpha$ угла наклона проекции на j -той координате по отношению $(j-1)$ -ой координате. При небольших значениях Δa , как известно, $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$, соответствующей $a_{j,i,k}$. Тогда выражение (12) может быть представлено как:

$$\operatorname{tg} \alpha = \Delta a_j / \Delta b_{j-1},$$

а при $\alpha \rightarrow 0$ для бесконечно малых Δa :

$$\alpha = da(j) / db(j-1) = f'(a(j)),$$

т.к. $\Delta a \rightarrow da$. Вектор $a(j)$, в свою очередь, является первообразной к проекции j -го вектора и т.д. для $j = \overline{n-1, 0}$. Следовательно, для $j = n-1$ является производной n -ого порядка в точке $P(x_{0j}, x_j)$ в плоскости эталон x_{0j} - измеренная величина x_j , т.е.:

$$f^{(n)}(P) = \frac{d^n x_{0j}}{dx_j^n}.$$

Аналогичный результат может быть получен для выражения a_{ji} коэффициента при n -кратном дифференцировании j -го уравнения калибровки.

Решение a_{ij} коэффициентов можно найти, представив систему уравнений степенных полиномов n -мерной системой линейных уравнений, применив затем численный метод Гаусса [5, 6]. После замены $x_j^i = x_{ij}$ система уравнений имеет вид:

$$x_{0j} = \sum_{i=1}^{n-1} a_i x_{i1}; \quad j = \overline{1, n}.$$

Сущность метода Гаусса состоит в преобразовании матрицы $A = \{a_{ij}\}_0^{n-1}$ в матрицу треугольного вида посредством n -итераций. Данный метод громоздок, а результат решения приблизительный. Решение данного уравнения методом Гаусса-Жордана [5, 10], являющимся модификацией метода Гаусса, сводит треугольную матрицу к диагональной. Расчет коэффициентов a_{ij} существенно упрощается, однако число операций в n -раз увеличивается.

Решающее значение для точности вычисления имеет величина коэффициента a_{kk} , которая может оказаться равной нулю. Для исключения этого осуществляют перестановку строк и столбцов, которые предварительно должны быть помечены, что необходимо при восстановлении исходной матрицы. По данному методу диагональ пытаются организовать из элемента наибольшего по модулю, что как-то повышает точность решения.

Известен способ Гаусса-Банашевича [5], оперирующий с необрабатываемыми числами при распределении отдельных шагов гауссова метода определенным порядком. Данный способ позволяет прийти к наглядной и компактной вычислительной схеме, однако n -мерная итерация также снижает точность вычисления.

Основным недостатком способов Гаусса, снижающим точность аппроксимации, является метод численного моделирования из-за отсутствия аналитического решения в явном виде.

Как видно из анализа известных методов, предлагаемый алгоритм (12) является аналитическим решением, свободным от недостатков методов численного вычисления.

2. Геометрическая интерпретация алгоритма (12) понятна из математической, где производная первого порядка является угловым коэффициентом секущей, т.е. $\operatorname{tg} \alpha = f'(P)$, вторая производная - касательная первообразной функции f и т.д. Соответственно n -ная производная $f^{(n)}$ рассматривается как угол α к производной $(n-1)$ -го порядка и касательной к первообразной $(n-2)$ -го порядка. С позиции геометрии алгоритм (12) позволяет аналитически рассчитать угловой коэффициент и касательную, ее скорость и ускорение в n -мерном векторном пространстве или в плоскости декардовых координат.

3. Метрология, предполагающая комплексный подход, позволяет интерпретировать формулу (12) как n -мерную производную в поле j -х координат, x_{0j} - эталон и его x_j измерение. На плоскости $x_{0j} = f(x_j)$ эталон - измерение выражение (12) служит для вычисления углов и касательных к соответствующим аппроксимирующим кривым в точках $P(x_{0j}, x_j)$. Справедливо и обратное утверждение, что уравнение калибровки с коэффициентами аппроксимации, найденными из аналитического алгоритма (12), позволяет соединить две точки j и $j+1$ координаты (вектора или скорости) наикратчайшим путем. Это соответствует введению линеаризации диапазона измерения в n -мерной координатной плоскости, найденной аналитически по алгоритму (12). Уравнение калибровки определяет линейную j -ую систему декардовых координат между двумя соседними точками калибровки. По отношению к декардовой системе координат "эталон - измерение" j -тые системы координат адаптированы между со-

седними точками $P(x_{0j}, x_j)$ и повторяют программно изгибы в калиброванном по эталонам диапазоне.

Оперативный пересчет [9, 10, 12] коэффициентов a по алгоритму калибровки (12) позволяет программно корректировать модель идентификации (4) при изменении диапазона контроля состава и свойств веществ или повышать разрешающую способность в нормированном по эталону диапазоне идентификации.

4. ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМЫЕ СПОСОБЫ

Как и калибровка, коррекция контролируемых параметров может осуществляться программными средствами, что повышает гибкость метрологических средств и адаптируемость ИВС по диапазону контроля веществ. Нижеописанные способы коррекции программно реализованы в ИВС ТЕРМИС и АИСТ [12].

