

1994

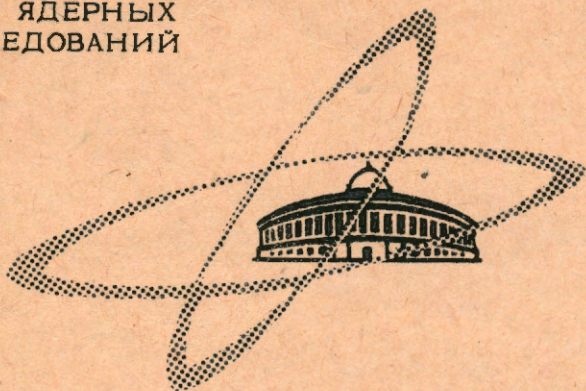
0-572

20/11-6

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1994



А.А.Омельяненко, А.Б.Попов, К.Г.Родионов,
Хен Ен Гынь, В.И.Чивкин

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОГО ФИЗИКИ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СХЕМЫ
ДЛЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА
МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ

1965

1994

А.А. Омеляненко, А.Б. Попов, К.Г. Родионов,
Хен Ен Гынь, В.И. Чивкин

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СХЕМЫ
ДЛЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА
МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ

Объединенный институт
энергетических исследований
БИБЛИОТЕКА

3024/3 нр.

В работе описана электронная аппаратура жидкостного сцинтилляционного детектора для измерения полных эффективных сечений взаимодействия нейтронов с ядрами. Свойства сцинтиллятора, тип фотоумножителей и их электрические выходные характеристики определили выбор блок-схемы и основных элементов, а также технические требования к характеристикам электронных блоков.

Блок-схема детектора

Блок-схема детектора для двух фотоумножителей показана на рис. 1. При большом размере контейнера со сцинтиллятором число установленных фотоумножителей может быть тоже большим. Схема в этом случае останется прежней, так как количество ФЭУ определит, в основном, только количество применяемых элементов, оставляя без изменения принципиальные связи. Все блоки разработаны на полупроводниковых приборах, что значительно уменьшает размеры аппаратуры, увеличивает надежность детектора и сокращает потребляемую мощность источника питания.

Жидкостный сцинтилляционный детектор^{/1/} обладает особенностями, которые заставляют предъявлять определенные требования к электронной аппаратуре. Импульсы от α -частиц имеют амплитуду, сравнимую с амплитудами шумовых импульсов ФЭУ. Кроме того, сцинтиллятор имеет заметную эффективность к γ -лучам, а световой выход для γ -лучей значительно выше, чем для α -частиц, поэтому амплитуда импульсов от γ -лучей, например, с $E_\gamma = 1$ Мэв, оказывается в 30 раз больше амплитуды импульсов от α -частиц.

Импульсы ФЭУ, ограниченные сверху на уровне, не искажающем исследуемый спектр, через эмиттерный повторитель и быстрый усилитель поступают на схему совпадений. Схемные методы позволяют в некоторой степени решить задачу разделения сигнала и шума, хотя большие перегружающие импульсы создают трудности при разработке высокочувствительных схем. Применение усилителей с малым временем нарастания позволило использовать схему совпадения со сравнительно большим порогом срабатывания. Схема пропускания образует линейные "ворота" длительностью 1 мксек. При больших входных нагрузках целесообразно было бы ставить схему пропускания как можно ближе к входу. Однако при этом сильно усложняется схема, так как нужно вводить дополнительные линии задержки в каждый канал линейного тракта и устранять полностью

"пьедестал". В противном случае спектр пропускаемых импульсов сильно искажается. Схема "ИЛИ" является сборкой выходных импульсов схем совпадений и позволяет анализировать нейтроны, попавшие в любое место детектора и зафиксированные любой из пар фотоумножителей. Суммарный импульс через линию задержки 0,3 мксек и схему пропускания поступает на дискриминатор, ширина окна и нижний порог которого выбираются в диапазоне 0,2-10 в.

Ниже приведены характеристики отдельных блоков.

Эмиттерный повторитель

Эмиттерный повторитель (ЭП) предназначен для передачи импульсов ФЭУ по длинному кабелю. Схема эмиттерного повторителя была описана в работе /2/. Для расширения диапазона линейности в область милливольтных сигналов она несколько видоизменена.

