

2.7 Схемы совпадений

Методы совпадений и антисовпадений являются одними из важнейших методов в радиометрии. Они позволяют регистрировать частицы и кванты с заданной корреляцией между ними в пространстве и времени. Можно привести много примеров использования этих методов в решении различных задач. Например, для определения числа частиц, имеющих определённое направление, применяется установка, состоящая из двух или нескольких счётчиков, подключённых к схеме совпадений, - так называемый телескоп. В зависимости от того, как проходит через счётчик частица: через один счётчик или через оба, на входы схемы совпадений поступают либо один, либо два импульса. Задача схемы совпадений заключается в том, чтобы выделять случаи одновременного поступления импульсов на входы и сигнализировать о таком событии. В рассматриваемой установке на входе схемы совпадений сигналы будут возникать всякий раз, когда частица пронизывает оба счётчика, т.е. проходит в выделенном телескопом конусе углов. Так как электронные схемы могут устанавливать одновременность события всегда лишь с некоторой конечной точностью, то возможны также случайные совпадения во времени между импульсами от различных частиц, проходящих под разными углами. Как правило, вероятность такого явления мала, но в некоторых случаях её приходится учитывать.

Другим примером использования метода совпадений является схема, исключаящая шумы множителя при регистрации мягкого излучения. Установка состоит из двух ФЭУ, «смотрящих» на один сцинтиллятор и подключённых к схеме совпадений. На входы схемы совпадений поступают импульсы от вспышек в кристалле, возникающих при попадании в него исследуемых частиц, а также импульсы шумов множителей. Импульсы от частиц появляются одновременно на выходе обоим ФЭУ, в то время как импульсы шумов возникают в множителе независимо друг от друга и приходят на схему совпадений в разные моменты времени. Поэтому схема совпадений будет срабатывать только от импульсов изучаемого эффекта.

Схема совпадений - электронное устройство, служащее для выделения из совокупности поступающих на него сигналов (электрических импульсов) только таких, которые полностью либо частично перекрываются (совпадают) во времени; представляет собой коммутирующее устройство дискретного действия с несколькими входами и одним выходом, сигнал на котором появляется только тогда, когда есть сигналы на всех входах одновременно.

В радиометрии схемой совпадения называется импульсная схема, электрический сигнал на входе которой возникает только при одновременной подаче сигналов на её входы. Посредством схемы совпадений определяют одновременность появления двух или более электрических импульсов, генерируемых детекторами ядерных излучений при регистрации отдельных актов ядерных взаимодействий.

Схему совпадений можно рассматривать состоящей из двух электрически связанных каскадов. Первый каскад называется смесительным каскадом или каскадом выделения совпадений. На его выходе образуются электрические сигналы разной амплитуды от совпавших и несовпавших во времени сигналов, поступивших на его входы. Второй каскад называется каскадом отбора совпадений и в большинстве случаев представляет собой ждущий мультивибратор, выдающий электрический импульс при попадании на его вход сигнала от первого каскада, который соответствует случаю совпадения. Импульс меньшей амплитуды, получающийся после первого каскада при несовпавших сигналах, не в состоянии открыть ждущий мультивибратор, на входе которого в данном случае электрический сигнал отсутствует.

Схемы совпадений характеризуются следующими основными параметрами: разрешающим временем τ_p (максимальный временной сдвиг между входными сигналами, при котором они регистрируются как одновременные), чувствительностью (минимальный уровень входных сигналов, поступающих одновременно на все входы схемы совпадений, мёртвым временем (минимальное время между двумя последовательными срабатываниями схемы совпадений). Кроме собственно узла совпадения, в состав схемы совпадений входят пороговые формирующие элементы и выходной дискриминатор (для схемы совпадений $\tau_p < 10$ нсек характерно совмещение функциональных элементов в одном конструктивном узле). Важно, что работа схемы совпадений зависит от формы подаваемых сигналов.