Следующий этап в развитии ИВС заключается в интеграции коррекции и контроля характеристик за счет программного управления. В ИВС организуется контур регулирования с программно-управляемой коррекцией контроля. Рассмотрим программно-управляемые способы на примере ТФХ материалов.

Способ контроля с адаптацией к нормируемому диапазону [а. с. № 1608535] программно корректирует термограмму нагрева на исследуемом образце к эталонной термограмме материала с известными ТФХ. Измерительный канал ИВС с заданной погрешностью настроен на термограмму T_0 эталонного материала (рис. 5). Коррекция осуществляется регулированием частоты подачи тепловых импульсов. Если для выбранной частоты F_0 периодом нагрева τ_0 погрешность измерения ϵ между термограммами в пределах заданной ϵT , то период частоты τ_0 не изменяется. Если в процессе измерения исследуемая термограмма T_1 проходит выше эталонной T_0 , период частоты увеличивают на длительность $\epsilon \tau_0$. При выявлении условия $T_0 - T_1 > \epsilon T$, период частоты уменьшают, т.е. - $\epsilon \tau_0$. После регулирования вычисляют тепло- и температуропроводность (a_i, λ_i) с коррекцией по эталону с нормированными характеристиками (a_0, λ_0) с учетом частоты F_n подачи импульсов от нагревателя и измеренных температур T_n в момент подачи n -го импульса. ТФХ рассчитывают по формулам:

$$\begin{cases} a_i = a_0 \frac{F_n}{F_{n0}} \\ \lambda_i = \lambda_0 \frac{F_n * T_{n0}}{F_{n0} * T_n} \end{cases}$$

Данный способ позволяет в ИВС применять узкодиапазонный канал измерения с высокой линейностью и помехозащищенностью. ИВС с нормированным диапазоном измерения использованы в заводских и полевых условиях при повышенном уровне электро- и радиопомех.

Способ контроля с линейным нагревом [а. с. № 1711052] включает импульсный нагрев термостатированных поверхностей эталонного и исследуемого образца источником постоянной частоты

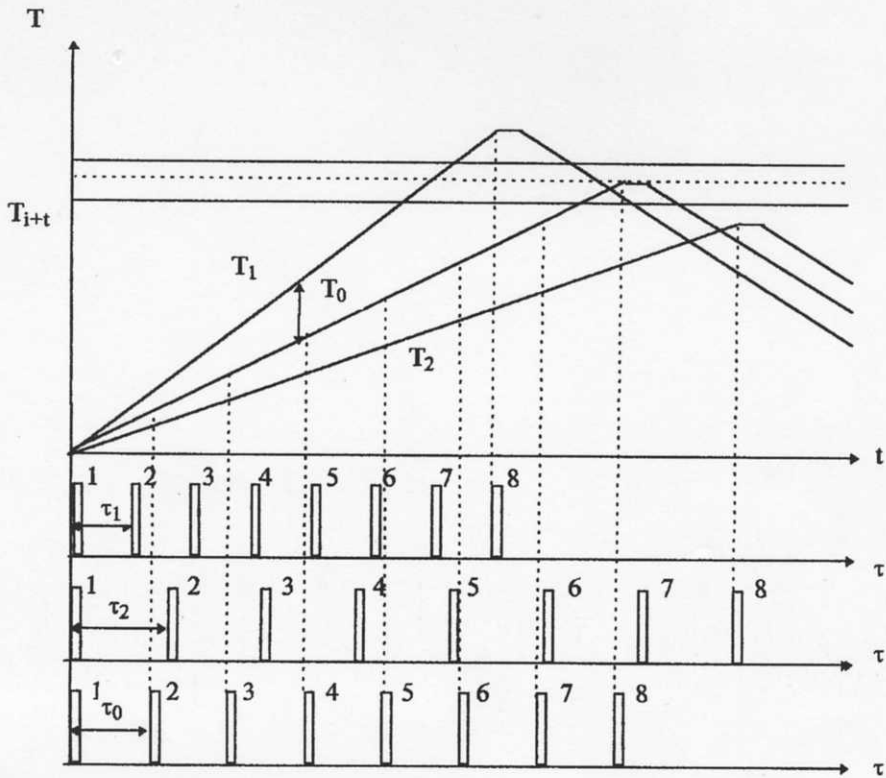


Рис. 5. Программно-управляемый способ контроля с адаптацией по диапазону измерения.

