

Рекомендации по использованию спектрометрических АЦП

Шереметьев А.К.

В настоящее время в спектрометрии ядерных излучений происходит замена амплитудных анализаторов на компьютеры со спектрометрическими АЦП. В предлагаемых рекомендациях рассматриваются особенности эксплуатации таких систем.

1. Амплитудно-цифровые преобразователи и их характеристики

Спектрометрические амплитудно-цифровые преобразователи (АЦП) обнаруживают появляющиеся на их входе импульсы и преобразуют амплитудное значение импульсов в цифровое значение. По-английски АЦП называют analog to digital convertor или ADC.

По сравнению с аналого-цифровыми преобразователями общего назначения в состав АЦП дополнительно входят амплитудный дискриминатор, который обнаруживает импульсы и зарядное устройство, запоминающее амплитуду импульсов для последующего аналого-цифрового преобразования.

АЦП отличаются от общетехнических аналого-цифровых преобразователей по применяемой терминологии и характеристикам. Разность двух соседних уровней квантования в аналого-цифровых преобразователях называют квантом или единицей младшего разряда. В спектрометрии утвердился термин "ширина канала". В отличие от аналого-цифровых преобразователей, в спектрометрии для характеристики уровня шумов используют понятие профиля канала, а не среднеквадратическое отклонение шума.

АЦП должен иметь малую дифференциальную нелинейность, т.е. высокую однородность ширин каналов. Аналого-цифровые преобразователи поразрядного взвешивания обычно имеют дифференциальную нелинейность, равную одной единице младшего разряда. АЦП имеет дифференциальную нелинейность 1% от ширины канала, что в 100 раз лучше.

Для получения малой дифференциальной нелинейности в АЦП применяют амплитудно-временное преобразование, изобретенное Вилкинсоном в 1950 году. Сущность его заключается в преобразовании амплитуды импульса во временной интервал путем разряда емкости постоянным током с одновременным заполнением временного интервала импульсами тактового генератора. По числу заполняющих импульсов судят об амплитуде импульса.

АЦП с преобразованием Вилкинсона, такие как 8701 фирмы CANBERRA, 800 фирмы ORTEC, а также отечественный АЦП типа БПА-01Ф имеют примерно одинаковые характеристики: число уровней квантования до 8195, интегральная нелинейность (0,02 - 0,05) %, дифференциальная нелинейность (0,7 - 1) %, частота генератора тактовых импульсов (100 - 150) МГц. Кроме того, для зарубежных АЦП указывают нестабильность, которая составляет 0,01 % на градус и 0,01 % за 24 часа и плоскую часть профиля канала, которая составляет от 75 до 90 % от ширины канала.

В 1963 году Коттини и Гатти предложили использовать для уменьшения дифференциальной нелинейности аналого-цифровых преобразователей поразрядного взвешивания скользящую шкалу. Идея заключается в том, чтобы амплитуду каждого импульса увеличивать на разную, но хорошо известную величину, а затем в цифровом виде эту добавку вычитать. В результате цифра, соответствующая амплитуде, не меняется, но преобразование всякий раз происходит на другом участке шкалы, поэтому неоднородность ширин каналов усредняется.

В последнее время в основном выпускают АЦП со скользящей шкалой. Это АЦП 8713 фирмы CANBERRA в стандарте NIM, 917 - 920 фирмы ORTEC в стандарте NIM и 114 и

413 в стандарте КАМАК. Время преобразования у них составляет от 5 до 15 мкс при дифференциальной нелинейности лучше 1%. АЦП CANBERRA 8715 и ORTEC 921 имеют время преобразования около 1 мкс.

АЦП фирмы CANBERRA связываются с компьютером через специальный соединительный модуль сети ETHERNET. Фирма ORTEC модуль связи встраивает в АЦП. При этом с компьютером можно связываться как через последовательный порт RS232, так и через ETHERNET. Стоимость такого АЦП с каналом связи составляет от 7 до 14 тысяч долларов.

