

УДК 539.1.074: 004.315

Н.Е. Сапожников, профессор, д-р техн. наук,

Д.В. Моисеев

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

ул. Курчатова, д. 7, г. Севастополь, Украина, 99033

E-mail: dmitriymoiseev@mail.ru

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

В работе рассматривается возможность создания вероятностного широкодиапазонного спектрометра повышенной точности с автокомпенсацией энергетической зависимости чувствительности во всем диапазоне измеряемой энергии.

Произведен расчет погрешности вероятностного преобразования и аппаратного объема проектируемого устройства, доказывающий преимущество вероятностной формы представления информации.

Ключевые слова: спектрометр, вероятностная форма, статистическое испытание, погрешность преобразования.

Существующие на данный момент широкодиапазонные спектрометры обладают высокой погрешностью, основной вклад в которую вносит энергетическая зависимость чувствительности (ЭЗЧ) первичных измерительных преобразователей [1].

Основная погрешность средства измерения, определяемая для "образцовой" энергии, составляет порядка 20 %, а дополнительная погрешность за счет ЭЗЧ для определенных условий может достигать 1500 %.

Попытки компенсации этой погрешности позволяют повысить точность измерений лишь в достаточно узком энергетическом диапазоне. Существует метод автокомпенсации, позволяющий принципиально расширить диапазон энергий измеряемых сигналов [2]. Однако сложность его аппаратной реализации, невозможность выполнения измерений в реальном масштабе времени, из-за разнесенности во времени операции измерения и обработки серьезно ограничивает возможности его применения в атомной энергетике.

Известны сцинтилляционные измерители мощности дозы излучения с автокомпенсацией энергетической зависимости чувствительности (ЭЗЧ) аналогичного назначения, в состав которого входят сцинтиллятор (Сц), фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) в импульсном режиме, подключенный к многоканальному амплитудному анализатору, в котором, с целью компенсации ЭЗЧ, для каждого значения энергии в поддиапазоне вводится заранее определенная поправка [1].

Сущность предлагаемого схемотехнического решения состоит в измерении энергетического гамма-спектра, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы в широком энергетическом диапазоне с одновременным повышением точности измерений за счет применения автокомпенсации энергетической зависимости чувствительности, снижении аппаратного объема устройства в целом сравнительно с прототипами и возможности применения преимуществ вероятностной формы представления информации позволяющие значительно ускорить дальнейшую обработку получаемых результатов.

Решение технической задачи достигается путём использования вероятностной формы представления данных, в связи с чем изменяется схема определения спектра, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы.

Предлагаемая функциональная схема вероятностного амплитудного анализатора сцинтилляционного спектрометра изображена на рисунке 1.

В состав схемы входят:

- аналоговая схема сравнения (АСхС);
- генератор тактовых импульсов (ГТИ);
- Q разрядная цифровая схема сравнения (ЦСхС);
- генератор псевдослучайных равномерно распределенных чисел (ГПРРЧ);
- счетчик количества испытаний;
- блок мультиплексирования (БМ), состоящий из Q логических элементов «ИЛИ» на L входов;
- счетчик реального времени (СчРВ);
- L логических элементов, выполняющих суммирование по модулю 2 (mod2);
- блок логических элементов;
- L регистров памяти на Q разрядов, хранящих поправочные коэффициенты в цифровом позиционном коде (Рг);

- $L+2$ двоичных накопительных счетчиков результатов измерений, где L – число поддиапазонов измерения.