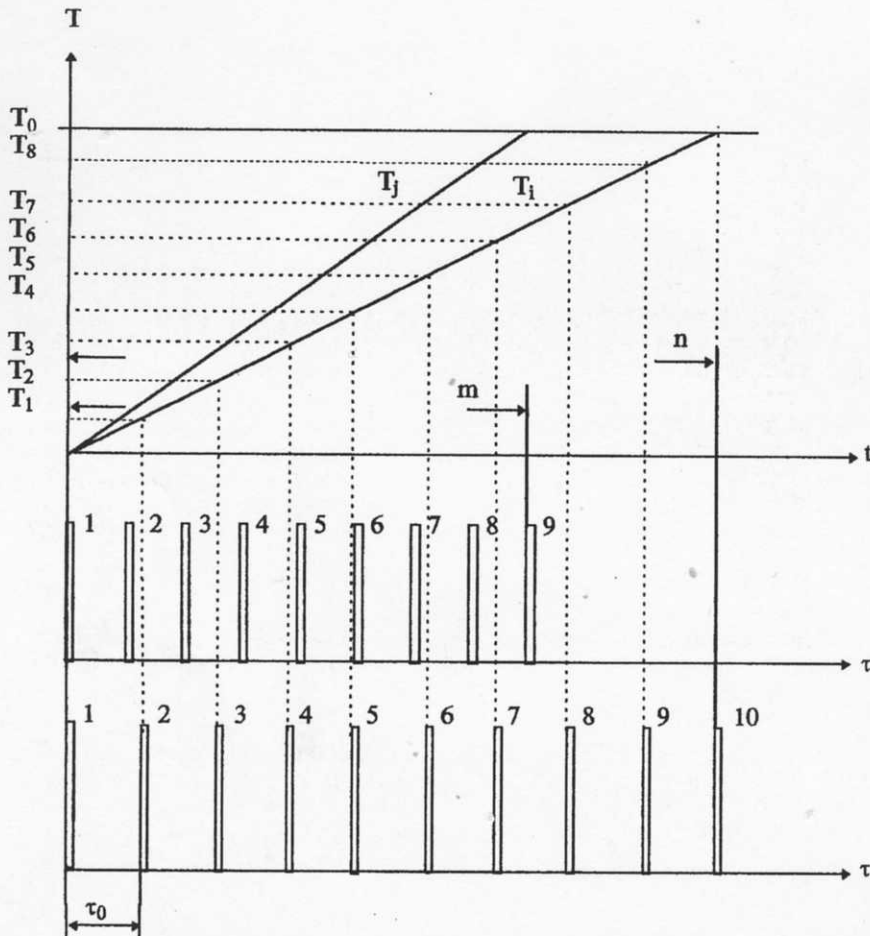


Рис. 6. Программно-управляемый способ контроля с линейным нагревом импульсами релаксации эталонного образца.

ты и мощности. С целью повышения оперативности и точности осуществляют линейный нагрев (см. рис. 6) поверхности образцов импульсами, период следования которых выбирают пропорционально времени релаксации τ_{ij} образца с нормированными характеристиками $\{a_0, \lambda_0\}$. Интервалы времени определяют числом импульсов $\{n, m\}$, когда температуры T_i, T_j образцов достигнут заданного порога T_0 в точках, расположенных на фиксированных расстояниях x от точки нагрева. Расчетные формулы искомым значений имеют вид:

$$\begin{cases} a_i = a_0 \frac{n}{m} \\ \lambda_i = \lambda_0 \frac{n}{m} \end{cases}$$

Более широкий диапазон контроля возможен при линейном нагреве, достигаемом в процессе регулирования интервалов τ_k подачи тепловых импульсов до периода релаксации исследуемого τ_0 и эталонного τ_{j0} материалов (рис. 7). Интервал τ_{j+1} на $(j + 1)$ -м шаге регулирования вычисляют по интегральной оценке

$$\tau_{j+1} = \tau_{j0} \frac{\sum_{k=1}^i \tau_k \cdot T_k}{\sum_{k=1}^i \tau_k},$$

где T_k - температура в точке x на k -том шаге измерения. Искомые характеристики находят из соотношения:

$$\begin{cases} a_i = a_0 \frac{\tau_{j0}}{\tau_{i0}} \\ \lambda_i = \lambda_0 \frac{\tau_{j0}}{\tau_{i0}} \end{cases}$$

Рассмотренный способ контроля по релаксации [а. с. № 1711052] позволяет определять и комплекс электрохимических характеристик, причем данные хорошо согласуются с кондуктометрическими методами.

Контроль с оптимальным временем измерения и заданной точностью [Патент № 2027172 (Россия)]

