

УДК 550.832

*А. В. Смирнов, В. А. Беляков, В. С. Лисицын, Г. К. Точиленко
ООО «Нефтегазгеофизика»*

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В СЦИНТИЛЛЯЦИОННОЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ

На примере аппаратуры типа АИМС-СТ и АИМС-90 рассмотрены и проанализированы методы преобразования и обработки сигналов в сцинтилляционной гамма-спектрометрии, применяемые в ООО «Нефтегазгеофизика». Указаны основные достоинства и недостатки каждого из методов.

Ключевые слова: гамма-спектрометрия, оцифровка сигнала, методы нейтронного гамма-каротажа, анализ эффективности.

Производство гамма-спектрометрической аппаратуры освоено многими предприятиями, занимающимися разработкой приборов для геофизических исследований скважин (ГИС). Это спектрометрическая аппаратура естественной гамма-активности породы для оценки содержания тория, урана и калия, а также спектрометрическая аппаратура гамма-излучения радиационного захвата нейтронов для оценки элементного состава породы. В основе работы спектрометрической аппаратуры лежит процесс преобразования поглощенной в детекторе энергии гамма-кванта в цифровой код, пропорциональный величине этой энергии. При использовании сцинтилляционных детекторов поглощенная в них энергия гамма-квантов создает множественные световые вспышки (сцинтилляции), которые преобразуются ФЭУ (фотоэлектронный умножитель) в электрический сигнал (импульс тока), прямо пропорциональный величине заряда, созданного гамма-квантом в рабочем объеме детектора [5, 11].

Сигнал с ФЭУ усиливается, оцифровывается и передается в персональный компьютер (ПК) в виде аппаратурного спектра. Задача определения энергии гамма-кванта может быть реализована через измерение амплитуды сигнала, полученного с ФЭУ, расчет площади этого сигнала и др. Точное определение амплитуды импульса (заряда) позволяет приблизиться к эталонному энергетическому разрешению, которое может реализовать применяемый сцинтилляционный детектор. На практике ухудшению энергетического разрешения спектро-

метра способствуют несколько факторов: шумовая составляющая, наложенная на получаемый сигнал от ФЭУ; температурный фактор (изменение световыххода кристалла, темновые токи в ФЭУ); высокая загрузка спектрометрического тракта, в результате которой импульсы, генерируемые гамма-квантами, оказываются наложенными друг на друга; смещение нулевой линии сигнала, возникающее при интенсивной загрузке сцинтиллятора. Доля наложенных импульсов, кроме того, зависит от времени высвечивания сцинтилляционного кристалла.

Вопрос энергетического разрешения всегда был и остается одним из самых важных, так как величина разрешения дает в простой и наглядной форме оценку информационных возможностей спектрометра [11]. Энергетическое разрешение спектрометра $\eta(E)$ обычно определяют как отношение ширины ΔE функции отклика $K(E, V)$ на ее полувысоте к E [11]:

$$\eta(E) = \frac{\Delta E}{E}.$$

Разрешение (понимается энергетическое разрешение спектрометрической системы в целом) показывает, насколько велики потери информации при использовании конкретной спектрометрической системы. Разрешение трактуется как естественная неопределенность, с которой можно определить истинное значение энергии зарегистрированного кванта излучения (частицы) по наблюдаемому значению.

Для реализации определения энергии зарегистрированного гамма-кванта блоком детектирования в аппаратуре, выпускаемой ООО «Нефтегазгеофизика», применяются несколько алгоритмов, имеющих свои плюсы и минусы: оцифровка импульсов по команде стробирования, оцифровка площади сигнала.

В первом случае время начала оцифровки импульса выбирается фиксированным: токовый импульс с ФЭУ после инвертирования поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и компаратор (после дополнительного усиления), на котором формируется временная задержка, равная времени нарастания переднего фронта входного сигнала. Сформированный на компараторе сигнал (строб) поступает на соответствующую ножку АЦП, и выполняется оцифровка сигнала. Этот способ формирования энергетического спектра реализован в аппаратуре СГК, ЗГГК-ЛП и АИМС-СТ [1, 9, 12].

Второй способ заключается в определении площади зарегистрири-

рованного импульса путем «конвейерной» оцифровки значения амплитуды сигнала через короткие промежутки времени (на несколько порядков меньшее длительности импульса) и последующее интегрирование полученных значений. Данный способ формирования энергетического спектра реализован в аппаратуре СНГК и АИМС-90 [2, 3].

