

УДК 539.1.008 : 002.237 : 681.54.001.26

А. М. Онищенко, А. Ю. Онищенко

(Люберцы Московской обл.)

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

Впервые рассматривается задача повышения точности радиометрических приборов контроля состава и свойств веществ путем использования тестовых методов. Последовательно рассмотрены возможности и особенности тестовых методов в радиометрических приборах. На примере трех различных приборов показаны особенности повышения точности. Описаны новые приборы: гамма-отражательный альгистр и два гамма-абсорбционных концентратомера – для проб и потока.

Главным показателем качества любого измерительного прибора является его суммарная погрешность. Для прибора контроля состава и свойств веществ основными составляющими суммарной погрешности являются погрешность представительности, которая характеризуется отношением контролируемого объема ко всему объему материала; методическая и инструментальная погрешности; случайная погрешность, которая определяется флуктуациями информационного сигнала. Для уменьшения суммарной погрешности ставится задача: спроектировать прибор таким образом, чтобы его показания не зависели от медленных изменений коэффициентов уравнения, чтобы он не требовал периодических переградуировок из-за старения элементов, сравнительно быстрого распада источников и других причин, а сам подстраивал себя в квазистатических режимах подстройки, когда допустимо измерение в дискретные моменты времени на заданном промежутке. Более того, прибор не должен требовать индивидуальной сложной и трудоемкой градуировки на конкретный продукт предприятия, а должен быть проградуирован один раз при выпуске на заводе-изготовителе и затем использован по назначению.

Такая задача типична для тестовых методов повышения точности измерений [1], которые в лучшем случае не усиливают некоррелированную составляющую погрешности σ и не увеличивают среднюю квадратическую статистическую погрешность $\sigma_{ст}$ (хотя иногда и увеличивают незначительно эти погрешности), но и не уменьшают их, а позволяют практически полностью устранить коррелированные составляющие погрешности.

В общем случае при тестовых методах процесс измерения состоит из $(n + 1)$ тактов, где n – количество параметров реального оператора работы прибора. В первом такте преобразуется измеряемый параметр x , а в n других, дополнительных, – тесты $T_1(x), T_2(x), \dots, T_n(x)$, каждый из которых является

$$\times \{[(y'_2 - y'_1) - (y_2 - y_1)](k_3^2 - 1) + [(y_3 - y_1) - (y'_3 - y'_1)](k_2^2 - 1)\}^{-1}, \quad k_1 = 1.$$

В работе [1] показано, что повышение точности измерения тестовыми методами в общем случае возможно только при совместном использовании аддитивных и мультипликативных тестов. Оптимальной комбинацией этих тестов является следующая: один тест одного рода и l тестов другого рода. При равенстве нулю любого из параметров a_1, a_2, \dots, a_n модели (1), за исключением a_n , тестовый алгоритм повышения точности может быть получен с помощью только аддитивного теста. С помощью только мультипликативного теста ни при каких условиях невозможно повысить точность измерений. Для зависимости (1) вида $y = a_1 + a_2 x^n$ при использовании только аддитивного теста вида $(x + Q)$ измеряемый параметр x можно определить после трех преобразований $y_0 = a_1 + a_2 x^n$, $y_1 = a_1 + a_2(x + Q_1)^n$, $y_2 = a_1 + a_2(x + Q_2)^n$ по тестовому алгоритму

$$\frac{y_1 - y_0}{y_2 - y_0} = \frac{nQ_1 x^{n-1} + Q_1^2 x^{n-2} \frac{n(n-1)}{1 \cdot 2} + Q_1^3 x^{n-3} \frac{n(n-1)(n-2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \dots}{nQ_2 x^{n-1} + Q_2^2 x^{n-2} \frac{n(n-1)}{1 \cdot 2} + Q_2^3 x^{n-3} \frac{n(n-1)(n-2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \dots}. \quad (6)$$