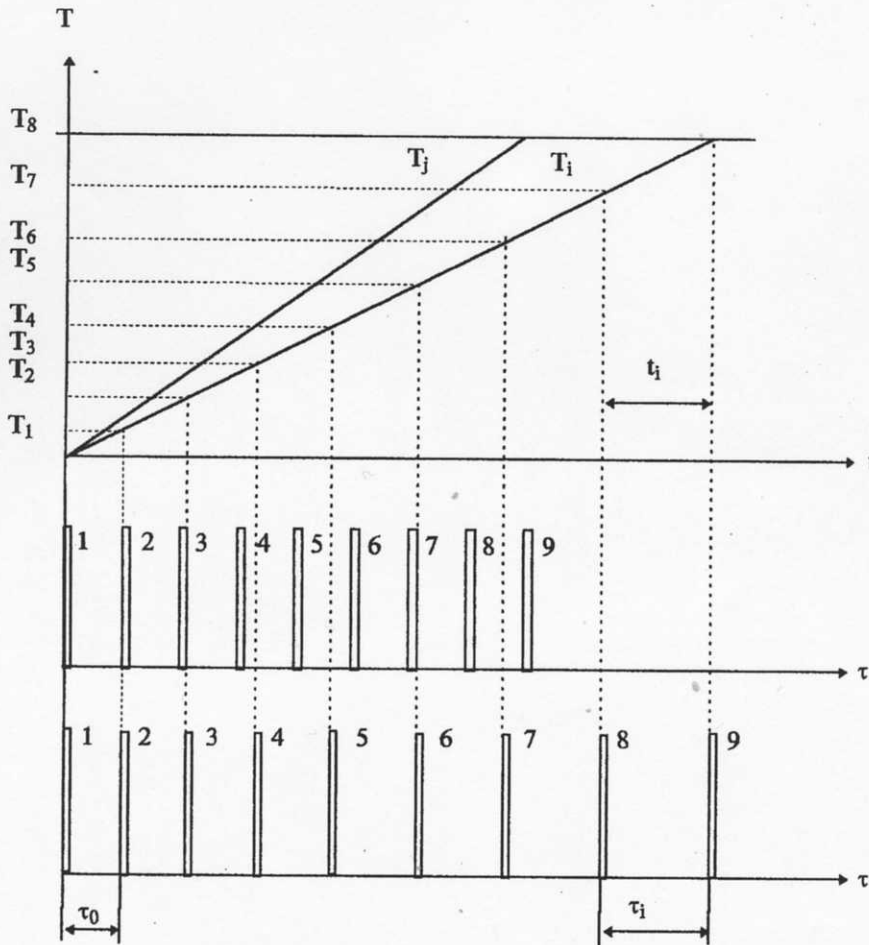


Рис. 7. Программно-управляемый способ с линейным нагревом импульсами релаксации, регулируемые по характеристикам исследуемого образца.

достигается регулированием времени измерения термограммы (рис. 8). Момент отсечки формируют при выполнении условия:

$$\frac{T_{i+1} - T_i}{j \cdot \tau_0} = \alpha_i \leq \alpha_0,$$

когда скорость нагрева α_i термограммы будет в пределах заданной скорости α_0 , найденной по критериям оптимизации. Для измеренных значений температуры T_i, T_{i+j} на i -том и $i+j$ -том шаге измерения за время $j \cdot \tau_0$ нагрева через фиксированные интервалы τ_0 теплофизические свойства можно определить:

$$\begin{cases} a_i = a_0 \frac{m}{n} \\ \lambda_i = \lambda_0 \frac{\alpha_i}{\alpha_j} \end{cases}$$

т. е. из соотношения числа $\{m, n\}$ поданных импульсов и скоростей нагрева α_i, α_j на исследуемом и эталонном образцах.

5. СПОСОБЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ

В отличие от способов коррекции и с программным управлением, в которых контролируемые парамет-

ры определяются в явном виде из соответствующих функциональных соотношений, в способах идентификации решается обратная задача. При идентификации сравниваются между собой интегралы измеримых значений исследуемого и эталонного веществ с заданной погрешностью. Первообразную эталона формируют из массива интегральных характеристик с нормированными параметрами. Результатам контроля отождествляют те нормированные меры, первообразные которых совпадают с интегралом измеримых значений исследуемого вещества по выбранному критерию. Для теплофизических исследований интегралом измеренных значений является температурно-временная зависимость: термограмма в точке измерения, инициированная тепловыми импульсами от линейного нагревателя. При электрофизическом контроле регистрируется вольтамперная характеристика, а в F -метрии измеряется импульсно-частотная характеристика девиации частоты. Способы идентификации проиллюстрируем на примере контроля теплофизических характеристик.

Способы идентификации базируются на процессах измерения, и по аналогии с последними их можно классифицировать: последовательного приближения, параллельного и последовательного действия.

Способ идентификации последовательного действия [а. с. № 1034488; № 220407] включает регистрацию термограммы от воздействия тепловых им-