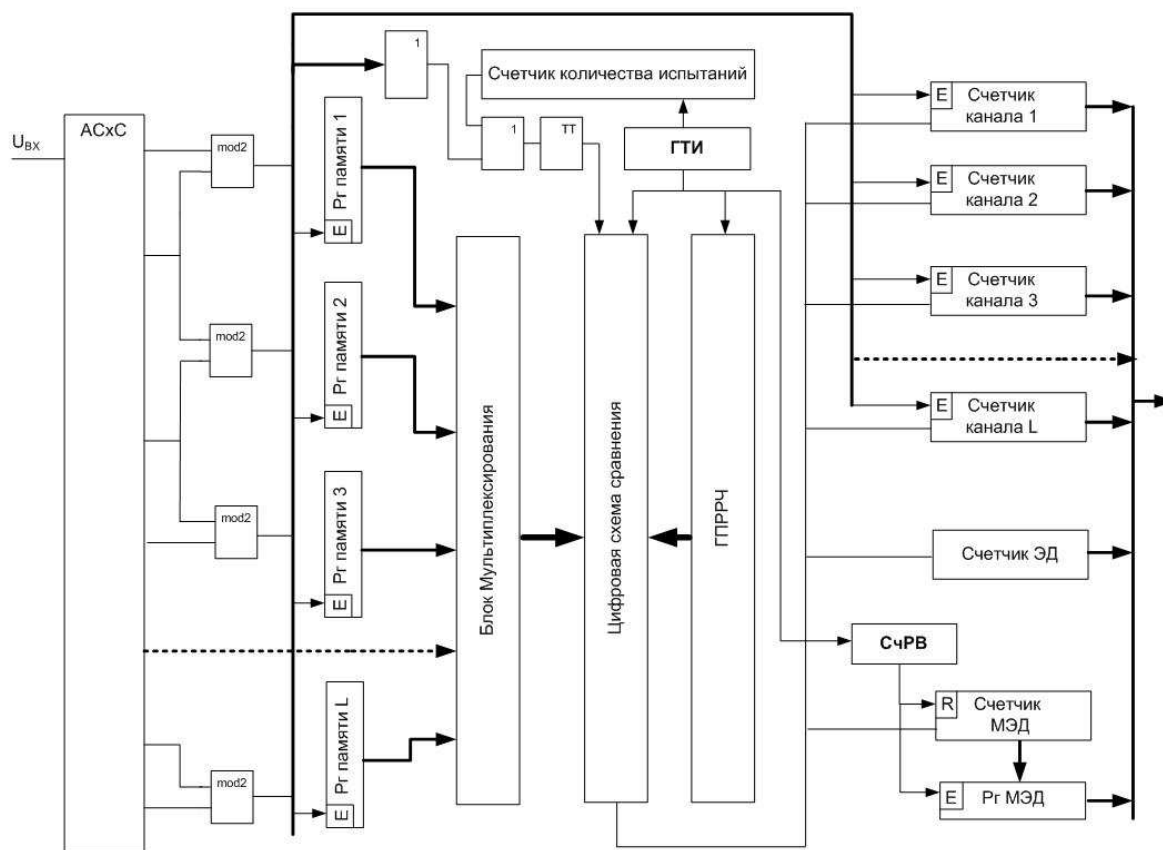


Рисунок 1 – Функциональная схема вероятностного амплитудного анализатора широкодиапазонного спектрометра повышенной точности

Процессы в схеме вероятностного широкодиапазонного спектрометра протекают в следующей последовательности.

Измерения начинаются после подачи на схему электропитания и программирования блока L регистров памяти. Ионизирующее излучение, взаимодействуя с веществом детектора, вызывает в нём сцинтилляции, по интенсивности пропорциональные энергии ионизирующих частиц. За счет оптической связи сцинтилляций с катодом ФЭУ, на последнем формируются электрические импульсы, амплитуда которых пропорциональна интенсивности отдельных сцинтилляций, т. е. энергии ионизирующих частиц. Эти импульсы с выхода ФЭУ усиливаются предусилителем, который как и сцинтиллятор и ФЭУ на схеме не показаны, и передаются на вход амплитудного селектора, выполняющего функцию преобразователя амплитуды в унитарный L -разрядный двоичный код, где L – число поддиапазонов измерения.

