

# Спектрометр нейтронного и гамма-излучения на основе цифровых методов регистрации и обработки сигналов

Михаил Прокуронов, Пётр Руднев, Василий Севастьянов (Москва)

В статье описывается спектрометр-дозиметр нейтронного и гамма-излучения с цифровой идентификацией частиц по форме импульса. Применение цифровых методов существенно расширяет возможности и повышает точность дозиметрической и спектрометрической аппаратуры. Прибор может применяться для спектрометрии и дозиметрии нейтронов и гамма-квантов в процессе всего технологического цикла работ с делящимися материалами, при работах с электрофизическими установками (в том числе с термоядерными) и радионуклидными источниками излучений, в области радиационной биологии и медицины.

Использование цифровых методов регистрации и обработки сигналов в ядерно-физическом приборостроении позволило резко улучшить характеристики приборов и выйти на качественно новый уровень развития спектрометрической и дозиметрической аппаратуры. Цифровые технологии обработки сигналов позволяют разрабатывать принципиально новые измерительные системы радиационного контроля на основе известных детекторов ионизирующего излучения. Используя оптимальные алгоритмы, более точно учитывающие процессы, проходящие при регистрации ионизирующего излучения в детекторе, можно получать информацию, которую сложно или вообще невозможно получить с помощью аналоговых систем. Цифровые методы позволяют уменьшить «мёртвое» время и работать при более высоких нагрузках. В цифровых устройствах информация

меньше искажается за счёт шумов и наводок.

В последние годы на основе достижений цифровых технологий регистрации и обработки сигналов был разработан спектрометр-дозиметр с цифровой идентификацией частиц по форме импульса, предназначенный для раздельного измерения энергетического спектра нейтронов и гамма-квантов в смешанных полях, а также для определения эквивалентной дозы и мощности эквивалентной дозы, смешанных полей нейтронного и гамма-излучения. Такая задача является достаточно актуальной в экспериментальной физике, и эта актуальность подтверждается развитием ядерной энергетики, где получение энергии происходит либо в результате деления ядер, либо в перспективе при термоядерном синтезе. В том и другом случае образуются быстрые нейтроны. Поэтому измерение параметров нейтронного излучения является важной и актуальной задачей в настоящем и обозримом будущем. Как правило, нейтронное излучение сопровождается гамма-излучением, и наиболее сложным является измерение спектров нейтронов и гамма-квантов в смешанных полях. При таких измерениях необходимо идентифицировать тип зарегистрированной частицы. Спектрометры с идентификацией нейтронов и гамма-квантов являются наиболее мощным средством экспериментального исследования полей излучения, дают наиболее полную

информацию об исследуемых радиационных полях [1].

Традиционно для идентификации нейтронов и гамма-квантов и измерения спектральных и временных характеристик смешанных полей используются сцинтилляционные детекторы с дальнейшей аналоговой обработкой сигналов. Идентификация частиц по форме импульса основана на том, что для органических сцинтилляторов (монокристаллов стиблена и паратерфинала) и жидких сцинтилляторов форма сцинтилляционного импульса различна для нейтронов и гамма-квантов. На рисунке 1 представлены зависимости кривых высвечивания стиблена от времени, полученные при регистрации гамма-квантов радиоактивного источника  $^{137}\text{Cs}$  и нейтронов радиоактивного источника  $^{252}\text{Cf}$  в энергетическом диапазоне 30...800 кэВ.

Аналоговые системы позволяют проводить идентификацию нейтронов и гамма-квантов при нижнем энергетическом пороге от 0,3 МэВ, при нагрузке до  $10^5$  имп./с. Вероятность ложного определения гамма-кванта как нейтрона за счёт статистических флуктуаций фотоэлектронов может составлять  $10^{-3}$  при пороге 0,5 МэВ и при нагрузке детектора до  $10^3$  имп./с. Однако во многих задачах измерения параметров смешанных полей нейтронов и гамма-квантов требуются системы идентификации, обладающие более высокими параметрами. Так, при различных импульсных измерениях нагрузка детектора является переменной, быстро меняющейся, и её величина может достигать  $10^6...10^7$  имп./с. В этом случае необходима режекция наложенных импульсов для уменьшения вероятности ложного определения типа частицы. В то же время для улучшения статистики зарегистрированных частиц количество отбрасываемых импульсов должно быть минимально. При спектрометрии и дозиметрии величина нижнего энергетического порога идентификации, которую обеспечивают