Эмиттерный повторитель работает в диапазоне отрицательных входных импульсов 0,003-0,7 в длительностью до 1 мксек с линейностью не хуже 1%. Амплитуда шумов при заземленном входе меньше 100 мкв. Коэффициент передачи при нагрузке на 150-омный кабель составляет 0,8.

Усилитель

Малый уровень выходных сигналов с ФЭУ не позволяет производить на существующей аппаратуре амплитудный и временной анализ. Поэтому применяемые усилители должны обеспечить значительное общее усиление.

Для спектрометрического тракта необходимы линейные в широком диапазоне амплитуд усилители. Во временном тракте нужны импульсные усилители с малыми временами нарастания. Кроме того, усилители должны быть не критичны к нагрузкам порядка $10^5 - 10^6$ 1/сек и нечувствительны к перегружающим импульсам.

Универсальный усилитель, удовлетворяющий всем вышеперечисленным условиям, очень сложен в изготовлении и настройке, и его применение не всегда целесообразно. Другой путь - в использовании усилителей, имеющих указанные характеристики, но обладающих небольшими коэффициентами усиления и линейных в различных диапазонах. В данной работе использован каскодный усилитель (рис. 2) с параллельно-последовательным питанием, который позволяет наиболее просто получить достаточно большой коэффициент усиления с одновременным расширением полосы усиливаемых частот /3,4,5/.

Ниже приведены основные характеристики примененных усилителей.

Линейный диапазон входных импульсов	Коэф. усил.	R ₁ ком.	R ₂ ком.	R _k ком.	R _{δ₁} ком.	R _{δ₂} ком.
У I 0-80 мв	3-45	1,8	2,2	1,2	5,1	5,5
У II 0-180 мв	3-27	1,8	2,2	1,2	5,1	20
У III 0-0,5 в	3-10	7,5	2,2	0,47	5,1	20
У IV 0-2 в	3-5	7,5	2,4	1,2	2,0	20

Схема усилителя состоит из собственно усилителя на транзисторах Т2 и Т3 (П411А), входного и выходного эмиттерных повторителей на триодах Т1, Т5 (П403А), Т6 (П502А) и фазоинвертора Т4 (П502А). Сопротивления цепей транзисторов Т2 и Т3 выбираются из условия получения наибольшего коэффициента усиления при выбранном диапазоне входных импульсов. Введение в цепь эмиттера триода Т2 сопротивления обратной связи несколько уменьшает коэффициент усиления, но увеличивает верхнюю граничную частоту усиления.

Фазоинвертор на Т4 и эмиттерные повторители на Т5 и Т6 обеспечивают положительный и отрицательный выход усилителей при работе на низкоомную нагрузку.

Сумматор

Один из распространенных методов линейного суммирования заключается в суммировании токовых импульсов на сопротивлениях с последующим усилением суммарного импульса (рис. 4). При таком суммировании необходимо соблюдать условие $R/\rho \gg \tau$ т.е. суммирование тем точнее, чем лучше выполняется неравенство. Если принять $R/\rho = 10\tau$, то на входе происходит деление сигнала в отношении $R/\tau = 10\rho$. При $\rho = 6-12$ оно уже очень существенно и для милливольтного диапазона входных сигналов (10-300 мв) грозит потерями малых амплитуд. Последующее линейное усиление суммарных импульсов малой амплитуды с достаточно короткими фронтами в присутствии перегружающих импульсов задача сама по себе достаточно сложная. Как правило, метод используется при 2, 3, 4 - канальном суммировании, в небольшом диапазоне входных сигналов и при жестких требованиях к фронтам усиленных импульсов.

Линейное суммирование коротких импульсов менее 0,5 мксек на схемах типа "Росси" применимо в широком диапазоне амплитуд при небольшом числе входов. Многоканальные сумматоры такого типа применяются во многих схемах суммирования больших по амплитуде и длительности импульсов. Действительно, полная выходная емкость

в этом случае пропорциональна числу входов. В транзистированных схемах выходная емкость равна $C_{\text{вых}} = C_M + \sum_{i=2}^n C_{k_i}$,

где C_k - выходная емкость транзистора,
 C_M - емкость монтажа,

и получение коротких времен нарастания и спада при многоканальном суммировании затруднительно. Кроме того невозможно избежать шунтирующего действия входов друг на друга при милливольтном рабочем диапазоне входных сигналов, а, следовательно, трудно получить нужный диапазон линейности.

