

## **Линеаризация статической характеристики радиоизотопного плотномера**

**А. М. ВОДОВОЗОВ**

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

*Рассмотрена задача линеаризации характеристики радиоизотопного измерительного прибора. Проанализирован процесс нелинейного преобразования потока импульсов с пуассоновским распределением. Предложена методика синтеза функции преобразования радиоизотопного прибора с учётом закона распределения информационного сигнала. Получены общие формулы и методики линеаризации градуировочных характеристик радиоизотопных измерительных приборов. Результаты использованы для линеаризации характеристики альбедного радиоизотопного измерителя плотности.*

*Ключевые слова: радиоизотопный прибор, пуассоновское распределение, нелинейность, линеаризация характеристики, функция преобразования прибора.*

*The problem of linearization of the characteristics of a radioisotope measuring device is considered. The process of nonlinear conversion of a stochastic signal with a Poisson distribution is analyzed. A technique is proposed for synthesizing the conversion function of a radioisotope instrument with allowance for the distribution of the information signal. The calculation formulas and methods of linearization of the calibration characteristics of radioisotope measuring devices are obtained. The results are used to linearize the characteristics of the albedo radioisotope density meter.*

*Key words: radioisotope device, Poisson distribution, nonlinearity, linearization characteristics, instrument conversion function.*

В радиоизотопных методах измерения физических величин применяется зависимость характеристик регистрируемого ослабленного или рассеянного  $\gamma$ -излучения от технических параметров контролируемого материала. Излучение, прошедшее через исследуемый объект, регистрируется в радиоизотопном приборе детектором, который в процессе поглощения  $\gamma$ -квантов генерирует информативный сигнал в виде потока импульсов [1, 2]. Из-за жёстких требований, норм и правил радиационной защиты в радиоизотопных приборах используются источники излучения с минимальным уровнем радиации и, как следствие, поток импульсов на выходе детектора в полной мере демонстрирует стохастический характер, соответствующий корпускулярной природе излучения [3]. За малый промежуток времени гораздо выше вероятность появления в потоке одного импульса, чем нескольких, что обусловлено свойством ординарности потока. Согласно свойству отсутствия последовательных событий наблюдается независимость появления отдельных событий в потоке. Таким образом, сигнал на выходе детектора с большой степенью достоверности можно определить как поток редких событий, подчиняющийся закону распределения Пуассона [4]:

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

где  $p(N, T)$  – вероятность появления ровно  $N$  импульсов потока за интервал наблюдения  $T$ ;  $\lambda$  – интенсивность (средняя частота) потока импульсов.

Информативным параметром потока считается его интенсивность  $\lambda$ , однозначно связанная с физическими свойствами измеряемого объекта.

Зависимость интенсивности потока импульсов от свойств материала описывается градуировочной характеристикой радиоизотопного прибора, имеющей ярко выраженный нелинейный характер. Данная характеристика – результат наложения множества линейных кривых отражения и поглощения  $\gamma$ -излучения в веществе. В зависимости от измеряемых параметров, геометрии измерений и конструкции прибора она может монотонно возрастать или убывать. Возрастающей является характеристика альбедных радиоизотопных приборов, основанных на отражении ионизирующего излучения от объекта контроля. Абсорбционные радиоизотопные приборы, в которых происходит ослабление ионизирующего излучения при прохождении его через объект контроля, имеют монотонно-убывающие характеристики. Производители обычно задают первичную градуировочную характеристику прибора, а для его привязки к конкретным условиям производства на предприятии-потребителе осуществляют её корректировку [5].

В альбедных радиоизотопных плотномерах, рассматриваемых в настоящей статье, плотность исследуемого материала определяется по рассеянию потока  $\gamma$ -излучения. При этом источник и детектор излучения размещают в одной плоскости на поверхности контролируемой конструкции. Градуировочная характеристика такого прибора представляет собой однозначно возрастающую кривую, описывающую зависимость интенсивности потока  $\lambda$  от плотности материала  $\rho$ . На рис. 1 показана первичная градуировочная характеристика альбедного плотномера, применяемого для исследования конструктивных тяжёлых, лёгких, ячеистых и плотных силикатных бетонов и их смесей, используемых в железобетонных конструкциях и товарных бетонных смесях [6]. Альбедный плотномер применяется для измерения плотности материалов в преде-

лах 800–1200 кг/м<sup>3</sup>. В процессе работы интенсивность потока импульсов может изменяться в интервале 80–180 имп./с.