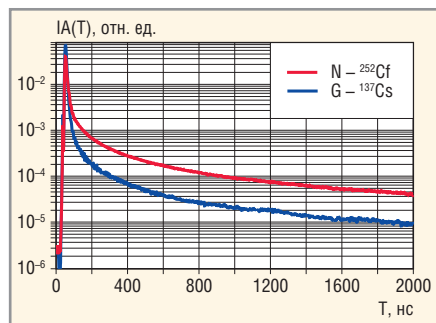


Рис. 1. Зависимости кривой высвечивания стиблена от времени, полученные при регистрации гамма-квантов ( $^{137}\text{Cs}$ ) и нейтронов ( $^{252}\text{Cf}$ ) в энергетическом диапазоне 30...800 кэВ

аналоговые системы, недостаточна из-за наличия значительной мягкой компоненты во многих энергетических распределениях. Для всех этих задач измерения важным является уменьшение вероятности ложного определения типа частицы, особенно при больших нагрузках и малых энергиях регистрируемого излучения.

Спектрометры с аналоговыми системами идентификации не получили заметного распространения по следующим основным причинам: во-первых, в них отсутствовали средства обработки аппаратных данных, позволяющие оперативно получать энергетический спектр; во-вторых, отсутствовали обстоятельные методические рекомендации по настройке, калибровке и применению спектрометров. Это объяснялось отсутствием высокопроизводительных вычислительных комплексов, предназначенных для обработки аппаратных данных, управления калибровкой и процессом измерения. Поэтому для работы с такими спектрометрами требовался высококвалифицированный научно-технический персонал [1].

В последние годы на основе достижений цифровых технологий регистрации и обработки сигналов оказалось возможным разработать цифровой метод идентификации частиц по форме импульса, который обладает более высокими характеристиками, чем аналоговые методы. Основой этого метода является преобразование без потерь при помощи АЦП аналогового сигнала непосредственно с анода фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) в цифровой массив данных. Исходя из значения постоянной быстрой компоненты высвечивания стильбена, ширина на полувысоте импульса ФЭУ должна быть не хуже 5 нс. ФЭУ с такими высокими временными параметрами позволяет преобразовать сцинтилляционный импульс в короткий токовый импульс с наименьшими искажениями формы сигнала, без интегрирования быстрой компоненты сцинтилляционного импульса и наложения её на медленную. При этом ФЭУ регистрирует и разрешает во времени одиночные электронные импульсы, вызванные отдельными фотонами медленной компоненты. Для регистрации таких

коротких импульсов используется быстросрабатывающий АЦП с частотой дискретизации 1 ГГц. Из полученных цифровых значений, используя оптимальные алгоритмы идентификации частиц по форме импульса, режекции наложений и алгоритм селекции и сортировки событий по критерию определения типа частицы, можно получить информацию о типе частицы, энергии и временных параметрах импульса [2].

Алгоритм цифровой идентификации частиц по форме импульса обладает наименьшей вероятностью ложного определения типа частицы среди всех известных аналогичных методов. При определении типа зарегистрированной частицы анализируется сумма произведений значений тока, создаваемого в анодной цепи ФЭУ и регистрируемого АЦП, на определённые коэффициенты:

$$S = \sum_{i=1}^N I_i p_i.$$

За счёт разницы в форме сцинтилляционного импульса при регистрации нейтронов и гамма-квантов уда-

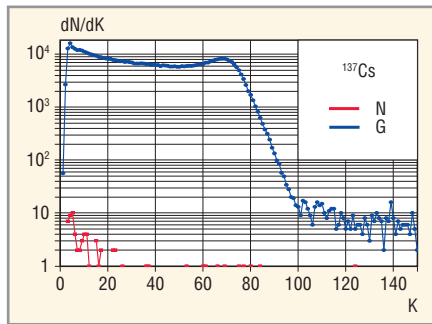


Рис. 2. Амплитудные распределения импульсов в гамма-канале G и в нейтронном канале N, полученные при регистрации гамма-квантов (<sup>137</sup>Cs)