Эффективность схемы совпадений – величина, показывающая вероятность регистрации истинного совпадения, т.е. совпадения, обусловленного наличием только полезных сигналов, связанных с изучаемым физическим явлением. Однако возможны случайные совпадения, вызванные наличием «ложных» импульсов, получающихся в результате попадания в детектор частиц или квантов, не связанных с изучаемым явлением, а также вызванных физическими процессами в самих детекторах или электронной схеме. Чем больше разрешающее время системы, тем больше вероятность случайного совпадения.

Схемы совпадений могут быть построены, например, на параллельно включенных элементах коммутации (транзисторах, полупроводниковых диодах и т.д.), имеющих малое внутреннее сопротивление по сравнению с сопротивлением нагрузки (Рис. 11.); известны схемы совпадений с формирующими каскадами на туннельных диодах, а также мостового типа. Матричные схемы совпадений, выполненные средствами микроэлектроники, позволяют строить многовходовые системы в интегральном исполнении. Находят применение мажоритарные схемы совпадений, срабатывающие при некотором заданном числе совпадающих входных сигналов.

Спусковая схема, спусковое устройство, термин, употребляемый в импульсной технике для обозначения устройств, обладающих двумя или (реже) несколькими состояниями равновесия и способных скачком переходить из одного состояния в другое.

Скачкообразное изменение состояния схемы совпадений происходит при внешнем воздействии вследствие лавинообразных процессов, развивающихся в устройстве благодаря наличию в нём сильной положительной обратной связи. Внешнее воздействие является спусковым (запускающим, стартовым) сигналом; скачок состояния наступает всякий раз, как только запускающий сигнал достигает некоторого уровня, называемого порогом срабатывания. В качестве активных элементов в схеме совпадений используют электронные и газоразрядные лампы, транзисторы, туннельные диоды и др. Типичная схема совпадений, применяемая в устройствах автоматики и вычислительной техники, - триггер.

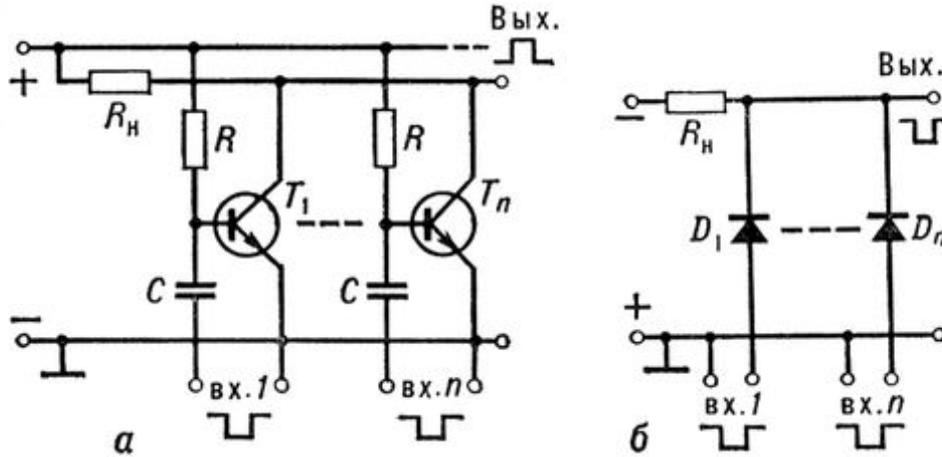


Рис. 11. Схема совпадений: а — на транзисторах; б — на диодах; R_n — сопротивление нагрузки; R — сопротивления в цепи смещения; C — конденсатор (ёмкость) в цепи смещения; T_1, \dots, T_n — транзисторы; D_1, \dots, D_n — диоды.

Триггер - спусковое устройство, которое может сколь угодно долго находиться в одном из двух (реже многих) состояний устойчивого равновесия и скачкообразно переключаться из одного состояния в другое под действием внешнего сигнала.