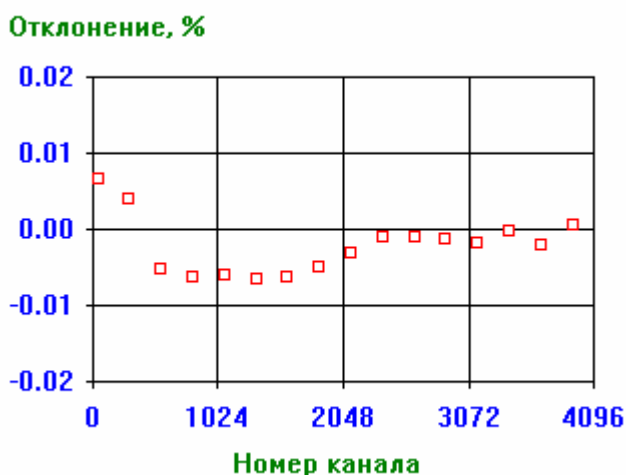
Стоимость плат АЦП, встраиваемых в компьютер, ниже. Это CANBERRA ACCUSPEC и ORTEC TRAMP с Вилкинсоновским преобразователем на 2048 каналов. Они стоят примерно 3 тысячи долларов.

Еще дешевле отечественное оборудование. Плата АЦП-8К фирмы АСПЕКТ, встраиваемая в компьютер, стоит 1000 долларов.

В настоящее время НПО СПЕКТР выпускает дешевый АЦП-1, встраиваемый в компьютер, для экологических измерений. Этот АЦП имеет 4095 каналов, интегральную нелинейность 0,01 %, дифференциальную нелинейность 1 %, плоскую вершину профиля канала 80 % и нестабильность 0,01 % на градус, что соответствует мировому уровню характеристик АЦП.

1.1. Интегральная нелинейность.

Интегральную нелинейность определяют как максимальное отклонение измерительной характеристики от аппроксимирующей прямой, проведенной таким образом, чтобы отклонения от нее в обе стороны были одинаковы и минимальны.



Положение пика в спектре можно определить с точностью 0,1 канала, что соответствует интегральной нелинейности 0,002 %. Интегральная нелинейность качественных АЦП приближается к этой величине.

Измерение характеристик АЦП нормировано в ГОСТ 22252-82. Интегральную нелинейности АЦП измеряют с помощью генератора импульсов

Рис. 1. Интегральная нелинейность АЦП-1.

точной амплитуды с наложенным шумом. Изменяя амплитуду импульсов генератора, получают отсчеты положения пика генератора, по которым и судят о нелинейности. На рис.1 приведен пример измерения интегральной нелинейности АЦП-1.

1.2. Дифференциальная нелинейность.

Под дифференциальной нелинейностью понимают неоднородность ширин каналов АЦП. При большой неоднородности ширин каналов в спектре могут образовываться ложные пики, а реально существующие пики малой амплитуды маскируются разбросом отсчетов. Определяют дифференциальную нелинейность как половину разности максимального и минимального отсчетов при измерении спектра генератора импульсов с равномерным распределением амплитуд. При этом подразумевается, что время измерения спектра достаточно велико, чтобы можно было пренебречь статистической погрешностью измерений.

Происхождение термина "дифференциальная нелинейность" относится к тому времени, когда неоднородность ширин каналов определялась нелинейностью измерительной характеристики. При этом дифференциальная нелинейность была равна производной от интегральной нелинейности, взятой с обратным знаком. По мере уменьшения интегральной нелинейности преобладающим источником неоднородности стала цифровая часть АЦП, а дифференциальная нелинейность стала выглядеть как случайный разброс ширин каналов (рис 2).

Отклонение от среднего, %

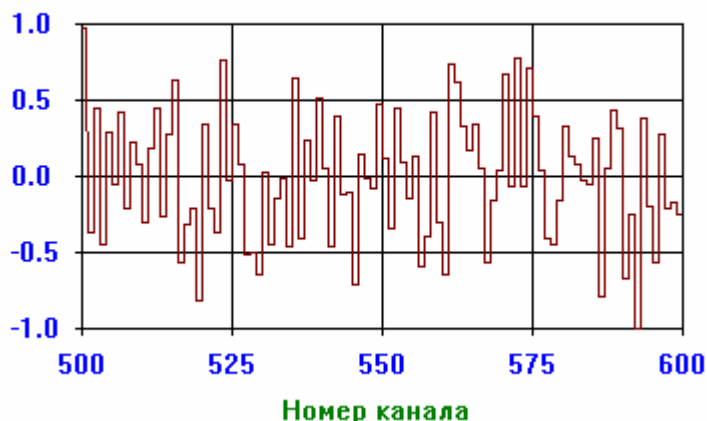


Рис. 2. Дифференциальная нелинейность АЦП-1.