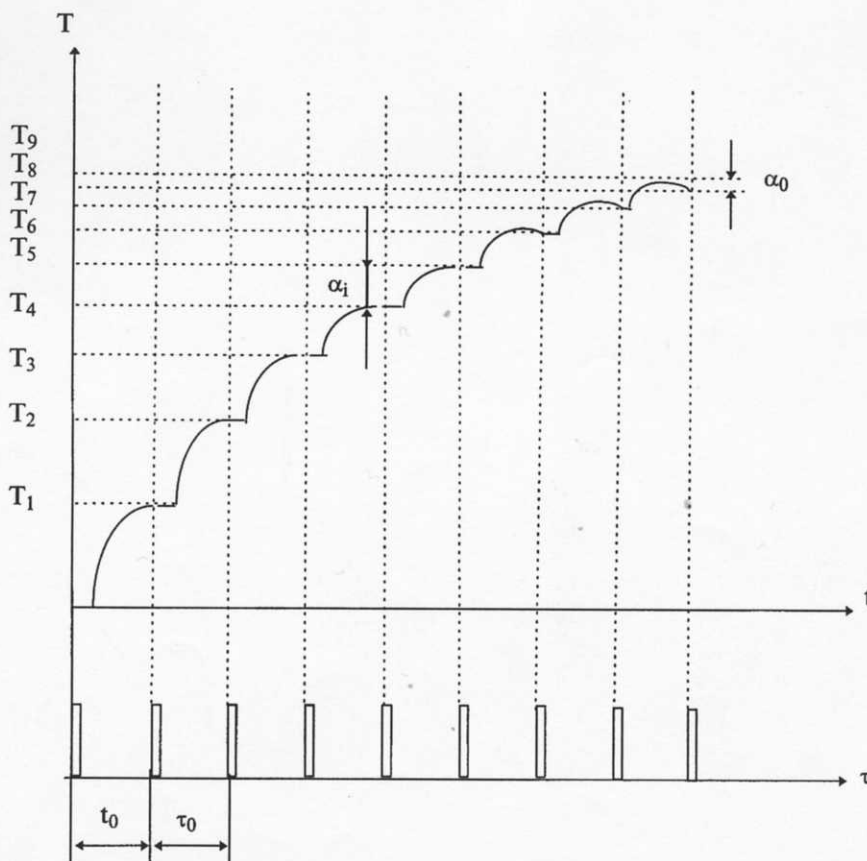


Рис. 8. Программно-управляемый способ контроля с оптимальным временем измерения.

пульсов постоянной энергии и периодом следования. Регистрацию (рис. 9) осуществляют в плоскости контакта исследуемого и эталонного образца на фиксированном расстоянии от линии нагрева. С целью расширения контроля ТФХ, формируют эталонную термограмму за счет управления по линейному закону последовательно во времени мерами нормируемых параметров ТФХ. Эталонную и регистрируемую термограммы сравнивают на каждом шаге измерения. Искомые характеристики идентифицируют мерам нормируемых параметров, соответствующих равенствам термограмм.

Сложность способов последовательного действия обусловлена неопределенностью выбора интегрального критерия из-за наличия комплекса характеристик: теплоемкости, температуро- и теплопроводности. При аналогичных способах измерения критерий оценки составляют из подобных мер, например, только амплитуды напряжения, длительности времени, числа. Для исключения неопределенности способы идентификации организуют по числу этапов в соответствии с количеством однородных параметров, составляющих комплекс. На каждом этапе выбирают однородный критерий, не зависящий от других параметров комплекса. Проиллюстрируем эти определения температуропроводности

по нормированным мерам $\sum_{i=1}^n a_{0i}$.

Для исключения в критерии теплопроводности

(или теплоемкости) пропорциональных амплитуде термограммы, критерий формируют из соотношений температур $\{T_i, T_{0i}\}$ на i -том шаге измерения. Из анализа разницы отношений управляют мерами нормированных параметров. Анализ проводят сравнением дифференциала ϵ_i отношений температур с заданной ϵ_T уставкой. Шаг дискретизации a изменяют до выполнения равенства $\epsilon_i = \epsilon_T$, что соответствует условию перехода ко второму этапу идентификации относительно меры нормированных значений теплопроводности λ_{0i} с найденной мерой a_{0i} . После определения на втором этапе соответствующей меры осуществляется третий этап по выбору меры теплоемкости γ_{0i} . Для повышения точности контроля значения мер $\{a_{0i}, \lambda_{0i}, \gamma_{0i}\}$ уточняются циклически по вышеописанной процедуре при уменьшении уставки.

Способ идентификации последовательного действия реализован в ИВС ТЕРМИС-М на НПО "Энергия" при контроле ТФХ материала класса "Рипор", "Тинк" и "КССК". Однако этот способ требует предварительной градуировки измерительного канала МИП или прецизионной настройки аппаратных средств ПИП и каналов ИВП. Достоверность контроля с заданной точностью достигается только после калибровки и периодической поверки ИВС, что снижает оперативность определения состава и свойств веществ. Устраняет указанные недостатки следующий способ.