В случае аппроксимации квадратного уравнения линейной зависимостью (1) и реализации тестового алгоритма (2) с аддитивными тестами $T_1(x) = x + Q$ и $T_2(x) = kx$ оптимальные значения тестов Q и k , соответствующие минимальной погрешности определения x из уравнения (4), могут быть найдены из уравнений

$$b_1 b_4^2 Q^5 + (b_1^2 b_3 + b_2 b_4^2) Q^4 + 2b_1 b_4 b_5 Q^3 + 2b_2 b_4 b_5 Q^3 + 2b_2 b_4 b_5 Q^2 + b_1 b_5^2 Q + b_2 b_5^2 = 0, \quad \Delta x = x_{\max} - x_{\min},$$

$$b_1 = \frac{1}{2} b_4 = \frac{1}{4\Delta x} \ln \frac{2a_3 x_{\max} + a_2 + a_3 \frac{\Delta x}{2}}{2a_3 x_{\min} + a_2 + a_3 \frac{\Delta x}{2}}, \quad b_2 = \frac{a}{4a_3 \Delta x} \ln \frac{2a_3 x_{\max} + a_2 + \frac{1}{2} a_3 \Delta x}{2a_3 x_{\min} + a_2 + \frac{1}{2} a_3 \Delta x},$$

$$b_3 = M(k) + 2\sigma_k - 2V\tau \ln \frac{x_{\max}}{x_{\min}} (\Delta x)^{-1} + 2\sigma a_1 \ln \frac{x_{\max}}{x_{\min}} (a_2 \Delta x)^{-1},$$

$$b_5 = M(Q) + 2\sigma_Q + V\tau + 2\sigma_1 a_2^{-1},$$

где V – скорость изменения величины $x(t)$, τ – время одного такта измерения. Для приближенного расчета оптимальных значений параметров тестов Q и k можно пользоваться формулами

$$Q = \{\sigma + a_2 [M(Q) + 2\sigma_Q + V\tau]\}^{1/2} a_3^{-1/2},$$

$$k = 1 + 2\{\sigma (\Delta x)^{-1} \ln [x_{\max} (x_{\min})^{-1}]\} +$$

$$+ a_2 [M(k) + 2\sigma_k - 2V\tau(\Delta x)^{-1} \ln(x_{\max}/x_{\min})] \} a_3^{-1} \Delta x^{-1}.$$

При использовании тестовых методов для повышения точности радиоизотопных приборов наиболее сложной задачей является формирование аддитивных и мультипликативных тестов. Как будет показано ниже, формирование тестов зависит не только от назначения прибора (типа параметра x объекта контроля (ОК)), но и от реализованного в приборе метода измерения. Сначала рассмотрим формирование тестов и реализацию тестовых алгоритмов повышения точности гамма-отражательных приборов различного назначения.

Зависимость интенсивности обратнорассеянного гамма-излучения (определяемая прибором величина, которую обозначим через y) для тонкого пучка от расстояния до ОК h (измеряемая величина, которую обозначим через x) в гамма-отражательных альтиметрах согласно [2] может быть записана в виде $y = ax^{-2}$, где a – коэффициент, зависящий от геометрии измерений, плотности и состава вещества объекта контроля, температуры и влажности воздуха и других медленно меняющихся (коррелированных) влияющих параметров. Непостоянство a не позволяет создать высокоточный альтиметр. Если же провести второе измерение, приблизив датчик на калиброванное расстояние H к ОК, то получим второй результат $y_1 = a(x - H)^{-2}$. Найдем $x = H(\sqrt{yy_1} - y_1)(y - y_1)^{-1}$. Таким образом, точность измерения расстояния до ОК не зависит от коррелированных погрешностей, а определяется лишь погрешностью измерения расстояния H и погрешностями измерения расстояний в широком диапазоне (от нескольких до сотен метров). Величина H при этом должна составлять несколько процентов максимального расстояния.