1.3. Профиль канала.

Профилем канала называют зависимость вероятности регистрации в данном канале от амплитуды импульсов. В идеальном случае это должен быть график прямоугольной формы: если амплитуда импульса находится внутри канала, вероятность регистрации равна единице, а если вне канала - равна нулю.

Границы канала размываются собственным шумом АЦП. Качество профиля канала оценивают по величине плоской вершины на уровне вероятности регистрации, равной 0,9, относя протяженность плоской вершины к ширине канала.

На рис.3 приведен профиль канала АЦП-1. Можно определить, что плоская часть профиля канала составляет 92 % при СКО собственного шума, равном 80 мкВ.

Вероятность регистрации

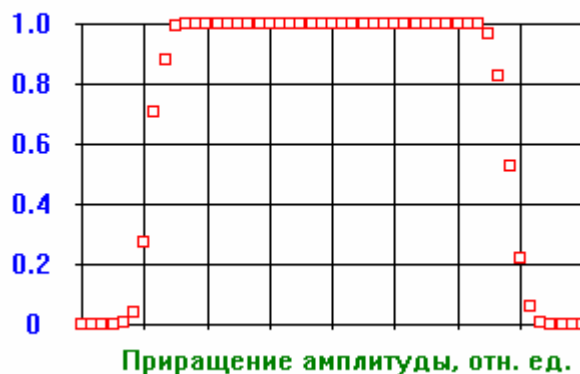


Рис. 3. Профиль канала АЦП-1.

2. Разрешение спектрометра

На разрешение спектрометра могут оказывать влияние три фактора, относящиеся к АЦП: число каналов, собственный шум АЦП и внешние шумы и наводки, возникающие при соединении спектрометрических блоков.

2.1. Требуемое число каналов АЦП.

При квантовании импульсов возникает шум за счет того, что положение всех импульсов внутри канала приравнивается к одному, равному середине канала. Среднеквадратичное отклонение шума квантования составляет примерно треть канала. Шум квантования ухудшает разрешение спектрометра не более чем на 1 %, когда на интервал, равный разрешению (ширина на половине высоты пика) приходится 5 каналов и более. В соответствии с этим требованием принято использовать для сцинтилляционных спектрометров 512 каналов, для рентгеновских полупроводниковых спектрометров 1024 канала, а для полупроводниковых спектрометров гамма и альфа-излучения 4096 каналов.

При измерении спектров от сцинтилляционных детекторов можно использовать большую ширину канала. Если динамический диапазон входных сигналов равен 10 В, то можно получить ширину канала 20 мВ. При такой ширине канала и стандартных мерах по заземлению аппаратуры шумы и наводки практически не влияют на процесс измерения.

На рис.4 приведен типичный спектр излучения Cs^{137} , полученный при измерении с кристаллом NaJ(Tl) диаметром и высотой 60 мм. Разрешение по пику с энергией 662 кэВ составляет 8,6 %. Хорошо виден пик рентгеновского излучения с энергией 32 кэВ. У этого пика на интервал, соответствующий разрешению, приходится 7 каналов. Таким образом, для сцинтилляционных спектрометров достаточно 512 каналов.