Триггер имеет два выхода: основной и инверсный. Каждому состоянию триггера соответствуют определённые сигналы на его выходах, отличающиеся своим уровнем. В одном состоянии на основном выходе триггера формируется сигнал высокого уровня, а на инверсном - низкого; в др. состоянии, наоборот, сигналы высокого и низкого уровней формируются соответственно на инверсном и основном выходах. Триггер характеризуется следующими важнейшими параметрами: быстродействием, временем срабатывания, уровнями входных и выходных сигналов. Быстродействие триггера определяется как максимальное возможное число переключений в единицу времени. Время срабатывания определяется временем перехода триггера из одного состояния в другое и характеризует задержку выходного сигнала триггера относительно входного. Под уровнем входного сигнала понимают минимальное значение сигнала, необходимое для переключения триггера. Уровень выходного сигнала у большинства триггеров не ниже уровня входного сигнала, чем обеспечивается возможность их последовательного соединения без промежуточного усиления.

Наиболее часто применяют: триггер со счётным входом (T -триггер), который изменяет своё состояние на противоположное с каждым входным сигналом; Триггер с двумя установочными входами (R - S -триггер), изменяющий своё состояние только при воздействии управляющего сигнала на определённый вход (R -или S -вход), причём повторное воздействие сигнала на тот же вход триггер не изменяет его состояния; универсальный T . (J - K -триггер), обладающий свойствами T -триггера и R - S -триггера; триггер. задержки (D -триггер), состояние которого и соответствующий ему выходной сигнал повторяют входной сигнал. Кроме триггеров этих типов, применяют комбинированные триггеры, представляющие собой универсальные многофункциональные устройства с большим числом входов.

Указанные выше триггеры относят к симметричным; применяют также несимметричные триггеры (T . Шмитта). Несимметричный триггер переходит из одного состояния в другое по достижении входным сигналом одного уровня (порога срабатывания), а в исходное состояние возвращается при уменьшении входного сигнала до некоторого др. уровня. Существуют и многостабильные триггеры, обладающие числом устойчивых состояний, большим, чем два.

Функция схемы совпадений состоит в генерации на ее выходе сигнала, если время появления сигналов на ее входах меньше некоторого предварительно установленного времени τ , которое называется разрешающим временем схемы совпадения. Входов в схеме совпадений может быть 2 (двойная схема совпадений) и больше.

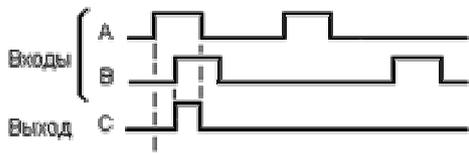


Рис. 12. Входные и выходные импульсы схемы "и".

Рассмотрим двойную схему совпадений так называемого перекрывающегося типа. Такая схема совпадений практически то же самое, что схема "и" цифровой электроники. Схемы совпадения такого типа обычно используются в микросекундной области. Это так называемые медленные схемы совпадений. На вход такой схемы поступают сформированные прямоугольные (медленные логические) импульсы. Иногда импульсы, поступающие на вход дополнительно регулируются (меняется их длительность). Эти импульсы поступают на схему "и". Выходной импульс со схемы "и" формируется и поступает на выход. Импульсы на выходе возникают, если временное рассогласование между двумя импульсами меньше, чем $t_1 + t_2$, где t_1 и t_2 - длительности импульсов на входе "и".

Большое число задач радиометрии связано с исследованием временного распределения импульсов, т.е. с определением зависимости числа импульсов в функции от момента их появления, $n=f(t)$. В экспериментах, где изучается временное распределение между парами сравнительно редко возникающих событий, часто используется метод задержанных совпадений. Идея метода состоит в том, что опережающие импульсы задерживаются на определенное время, и производится регистрация числа совпадений их с отстающими импульсами.