Для измерения малых расстояний (от нескольких сантиметров до нескольких метров) зависимость может быть аппроксимирована выражением $y = ax^{-1}$. Структура гамма-отражательного альтиметра, реализующая тестовый метод с аддитивным тестом, показана на рис. 1. Датчик ИБ прибора состоит из коллимированного источника излучения (И), основного (Д) и дополнительного (Д₁) детекторов с разностью высот H . Схема прибора (П) содержит счетчик (С), реверсивный счетчик (РС) и измеритель отношений (ИО). С выхода счетчика на измеритель отношений поступает сигнал $y_1 = a(x + H)^{-1}$. Измеритель отношений формирует результат $x = y_1 H (y - y_1)^{-1}$, не зависящий от вариаций коэффициента a .

При соответствующем выборе геометрии измерения интенсивность обратнорассеянного низкоэнергетического гамма-излучения (y) обратно пропорциональна содержанию тяжелого компонента (x) в материале ОК и может быть аппроксимирована

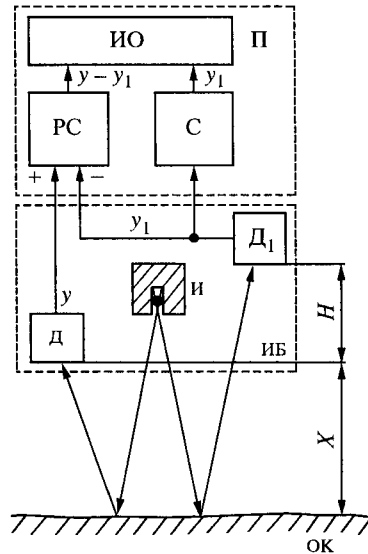


Рис. 1. Структурная схема гамма-отражательного альтиметра

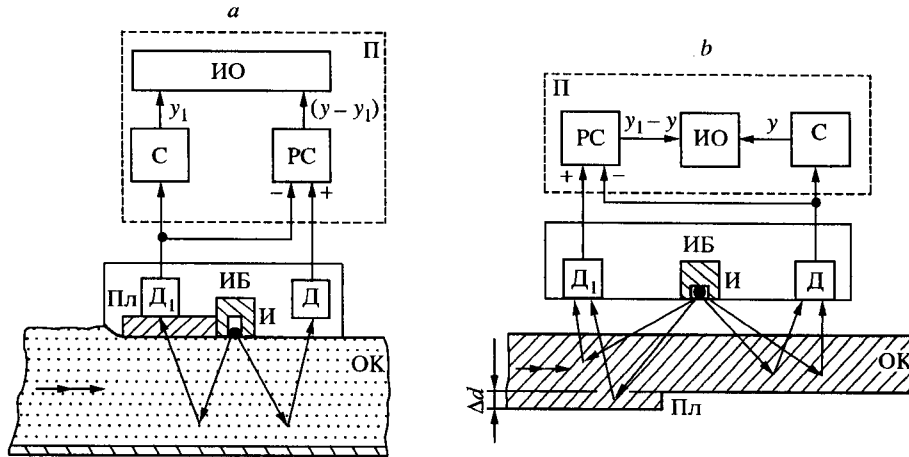


Рис. 2. Структурные схемы гамма-отражательных концентратомера (плотномера) (а) и толщиномера (б)

на выражением $y = ax^{-1}$. Чтобы уменьшить погрешность вследствие непостоянства a , можно проводить измерение содержания x по тестовому методу с аддитивным тестом $T(x) = x + \Delta x$. На рис. 2, а показана схема гамма-отражательного концентратомера, в котором аддитивный тест создан установкой перед детектором $Д_1$ пластины (Пл) из элемента, содержание которого требуется определить в материале ОК. Работа концентратомера осуществляется при скольжении датчика ИБ по поверхности контролируемого сыпучего материала (железной руды). Пластина изготовлена из стали из расчета $\Delta x = 10\%$, т. е. 1/4 диапазона измерений. Алгоритм работы концентратомера аналогичен работе альтиметра $x = \Delta x y_1 (y - y_1)^{-1}$.

