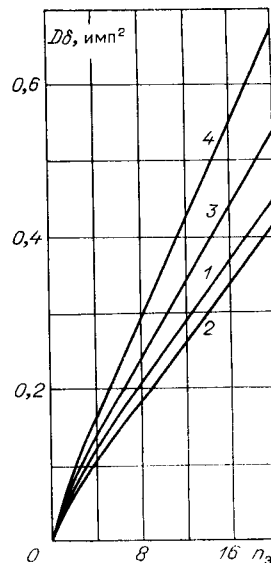


Рис. 3. Зависимость дисперсии погрешности интегрирования $D\delta$ от числа эквивалентных двоичных разрядов n_3 :

1 — для двоичного множителя; 2 — для десятичного множителя с кодированием по выражению (4); 3, 4 — для десятичных множителей, рекомендуемых в работах [5, 6] соответственно.



Сравнение (5) и (7) показывает, что достижимая точность цифрочастотного интегрирования на десятичном множителе выше, чем на двоичном: $\sim 10\%$.

По изложенной методике были также проанализированы способы кодирования десятичных множителей, предложенные в работах [5, 6]. Результаты анализа, которые представлены на рис. 3 в виде зависимости дисперсии погрешности интегрирования от числа эквивалентных двоичных разрядов, подтвердили, что способ кодирования для десятичных множителей, определяемый выражением (4), обладает по сравнению с известными способами кодирования наименьшей дисперсией погрешности интегрирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов В. П., Плискин Ю. С., Ракаев А. П., Хризолитов А. А. Исследование погрешности кусочно-линейного представления характеристик частотных преобразователей.— Метрология, 1977, № 8.
2. Данчеев В. П. Цифрочастотные вычислительные устройства. М.: Энергия, 1976.
3. Воронов А. А., Гарбузов А. Р., Ермилов Б. И. и др. Цифровые аналоги для систем автоматического управления. М.— Л.: Изд-во АН СССР, 1960.
4. Доронина О. М., Кариниц И. В., Петух А. М. Графический метод определения максимальных погрешностей цифровых интеграторов последовательного переноса.— Автометрия, 1975, № 2.
5. Robrock H.R. V. A. Digital Integrator Employing Decimal Rate Multiplication.— In: Proc. of the Symposium on Pulse-Rate and Pulse-Number Signals in Automatic Control. Budapest, 1968, p. 68—74.
6. Kaps G. Scaling of Frequency Analogous Measured Values.— Ibid, p. 148—153.

Поступило в редакцию 20 февраля 1978 г.;
окончательный вариант — 13 марта 1980 г.

УДК 539.1.074.088

А. М. ОНИЩЕНКО

(Люберцы Московской обл.)

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАГРУЗКИ ДЕТЕКТОРА РАДИОИЗОТОПНОГО ПРИБОРА

Для уменьшения статистической погрешности радионуклеонного прибора иногда увеличивают загрузку детектора. Однако при этом начинают сказываться просчеты. В современных радионуклеонных приборах широко используются цифровые измерители скорости счета с малым «мертвым» временем, специальные методы уменьшения просчетов и высокостабильные пороговые устройства с низким порогом срабатывания. В этом случае потеря счета в измерителе не происходит. Тогда для приборов с газоразрядными или сцинтилляционными детекторами, обладающими «мертвым» временем τ непреодолеваемого типа, статистическая погрешность, выраженная в единицах измеряемой величины, определится из выражения

$$\sigma'_{ст} = 1/S_x \sqrt{n_0 t (1 + n_0 \tau)}, \quad (1)$$

где S_x — приборная чувствительность к измеряемому параметру x ; n_0 — истинная скорость счета импульсов без учета просчетов (число попаданий [1] в единицу времени).

