

Особенности цифровой обработки измерительной информации в радиоизотопных приборах

А. М. ВОДОВОЗОВ

Вологодский государственный университет,
Вологда, Россия, e-mail: am.vodovozov@gmail.com

Проанализирована методическая погрешность радиоизотопного измерительного прибора, обусловленная стохастическим характером полезного сигнала и нелинейностью характеристики датчика. Предложены формулы для расчёта методической погрешности при аппроксимации данной нелинейности полиномом.

Ключевые слова: радиоизотопный прибор, нелинейность, пуассоновское распределение.

The methodical error of the radioisotope measuring instrument is analyzed, due to the stochastic character of the useful signal and the nonlinearity of the sensor characteristic. Formulas are proposed for calculating the methodical error in the approximation of nonlinearity by a polynomial.

Key words: radioisotope instrument, nonlinearity, Poisson distribution.

В радиоизотопных измерительных приборах (плотно-, толщино-, уровне-, высотомерах, весах и др.) используется процесс ослабления (поглощения) γ -излучения при его прохождении через вещество. Такие приборы применяют в тех случаях, когда сложный технологический процесс исключает возможность использования других принципов измерений [1–4].

Современный радиоизотопный прибор с измерительным преобразователем содержит сцинтиллятор (детектор), фотоумножитель и блок цифровой электроники. Сцинтиллятор регистрирует γ -излучение и генерирует вспышки света, которые усиливаются и обрабатываются фотоумножителем. Фотоумножитель осуществляет количественную регистрацию рассеянного средой излучения и преобразует кванты световой энергии в электрические импульсы. Частота следования импульсов характеризует интенсивность излучения. Данный принцип измерений является полностью бесконтактным, так как компоненты прибора не соприкасаются с объектом измерения.

В общем случае радиоизотопный измерительный прибор, как и любую систему контроля, можно рассматривать в качестве преобразователя изменяющейся во времени измеряемой физической величины x (толщины, плотности, расстояния и т. д.) в другую физическую величину – выходной сигнал y (пригодную для отсчёта оператором или для дальнейшей переработки в системе автоматического управления.) Обычно требуется, чтобы выходная величина воспроизводила все изменения контролируемого параметра, т. е. была ему пропорциональна (с учётом масштабов представления результатов измерений). В идеальном случае $y = x$.

Проведение измерений в радиоизотопном приборе всегда связано с определёнными ограничениями. Во-первых, неотъемлемыми элементами такого прибора являются источник и детектор излучения. Данные устройства имеют специфические особенности, обусловленные физикой процесса, ограниченным количеством используемого радиоактивного изотопа, определённой геометрией измерений, наличием си-

стем безопасности и т. д. Во-вторых, существенно усложняет задачу стохастический характер процесса излучения и взаимодействия излучения со средой (в том числе с веществом детектора). Этот характер не позволяет выявить жёсткую взаимосвязь между числом зарегистрированных частиц и контролируемым параметром. Достижение приемлемой точности измерений при этом связано либо с применением источников излучения большей активности, либо с существенным увеличением времени накопления информации [5]. При этом, как и в любой информационной системе, на первый план выходят вопросы паритета динамических и статических погрешностей измерений [6].

В радиоизотопном приборе блок электроники на основе микроконтроллера осуществляет подсчёт импульсов потока за фиксированный интервал квантования T , выполняет линеаризацию характеристики датчика и фильтрацию сигнала. Процесс линеаризации, как правило, предшествует фильтрации, поскольку только в этом случае можно спрогнозировать закон изменения выходной величины во времени и использовать при построении фильтра методы теории оптимальной фильтрации [7].

Информационным параметром потока на выходе фотоумножителя является скорость счёта импульсов λ , а статистические характеристики потока с высокой достоверностью описываются законом распределения Пуассона [8]:

$$P(N, T) = \frac{(\lambda T)^N}{N!} \exp(-\lambda T), \quad (1)$$

где $P(N, T)$ – вероятность появления N импульсов потока за интервал измерений T .

Скорость счёта импульсов всегда связана с фактическим значением x измеряемого технологического параметра однозначной функциональной зависимостью $\lambda = f(x)$. Функция $f(x)$, как правило, однозначна и монотонна. На рис. 1 показана характеристика датчика радиоизотоп-

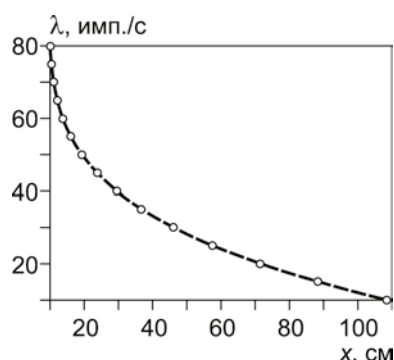


Рис. 1. Зависимость скорости счёта импульсов датчика прибора от измеряемого уровня жидкости

ного индикатора уровня, обеспечивающего измерения уровня жидкости в пределах 10–110 см. В большинстве случаев характеристика датчика радиоизотопного прибора задаётся множеством точек, описывающих реальную функциональную зависимость.