Точное определение энергии зарегистрированных гамма-квантов способствует получению качественных приборных спектров с сохранением линейности энергетической шкалы (соотношение канал-энергия) и хорошим разрешением (обнаружение спектральных пиков) и, соответственно, качественной обработке и интерпретации полученного материала.

Решение задачи обнаружения спектральных пиков существенно зависит от характеристик и параметров сигналов, таких как форма пиков, динамический диапазон амплитуд пиков, локальная и средняя интенсивности пиков, характеристика шумов, а также от локального и фонового (во всем спектре) изменения этих характеристик. Поэтому выбор варианта пути решения этой задачи сильно зависит от области применения.

Разберем каждый метод оцифровки сигналов по отдельности. Для наглядности и анализа положительных и отрицательных моментов каждый метод рассмотрим на показаниях приборов импульсного спектрометрического нейтронного гамма-каротажа типа АИМС-СТ (метод стробирования) и АИМС-90 (метод расчета площади сигнала), в которых применяются в качестве блоков детектирования сборки из ФЭУ Hamamatsu R1847-05 и сцинтилляционного детектора BGO.

Оцифровка сигнала методом стробирования

Специалистами отдела радиоактивного каротажа ООО «Нефтегазгеофизика» разработан и внедрен в массовое производство электронный тракт спектрометрической аппаратуры, позволяющий определять энергию зарегистрированных гамма-квантов в сцинтилляционном детекторе (оцифровка сигнала методом стробирования). Для каждого типа аппаратуры подобран свой тип сцинтилляционного детектора. Данный метод оцифровки полученного сигнала применяется в аппаратуре СГК-1024 (спектрометрического гамма-каротажа

естественной радиоактивности породы), ЗГГК-ЛП (литоплотностного гамма-гамма-каротажа), АИМС-СТ (углеродно-кислородного импульсного нейтронного гамма-каротажа). Определение временных характеристик регистрируемых импульсов имеет важное значение при выборе архитектуры и принципа построения аппаратуры ИНГКС [10]. Токовый импульс с анода ФЭУ поступает на вход преобразователя «аналог–код», состоящий из преобразователя «ток–напряжение», устройства дискриминации импульсов, амплитуда которых ниже допустимого уровня, системы определения пика информационного импульса и старта АЦП на преобразование [6].

Как говорилось выше, сигнал строб формируется из импульса, который необходимо оцифровать с задержкой на время нарастания переднего фронта. Задержка формируется таким образом, чтобы обеспечить необходимое сочетание канал–энергия на энергетическом спектре, обеспечивая тем самым требуемую линейность шкалы и максимально возможное энергетическое разрешение. На практике при эксплуатации аппаратуры при повышенных температурах из-за изменения времени высвечивания кристалла происходит изменение длительности зарегистрированного импульса.

На рис. 1 приведено изменение формы импульса при прогреве детектора BGO совместно с ФЭУ Hamamatsu R1847. Воздействие температуры приводит к изменению положения пика импульса относительно его начала, время нарастания переднего фронта уменьшается, соответственно, это приводит к увеличению времени начала оцифровки АЦП.

При этом начинает проявляться нелинейность энергетической шкалы (соотношение канал–энергия на энергетической шкале меняется). Подобное изменение может привести к неконтролируемым ошибкам. Многочисленные исследования детекторов показали, что наблюдаемые температурные зависимости являются характерными для каждого типа детекторов и не меняются во времени. На основании этого был предложен и реализован способ корректировки температурного дрейфа формы импульса. Температурное воздействие на блок детектирования приводит к изменению положения энергетической шкалы вследствие изменения световогохода кристалла и изменению параметров ФЭУ. Восстановление энергетической шкалы в аппаратуре осуществляется с помощью увеличения высокого напряжения на динодах ФЭУ, то есть увеличения коэффициента усиления ФЭУ.