В общем виде истинная скорость счета является функцией измеряемого параметра x и других параметров объекта контроля y и z и пропорциональна активности источника Q :

$$n_0 = KQf(x, y, z) \quad (2)$$

(K — приборная константа). Следуя [1], зависимость измеренной скорости счета n от истинной n_0 и «мертвого» времени τ подчиняется соотношению

$$n = n_0 / (1 + n_0 \tau),$$

откуда

$$n = KQf(x, y, z) / (1 + KQ\tau f(x, y, z)). \quad (3)$$

Учитывая, что $S_x = \frac{\partial n}{\partial x} / n$, из (1) и (3) получим

$$\sigma'_{ст} = \sqrt{f(x, y, z) [1 + KQ\tau f(x, y, z)]} / |f'_x(x, y, z) \sqrt{KQ\tau}|. \quad (4)$$

Формула (4) позволяет определить погрешность прибора в статике для любых (но постоянных в пределах одного измерения) значений параметров объекта контроля K , Q или τ . Погрешность $\sigma'_{ст}$ уменьшается с ростом активности Q несмотря на значительные просчеты при больших нагрузках детектора. Однако если увеличение Q при малых нагрузках ($n_0\tau \ll 1$) приводит к уменьшению $\sigma'_{ст}$, пропорциональному \sqrt{Q} , то при больших нагрузках степень влияния Q на погрешность $\sigma'_{ст}$ снижается.

Для большинства радиоизотопных приборов зависимость (2) монотонна, а на зависимости $\sigma'_{ст}$ от параметров объекта контроля наблюдается пологий минимум.

Поэтому из (4), приравняв частную производную от $\sigma'_{ст}$ по контролируемому параметру к нулю, можно найти оптимальное значение этого параметра, соответствующее минимуму погрешности, которое затем можно фиксировать. Так, например, в широко распространенных γ -абсорбционных радиоизотопных приборах с экспоненциальной зависимостью n_0 от массового коэффициента ослабления μ , плотности ρ и толщины слоя d для расчета оптимальной толщины слоя $d_{опт}$ получим

$$\mu \rho d_{опт} = 2[1 + KQ\tau \exp(-\mu \rho d)]. \quad (5)$$

Величина $KQ\tau \exp(-\mu \rho d)$ численно равна относительным просчетам импульсов с детектора. При малых нагрузках, когда просчетами можно пренебречь, из (5) получим классическую формулу $\mu \rho d_{опт} = 2$. Если же просчетами пренебречь нельзя, то значение $\mu \rho d_{опт}$ возрастает на величину относительных просчетов (так, например, при 10% просчетов $\mu \rho d_{опт} = 2,2$).

Следует отметить, что при определении погрешности $\sigma'_{ст}$ из (4) или оптимального параметра $y_{опт}$ (например, $d_{опт}$ из (5)) значение $\sigma'_{ст}$ будет несколько заниженным, а $y_{опт}$ — завышенным относительно соответствующего истинного значения. Это обусловлено тем, что с ростом нагрузки детектора уменьшается как средняя продолжительность «мертвого» времени τ , так и его флуктуации вокруг этого значения [2]. Поэтому для более точного определения $\sigma'_{ст}$ и $y_{опт}$ целесообразно найти τ при расчетной нагрузке, а затем значения $\sigma'_{ст}$ и $y_{опт}$ уточнить. Ограничением на увеличение нагрузки детектора является его срок службы. Поэтому один из возможных путей уменьшения $\sigma'_{ст}$ или увеличения быстродействия прибора заключается в параллельном включении счетчиков в детекторе и использовании специальных электронных схем, уменьшающих τ детектора [3].

Если же электронный блок прибора решает градуировочное уравнение $n = \varphi(x, y, z)$, отличное от уравнения шкалы (3), то необходимо учитывать два обстоятельства. Во-первых, при определении $\sigma'_{ст}$ из (1) в нее нужно подставлять чувствительность S_x , вычисляемую не из уравнения шкалы (3), а из градуировочного уравнения. Во-вторых, необходимо учитывать погрешность δ_d от деформации шкалы прибора. Аппроксимацию уравнения шкалы градуировочным уравнением проводят обычно по методу наименьших квадратов (МНК) или по критерию Чебышева (когда минимизируют максимальную величину погрешности δ_d). Градуировка по критерию Чебышева используется в приборах с регламентированными требованиями к линейности, а также в приборах, измеряющих параметр, на который накладывается жесткий допуск.