В сумматорах на распределенных усилителях каждый входной каскад подключен к секции искусственной линии задержки, образованной индуктивностью L и емкостью $C = C_{\text{пар}} + C_{\text{вых}}$ ($C_{\text{вых}}$ - выходная емкость входного каскада). Разделение емкостей входных каскадов позволяет сделать сумматор на большее число входов без существенного увеличения фронтов выходного импульса.

Этот метод представляется наиболее целесообразным для многоканального линейного суммирования и применен в сумматоре на 12 входов, разработанном на полупроводниковых элементах (рис. 3). Секции линии задержки образованы индуктивностью и емкостями C . Так как время задержки одной такой секции и линии в целом невелико, то для параметров входных импульсов, указанных ниже, применение компенсирующих линий задержек во входных цепях является необязательным, что значительно упрощает схему.

Сумматор рассчитан на работу с импульсами длительностью 0,1-0,5 мксек. Время нарастания выходного импульса равно 50 нсек. Диапазон линейности 10 мВ - 2 В по одному входу при коэффициенте передачи, близком к 1. В схеме использованы транзисторы типа П403А.

Схема пропускания

Линейная схема пропускания (рис. 5) уменьшает количество поступающих на анализ случайных импульсов, пропуская без искажения исследуемый спектр.

Известные из литературы ^{/5,8/} схемы пропускания не удовлетворяют требованиям отсутствия пьедестала и большого диапазона линейно-пропускаемых импульсов. Для уменьшения пьедестала в таких схемах нужно применять дополнительные устройства, что сильно усложняет схему.

Описанная в работе ^{/7/} мостиковая схема пропускания при нулевом пьедестале и

линейности до 5 В обладает большим мертвым временем. Такие схемы могут работать от импульсов, приходящих с частотой не более 25 кГц.

В разработанной схеме использован тот же мостиковый метод компенсации пьедестала, но для формирования "ворот" применен триггер на туннельном диоде и транзисторе. Таким образом, рабочая частота схемы увеличена до $5 \cdot 10^5$ 1/сек. Ширина "ворот" определяется величиной задержки ЛЗ. в цепи эмиттер-туннельный диод. Импульсы с трансформатора Тр поступают на диодную схему (диоды $D_{11} - D_{16}$), открывая "ворота" линейного тракта. Из-за несимметрии мостовой схемы возможно образование пьедестала и коротких выбросов на краях "ворот". Изменением сопротивления потенциометра R можно добиться полного устранения пьедестала, а интегрирующая цепочка $R_1 C_1$ уменьшает краевые выбросы. Линейность схемы пропускания в диапазоне 0,01-9 В не хуже 1%. Все транзисторы типа П403А.

Схема совпадений

Как уже указывалось ранее, для уменьшения шумов применена схема совпадения (рис. 6) с разрешающим временем $3 \cdot 10^{-8}$ сек. Так как минимальная амплитуда сигналов с фотоумножителей мала, то необходимо было бы применить схему с большой чувствительностью. С другой стороны, желательно иметь большой коэффициент отбора

$$\bar{R} = U_{\text{макс I}} / U_{\text{мин II}}$$

где $U_{\text{макс I}}$ - максимальная амплитуда на входе одного из каналов, при которой срабатывает схема совпадений.

$U_{\text{мин II}}$ - минимальная амплитуда на входе обоих каналов, при котором срабатывает схема совпадений.

Применение перед схемой совпадений усилителей и ограничение максимальных выходных сигналов ФЭУ позволяет значительно снизить требования к самой схеме и упростить ее решение. В качестве элемента отбора с/с применена широко известная диодная схема с предварительной формировкой сигналов по длительности в/ч кабелем. Импульсы на элемент отбора поступают от усилителей, собранных на двух транзисторах типа П411А - Т1, Т2 (Т3, Т4). Дискриминирующим элементом служит одновибратор на транзисторах Т5, Т6, Т7 ^{/8/}. (Транзисторы типа П403А).

Выходной импульс отрицательной полярности имеет амплитуду 2,5 В и длительность 0,6 мксек.

Схема "ИЛИ"

Схема (рис. 7) представляет собой сочетание обычной диодной схемы ИЛИ, формирующего каскада на триоде Т1 и туннельном диоде ТД, фазоинвертора и эмиттерного повторителя на транзисторах Т2, Т3. Такое построение позволяет использовать основное преимущество диодной схемы и свести к минимуму ее недостатки: диоды обеспечивают независимость входов схемы друг от друга, и в то же время суммарная емкость переходов диодов не определяет времена нарастания и спада импульса на выходе. Последние зависят, главным образом, от свойств формирующего каскада.