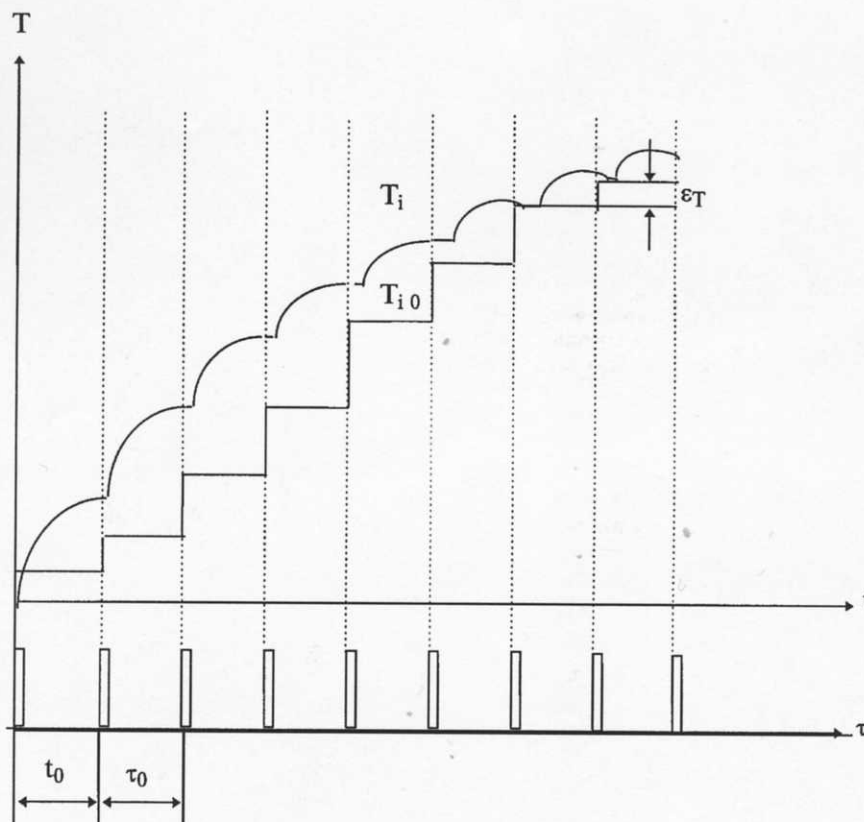


Рис. 9. Способ идентификации последовательного действия.

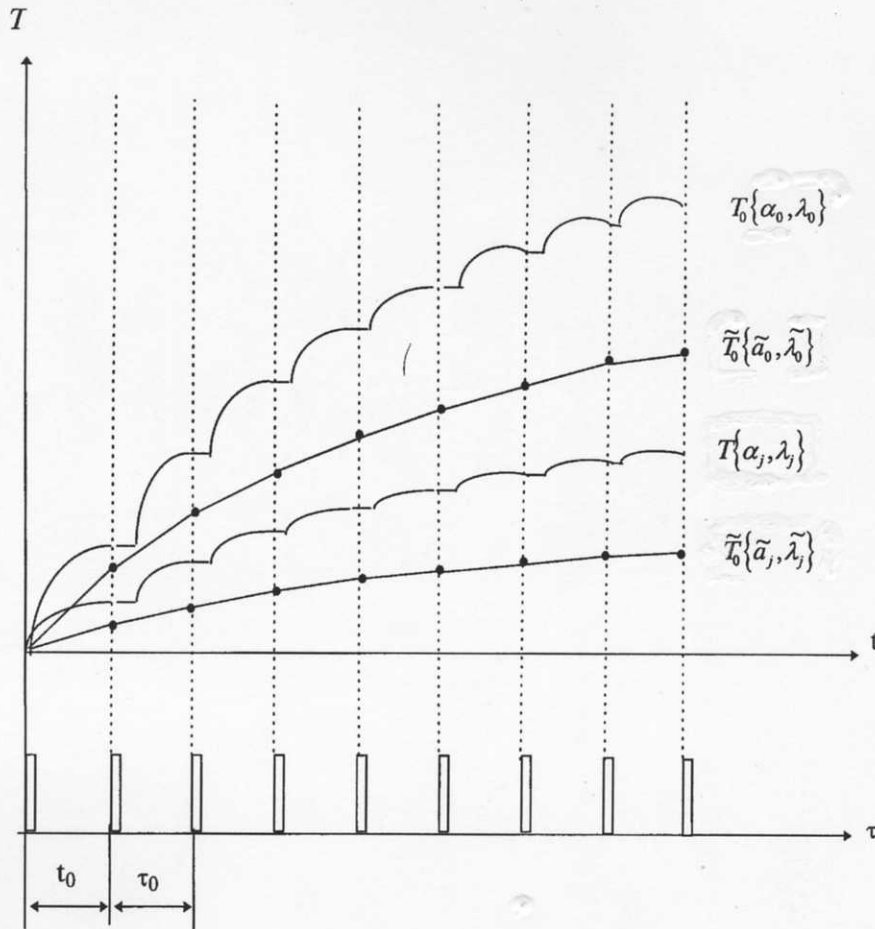


Рис. 10. Способ идентификации последовательного приближения.

Способ идентификации последовательного приближения [Патент по заявке № 4932067/25], с целью повышения точности за счет снижения динамической и методической погрешности, включает сравнение (рис. 10) минимальной погрешности в моменты регистрации измеренной температуры с оригинальными по математической модели. Оригиналы термограммы формируют посредством программного управления мерами нормируемых теплофизических характеристик. По мерам, соответствующим равенству температур, определяют искомые характеристики, которые идентифицируют по нормированным значениям характеристик эталона. Отличительной особенностью этого способа является коррекция термограммы, полученной по математической модели процесса контроля, относительно реальной термограммы эталонного материала с нормированными параметрами. Оригиналом является скорректированная по эксперименту моделируемая термограмма. Исследуемая термограмма j -того материала сопоставляется с термограммой оригинала, а искомые параметры находятся относительно нормированного параметра, скорректированного по измеренным значениям исследуемого и эталонного образцов:

$$\begin{cases} a_j = a_0 \frac{\tilde{a}_j}{\tilde{a}_0} \\ \lambda_j = \lambda_0 \frac{\tilde{\lambda}_j}{\tilde{\lambda}_0} \end{cases}$$

Расчетные формулы получены из условия коррекции: отношения расчетных и действительных значений равны (см. п.1). Измеренные значения $\tilde{V} = \{\tilde{a}_j, \tilde{\lambda}_j\}$ на исследуемом и $\tilde{V}_0 = \{\tilde{a}_0, \tilde{\lambda}_0\}$ эталонном материале рассчитывают итерацией из сопоставления измеренных термограмм $\{\tilde{T}, \tilde{T}_0\}$ и смоделированной T_0 для действительных значений $V_0 = \{a_0, \lambda_0\}$ эталона. Действительные значения $\tilde{V} = \{a_j, \lambda_j\}$ определяются простыми соотношениями в явной форме, когда расчетные параметры \tilde{V} требуют итерационных вычислений.