Применение МНК покажем на примере радиоизотопного золомера с линейной зависимостью n_0 от зольности A^c : $n_0 = KQ(a - bA^c)$ [4], для которого с уче-

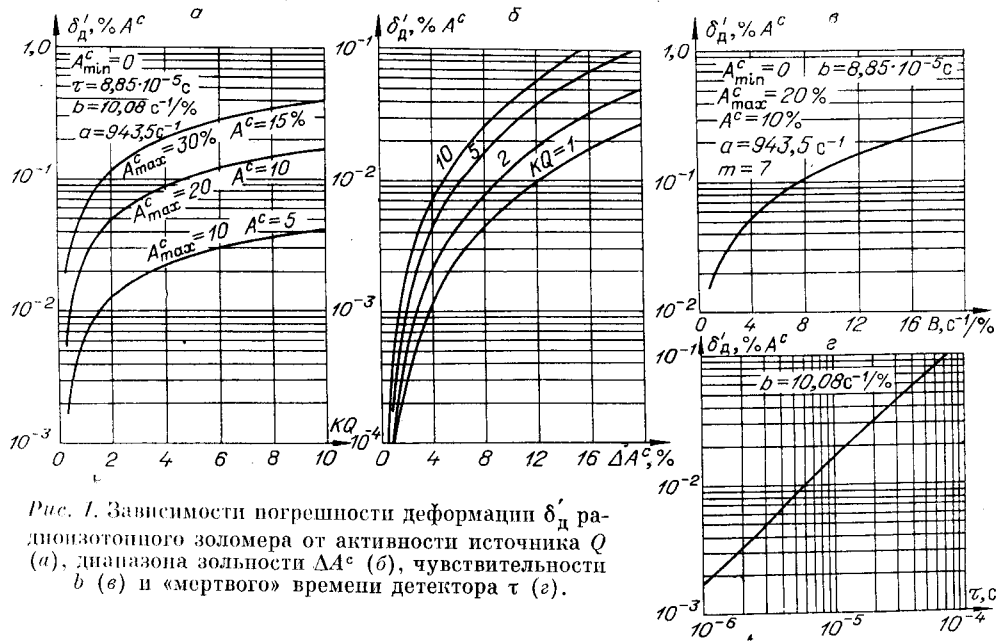


Рис. 1. Зависимости погрешности деформации δ'_d радионуклонного зооломера от активности источника Q (а), диапазона зольности ΔA^c (б), чувствительности b (в) и «мертвого» времени детектора τ (г).

том (3) зависимость $n=f(A^c)$ при наличии просчетов изобразится в виде вогнутой вниз убывающей кривой. При аппроксимации этой кривой линейным градуировочным уравнением $n = a_1 - b_1 A^c_{II}$ (A^c_{II} — приборное значение зольности) из условия МНК находят значения a_1 и b_1 и затем погрешность δ'_d :

$$\delta'_d = A^c - A^c_{II} - A^c - \frac{\Delta n + c/\tau - n_{cp}c}{KQb\tau^2 (\Delta n n_{cp} - (\Delta^3 n/3))} \left[n_{cp} - \frac{n_0}{1+n_0\tau} \right] - \frac{1}{KQb\tau} - \frac{c}{KQbt^2 \Delta n} - \frac{a}{b}. \quad (6)$$