Схема ИЛИ работает от стандартных выходных сигналов схемы совпадений. Длительность выходного импульса повторяет длительность входного, а мертвое время равно 0,5 мксек. Используются триоды типа П403А и туннельный диод.

Дискриминатор

Для амплитудного отбора на выходе используется простой транзистированный дифференциальный дискриминатор (рис. 8), обладающий в то же время вполне удовлетворительными характеристиками. Каждый из каналов состоит из диодного дискриминатора и чувствительного одновибратора с эмиттерной связью^{/8/}.

Пороговое устройство включает в себя диод (Д1 и Д2 типа Д10) и ступенчатый делитель, который позволяет подавать напряжение смещения на диод от 0,1 до 10 в. Область дискриминации 0,2–10 в. Входное сопротивление дискриминатора для открытого дискриминирующего диода – 500 ом, что требует от предшествующих ему устройств достаточно мощного выхода.

Одновибраторы выполнены на триодах Т1, Т2, Т3, Т4 и Т6, Т7 (оконечный формирующий каскад). Д5, Д6, Д8 – ускоряющие диоды. Линейность дискриминационной характеристики не хуже 2%. Длительность импульса с выхода одновибратора равна 0,8 мксек для времязадающей емкости С = 75 пф. При этом мертвое время одновибратора, определяющее мертвое время всего дискриминатора, равно 3 мксек. Температурные изменения порога определяются только диодным пороговым устройством.

Импульсы положительной полярности с плеч канальных одновибраторов подаются на схему антисовпадений (триод Т5), сигнал нижнего порога подается с задержкой 0,25 мксек. Выходной импульс схемы имеет амплитуду – 2,5 в и длительность 0,8 мксек. Все транзисторы типа П403А.

Экспериментальные результаты

Проверка аппарата проведена с контейнером ϕ 45 мм и $h = 30$ мм на двух фотоумножителях типа ФЭУ-13. Шумовые импульсы от ФЭУ исключались быстрой схемой совпадений. Чувствительность непосредственно схемы совпадений 100 мв. Оптимальное разрешающее время, измеренное на γ -источнике методом задержанных совпадений, составляет 30 нсек.

На рис. 9 показаны кривые распределения импульсов от нейтронного источника, находящегося в парафине, снятые без Cd и с Cd, а также разность этих распределений, дающая спектр импульсов от тепловых нейтронов. Рабочее окно дискриминатора было выбрано 2,8 в при нижнем пороге 0,4 в. С этим окном была снята зависимость кадмиевой разности от величины усиления усилителей У1 (рис. 10). Вид этой зависимости позволяет сделать заключение, что эффективность регистрации α -частиц близка к 100%. Отсюда можно выбрать оптимальный коэффициент усиления усилителей У1 $K_{\text{опт}} = \frac{1}{2} K_{\text{макс}}$. С нейтронным источником интенсивностью 10^7 1/сек было проверено изменение положения максимума пика α -частиц от общей загрузки схемы. Пик не менял положения до значения кадмиевой разности $3,4 \cdot 10^3$ 1/сек (при полной загрузке с/с до $1 \cdot 10^4$ 1/сек). Большую интенсивность счета с имеющимся нейтронным источником в нашей геометрии получить не удалось. Исследовалось также влияние на кадмиевую разность дополнительной подсветки детектора γ -источником Zn⁶⁵. Дополнительная загрузка детектора γ -источником, которая составляла несколько десятков процентов от полной загрузки схемы совпадений, не изменяет кадмиевую разность в окне дискриминатора, если полный счет схемы совпадений не превышает $1 \cdot 10^4$ имп/сек.

На рис. 11 приведены загрузочные характеристики, снятые на γ -лучах Cs¹³⁷ для всего детектора и при отключенных схемах совпадения и пропускания. В качестве пересчетной схемы использовалась полупроводниковая ПС с разрешающим временем 0,25 мксек, включенная перед дискриминатором. Видно, что повторители и усилители выдерживают загрузку, по крайней мере, до $9 \cdot 10^4$ 1/сек. Вся система допускает загрузку до $1,5 \cdot 10^4$ 1/сек. Это различие объясняется тем, что выходной каскад с/с имеет мертвое время ~ 2 мксек. Стабильность работы детектора контролировалась по изменению кадмиевой разности в окне дискриминатора. За 4 дня работы детектора отклонение каждого отдельного измерения от среднего значения разности за все дни не превышало 2,5% и лежит в пределах собственной статистической ошибки, которая составляет 2,7%. Статистическая точность среднего значения 0,4%.