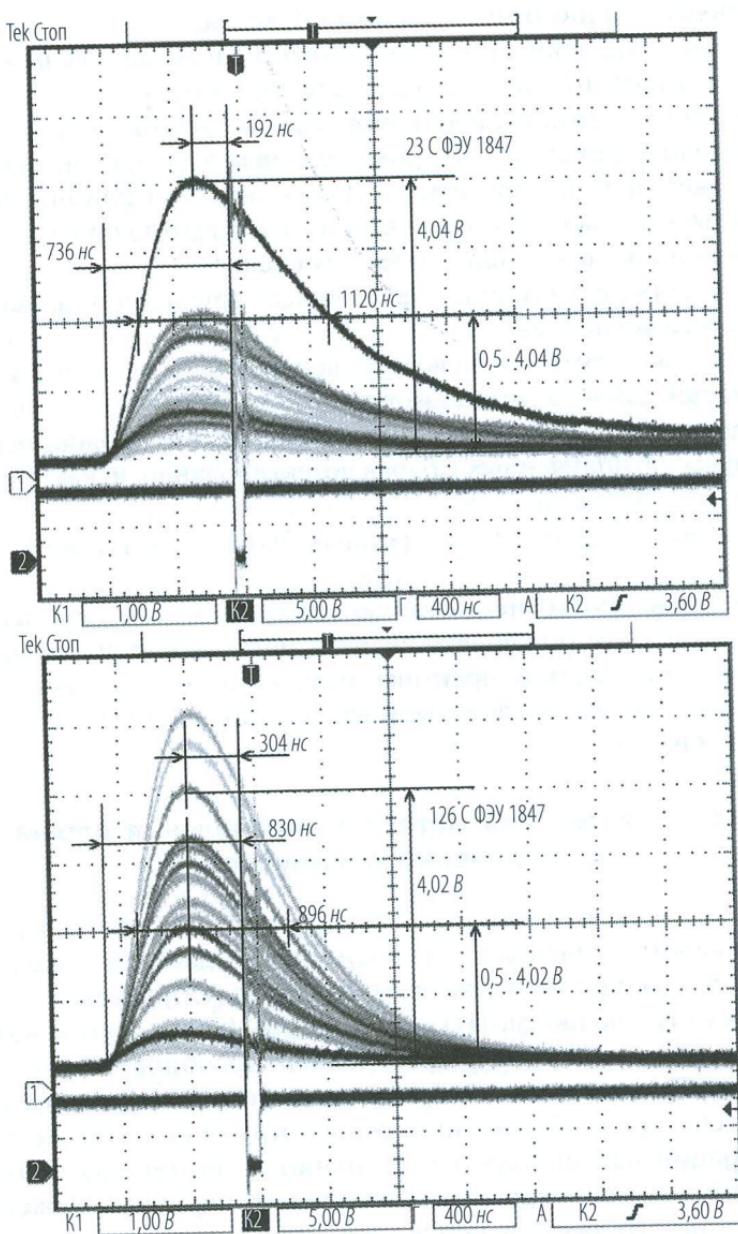


Рис. 1. Сигнал строб и импульсы с ФЭУ

К минусам данного метода можно отнести:

- плохое сохранение линейности энергетической шкалы при температурных воздействиях на блок детектирования;
- из-за возможных шумов (в виде высокочастотных гармоник) на сигнале точное определение уровня сигнала в момент начала оцифровки может быть некорректным. Такая ситуация при определении амплитуды импульсов одной энергии гамма-квантов приведет к «размазыванию» пиков на энергетическом спектре;
- реализация регистрации наложенных друг на друга импульсов сложна схемотехнически;
- не контролируется нулевой уровень сигнала (нулевая линия).

К плюсам данного метода можно отнести:

- достаточную простоту реализации электронного блока регистрации импульсов, полученных с блока детектирования, и, как следствие, простоту настройки прибора;
- возможность работы электронных блоков при температурах до 150 °C.

Несмотря на имеющиеся отрицательные моменты, при использовании в аппаратуре оцифровки сигнала методом стробирования, как показывает многолетняя практика эксплуатации такой аппаратуры, полученный материал качественный и сопоставим с данными зарубежных аналогов.

Оцифровка сигнала методом определения площади полученного импульса

В процессе разработки аппаратуры спектрометрического нейтронного каротажа для оценки относительных массовых содержаний кремния (Si), кальция (Ca), железа (Fe), хлора (Cl), натрия (Na), серы (S), титана (Ti), водорода (H) и гадолиния (Gd) в породе возникла необходимость улучшения разрешающей способности блока детектирования. Суть метода спектрометрического нейтронного гамма-каротажа состоит в облучении породы потоком быстрых нейтронов и регистрации на некотором расстоянии от источника нейтронов энергетического спектра гамма-излучения неупругого рассеяния и радиационного захвата нейтронов. Для ампульных источников нейтронов (Am-Be, Pu-Be и др.) регистрируемый спектр в основном является спектром радиационного захвата нейтронов. Гамма-излуче-

ние радиационного захвата (ГИРЗ) имеет характерный для каждого элемента энергетический спектр [2, 3, 7, 8]. Решение, принятое разработчиками аппаратуры, сводилось к изменению подхода оцифровки сигнала, полученного с анода ФЭУ, а именно – использование оцифровки сигнала методом определения площади полученного импульса. Данный метод был опробован на аппаратуре спектрометрического нейтронного гамма-каротажа серии СНГК-89, в котором используется стандартный плутоний-бериллиевый источник нейтронов активностью не менее 10^7 н/с. Эта аппаратура серийно выпускается ООО «Нефтегазгеофизика» и эксплуатируется организациями на территории России, Украины, Туркмении и др. [2, 4]. Успешное опробование алгоритма оцифровки импульса методом определения площади позволило перейти к разработке и внедрению в производство усовершенствованной аппаратуры типа ИНГКС, работающей в составе с импульсным нейтронным генератором АИМС-90 [3, 8].