Здесь

$$n_{max} = \frac{KQ(a - bA^c_{min})}{1 + KQ\tau(a - bA^c_{min})}, \quad n_{min} = \frac{KQ(a - bA^c_{max})}{1 + KQ\tau(a - bA^c_{max})}, \quad n_{cp} = (n_{max} + n_{min})/2,$$

$$c = \ln(1 - n_{max}\tau)/(1 - n_{min}\tau), \quad \Delta n = n_{max} - n_{min}, \quad \Delta^3 n = n_{max}^3 - n_{min}^3.$$

Типовые зависимости погрешности δ'_d от параметров прибора показаны на рис. 1. Быстрый рост δ'_d как функции Q для больших диапазонов $\Delta A^c = A^c_{max} - A^c_{min}$ позволяет рекомендовать разбиение шкалы на поддиапазоны, чтобы уменьшить δ'_d , а также специальное включение счетчиков [3] для уменьшения τ и δ'_d .

Применение метода минимакса рассмотрим на примере γ -абсорбционного плотномера с экспоненциальной зависимостью $n_0 = KQ \exp(-\mu\rho d)$. С учетом (3) уравнение шкалы при просчетах будет отличным от экспоненты.

На рис. 2, а показаны зависимости $n=f(\rho)$ (с учетом (3) они отличаются от экспоненциальных) для плотномера, в котором используется счетный детектор (состоящий из 8 газоразрядных счетчиков типа СБМ-19) с «мертвым» временем $\tau = 3 \cdot 10^{-5} \text{ c}$ при $\mu d = 2 \text{ см}^3/\text{г}$. Все зависимости нормированы к скорости счета при минимальной плотности. Кривые 1 и 2 отражают зависимости $n=f(\rho)$ при малых загрузках детектора, когда $KQ\tau \exp(-\mu\rho d) < 1$ (1 — при $KQ = 1 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$, 2 — при $KQ = 2,463 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$). Кривая 3 соответствует зависимости $n=f(\rho)$ при $KQ\tau \exp(-\mu\rho d) = 1$ (когда $KQ = 4,489 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$). Видно, что при $\rho < \rho_{cp}$ кривая 3 вогнута вниз, при $\rho = \rho_{cp}$ наблюдается перегиб, а при $\rho > \rho_{cp}$ кривая 3 вогнута вверх. Зависимости $n=f(\rho)$ при больших загрузках ($KQ\tau \exp(-\mu\rho d) \gg 1$) представляют собой монотонные кривые, вогнутые вниз (кривая 4 — при $KQ = 8,18 \times 10^5 \text{ c}^{-1}$, 5 — при $KQ = 10^7 \text{ c}^{-1}$). Пусть уравнение шкалы необходимо аппроксимировать прямой. Анализируя зависимости на рис. 2, а и учитывая, что из условия минимакса в общем виде коэффициенты прямой определить нельзя, критерий Чебышева можно приближенно заменить равенством отклонений на краях и середине диапазона измерения. Из этого условия получим формулу для расчета погрешности