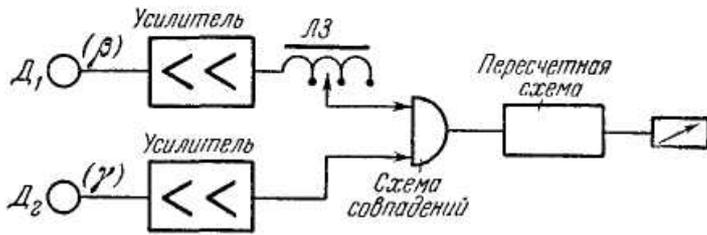


Рис. 13. Одноканальная схема задержанных совпадений.

Метод задержанных совпадений применяется, например, для определения времени жизни возбужденного ядра при β -распаде. При этом используется тот факт, что переход ядра в возбужденное состояние сопровождается вылетом β -частицы, а последующий переход в основное состояние связан с испусканием γ -кванта. Время пребывания ядра в возбужденном состоянии мало (порядка нескольких микросекунд) и колеблется около некоторого среднего значения. Применяемая для определения времени жизни возбужденного состояния схема задержанных совпадений приведена на Рис. 13. Она подключена к детекторам D_1 и D_2 и отличается от обычной схемы совпадений тем, что в канале регистрации β -частицы (D_1) имеется элемент переменной задержки - линия L_3 . При проведении измерений такой схемой вначале устанавливают некоторую задержку t_{31} и определяют число совпадений в единицу времени, затем ту же величину определяют при задержке $t_{32}, t_{33}, \dots, t_{3n}$. Результаты откладываются в виде графика $n=f(t_3)$, по которому и определяется время жизни возбужденного ядра.

Таким образом, методом задержанных совпадений определяется число совпадений в функции от вводимой в канал задержки. Для того чтобы подобные исследования сделать более эффективными, аналогичные задачи решают или с помощью многоканальных схем задержанных совпадений, или путём измерения интервалов времени между парами импульсов. В последнем случае измеряются все интервалы и результаты измерений сортируют так, что в конечном итоге получается зависимость $n=f(t_3)$.

Если на оба входа схемы совпадений подать сигналы от одного источника и в один из каналов ввести задержку t_d , то интенсивность на выходе N в зависимости от задержки будет иметь П-образную форму. Это так называемая кривая самосовпадений ($\tau_e = t_1 + t_2$ - электрическое разрешающее время). Однако если подать на входы схемы совпадений сигналы от двух источников и проделать ту же операцию (снять кривую совпадений), картина может становиться заметно асимметричной. Это связано с временными неопределенностями временных привязок в каналах. Чем они больше, тем кривая совпадений сильнее размывается. Часть событий при измерениях с, так выбранным, разрешающим временем будут утеряны (эффективность системы регистрации $< 100\%$).

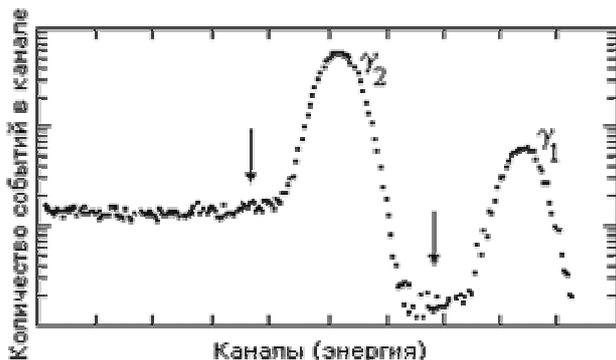


Рис. 14. Часть энергетического спектра гамма-квантов.

Рассмотрим конкретный пример использования быстро-медленных совпадений. Предположим, что проводятся измерения гамма-спектра радиоактивного источника. На спектре, измеренном с помощью одного детектора, видны три линии γ_1, γ_2 и γ_3 . Часть измеренного

спектра с линиями γ_1 и γ_2 показана на **Рис. 14**. Возможны различные схемы распада, в частности показанные на **Рис. 15**.