Способ идентификации с последовательным приближением (итерацией) внедрен на НПО "Энергия" в ИВС ТЕМП-071 при контроле мате-

риалов класса пенопласты-полимеры-стекла. Эксперимент показал воспроизводимость результатов во всем диапазоне относительно эталонных образцов полиметилметакрилат, рипор, фторопласт ФТ-4, кварцевое стекло ТФ, а погрешность контроля не превышала погрешность измерения эталонов стационарными методами. Следует отметить, что широкий диапазон измерения: $\lambda = \{0,02 \div 5\} [\text{Вт/мК}]$, $a = \{(1,0 \div 10) \cdot 10^{-7}\} [\text{м/с}]$ уверенно перекрывается идентификацией по одному любому эталону из совокупности триады диапазонов без последующей калибровки. Для кодоимпульсных ИВС с шинной структурой на базе миниЭВМ возможна идентификация по аналогии, предполагающая большой объем интерфейсов памяти.

Способ идентификации параллельного действия [Патент № 2018117 (Россия)], с целью расширения диапазона контроля ТФХ, основан на сравнении исследуемой термограммы с семейством нормированных термограмм (рис. 11), соответственно исследуемого и эталонного материалов. Образцы семейства откликов на материалах с нормированными параметрами хранятся в массиве данных с соответствующим массивом нормированных характеристик эталонов. При идентификации по аналогии решается оптимизационная задача. Соответственно, измеренной термограмме T_k находится из семейства $\hat{T} = \{\hat{T}_0, \hat{T}_1, \hat{T}_2, \dots, \hat{T}_{n-1}\}$ такая термограмма \hat{T}_k , для $0 \leq k \leq n - 1$, для которой существует минимальная погрешность:

$$\varepsilon_1(\hat{T}, V) = \min \varepsilon_1(T, V)$$

По оптимальному образу термограммы \hat{T}_k с нормируемыми параметрами $V = \{a_{0k}, \lambda_{0k}\}$ идентифицируют исследуемые характеристики.

В способах идентификации по аналогии при оптимизации по заданным критериям осуществляется коррекция по n -эталонам без использования математических моделей контроля физических процессов. Однако физическая модель и соответствующее математическое обеспечение инвариантно замещаются стохастической моделью метрологических средств. Данный способ требует богатого экспериментального опыта, формируемого длительное время, и мощную вычислительную технику. В процессе наращивания массива экспериментальных данных при создании новых материалов способ аналогии дифференцируется по чувствительности и интегрируется по диапазону контроля. В отличие от других способов, за счет накопления информации в процессе упорядочивания и анализа, он имеет тенденцию к развитию гибкости и универсальности.

Другими словами, можно говорить о появлении основного признака информации-самоорганизации, т.е. о формировании и интеграции новой функции информационного процесса - синтеза. Однако исследование развивающегося информационного

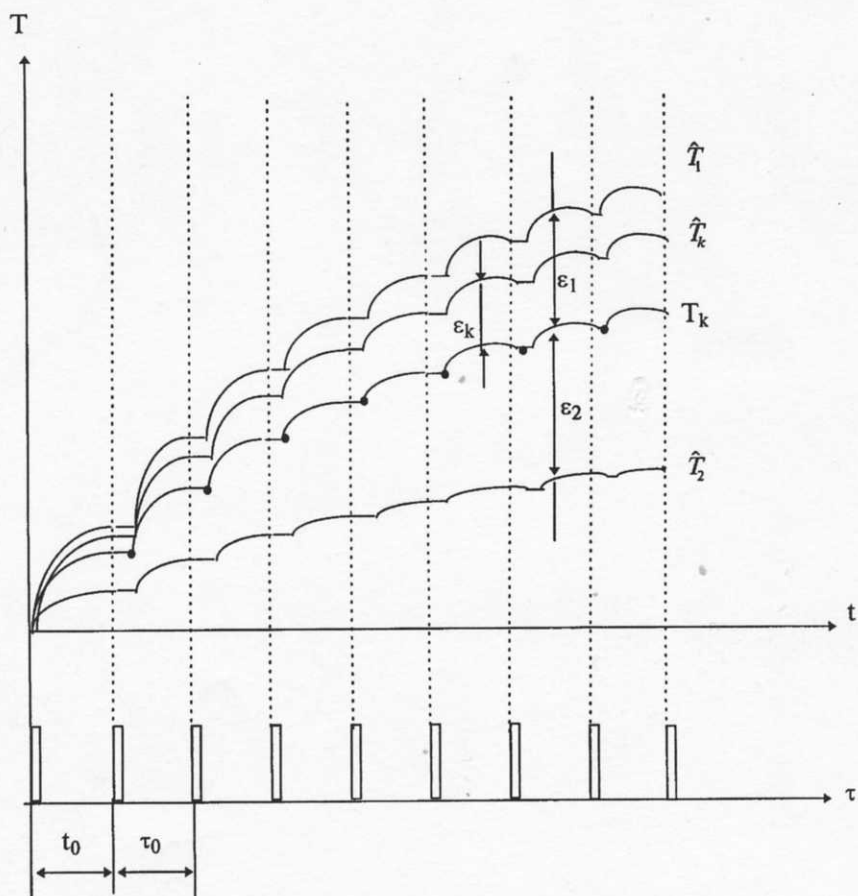


Рис. 11. Способ идентификации параллельного действия.