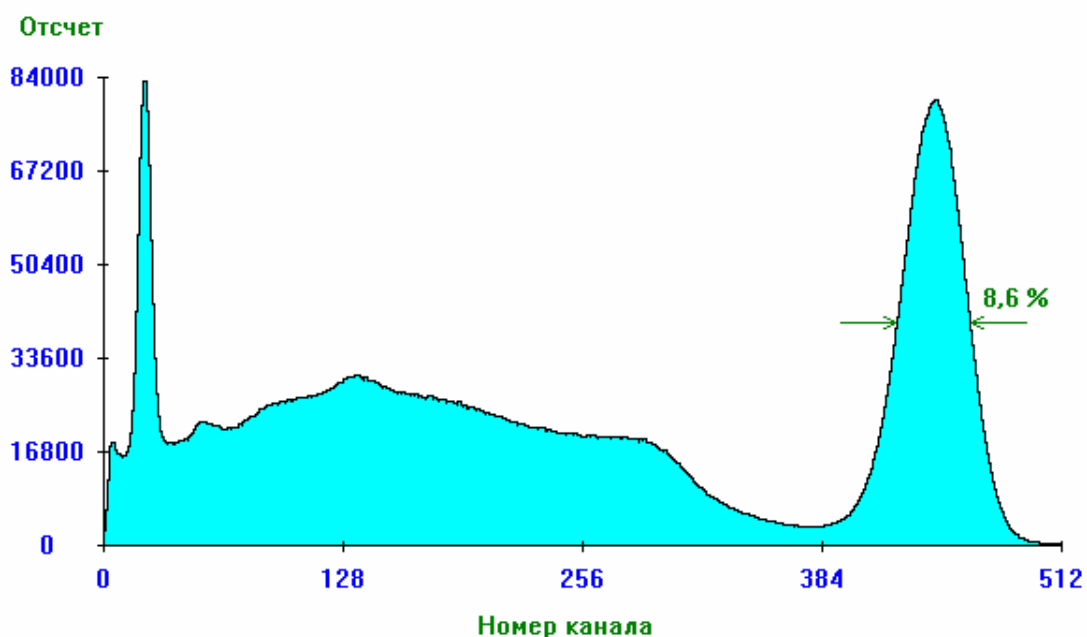


Рис. 4. Спектр излучения Cs^{137} , полученный от сцинтилляционного детектора.

2.2. Собственный шум АЦП.

Качество АЦП определяется его собственным шумом и характеризуется профилем канала. Если плоская часть вершины профиля канала составляет от 75 до 90 % ширины канала, то при типичной ширине канала 2,5 мВ СКО шума составляет от 100 до 200 мкВ. Собственный шум должен быть меньше шума квантования, иначе эффективное (метрологически обеспеченное) число каналов будет меньше номинального. Например, если плоская вершина профиля канала составляет 20 % от ширины канала, то собственный шум равен шуму квантования, а реальное число каналов АЦП уменьшается в 1,4 раза по сравнению с номинальным.

Таким образом, нужно выбирать АЦП с достаточно качественным профилем канала.

2.3. Внешние шумы и наводки.

В том случае, когда плата АЦП встроена в компьютер, шум в системе спектрометрический усилитель - АЦП может возрасти из-за наводок на кабель, соединяющий выход усилителя и вход АЦП.

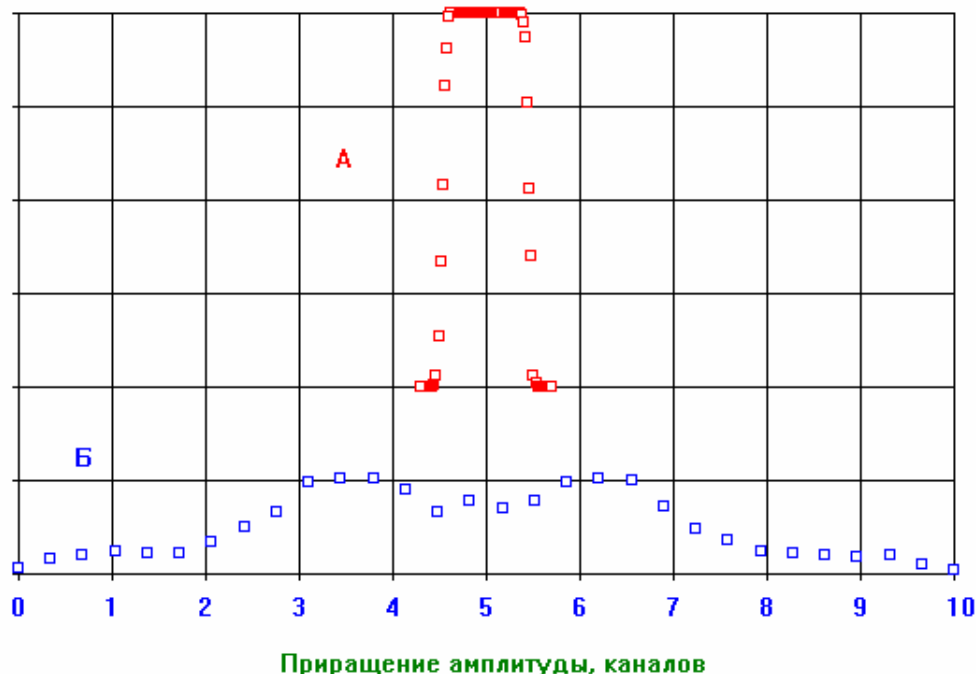
Наводки, возникающие на соединительном кабеле, связаны с источниками сетевого питания, которые создают токи в контуре заземления. Эти токи могут протекать по оплетке кабеля и создавать шум. В качестве примера на рис.5 приведены результаты измерения профиля канала с генератором, размещенном в крейте КАМАК фирмы POLON. Длина соединительного кабеля составляла несколько метров, а крейт и компьютер были включены в сетевые розетки, расположенные на противоположных стенах комнаты. Исходный профиль (кривая А) 'расплылся' на 10 каналов (кривая Б). СКО шума составило 3 мВ, что привело к уменьшению реального числа каналов АЦП до 1000.