Для линеаризации измерительной характеристики прибора блок электроники должен вычислять функцию преобразования прибора $x=g(\lambda)$, взаимнообратную функции $\lambda=f(x)$. В реальном приборе при вычислениях в качестве аргумента интенсивность потока λ подменяется её оценкой $\hat{\lambda}=N/T$, основанной на подсчёте числа импульсов потока N за фиксированный интервал времени T .

С учётом статистических свойств процесса результат вычислений можно оценить как математическое ожидание $m(\lambda)$ процесса на выходе вычислительного устройства, осуществляющего нелинейное преобразование $g(\hat{\lambda})=g(N/T)$. Тогда

$$m(\lambda)=\sum_0^{\infty}[P(N,T)g(N/T)].$$

На основании (1) имеем

$$m(\lambda)=\exp(-\lambda T)\sum_0^{\infty}\left[\frac{(\lambda T)^N}{N!}g(N/T)\right]. \quad (2)$$

В силу стохастической природы процесса полученный результат $m(\lambda)$ не совпадает с желаемым результатом $g(\lambda)$, что приводит к проявлению методической погрешности $\varepsilon=m(\lambda)-g(\lambda)$, которая существенно зависит как от вида нелинейности функции $g(\lambda)$, так и от интервала дискретизации T .

Поскольку в общем случае для произвольно заданной функции решение задачи в виде уравнения (2) не позволяет получить количественную и качественную оценки методической погрешности, то рассмотрим задачу воспроизведения функции $g(\lambda)$, заданной алгебраическим многочленом

$$g(\lambda)=\sum_{j=0}^n a_j \lambda^j, \quad (3)$$

где λ^j – элементарные степенные функции; a_j – коэффициенты многочлена, $j=0, 1, 2, \dots$.

Такой подход можно считать наиболее общим с точки зрения выявления характерных закономерностей, поскольку аппроксимация функций алгебраическими многочленами

имеет достаточно развитый математический аппарат и наиболее часто применяется в численных методах анализа. Поскольку погрешность воспроизведения многочлена складывается из погрешностей воспроизведения его составляющих, то проанализируем погрешности воспроизведения элементарной степенной функции λ^j . Заменим в ней λ на $\hat{\lambda}=N/T$ и оценим математическое ожидание выходного сигнала нелинейного преобразователя, настроенного на воспроизведение функции λ^j :

$$m(\lambda)=\sum_{N=0}^{\infty}\left[\frac{(\lambda T)^N}{N!}\exp(-\lambda T)(N/T)^j\right]=\frac{1}{T^j}M_j,$$

где $M_j=\sum_{N=0}^{\infty}\left[\frac{(\lambda T)^N}{N!}\exp(-\lambda T)N^j\right]$ – момент j -го порядка пуассоновского распределения.

Момент j -го порядка пуассоновского распределения можно вычислить по известному рекуррентному соотношению [9]:

$$M_j=\lambda T \sum_{i=0}^j C_i^{j-1} M_i,$$

где C_i^{j-1} – биномиальные коэффициенты.

В таблице приведены рассчитанные по приведённым формулам абсолютные погрешности воспроизведения элементарных степенных функций с нулевого до седьмого порядка.

Абсолютные погрешности воспроизведения элементарных степенных функций

$g(\lambda)$	ε
λ^1	0
λ^2	λT^{-1}
λ^3	$3\lambda^2 T^{-1} + \lambda T^{-2}$
λ^4	$6\lambda^3 T^{-1} + 7\lambda^2 T^{-2} + \lambda T^{-3}$
λ^5	$10\lambda^4 T^{-1} + 25\lambda^3 T^{-2} + 15\lambda^2 T^{-3} + \lambda T^{-4}$
λ^6	$15\lambda^5 T^{-1} + 65\lambda^4 T^{-2} + 90\lambda^3 T^{-3} + 31\lambda^2 T^{-4} + \lambda T^{-5}$
$a_7 \lambda^7$	$21\lambda^6 T^{-1} + 140\lambda^5 T^{-2} + 350\lambda^4 T^{-3} + 301\lambda^3 T^{-4} + 63\lambda^2 T^{-5} + \lambda T^{-6}$

В результате можно получить общую формулу для оценки погрешности воспроизведения алгебраического многочлена (3):

$$\varepsilon=a_2(\lambda T^{-1})+a_3(3\lambda^2 T^{-1}+\lambda T^{-2})+ \\ +a_4(6\lambda^3 T^{-1}+7\lambda^2 T^{-2}+\lambda T^{-3})+\dots \quad (4)$$

Проанализируем погрешности линеаризации характеристики датчика измерителя уровня $\lambda=f(x)$ (см. рис. 1). При таких исходных данных аппроксимация функции преобразо-