обеспечения - самостоятельное научное направление.

Способ идентификации по аналогии реализован в научно-исследовательских работах ТГТУ с НПО "Энергия", на базе ИВС ТЕМП-075 с использованием миниЭВМ ZX-SPEKTRUM, организованной по шинной структуре с программно-управляемым кодоимпульсным микропроцессором Z80 [12].

ВЫВОДЫ

1. Заключительным этапом технологии проектирования ИВС является создание метрологических средств, идентифицирующих качественные характеристики процесса контроля физическому процессу в ПИП.

2. Проектирование метрологических средств включает информационный анализ способов повышения точности, выбор инвариантных решений, математическое моделирование процесса идентификации для оптимизации по точности, создание алгоритмов коррекции и калибровки, синтез программ и структуры программно-управляемого ПИП и эталонирование натурального образца ИВС по диапазону контроля материалами с нормированными характеристиками состава и свойств веществ.

3. Информационный анализ способов повышения точности показывает перспективность способов коррекции схемных решений ПИП, использующих принцип компенсации по рабочему и эталонному каналу с нормированными параметрами.

4. Выявлены гибкие способы коррекции: структуры - связями управления, режима - синхронизацией измерения, диапазона - мерами контроля, инвариантные информационным процессам в координатах: пространство - время - функция, и соответствующим архитектурам микропроцессорных средств.

5. Развита метод динамического программирования при оптимизации математической модели идентификации состава и свойств веществ по точности мер качества с нормированными характеристиками за счет программного управления начальными условиями модели идентификации.

6. Найдено решение оптимизации в виде итерационного алгоритма калибровки адаптивного к диапазону контроля по программно-управляемым мерам. Алгоритм калибровки реализован новыми программно-управляемыми способами контроля теплофизических, электрофизических, электрохимических характеристик по диапазону измерения

ИВС, принципу релаксации исследуемых веществ и режиму контроля.

7. Предложены новые способы идентификации состава и свойств веществ: параллельного и последовательного действия, последовательного приближения, инвариантные информационным процессам и обеспечению ИВС контроля качественных характеристик с заданной точностью и быстродействием в нормируемом диапазоне.

8. Показано развитие способов повышения точности по вектору гибкости и универсальности за счет интеграции информационных процессов и обеспечения ИВС при организации операционной схемы вида: коррекция - калибровка - идентификация.

9. Управляемые способы коррекции совершенствуют архитектуру: аппаратные средства и программное обеспечение. Осуществляют прогресс математического обеспечения и метрологических средств программно-управляемые способы калибровки. Способы идентификации дифференцируют самостоятельную категорию, информационное обеспечение, развивающееся в микропроцессорных системах и сетях при решении задач процессов передачи информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Земельман М.А.* Метрологические основы технических измерений. М.: Изд-во стандартов, 1991. 228 с.
2. *Кулаков М.В.* Технологические измерения и приборы для химических производств. М.: Машиностроение, 1983. 424 с.
3. *Кондрашкова Г.А.* Технологические измерения и приборы в целлюлозно-бумажной промышленности. М.: Лесная пром-ть, 1981. 376 с.
4. *Электрические измерения /* Под ред. А.В.Фремке и Е.Д.Душина. Л.: Энергия, 1980. 392 с.
5. *Фаранзаде Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю.* Технологические измерения и приборы. М.: Высш. шк., 1989. 459 с.
6. *Чернявский Е.А., Недосекин Д.Д., Алексеев В.В.* Измерительно-вычислительные средства автоматизации производственных процессов. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 272 с.
7. *Мирский Г.Я.* Микропроцессоры в измерительных приборах. М.: Радио и связь, 1984. 160 с.
8. *Мелик-Шахназаров М.М., Маркатун М.Г., Дмитриев Б.А.* Измерительные приборы со встроенными микропроцессорами. М.: Энергоатомиздат, 1985. 240 с.
9. *Герасимов Б.И., Глинкин Е.И.* Микропроцессорные аналитические приборы. М.: Машиностроение, 1989. 248 с.
10. *Глинкин Е.И., Бояринов А.Е., Герасимов Б.И.* Адаптивная калибровка МАП / Вестник ТГТУ. Тамбов, 1995. № 1. С. 35-45.
11. *Ту Ю.Т.* Современная теория управления. М.: Машиностроение, 1971. 472 с.
12. *Герасимов Б.И., Глинкин Е.И.* Микропроцессоры в приборостроении. М.: Машиностроение, 1997. 246 с.

Поступила в редакцию 30 декабря 1997 г.