В заключение авторы выражают благодарность Ю.С. Язвickому за постоянный интерес к работе и обсуждение результатов и Яо Чи-чуаню за проведение некоторых физических измерений.

Л и т е р а т у р а

1. И.Визи, Г.П.Жуков, Г.И.Забиякин и др. "Жидкостные сцинтилляционные детекторы для регистрации нейтронов", т. 1, 1962.
2. О.М.Безменов и др. ПТЭ, 6, 56, 1960.
3. Ю.В.Завражнев, Ю.Г.Крюков. Электросвязь, 10, 40, 1961.
4. T.R.James. El. Ing., 32, 383, 44 (1960).
5. Л.С.Горя, Б.Н.Хазанов. "Транзисторы в радиометрической аппаратуре", Госатомиздат, 1961.
6. Л.С.Горя, И.С.Крашенинников, Б.Н.Хазанов. "Электроника в спектроскопии ядерных измерений", 1963. Госатомиздат.
7. P.R.Chagnon. RSI 32, 1, 68 (1961).
8. А.А.Писаревский, Л.Д.Сорин, Ю.Е.Селениянов. ПТЭ, 4, 138, 1960.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 февраля 1965 г.

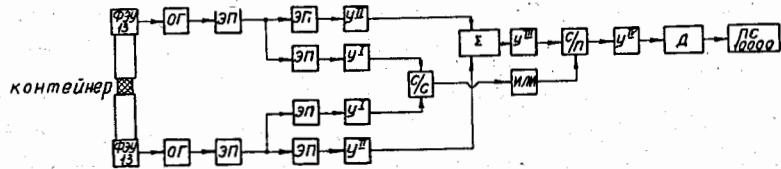


Рис. 1. Блок-схема детектора.
ОГ - ограничитель, ЭП - эмиттерный повторитель,
У - усилитель, с/с - схема совпадений, Σ - сумматор,
с/п - схема пропускания, Д - одноканальный дискримина-
тор, ПС - пересчетный прибор.

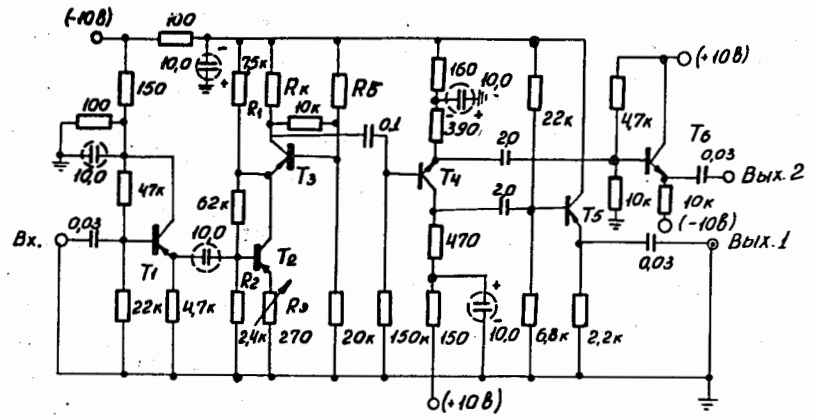


Рис. 2. Импульсный усилитель.

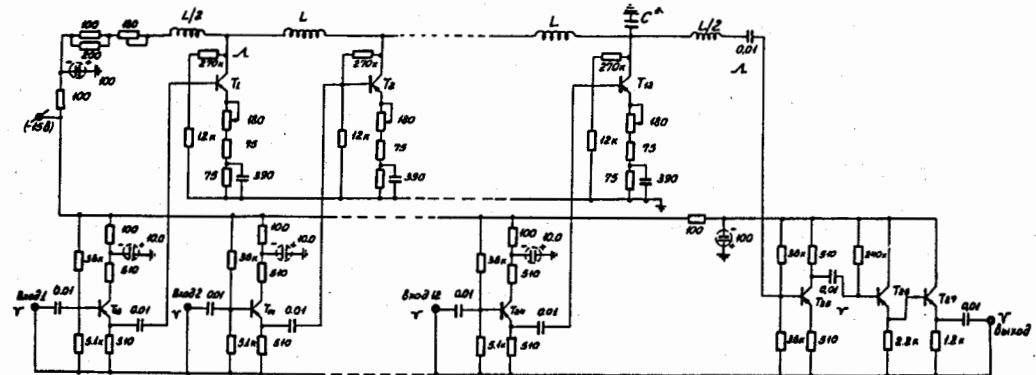


Рис. 3. Линейный сумматор.