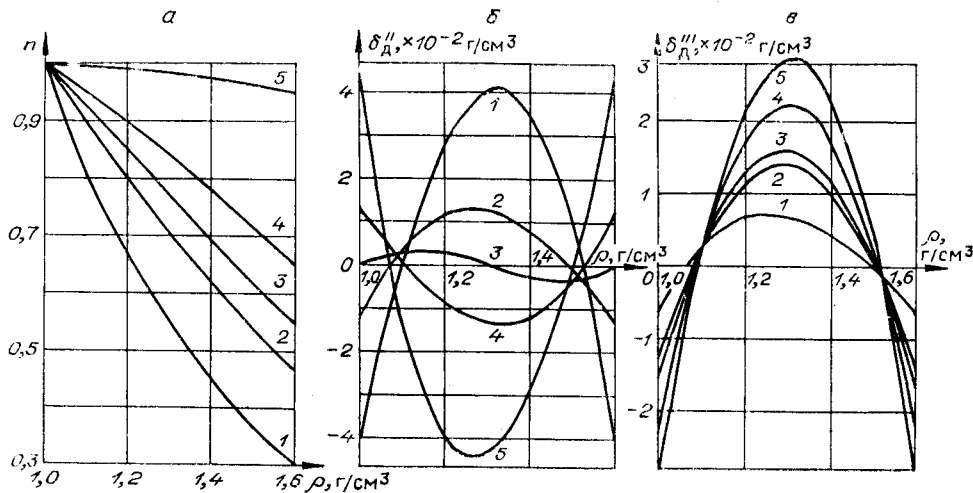


Рис. 2. Зависимости нормированной скорости счета n от плотности ρ (а) и погрешности деформации δ_d'' от плотности при линейной (б) и экспоненциальной (в) аппроксимациях.

δ_d'' деформации уравнения шкалы плотномера против аппроксимирующей прямой:

$$\delta_d'' = \rho + \frac{2n - n_2 - n_3}{2(n_1 - n_3)} (\rho_{\max} - \rho_{\min}) + \frac{3\rho_{\max} + \rho_{\min}}{4}. \quad (7)$$

Здесь

$$n_1 = KQ \exp(-\mu\rho_{\min}d) / (1 + KQ\tau \exp(-\mu\rho_{\min}d)), \quad n_2 = KQ \exp(-\mu\rho_{\max}d) / (1 + KQ\tau \exp(-\mu\rho_{\max}d)), \quad n_3 = KQ \exp(-\mu\rho_{cp}d) / (1 + KQ\tau \exp(-\mu\rho_{cp}d)).$$

На рис. 2, б приведены зависимости $\delta_d'' = f(\rho)$ соответственно при аппроксимации кривых 1—5 на рис. 2, а прямыми. Видно, что при линейной аппроксимации шкалы γ -абсорбционного прибора минимум погрешности δ_d'' достигается при условии $KQ\tau \exp(-\mu\rho_{cp}d) = 1$.

Часто уравнение шкалы γ -абсорбционного плотномера аппроксимируют экспонентой $n = a \exp(-b\rho_n)$ (ρ_n — приборное значение плотности), коэффициенты a и b которой можно также определить из условия равенства отклонений на краях и середине диапазона. Тогда погрешность деформации находится из соотношений

$$\delta_d''' = \frac{\ln \frac{KQ(1 - n\tau)}{n}}{\mu d} - \frac{f \ln \frac{\sqrt{n_2 n_3} (n_1/n_3)^{c_1/2f}}{n}}{\mu d \ln(n_1/n_3)}, \quad (8)$$

$$c_1 = (\ln K^2 Q^2 (1 - n_2\tau)(1 - n_3\tau)) / n_2 n_3,$$

$$f = \ln[n_1(1 - n_3\tau) / n_3(1 - n_1\tau)].$$

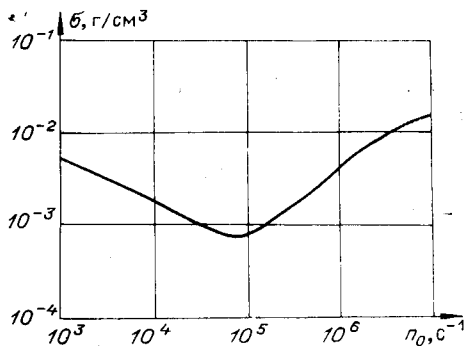
Расчетные зависимости $\delta_d''' = f(\rho)$ показаны на рис. 2, в (при аппроксимации кривых 1—5 на рис. 2, а, экспонентами). Сравнивая погрешности δ_d'' и δ_d''' , можно заключить, что погрешность деформации при малых нагрузках меньше при аппроксимации шкалы экспонентой; при $KQ\tau \exp(-\mu\rho_{cp}d) = 1$ целесообразнее линейная аппроксимация, а при просчетах свыше 50% погрешности δ_d'' и δ_d''' сравнимы, но следует предпочесть линейную аппроксимацию как более простую для аппаратурной реализации.