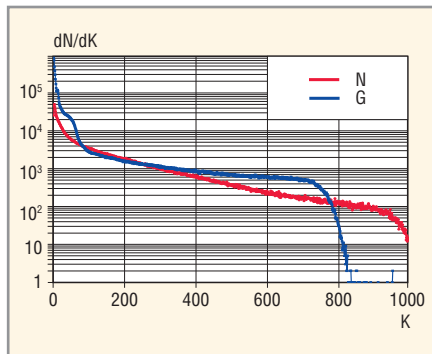


Рис. 3. Амплитудные распределения импульсов в гамма-канале G и в нейтронном канале N, полученные при регистрации нейтронов и гамма-квантов изотопа Pu-Be

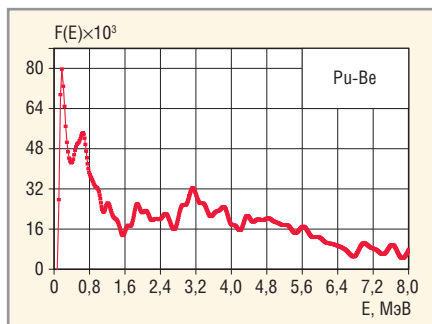


Рис. 4. Энергетическое распределение нейтронного излучения, полученное при регистрации гамма-квантов и нейтронов радиоактивного источника Pu-Be

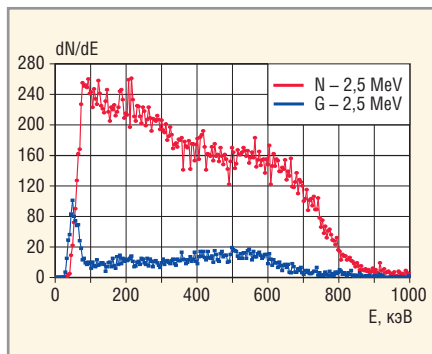


Рис. 5. Амплитудные распределения импульсов в гамма-канале G и в нейтронном канале N, полученные при регистрации излучения импульсного генератора нейтронов с энергией 2,5 МэВ при загрузке  $1,4 \times 10^6$  имп./с

ётся подобрать такие коэффициенты  $p_i$ , при которых среднее значение величины  $S$  при регистрации гамма-квантов будет меньше нуля ( $\overline{S_\gamma} < 0$ ), а при регистрации нейтронов будет больше нуля ( $\overline{S_n} > 0$ ).

В алгоритме режекции наложенный значение тока наложенного импульса заменяется нулевым значением, и скорректированная таким образом функция тока детектора используется для идентификации типа частицы, что позволяет сократить количество исключаемых из анализа импульсов. Алгоритм селекции и сортировки событий по критерию определения типа частицы позволяет уменьшить вероятность ложного определения типа частицы в 10 раз при отбрасывании 5...10% зарегистрированных импульсов.

По амплитудным распределениям импульсов, полученным при регистрации гамма-квантов и нейтронов, можно определить спектральный состав нейтронного и гамма-излучения и рассчитать эквивалентную дозу.

На основании изложенных принципов и был разработан спектрометр-дозиметр с цифровой идентификацией типа частиц по форме импульса для отдельного измерения энергетического спектра нейтронов и гамма-квантов в смешанных полях. Он состоит из блока детектирования и блока регистрации и обработки информации. Блок детектирования выполнен на основе стильбена  $\varnothing 30 \times 10$  мм и ФЭУ Hamamatsu R6095.

В состав блока регистрации и обработки информации входят: быстродействующий аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с частотой дискретизации 1 ПГц, программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) и вычислительный комплекс [2].

Были проведены экспериментальные исследования основных характеристик спектрометра в статическом и импульсном режимах. В статическом режиме регистрировалось излучение гамма-квантов радиоактивного источника <sup>137</sup>Cs и гамма-квантов и нейтронов источника Pu-Be. На рисунках 2 и 3 приведены амплитудные распределения импульсов в гамма-канале G и в нейтронном канале N, полученные при регистрации гамма-квантов радиоактивного источника <sup>137</sup>Cs и гамма-квантов и нейтронов радиоактивного источника Pu-Be. При регистрации гамма-квантов источника <sup>137</sup>Cs значение нижнего энергетического порога

составило 15 кэВ по поглощённой энергии электронов, величина динамического диапазона по энергии регистрируемых гамма-квантов равнялась 60. В энергетическом диапазоне 15...900 кэВ вероятность ложного определения гамма-кванта как нейтрона составила  $2 \times 10^{-4}$  при загрузке  $1,5 \times 10^4$  имп./с.