АСхС представляет собой амплитудный селектор, выполняющий функцию преобразователя амплитуды в унитарный L -разрядный двоичный код, где L – число поддиапазонов измерения. Таким образом, каждой амплитуде импульса с выхода ФЭУ будет соответствовать «своя единица», на выходе i -го сумматора по mod2, где $i = 1, 2, \dots, L$. Эта «единица», подаётся на разрешающий вход i -го регистра памяти, хранящего поправочный коэффициент, после чего значение поправочного коэффициента через блок мультиплексирования попадает на первые параллельные входы цифровой схемы сравнения, на вторые входы ЦСхС подаётся значение с ГПРЧ, в результате чего происходит вероятностное преобразование значений поправочных коэффициентов. Эта же «единица» через L входовую схему «ИЛИ» переключает счетный Т-триггер в единичное состояние, подавая разрешающий сигнал на ЦСхС и тем самым начиная подцикл измерения, эта же «единица» подаётся на разрешающий вход счетчика i -го канала. Вероятностные отображения с выхода ЦСхС поступают через элементы «ИЛИ» на счетчики интеграторы, счетчик экспозиционной дозы (ЭД) и через счетчик реального времени на счетчик мощности экспозиционной дозы (МЭД).

С каждым импульсом с ГТИ значение в счетчике количества испытаний инкрементируется на 1, при достижении значения равного K , счетчик количества испытаний вырабатывает сигнал обнуления, который проходя через схему «ИЛИ» переключает счетный Т-триггер в нулевое состояние, заканчивая тем самым подцикл измерения.

После окончания измерений на параллельных выходах счётчиков-интеграторов, соответствующих каждому энергетическому каналу будет находиться энергетический спектр измеряемого сигнала, на выходе счётчика-интегратора ЭД – экспозиционная доза, а на выходе счётчика-интегратора МЭД – мощность экспозиционной дозы в заданную единицу времени.

Модуль счета СчРВ рассчитывается таким образом, чтобы в зависимости от частоты работы ГТИ за выбранную единицу времени СчРВ наполняясь, разрешал запись в счетчик МЭД, а переполняясь инициализировал сигнал переписи значения с счетчика МЭД в регистр МЭД и обнуления счетчика МЭД, тем самым в регистре МЭД будет находиться приращение ЭД в единицу времени – мощность ЭД.

Частота работы ГТИ рассчитывается таким образом, чтобы за промежуток времени между возможными появлениями единицы на выходе амплитудного анализатора с учетом всех задержек в логических элементах и элементах памяти, ЦСХС произвела K испытаний, и было получено K вероятностных отображений, причем количество испытаний напрямую влияет на точность вероятностного преобразования.

В общем виде суть стохастического или вероятностного преобразования заключается в том, что любому значению параметра преобразуемой величины можно привести в соответствие некоторую вероятность [3]

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } x_i > R(t_{ij}) \\ 0 & \text{при } x_i \leq R(t_{ij}) \end{cases},$$

где x_i – i -е значение параметра преобразуемого сигнала $X(t)$; $R(t_{ij})$ – j -е значение параметра вспомогательного случайного сигнала $R(t)$, изменяющегося в интервале изменения $X(t)$; $i = \overline{1, N}$ – число циклов преобразования сигнала $X(t)$; $j = \overline{1, K}$ – количество статистических испытаний каждого значения x_i внутри временного интервала $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$; y_{ij} – значение вероятностного отображения параметра сигнала x_i из ряда

$$Y_i(t) = \{y_{i1}; y_{i2}; \dots; y_{ij}; \dots; y_{iK}\}.$$

В случае, когда вспомогательный случайный сигнал подчиняется равномерному закону распределения, выражение для МО переписывается в виде

$$M[Y_i(t)] = P(y_{ij} = 1) = x_i,$$

В качестве оценки x_i , удовлетворяющей требованиям несмещённости, состоятельности и эффективности, в соответствии с теоремой Чебышева, принимается

$$x_i = \{M[Y_i(t)]\} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K y_{ij}.$$

Учитывая, что величина x_i , подвергнутая вероятностному преобразованию, нормирована в единичном интервале, величина приведённой погрешности будет равна

$$\gamma_{ВП} = \frac{\Delta_{ВП}}{1} \cdot 100\%.$$

Выражение для абсолютной погрешности переписывается в виде:

$$\Delta_{ВП} = \frac{\sqrt{2F^{-1}(P)}}{\sqrt{K}} \sqrt{x_i(1-x_i)},$$

где $F^{-1}(P)$ – функция обратная функции Лапласа; P – вероятность того, что истинное значение $F_x(R)$ находится внутри интервала с границами $I_p = \{F_{x_i}^*(R) - \Delta_{ВП}; F_{x_i}^*(R) + \Delta_{ВП}\}$.