Аналогично подбирая геометрические параметры датчика ИБ так, чтобы интенсивность линейно уменьшалась с увеличением плотности ρ материала ОК, и применив в качестве пластины прессованный материал ОК среднего химического состава соответствующей толщины, можно измерять плотность материала. В этом случае расстояния от источника излучения до детекторов, расположенных симметрично относительно источника, будут большими, чтобы обеспечить работу в заинверсионной по отношению к плотности области.

На рис. 2, б показана схема гамма-отражательного толщиномера листовых материалов. Геометрические параметры датчика ИБ подобраны таким образом, чтобы интенсивность приблизительно линейно увеличивалась с ростом толщины листа x . Тогда зависимость сигнала на выходе счетчика (интенсиметра) можно аппроксимировать уравнением $y = ax$, а сигнал на выходе дополнительного детектора – уравнением $y_1 = a(x + \Delta d)$, где Δd – толщина подложенной под лист пластины, изготовленной из материала листа среднего состава и средней плотности и установленной под детектором $Д_1$. Алгоритм работы толщиномера $x = y \Delta d (y - y_1)^{-1}$ отличается от алгоритма работы концентратомера. Толщина пластины выбирается приблизительно равной 1/4 диапазона измерения толщины.

Общим в показанных на рис. 1 и 2 приборах является то, что в них зависимость $y = f(x)$ может быть аппроксимирована уравнением вида $y = ax^n$, не

содержащим свободного члена, что позволяет использовать только аддитивные тесты для построения тестовых алгоритмов повышения точности. Для получения зависимости вида $y = ax^n$ счетчик (интенсиметр) должен строиться по схеме с автоматическим вычитанием фона. Иначе будет получена зависимость $y = a_0 + ax^n$, для которой возможна работа с использованием аддитивных тестов только в случае, когда $n \geq 2$ (т. е. только для альтиметра).

прерывно. Недостатком прибора является наличие двух детекторов, что при неидентичных изменениях их параметров приводит к возникновению соответствующей погрешности и усложняет прибор. Устранить этот недостаток можно применением одного детектора и выполнением измерений в два такта, получая в первом такте сигнал y , а во втором – y_1 . Осуществить это можно перемещением датчика ИБ или детектора в альтиметре с одновременным переключением его выхода либо перемещением пластины в концентратомере и толщиномере с одновременным переключением выхода детектора.

Зависимость интенсивности гамма-излучения, прошедшего через слой материала ОК, от содержания тяжелого компонента в материале близка к экспоненциальной и может быть аппроксимирована уравнением вида $y_4 = a_1 \exp(-a_2 x)$, где a_1 – нестабильная во времени константа; a_2 – чувствительность к составу, прямо пропорциональная произведению ρd и зависящая от состава наполнителя, влажности материала и других дестабилизирующих факторов.

На рис. 3 приведена схема гамма-абсорбционного концентратомера, работающего по тестовому методу повышения точности в четыре такта. В первом такте измеряется интенсивность прошедшего через ОК и пластину излучения $y_1 = a_1 \exp[-a_2 k(x + \Delta x)]$; при этом сигналом с блока управления (БУ) ключ K_1 коммутатора (К) замкнут и импульсы с детектора поступают на вход первого измерителя отношения интенсивностей ИОИ₁. Если измеряется, например, содержание железа в руде, то пластина должна быть изготовлена из стали и иметь толщину, которая уменьшала бы интенсивность излучения на детектор на величину Δx , равную 0,1 диапазона измерения. Сигнал y_1 запоминается в ИОИ₁. Во втором такте блок управления поворачивает ОК на 90° и просвечиваемая излучением его толщина уменьшается в k раз (отно-