На рисунке 4 показано энергетическое распределение нейтронного излучения, полученное при регистрации гамма-квантов и нейтронов радиоактивного источника Pu-Be. Энергетическое распределение восстановлено из амплитудного распределения, показанного на рисунке 3.

Предельные значения характеристик спектрометра исследовались при регистрации нейтронов и гамма-квантов смешанного поля импульсного нейтронного генератора. Измерения проводились при высокой и быстро меняющейся загрузке детектора до  $10^6$  имп./с и в широком энергетическом диапазоне, при значении нижнего энергетического порога от 5 кэВ [3].

На рисунке 5 изображены амплитудные распределения импульсов в гамма-канале G и в нейтронном канале N, полученные при регистрации излучения импульсного генератора нейтронов с энергией 2,5 МэВ при загрузке  $1,4 \times 10^6$  имп./с.

В энергетическом диапазоне 30...800 кэВ при загрузке  $1,4 \times 10^6$  имп./с около 90% зарегистрированных импульсов было идентифицировано как нейтроны, остальные 10% как гамма-кванты. При этом вероятность ложного определения гамма-кванта как нейтрона составила  $10^{-4}$ ... $10^{-3}$  при загрузке  $(1,5...5) \times 10^5$  имп./с.

В энергетическом диапазоне 2...35 кэВ использование оптимальных алгоритмов обработки позволило проводить идентификацию импульсов, у которых амплитуда быстрой компоненты соизмерима с амплитудой одноэлектронных импульсов ФЭУ. Так, для энергии 10 кэВ по поглощённой энергии электронов вероятность ложного определения гамма-кванта как нейтрона составляла  $3 \times 10^{-3}$ .

Результаты экспериментальных исследований показывают высокую эффективность метода цифровой идентификации нейтронов и гамма-квантов в смешанных импульсных полях при очень высокой и быстро меняющейся загрузке детектора. При загрузках детектора  $10^6$  имп./с и энергетиче-

ческом пороге в 150 кэВ по поглощённой энергии нейтронов такой метод позволяет проводить идентификацию нейтронов и гамма-квантов в смешанных полях и измерение спектральных характеристик нейтронного и гамма-излучения. Использование цифровой идентификации вместо аналоговой позволяет уменьшить вероятность ложного определения гамма-кванта как нейтрона не менее чем на порядок. Нижний энергетический порог идентификации нейтронов также можно уменьшить примерно в три раза, доведя его до 100...150 кэВ по поглощённой энергии нейтронов [3], а загрузку детектора увеличить на порядок.

Таким образом, цифровая идентификация частиц по форме импульса позволяет добиться более высоких характеристик сцинтилляционных измерительных устройств по сравнению с аналоговыми системами, а именно:

- уменьшить вероятность ложного определения типа частицы и понизить нижний энергетический порог идентификации за счёт использования более эффективных и оптимальных цифровых алгоритмов идентификации;
- увеличить загрузку детектора, при которой возможна идентификация частиц, за счёт цифровой режекции наложенных импульсов;
- достигнуть лучшего энергетического разрешения сцинтилляционных спектрометров;
- обеспечить стабильность метрологических характеристик сцинтилляционных спектрометров за счёт использования цифровых устройств.