После предварительного инвертирования и усиления на базе высокоскоростного операционного усилителя (ОУ) сигнал с ФЭУ преобразуется в синфазный и передается на соответствующие выводы АЦП по помехозащищенной линии.

В описанном методе используется высокоскоростной АЦП с синфазным входом, способный работать с необходимой частотой дискретизации, в данном случае 25 МГц . Для работы АЦП не требуется сигнализации о наступлении события «регистрация импульса», преобразование идет непрерывно с заданной частотой. Дальнейшая обработка исключительно программная: спектр формируется на основе значений площадей полученных импульсов, что позволяет снизить влияние шумов и получить более высокое разрешение. Площадь импульса рассчитывается относительно постоянно корректируемой нулевой линии, которая может изменяться при высоких загрузках спектрометрического канала, снижая линейность энергетической шкалы. Также в процессе обработки обнаруживаются и исключаются наложенные импульсы.

К преимуществам данного метода можно отнести:

- возможность обнаружения наложенных импульсов и дальнейшего их исключения;
- удержание линейности энергетической шкалы независимо от температурного воздействия на блок детектирования;

– обеспечение более высокого энергетического разрешения по сравнению с предыдущим способом во всем диапазоне энергий.

К недостаткам можно отнести:

- существенное усложнение схемотехники;
- сложный и длительный алгоритм первичной настройки;
- увеличение энергопотребления в связи с непрерывным преобразованием;
- использование быстродействующего процессора, который, как правило, не рассчитан на работу при температурах выше 120 °C;
- ограничения по рабочей температуре;
- высокие требования к питанию.

На рис. 2 и 3 приведены энергетические спектры, полученные приборами АИМС-СТ и АИМС-90 в одной скважине и в одном и том же интервале. Энергетическое разрешение спектров, рассчитанное по пику водорода, составляет 8,5% для АИМС-СТ и 6,9% для АИМС-90.

Выбор методов обработки сигналов в сцинтилляционной гамма-спектрометрии позволяет специалисту решать, какой из методов целесообразней использовать для реализации поставленной задачи в конкретной аппаратуре.

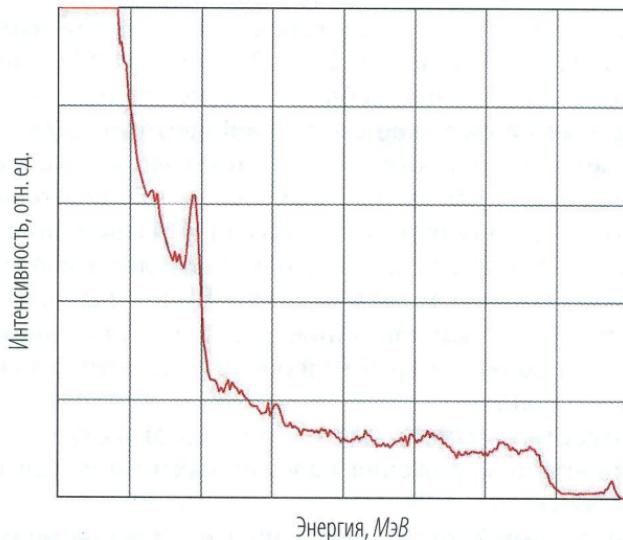


Рис. 2. Энергетический спектр прибора импульсного нейтронного гамма-каротажа АИМС-СТ