Существенное улучшение характеристик происходит, когда крейт и компьютер включены в соседние сетевые розетки, а соединительный кабель имеет минимальную длину (рис.6.Б). Шум при этом уменьшается до приемлемого значения 140 мкВ. Результат получается еще лучше, если отключить заземление крейта (рис.6.А). Тогда величина шума падает до 80 мкВ. К сожалению, такая мера противоречит требованиям техники безопасности.

Таким образом, компьютер и блок со спектрометрическим усилителем необходимо включать в соседние сетевые розетки, а соединительный кабель должен иметь минимальную длину.

Другим источником наводок является дисплей компьютера. На рис.7 приведены профили канала при измерениях с генератором, получающим питание от компьютера и соединенным с АЦП кабелем длиной 1,5 м. В том случае, когда генератор расположен за компь-

Вероятность регистрации



ютером так, чтобы корпус компьютера экранировал монитор, шум составляет 160 мкВ (рис.7.А). Когда генератор расположен перед экраном монитора, шум возрастает до 1 мВ (рис.7.Б), а реальное число каналов уменьшается в два раза. Таким образом, спектрометрическую аппаратуру необходимо удалять от монитора компьютера.

Рис. 5. Собственный профиль канала АЦП-1 (А) и в системе КАМАК – компьютер с обширным контуром заземления (Б).

Вероятность регистрации

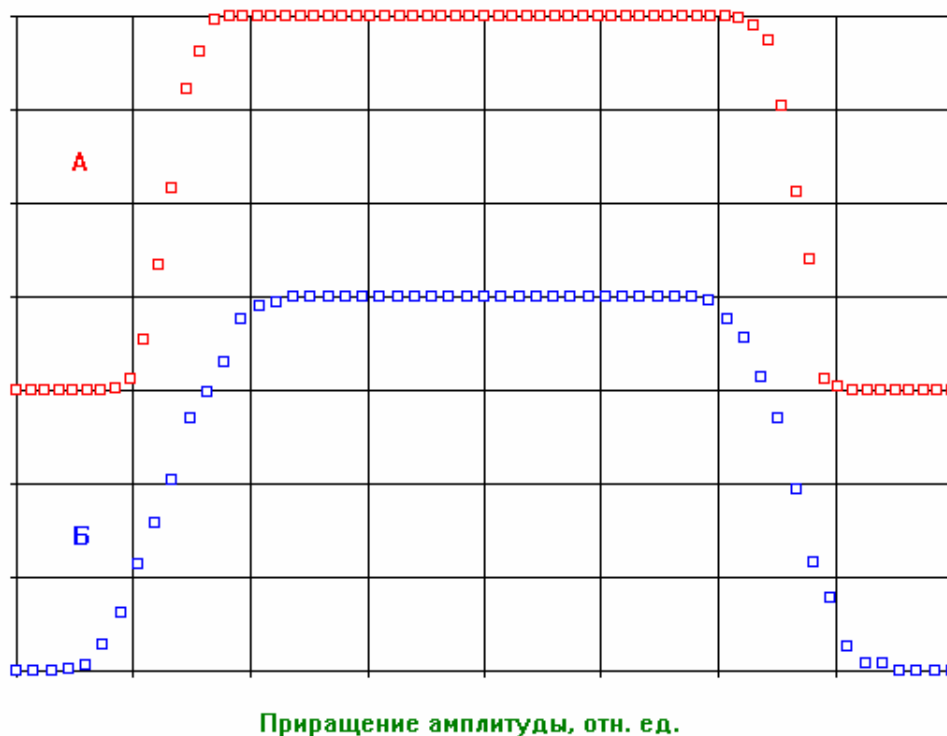


Рис. 6. Профиль канала в системе КАМАК – компьютер с отключенным заземлением (А) и с минимальным контуром заземления (Б).