В состав программного обеспечения спектрометра-дозиметра входят специальные алгоритмы для восстановления энергетических спектров нейтронного и гамма-излучения по амплитудным распределениям импульсов детектора, вызванных регистрацией протонов отдачи и комптоновских электронов. При регистрации нейтронов и гамма-квантов в стибене образуются протоны отдачи (от нейтронов) и комптоновские электроны (от гамма-квантов), при этом амплитуда импульса детектора пропорциональна потерянной энергии протона отдачи (с учётом поправочного коэффициента) и комптоновского электрона в сцинтиляторе. По энергетическим спектрам протонов отдачи и комптоновских электронов можно определить энергетические спектры регист-

**Основные характеристики спектрометра-дозиметра**

Энергетические диапазоны измерения спектрального состава и эквивалентной мощности дозы нейтронного и гамма-излучения смешанных полей	0,01...10 МэВ для гамма-излучения 0,1...15 МэВ для нейтронного излучения
Диапазон измерения мощности эквивалентной дозы смешанных гамма-нейтронных полей	0,1...1000 мкЗв/ч
Погрешность определения мощности эквивалентной дозы	Менее 10% в диапазоне поглощенной энергии электронов 0,1...10 МэВ Менее 20% в диапазоне поглощенной энергии электронов 0,01...0,1МэВ
Коэффициент блокировки гамма-квантов радиоизотопного источника <sup>137</sup> Cs	Не менее 4,0 × 10 <sup>3</sup> при загрузке 5,0 × 10 <sup>5</sup> имп./с в диапазоне поглощенной энергии электронов 30...600 кэВ
Эффективность идентификации нейтронов с энергией 2,5 МэВ	Не менее 90% при загрузке 5,0 × 10 <sup>5</sup> имп./с в диапазоне поглощенной энергии электронов 30...800 кэВ

рируемого нейтронного и гамма-излучения, что позволяет рассчитывать эквивалентные дозы в различных тканях. Наличие производительного процессора делает систему гибкой, позволяющей производить энергетическую калибровку, стабилизацию спектрометрического тракта и другие метрологические операции. В состав программного обеспечения входят модули, обеспечивающие сбор, предварительную обработку цифровых массивов в блоке регистрации и обработки информации и затем передачу данных в компьютер, а также программные блоки идентификации нейтронов и гамма-квантов, режекции наложенных импульсов и построения амплитудных распределений. Управление процессом измерения производится вычислительным комплексом, и при проведении измерений не требуется высококвалифицированный научно-технический персонал. Это позволяет использовать спектрометр-дозиметр и при технологическом контроле. Основные характеристики такого прибора приведены в таблице.

В настоящее время на рынке дозиметрической аппаратуры представлен спектрометр-дозиметр для измерения спектра и дозы нейтронного излучения, выполненный по мультисферной методике. Спектр измеряется за счёт того, что количество быстрых нейтронов, замедлившихся до тепловых, зависит от их энергии и массы сферы. Погрешность измерения дозы нейтронного излучения составляет до 40%.

Спектрометр-дозиметр с цифровой идентификацией типа частиц позволяет измерять одним детектором эквивалентную дозу и мощность дозы одновременно и раздельно для нейтронов и гамма-квантов, причём с более высокой точностью (около 10%), чем существующие дозиметры, а также

спектральные распределения нейтронов и гамма-квантов в смешанных полях. В этом заключается основное отличие и преимущество предлагаемого прибора по сравнению с существующими дозиметрами.

Спектрометры-дозиметры с цифровой идентификацией типа частиц по форме импульса могут применяться для спектрометрии и дозиметрии нейтронов и гамма-квантов в процессе всего технологического цикла работ с делящимися материалами (ДМ) – от обогащения и изготовления материалов и изделий из ДМ, далее при эксплуатации АЭС и судов с ядерными реакторами и затем при выгрузке, транспортировке, переработке и хранении облучённого ядерного топлива. Прибор может использоваться при работах с электрофизическими установками (в том числе с термоядерными) и радионуклидными источниками излучения, а также в области радиационной биологии и медицины. Прибор может использоваться как отдельный детектор модульной детектирующей системы, предназначенной для пассивного или активного контроля ДМ, а именно наличия, массы и изотопного состава ДМ.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Колеватов Ю.И., Семенов В.П., Трыков Л.А. Спектрометрия нейтронов и гамма-излучения в радиационной физике. М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Прокуровов М., Руднев П. Идентификация нейтронов и гамма-квантов на основе цифровых методов. Электроника: НТБ. 2009. № 1.
3. Прокуровов М.В., Шаболин А.Н. Цифровая идентификация нейтронов и гамма-квантов по форме импульса при высокой загрузке детектора и низкой энергии регистрируемого излучения. ПТЭ. 2007. № 3. С. 1–15.