Для представления результатов исследований в единицах измерения контролируемого параметра необходимо линеаризировать градуировочную характеристику непосредственно в процессе обработки стохастического потока импульсов, поступающего с детектора излучения. При этом задача линеаризации статических характеристик радиоизотопного прибора аналогична таким же задачам в приборах других типов. Так, при обработке информационного сигнала необходимо вычислять функцию преобразования  $g(\lambda)$ , взаимнообратную градуировочной характеристике измерителя [7]. Если функция преобразования прибора  $g(\lambda)$  задана аналитическим выражением или таблицей, то, как и в других приборах, вопрос решается использованием аппаратных и программных средств современной микропроцессорной техники. Однако стохастический характер информационного сигнала детектора радиоизотопного прибора вносит свои особенности в процесс формирования заданной нелинейной функции. Они связаны с тем, что в процессе обработки информации в потоке событий на выходе детектора периодически, с интервалом квантования  $T$ , фиксируется количество случайных импульсов  $N$ . Нелинейному преобразованию по некоторому заложенному в прибор функционалу  $\varphi(N)$  подвергается именно случайная переменная  $N$ , а не информативный параметр – интенсивность потока  $\lambda$ , входящий в функцию преобразования прибора  $g(\lambda)$ . В результате, в полной мере проявляется эффект статистической линеаризации нелинейности, для компенсации которого в расчётных формулах необходимо учитывать информацию о вероятностных характеристиках обрабатываемого сигнала [8].

Информация на выходе нелинейного преобразователя всегда фильтруется, поэтому функция преобразования прибора  $g(\lambda)$  описывается как математическое ожидание процесса на выходе нелинейного преобразователя, вычисляющего функционал  $\varphi(N)$  [6]:

$$g(\lambda) = \sum_{N=0}^{\infty} [p(N, T) \varphi(N)].$$

С учётом пуассоновского закона распределения импульсов полезного сигнала (1) получаем равенство, связывающее фактический вычисляемый функционал  $\varphi(N)$  с функцией преобразования прибора  $g(\lambda)$ :

$$\sum_{N=0}^{\infty} \left[ \frac{\lambda T^N}{N!} \varphi(N) \right] = g(\lambda) e^{\lambda T}. \quad (2)$$

Левая часть выражения (2) является бесконечным степенным рядом. Следовательно, значения  $\varphi(N)$  можно определить разложением правой части в степенной ряд по переменной  $\lambda T$ . Коэффициенты ряда  $\varphi(N)$  можно рассчитать как производную  $N$ -го порядка функции  $g(\lambda) e^{\lambda T}$  в точке  $\lambda T = 0$  по формуле Маклорена [9]:

$$\varphi(N) = \left[ g(\lambda) e^{\lambda T} \right]^{(N)} \Big|_{\lambda T=0} = \sum_{j=0}^N \left[ C_j^N T^{-j} g^{(j)}(0) \right], \quad (3)$$

где  $C_j^N = \frac{N!}{j!(N-j)!}$  – биномиальные коэффициенты.