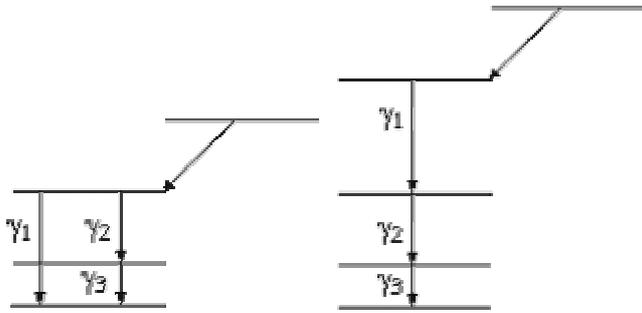


Рис.15. Варианты схем распада.

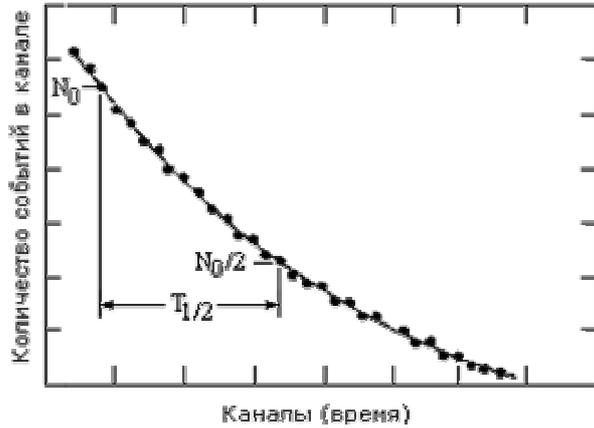


Рис. 16. Кривая распада возбужденного состояния.

С выхода время-амплитудного конвертера (ВАК) сигналы подаются на АЦП. В результате измеряется временной спектр (**Рис. 16**). Это ничто иное, как кривая распада первого возбужденного состояния (**Рис. 15а**). Таким образом, с помощью системы с быстро-медленными совпадениями удалось не только определить схему распада, но и измерить период полураспада (среднее время жизни) одного из возбужденных состояний ядра. Последнее оказалось возможным, так как в этом случае временная неопределенность

в быстрых цепях была заметно меньше среднего времени жизни возбужденного состояния. Схемы, быстро-медленных совпадений применяются не только для измерения гамма-гамма корреляций, но и для корреляций частица-гамма и частица-частица.

Теперь нужно провести измерения с двумя детекторами. В первом измерении окно одноканального анализатора 2 настраивается на линию γ_1 и с первого канала снимается энергетический спектр на совпадения с этой линией. Гамма-линии в этом случае отсутствуют, а на выходе ВАКа видны случайные сигналы от некоррелированных событий. Во втором измерении окно одноканального анализатора 2 настраивается на линию γ_2 . На энергетическом спектре, который снимается с первого канала, видна линия γ_3 . Третье измерение - снятие временного спектра. Для этого временной одноканальный анализатор настраивается на линию γ_3 .



Рис. 17. Исключение шумов ФЭУ методом совпадений.

В тех задачах, где изучается временное распределение большого числа событий, возникающих после некоторого начального момента, часто используется метод временной селекции. В этом методе производится отбор и регистрация статистически распределённых исследуемых импульсов в течение

определённых интервалов времени. Временная селекция импульсов используется в спектрометрических исследованиях нейтронов по методу полёта. Такие исследования ведутся на импульсно работающих циклотронах, линейных ускорителях, реакторах.

В радиометрии схемы совпадений применяются при постановке метода бета-гамма-совпадений, для уменьшения влияния фона фотоумножителей при сцинтилляционном счёте, при необходимости раздельной регистрации параметров одного излучения на фоне другого, для определения углового распределения и скорости движения ядерных частиц, для изучения периодов полураспада короткоживущих радиоактивных элементов и т.п.