Формулы (6) — (8) и рис. 2 показывают, что по своей природе погрешность δ_d является систематической, меняющейся величиной и знаком по диапазону измерения. Учитывая это, суммарную погрешность от совместного действия статистики распада и деформации уравнения шкалы против градуировочного уравнения можно определить из приближенного соотношения

$$\sigma = (\delta_d^2/4 + \sigma_{ст}^2)^{1/2}. \quad (9)$$

Такое суммирование возможно, так как несмотря на зависимость δ_d и $\sigma_{ст}$ от n_0 и

Рис. 3. Зависимость суммарной погрешности плотномера от числа попаданий n_0 .



τ при $\bar{n}_0 = \text{const}$ эти погрешности статистически независимы, а суммарная погрешность σ определяется для любого (но постоянного в пределах одного определения) \bar{n}_0 . На зависимости $\sigma = f(\bar{n}_0)$ в радиоизотопных приборах с линейной или экспоненциальной зависимостью n_0 от параметров x, y или z наблюдается пологий минимум. Величина n_0 , соответствующая минимуму σ , для γ -абсорбционных приборов с экспоненциальной аппроксимацией меньше, нежели для приборов с линейной аппроксимацией. Наличие минимума на зависимости $\sigma = f(\bar{n}_0)$ и ее непрерывность позволяют, приравняв к нулю первую производную от σ до \bar{n}_0 , получить трансцендентное уравнение для определения оптимального \bar{n}_0 . Однако из-за значительной сложности получаемых уравнений и необходимости их численного решения, по нашему мнению, более целесообразно определение оптимального \bar{n}_0 по графику $\sigma = f(\bar{n}_0)$. На рис. 3 приведена зависимость погрешности σ плотномера с экспоненциальной аппроксимацией при значениях параметров $\tau = 3 \cdot 10^{-6}$ с, $t = 100$ с, $\mu d = 2$ см³/г, $\mu = 0,286$ см²/г, $\rho_{\text{min}} = 1$ г/см³, $\rho_{\text{max}} = 1,6$ г/см³, $\rho = 1,3$ г/см³.

Описанная методика и приведенные формулы позволяют оптимизировать загрузку детектора для получения минимума погрешности или максимума быстродействия, а также, задавая допустимую суммарную погрешность, находить минимально необходимую активность источника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольданский В. И., Куценко А. В., Подгорецкий М. И. Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц. М.: Наука, 1959.
2. Фюнфер Э., Нейерт Г. Счетчики излучений: Пер. с нем. М.: Атомиздат, 1961.
3. Колесов Б. М. и др. Быстродействующая схема счетного канала для параллельного включения галогенных счетчиков гамма-квантов и бета-частиц.— ИТЭ, 1974, № 5.
4. Рудановский А. А., Васильев А. Г., Онищенко А. М. Экспресс-анализатор зольности угля.— Уголь, 1973, № 12.

Поступило в редакцию 4 января 1978 г.;
окончательный вариант — 14 марта 1980 г.

УДК 658.012.011.56 : 311

З. Д. ЗУРАБИШВИЛИ
(Тбилиси)

ОПТИМАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПРИ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ ПУАССОНОВСКИХ ПОТОКОВ

При разработке различных информационно-измерительных систем часто возникает задача параллельной оценки вероятностных характеристик нескольких случайных импульсных потоков. Сбор статистических данных для решения этой задачи обычно осуществляется подключением к каждому потоку отдельного регистрирующего прибора. В работе предлагается методика оптимального распределения n регистрирующих приборов для оценки параметров N случайных импульсных потоков ($n < N$). Использование меньшего количества регистрирующих приборов особенно эффективно в том случае, когда обработка статистических данных происходит в удалении от объекта, а информация о потоках передается по каналам связи. При этом вместе с количеством регистрирующих приборов уменьшается количество самой дорогостоящей части системы — каналов и аппаратуры передачи данных.