Вероятность регистрации

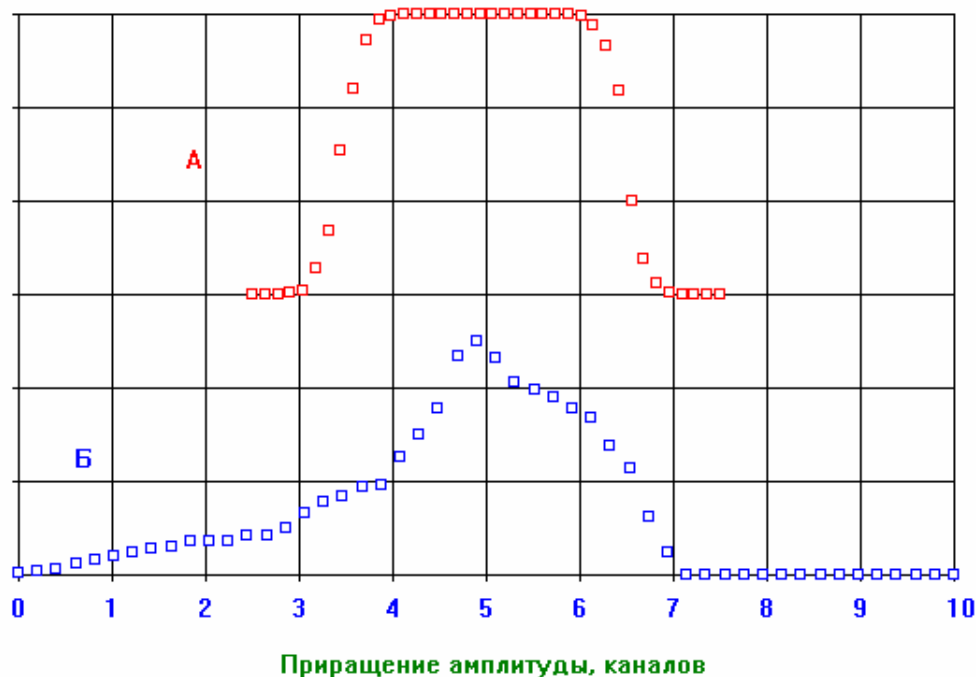


Рис. 7. Профиль канала в системе генератор-компьютер с генератором, удаленным от дисплея (А) и с генератором, расположенным перед экраном дисплея (Б).

3. Потери информации в спектрометре

3.1. Погрешность задания экспозиции.

Экспозицию в спектрометрах на основе компьютеров стараются задавать программным способом. Погрешность экспозиции можно измерить, если использовать генератор периодических импульсов стабильной частоты, например, с кварцованным задающим генератором.

В среде WINDOWS экспозицию можно задать с помощью таймера, прерывающего работу программы, и в текущем режиме с помощью команды GetTickCount. Прерывание удобно использовать для АЦП с буферной памятью. Тогда во время набора информации можно использовать компьютер для других целей, например, для обработки предыдущего спектра. Анализ текущего времени набора используется для АЦП без буферной памяти.

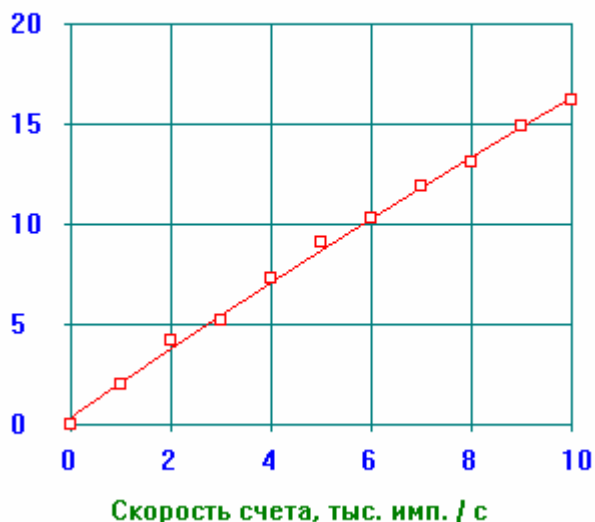
Дискретность задания экспозиции таймером составляет 55 мс, поэтому на коротких циклических экспозициях может набегать ошибка в несколько процентов. Приемлемую погрешность в 0,1 % можно получить при опросе буферной памяти с периодом 10 с и более.