При заданном значении $\Delta_{ВП} = 6\%$ оценкой сверху для K будет:

$$\lceil K \rceil = \left(\frac{\sqrt{2F^{-1}(P)}}{\Delta_{ВП}} \sqrt{x_i(1-x_i)} \right)^2, K = 256.$$

Заданная точность $\Delta_{ВП} = 6\%$ вполне удовлетворяет заданным метрологическим требованиям поставленной задачи.

Для ускорения работы схемы, либо повышения точности можно воспользоваться параллельным вероятностным преобразованием. В данном случае необходимо включить в схему дополнительные блоки вероятностного преобразования (ГПРРЧ и ЦСхС).

В случае добавления дополнительных трёх блоков вероятностного преобразования аппаратный объём для первого и второго случаев возрастёт приблизительно на 600 элементов булевого базиса, а быстроедействие всей схемы увеличится в 4 раза.

Предложенное техническое решение позволяет воспользоваться преимуществами вероятностной формы представления информации, для чего необходимо в схеме амплитудного анализатора вероятностного сцинтилляционного спектрометра повышенной точности заменить счетчики интеграторы на K -разрядные регистры, в которые с выхода ЦСхС будет подаваться непосредственно вероятностное отображение.

Технико-экономическая эффективность предлагаемого вероятностного сцинтилляционного спектрометра повышенной точности состоит в возможности измерения энергетического спектра, экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы ионизирующего излучения в реальном масштабе времени с одновременным уменьшением погрешности измерений и аппаратного объёма устройства, а также в возможности использования преимущества вероятностной формы представления информации для дальнейшей обработки получаемых данных.

В перспективе дальнейших исследований ставится вопрос разработки параллельного вероятностного широкодиапазонного спектрометра повышенной точности, для повышения его быстрогодействия.

Библиографический список использованной литературы

1. Афанасьев А.В. Пути решения проблемы анализа изотопного состава радиоактивных инертных газов и аэрозолей в практике радиационной безопасности / А.В. Афанасьев, Н.Е. Сапожников, Д.В. Моисеев // 36. наук. пр. СХУЯЄтаП. — Севастополь, 2008. — Вып. 4 (28). — С. 63–67.
2. Moriuchi S. A spectrometric method for measurement of low-level gamma exposure data / S. Moriuchi, L. Miyanaga // Health. Phys. — 1966. — V. 12. — № 4. — P. 541–551.
3. Сапожников Н.Е. О вероятностном преобразовании информации / Н.Е. Сапожников // Приборостроение. — 1983. — Вып. 34. — С. 31–38.

Поступила в редакцию 19.10.2010 г.

Сапожников М.Є., Моїсєєв Д.В. Імовірнісний широкодіапазонний спектрометр підвищеної точності

У роботі розглядається можливість створення імовірнісного широкодіапазонного спектрометра підвищеної точності з автокомпенсацією енергетичної залежності чутливості у всьому діапазоні вимірюваної енергії.

Зроблено розрахунок погрішності імовірнісного перетворення та апаратного обсягу проєктованого пристрою, що доводить перевагу імовірнісної форми представлення інформації.

Ключові слова: спектрометр, форма вірогідності, статистичне випробування, погрішність перетворення.

Sapozhnikov N.E., Moiseev D.V. The probabilistic wide-range spectrometer of extended precision

The possibility of designing a probabilistic wide-range spectrometer of extended precision with auto-compensation of sensitivity power dependence in all of ranges of measurable energy is examined. The error of probabilistic transformation and apparatus volume of the designed device is computed proving advantage of probabilistic form of information representation.

Keywords: spectrometer, probabilistic form, statistical test, error of transformation.