n
входов

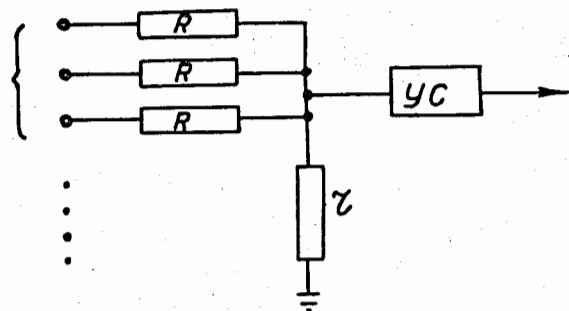


Рис. 4. Схема суммирования на сопротивлениях.

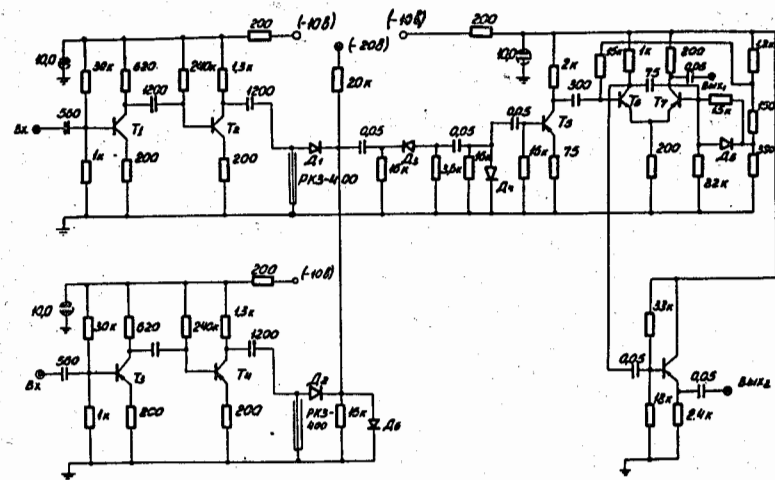


Рис. 6. Схема совпадений.

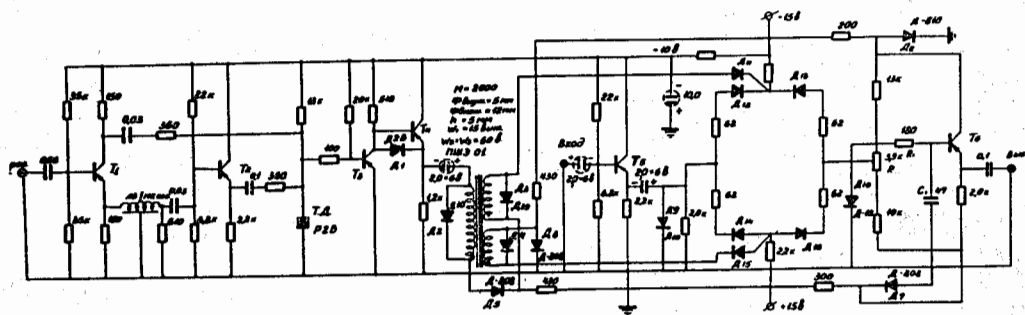


Рис. 5. Схема пропуска.

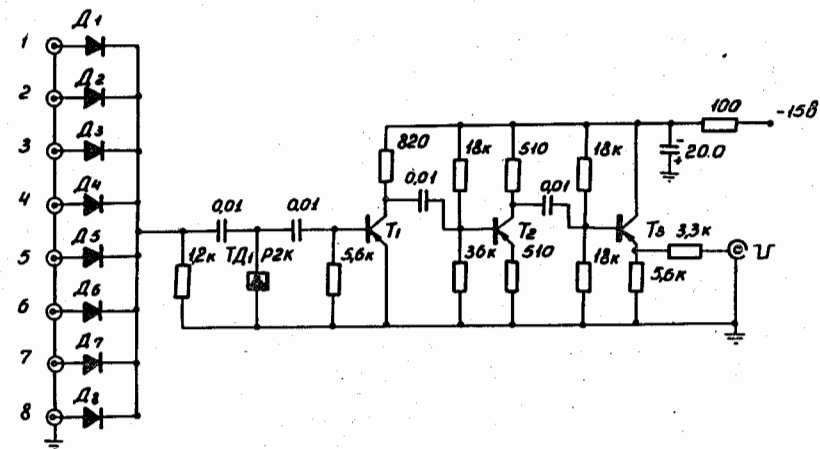


Рис. 7. Схема "ИЛИ".