Дискретность GetTickCount составляет 14 мс, поэтому погрешность в 0,1 % можно получить при наблюдении спектра 1 раз в 5 с или реже.

3.2. Потери информации в сцинтилляционном спектрометре.

При увеличении входной загрузки пики излучения в спектрометрах расширяются и сдвигаются. Кроме того, площадь пиков уменьшается по сравнению с расчетной. Расширение и сдвиг пиков определяются усилительным трактом, а потери информации происходят в АЦП и в регистрирующем устройстве. Пока АЦП занят анализом импульса, его вход заблокирован и входные импульсы за это время теряются.

Уменьшение площади пика, %



Уменьшение площади пика удобно наблюдать с генератором импульсов стабильной частоты, если импульсы генератора подмешать в спектр измеряемого излучения. На рис.8 приведены результаты измерения площади пика генератора в зависимости от входной загрузки. Загрузка изменялась с помощью источника излучения Cs^{137} . Поскольку наблюдать можно выходную скорость счета, а не входную, загрузка в каждой точке подбиралась путем последовательных приближений с

Рис. 8. Потери информации в сцинтиляционном спектрометре

учетом измеренных потерь. Спектр регистрировался в 512 каналах. Согласно закону Пуассона потери информации равны $e^{-n\tau}$, где n - скорость счета импульсов а τ - среднее мертвое время. Аппроксимация полученных данных произведена экспоненциальной кривой. Можно видеть, что до 10 тыс. имп./с начальный участок экспоненты близок к линейной зависимости. Среднее мертвое время для АЦП-1 составляет 17,5 мкс.

3.3. Потери информации в полупроводниковом спектрометре.

В полупроводниковом спектрометре потери информации больше из-за большого количества используемых каналов. На рис.9 приведены потери информации в спектрометре с полупроводниковым детектором в диапазоне загрузок до 1 тыс. имп/с.

Можно видеть, что потери зависят от формы спектра. Для Co^{60} с энергиями гамма-излучения 1,17 и 1,33 МэВ потери больше, чем для Cs^{137} с энергией гамма-излучения 0,66 МэВ. Связано это с тем, что при большой энергии квантов и, соответственно, большой амплитуде импульсов, время преобразования увеличивается, что увеличивает потери входных импульсов.

Уменьшение площади пика, %

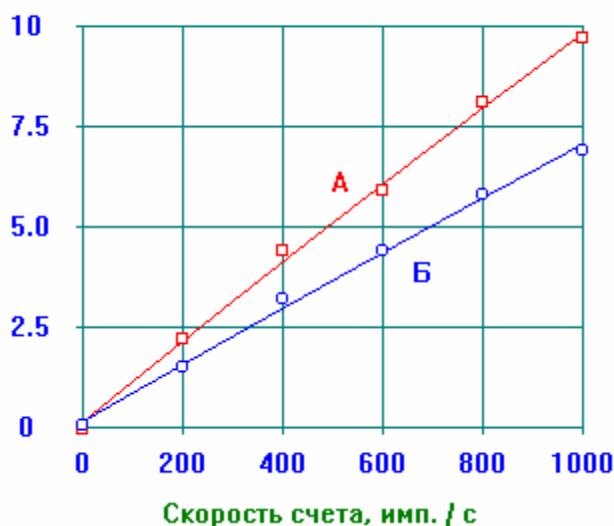


Рис. 9. Потери информации в полупроводниковом спектрометре при загрузках до 1000 имп / с. А – кобальт-60; Б – цезий-137.

3.4. Коррекция площади пиков по мертвому времени.

Коррекция площади пиков основана на полученной из закона Пуассона зависимости для скорости счета импульсов в устройствах с мертвым временем:

$$m = n e^{-n\tau}$$

где n - входная скорость счета импульсов;
 τ - мертвое время устройства;
 m – выходная скорость счета импульсов.

Следует отметить две особенности применения этого выражения. Во-первых, по известной выходной скорости счета импульсов в явном виде нельзя найти входную, поэтому такую операцию осуществляют путем последовательных приближений. Во-вторых, для учета формы спектра целесообразно разделить среднее мертвое время на две составляющие: переменное время преобразования и постоянное дополнительное время.