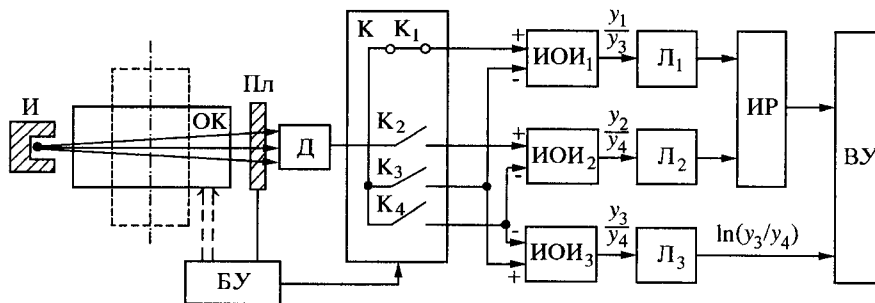


Рис. 3. Гамма-абсорбционный концентратомер для проб

шение сторон параллелограмма ОК равно $1/k$), ключ K_1 размыкается, замыкается ключ K_2 и из детектора на ИОИ₂ поступает сигнал $y_2 = a_1 \times \exp[-a_2(x + \Delta x)]$, который запоминается в ИОИ₂. В третьем такте сигналом с блока управления объект контроля снова становится в показанное на рис. 3 положение, пластина опускается, ключ K_3 замыкается и на ИОИ₁ и ИОИ₃ из детектора поступает сигнал $y_3 = a_1 \exp(-a_2 kx)$, в ИОИ₃ и ИОИ₁ вычисляется отношение y_1/y_3 . В четвертом такте сигналом с блока управления объект контроля поворачивается на 90° (пластина, как и в третьем такте, опущена), ключ K_3 размыкается, ключ K_4 замыкается и на ИОИ₂ и ИОИ₃ из детектора поступает сигнал y_4 . В блоке ИОИ₂ определяется отношение y_2/y_4 , а в ИОИ₃ – отношение y_3/y_4 . С выходов ИОИ сигналы подаются на логарифматоры L_1 , L_2 и L_3 , на выходах которых формируются соответствующие сигналы $\ln(y_1/y_3)$, $\ln(y_2/y_4)$, $\ln(y_3/y_4)$. На выходе измерителя разности (ИР) формируется сигнал $\ln(y_1/y_3) - \ln(y_2/y_4)$, который вместе с сигналом с L_3 поступает в вычислительное устройство (ВУ), определяющее концентрацию x по уравнению $x = \Delta x \ln(y_3/y_4) [\ln(y_1/y_3) - \ln(y_2/y_4)]^{-1}$, которое является решением системы последних уравнений относительно x .

Показанный на рис. 3 концентратомер замечателен тем, что результат измерения не зависит от a_1 , a_2 , k и других медленно меняющихся параметров. Погрешность концентратомера определяется средней квадратической случайной погрешностью измерения интенсивностей и инструментальными погрешностями блоков ИОИ₁, ИОИ₂, ИОИ₃, L_1 , L_2 , L_3 , ИР и ВУ, которые при цифровом выполнении блоков могут быть пренебрежимо малыми. Пластина не вносит погрешности, так как при любом неточном ее изготовлении конкретное значение Δx может быть введено в вычислительное устройство. Суммарная средняя квадратическая погрешность измерения интенсивностей при том же общем времени измерения вдвое больше, чем у обычного измерения, следовательно, для сохранения того же быстродействия при той же погрешности концентратомер потребует применения вчетверо большей активности, нежели обычный гамма-абсорбционный прибор.

Если использовать источник высокоэнергетического гамма-излучения со слабой зависимостью y от состава (или же источник низкоэнергетического гамма-излучения, если состав и плотность тесно коррелируют) и изготовить пластину из прессованной (например, на клею) железной руды среднего химического состава, то радиоизотопный прибор превратится в плотномер, работающий по тому же алгоритму в четыре такта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Онищенко А. М.** Методы повышения точности приборов с источниками ионизирующего излучения. М.: Изд-во стандартов, 1987.
2. **Булатов Б. П., Андришин Н. Ф.** Обратнорассеянное гамма-излучение в радиационной технике. М.: Атомиздат, 1971.