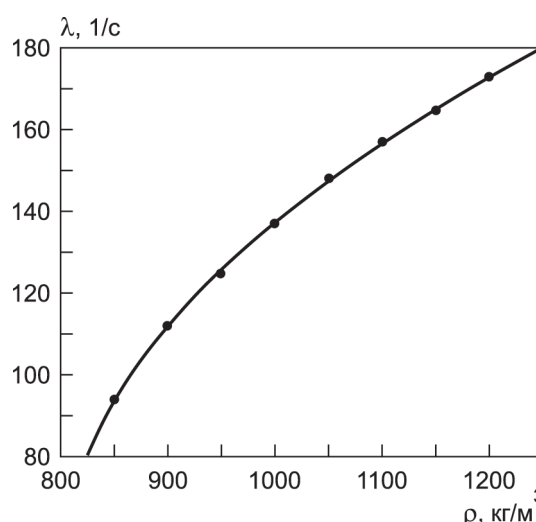


Рис. 1. Градуировочная характеристика альбедного плотномера

Например, для элементарной степенной функции  $g(\lambda) = \lambda^k$

$$g^{(j)}(\lambda) = \frac{k!}{(k-j)!} \lambda^{k-j}.$$

При  $\lambda = 0$  имеем  $g^{(j)}(0) = \begin{cases} 0 & \text{при } j \neq k; \\ k! & \text{при } j = k. \end{cases}$

Тогда, в соответствии с уравнением (3), запишем

$$\varphi(N) = T^{-k} \prod_{i=0}^{k-1} (N-i) \quad (4)$$

В частности

$$\varphi(N) = \begin{cases} T^{-1}N & \text{при } k=1; \\ T^{-2}N(N-1) & \text{при } k=2; \\ T^{-3}N(N-1)(N-2) & \text{при } k=3; \\ \dots & \end{cases}$$

В конкретном приборе функцию преобразования  $g(\lambda)$  всегда можно описать аналитическим выражением, полученным при аппроксимации табличных данных градуировочной характеристики. Рассмотрим вариант описания функции преобразования полиномом. Такая аппроксимация считается наиболее приемлемой при обработке экспериментальных данных различной физической природы и, как правило, даёт хорошие результаты как для монотонно-возрастающих, так и для монотонно-убывающих функций, характерных для альбедных и абсорбционных радиоизотопных приборов. В общем случае аппроксимирующий полином имеет вид

$$g(\lambda) = \sum_{k=0}^m a_k \lambda^k, \quad (5)$$

где  $m$  – число членов;  $a_k$  – коэффициенты.

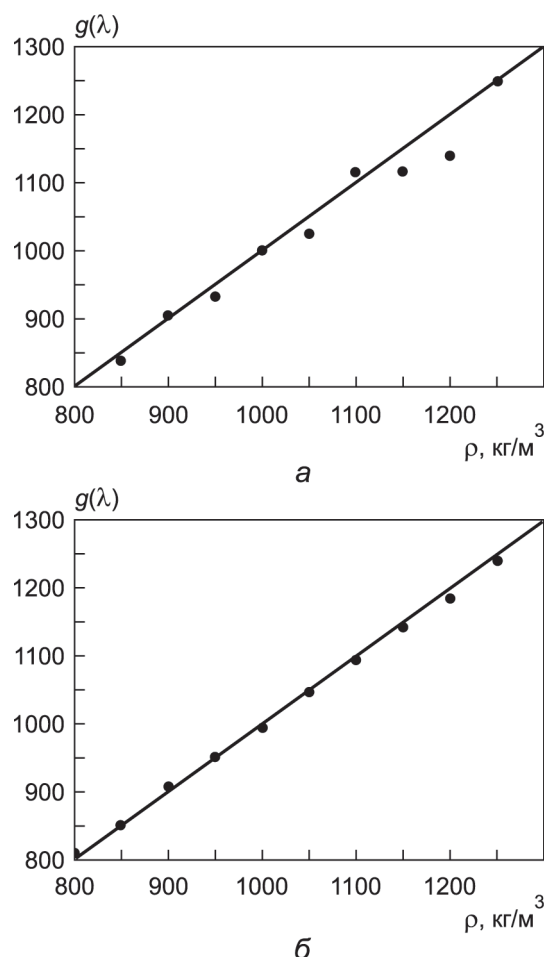


Рис. 2. Линеаризованная характеристика плотнoмера при количестве испытаний 200 (а) и 2000 (б)

Данные параметры  $m$ ,  $a_k$  можно вычислить по выбранному критерию аппроксимации. Полином сравнительно просто сформировать из таблицы данных при использовании распространенного на практике метода наименьших квадратов [9].