Среднее время преобразования τ_n зависит от формы полученного спектра и вычисляется следующим образом:

$$\tau_n = \frac{\sum N T I}{\sum I}$$

где N – номер канала;

T – период генератора тактовых импульсов АЦП;

I – число импульсов в канале.

Суммирование ведется по всем каналам спектра.

Постоянное дополнительное время определяется двумя величинами.

Во-первых, оно учитывает наложение других импульсов на передний фронт анализируемого импульса. Формирующие спектрометрические усилители в полупроводниковых спектрометрах дают импульсы с длительностью переднего фронта 5 – 10 мкс. Амплитуда измеряемого импульса при наложении на его передний фронт другого импульса возрастает, поэтому в спектре информация о нем попадает не в пик, а в непрерывное распределение. Другими словами, при увеличении загрузки относительная площадь пиков в спектре уменьшается.

Во-вторых, в постоянное дополнительное время входит время регистрации полученной информации об амплитуде импульса.

Дополнительное время можно найти из данных по измерению потерь с генератором стабильной частоты. Для этого по потерям информации вычисляют среднее мертвое время, а по спектру – среднее время преобразования. Их разность дает дополнительное мертвое время. Для АЦП-1 и спектрометрического усилителя с длительностью переднего фронта 5 мкс дополнительное мертвое время равно 8 мкс.

Таким образом, учет потерь информации в спектрометре сводится к следующим операциям.

По измерению потерь с генератором стабильной частоты нужно найти дополнительное мертвое время. Эта величина определяется один раз и является константой для данной конфигурации аппаратуры.

В полученном спектре нужно вычислить среднее время преобразования. Среднее мертвое время равно сумме дополнительного мертвого времени и времени преобразования.

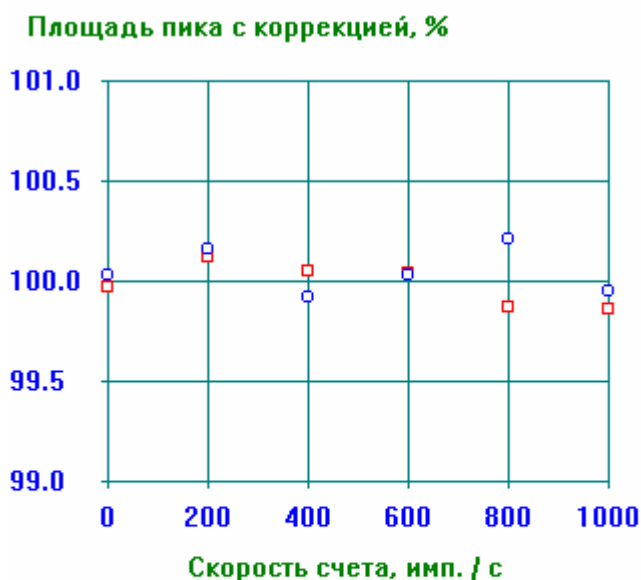


Рис. 10. Коррекция потерь информации в полупроводниковом спектрометре при загрузках до 1000 имп. / с. □ - кобальт-60 ; ○ - цезий-137.

На рис.10 представлена зависимость площади пика генератора в диапазоне до 1 тыс. имп./с с коррекцией, введенной описанным способом. Время набора информации в каждой точке составляло 10 мин. Можно видеть, что значительное изменение формы спектра (энергия гамма-излучение Co^{60} и Cs^{137} отличается примерно в два раза) корректно учитывается с помощью описанного способа.

Таким образом, в диапазоне до 1 тыс. имп / с потери информации можно откорректировать с погрешностью не более 0,3 %.

Затем следует вычислить входную скорость счета. Для этого нужно вычислить первое приближение n согласно выражению

$$n = m / e^{m\tau}$$

а затем в цикле уточнить значение n согласно выражению

$$n = m / e^{n\tau}$$

Здесь в правой части выражения используется предыдущее значение n , а в левой части получается последующее. Десяти циклов приближения вполне достаточно для получения значения n с малой погрешностью.

Далее нужно ввести поправку в измеренное ранее значение площади пика $S_{изм}$ в следующем виде:

$$S = S_{изм} e^{-n\tau}$$