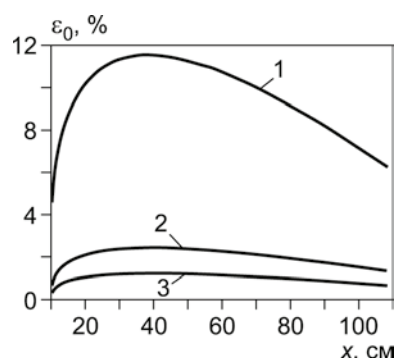


Рис. 2. Результаты расчёта относительной погрешности воспроизведения входной переменной при различных интервалах квантования:
1–3 – $T=0,1; 0,5; 1$ с, соответственно

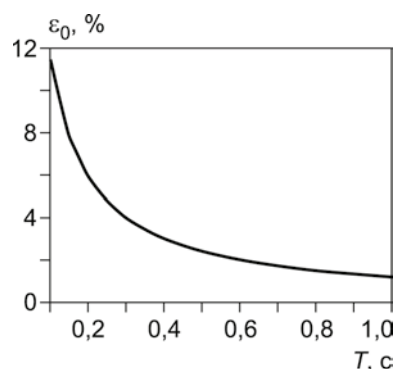


Рис. 3. Зависимость максимума относительной погрешности от интервала квантования T

вания прибора $g(\lambda)$ по методу наименьших квадратов с приемлемой погрешностью (менее 0,1 %) приводит к многочлену четвёртого порядка в виде

$$x = g(\lambda) = 1,5 \cdot 10^{-6} \lambda^4 - 6 \cdot 10^{-4} \lambda^3 + 9 \cdot 10^{-2} \lambda^2 - 6 \lambda + 160. \quad (5)$$

Используя (4), получаем уравнение для расчёта абсолютной погрешности оценки измеряемого уровня x в функции переменной λ :

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 1,5 \cdot 10^{-6} (6 \lambda^3 T^{-1} + 7 \lambda^2 T^{-2} + \lambda T^{-3}) - \\ & - 6 \cdot 10^{-4} (3 \lambda^2 T^{-1} + \lambda T^{-2}) + 9 \cdot 10^{-2} \lambda T^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Совместное решение уравнений (5), (6) позволяет проанализировать зависимости абсолютной и относительной погрешностей измерения от входной переменной x . Результат вычислений существенно зависит от интервала квантования T .

На рис. 2 показаны результаты нахождения относительной погрешности измерения при различных интервалах квантования. Данная погрешность приведена к максимальному значению входной переменной $x_{\max} = 110 \text{ см}$: $\varepsilon_0 = \varepsilon / x_{\max} \cdot 100$. Все кривые имеют максимум, который зависит от времени измерений. С увеличением интервала квантования T относительная погрешность воспроизведения контролируемой переменной уменьшается (рис. 3), вступая в противоречие с динамической погрешностью, которая с увеличением времени измерений всегда увеличивается.

Закключение. Рассмотрение радиоизотопного прибора как нелинейной стохастической системы с пуассоновским входным сигналом показывает, что обработка информации всегда сопровождается методической погрешностью, возникающей при воспроизведении нелинейной функции в процессе линеаризации измерительной характеристики датчика. Значение погрешности зависит от вида воспроизводимой функциональной зависимости и может быть уменьшено за счёт увеличения времени квантования входного сигнала.

Проведённые расчёты позволяют решить задачу оптимизации интервала квантования средствами современной микропроцессорной техники [10], обеспечив паритет динамических и статистических погрешностей и минимизацию методической погрешности измерений.

Л и т е р а т у р а

1. **Деменков В. Г.** Методы и электронные средства автоматизации экспериментальных исследований. Учебное пособие по курсам «Ядерная электроника», «Спецэлектроника», «Измерительно-информационная техника». Обнинск: ИАТЭ, 2011.
2. **Басова Е. В., Часовских В. П.** Использование радиоизотопных толщиномеров для определения толщины пристеночных отложений на внутренних стенках циклона // *Фундаментальные исследования*. 2011. № 12 (4). С. 760–765.
3. **Боченин В. И.** Радиоизотопный способ контроля степени износа защитных покрытий из хрома и алюминия на лопатках газовых турбин // *Измерительная техника*. 2006. № 10. С. 36–39.
4. **Потанин А. С.** Бесконтактный датчик для измерения толщины ферромагнитной металлической полосы. *Измерительная техника*. 1988. № 1. С. 18–19.
5. **Улитенко К. Я., Котик У. И.** Возможность снижения активности источников излучений, используемых в радиоизотопных плотномерах // *Приборы и системы, управление, контроль, диагностика*. 2003. № 10. С. 30–34.
6. **Соболев В. И.** О паритете динамических и статических погрешностей в информационно-измерительных системах // *Измерительная техника*. 2014. № 3. С. 15–20.
7. **Водовозов А. М., Полянский А. В.** Линеаризация характеристик сцинтилляционных датчиков // *Известия вузов. Приборостроение*. 1978. № 8. С. 17–20.
8. **Кингман Д.** Пуассоновские процессы / Под ред. А. М. Вершика. М.: МЦНМО, 2007.
9. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974.
10. **Водовозов А. М.** Микроконтроллеры для систем автоматизации. Москва: Инфра-Инженерия, 2016.

Дата принятия: 18.01.2018.