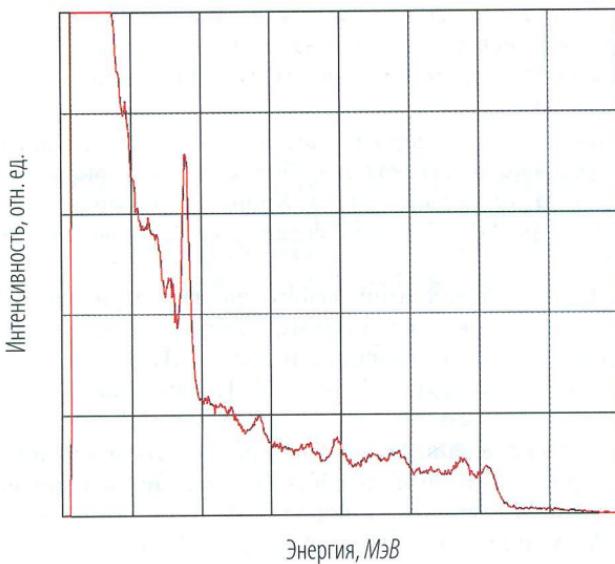


Рис. 3. Энергетический спектр прибора импульсного нейтронного гамма-каротажа АИМС-90

Для расчета массовых содержаний элементов, которое выполняется разложением зарегистрированных спектров ГИНР и ГИРЗ на спектры отдельных элементов породы, важным моментом является высокое энергетическое разрешение аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Велижсанин В. А., Головацкий С. Ю., Саранцев С. Н., Черменский В. Г. и др. Спектрометрический гамма-каротаж естественной активности пород – аппаратура, метрология, интерпретационно-методическое и программное обеспечение // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2002. Вып. 93. С. 59–68.
2. Велижсанин В. А., Бубеев А. А., Лобода Н. Г., Лобода Д. Р. и др. Аппаратура спектрометрического нейтронного гамма-каротажа для оценки массовых содержаний элементов в породе // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2011. Вып. 2 (200). С. 73–77.
3. Велижсанин В. А., Беляков В. А., Волнухина А. А., Лисицын В. С. и др. Аппаратура спектрометрического импульсного нейтронного каротажа АИМС-90 // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2021. Вып. 2 (308). С. 104–115.

4. Велижанин В. А., Лобода Н. Г., Бубеев А. А., Лисицын В. С. Опыт применения спектрометрического нейтронного гамма-каротажа на нефтегазовых месторождениях Юго-Западного Туркменистана // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2016. Вып. 9 (267). С. 46–54.
5. Гамма-спектроскопия: калибровка гамма-спектрометра, сцинтилляционные детекторы (учебно-методическое пособие к лабораторному практикуму) / А. С. Храмов, М. М. Бикчантаев, Д. М. Хрипунов. Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики, кафедра физики твердого тела. 2014. г. Казань.
6. Инструкция по проведению импульсного спектрометрического нейтронного гамма-каротажа аппаратурой серии АИМС и обработке результатов измерений при оценке текущей нефтенасыщенности пород МИ41-17-1399-04 / В. А. Велижанин, В. С. Бортасевич, Д. Р. Лобода, В. Г. Черменский и др. Тверь: Изд. ГЕРС, 2004.
7. Инструкция по проведению спектрометрического нейтронного гамма-каротажа аппаратурой СНГК-90 и обработке результатов измерений при оценке массовых содержаний элементов в породе / В. А. Велижанин, В. А. Беляков, А. А. Бубеев, А. А. Волнухина, Н. Г. Лобода, Д. Р. Лобода и др. Тверь: ООО «Нефтегазгеофизика».
8. Инструкция по проведению импульсного нейтронного каротажа аппаратурой АИМС-90 (ИННК-НТ + 2ИННК-Т + ИНГКС-Т-90-120/80) и обработке результатов измерений / В. А. Велижанин, В. А. Беляков, А. А. Бубеев, А. А. Волнухина, Н. Г. Лобода, Д. Р. Лобода и др. Тверь: ООО «Нефтегазгеофизика».
9. Патент № 2262124. Россия. МПК7 G01 V5/10. Способ импульсного нейтронного каротажа и устройство для его проведения / В. С. Бортасевич, Р. Т. Хаматдинов, В. Г. Черменский, В. А. Велижанин, С. Н. Саранцев. 26.05.2004.
10. Программно-управляемая спектрометрическая аппаратура импульсного нейтронного гамма-каротажа / В. С. Бортасевич. Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Екатеринбург, 2005.
11. Разрешение спектрометрических систем различных типов. Постановка проблемы / В. П. Семенов, Л. А. Трыков. ФЭИ-1632, 1984. Обнинск.
12. Хаматдинов В. Р., Велижанин В. А., Вершинин А. В., Саранцев С. Н., Черменский В. Г. Спектрометрическая аппаратура литолого-плотностного гамма-гамма-каротажа нефтегазовых скважин // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2005. Вып. 129. С. 24–30.

Рецензент доктор техн. наук Е. П. Боголюбов