Для функции  $g(\lambda)$ , представленной полиномом (5), выражение (3) преобразуем к виду

$$\varphi(N) = \sum_{k=0}^m \left[ a_k T^{-k} \prod_{i=0}^{k-1} (N-i) \right]. \quad (6)$$

Формула (6) позволяет синтезировать нелинейный функционал  $\varphi(N)$  по заданному аналитическому выражению функции преобразования прибора  $g(\lambda)$ , заданной полиномом произвольной степени при фиксированном интервале квантования  $T$ .

На основании выведенных формул (3)–(6) сформируем функцию преобразования прибора  $g(\lambda)$  для линеаризации измерительной характеристики альбедного измерителя плотности бетона. Аппроксимация данных (см. рис. 1) по методу наименьших квадратов с

погрешностью менее 2 % приведёт к решению в виде полинома 2-го порядка

$$g(\lambda) = 913,9 - 3,56\lambda + 0,03\lambda^2.$$

Определённый по формуле (6) нелинейный функционал, необходимый для линеаризации характеристики, представим выражением

$$\varphi(N) = 913,9 - 3,56N/T + 0,03N(N-1)/T^2.$$

На рис. 2 показана линеаризованная характеристика плотнoмера, полученная моделированием в пакете прикладных программ Scilab [10]. Интервал квантования  $T$  составил 0,05 с, плотность  $\rho$  измеряли в диапазоне 800–1300 кг/м³ при различном количестве испытаний. При усреднении данных по результатам 200 испытаний относительная среднеквадратичная статистическая погрешность воспроизведения линейной функции составила 9 %, а при их усреднении по результатам 2000 испытаний – менее 3 %. Статистическая погрешность обусловлена конечным временем усреднения результатов. При выбранном интервале квантования  $T=0,05$  с время обработки увеличилось с 10 до 100 с, что и привело к уменьшению статистической погрешности примерно в  $\sqrt{10} = 3,1$  раза. При необходимости эту погрешность можно свести к минимуму за счёт увеличения количества испытаний при фильтрации результатов.

**Заключение.** Предложенная методика линеаризации характеристики радиоизотопного прибора с достаточной для практического применения точностью обеспечивает решение поставленной задачи. Существующие в настоящее время микропроцессорные средства имеют достаточно развитый набор встроенных периферийных устройств и программных модулей для реализации всех предложенных алгоритмов [11], поэтому практическое воспроизведение предложенных методик расчёта не вызывает трудностей. Полученные расчётные формулы и методики можно применять для решения аналогичных задач в различных измерительных приборах с использованием излучений, где полезный сигнал с достаточной точностью описывается как пуассоновский поток событий, а его информационным параметром является интенсивность потока.

## 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. **Улитенко К. Я., Котик У. И.** Возможность снижения активности источников излучений, используемых в радиоизотопных плотнoмерах // *Приборы и системы, управление, контроль, диагностика*. 2003. № 10. С. 30–34.

4. **Кингман Д.** Пуассоновские процессы / Под ред. А. М. Вершика. М.: МЦНМО, 2007.
  5. **Кузелёв Н. Р., Еголин Я. Г.** Датчики ФГУП «ВНИИТФА» для систем контроля и управления технологическими процессами // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техническая физика и автоматизация. М.: Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации. 2005. № 59-1. С. 6–11.
  6. **ГОСТ 17623–87.** Бетоны. Радиоизотопный метод определения средней плотности.
  7. **Иванов Г. М., Теснавс Э. Р.** Масштабирование и линеаризация в цифровых радиоизотопных приборах // Вопросы атомной науки и техники. Радиационная техника. Выпуск 17. М.: Атомиздат, 1979.
  8. **Водовозов А. М.** Особенности цифровой обработки измерительной информации в радиоизотопных приборах // Измерительная техника. 2018. № 2. С. 63–65.
  9. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974.
  10. **Алексеев Е. Р., Чеснокова О. В., Рудченко Е. А.** Scilab: Решение инженерных и математических задач. М.: ALT Linux; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.
  11. **Водовозов А. М.** Микроконтроллеры для систем автоматики. М.: Инфра-Инженерия, 2016.
- Дата принятия: 17.07.2018.*