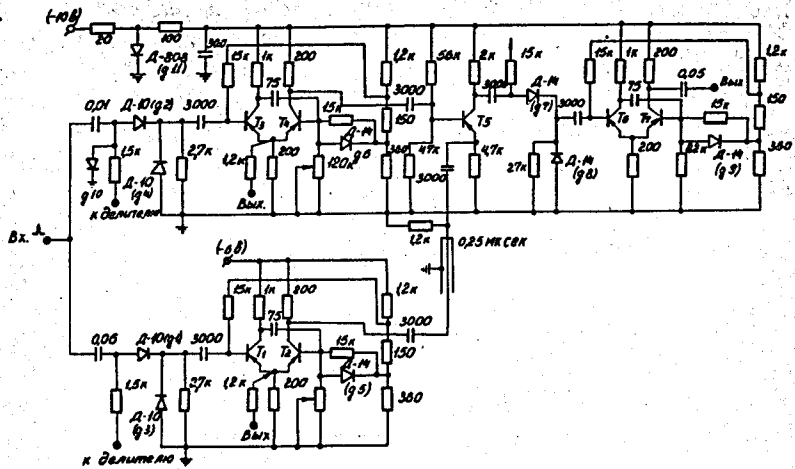


Рис. 8. Одноканальный дискриминатор.

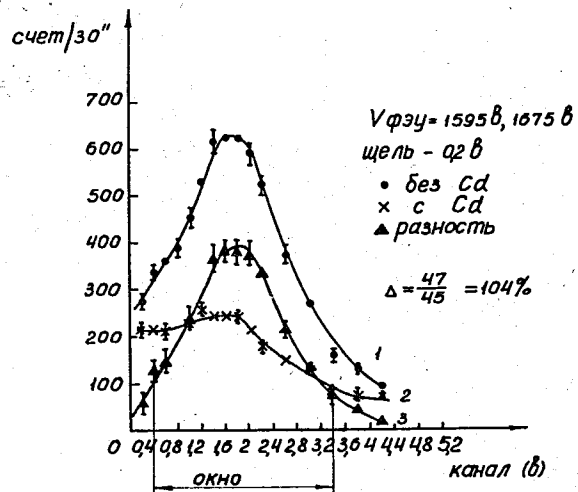


Рис. 9. Амплитудное распределение импульсов от Cd источника, помещенного в парафин.
 1 - спектр импульсов $P_0 + \text{Ве}$ без кадмия,
 2 - спектр импульсов $P_0 + \text{Ве}$ с кадмиевым фильтром,
 3 - спектр разности без кадмия - с кадмием.

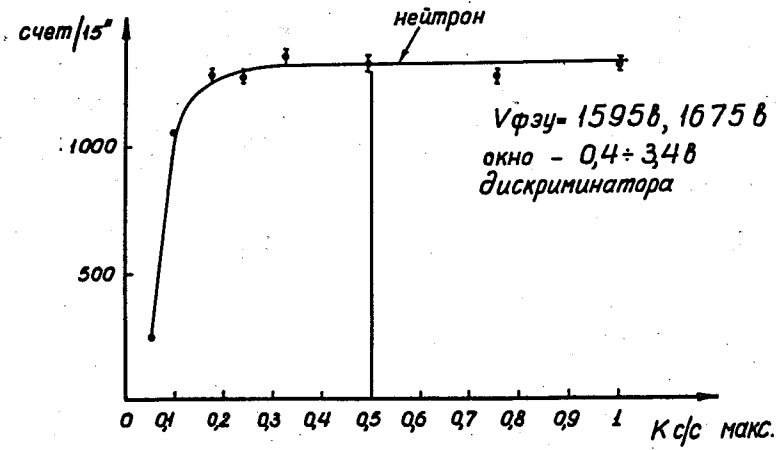


Рис. 10. Зависимость счета кадмиевой разности в окне дискриминатора от коэффициента усиления U

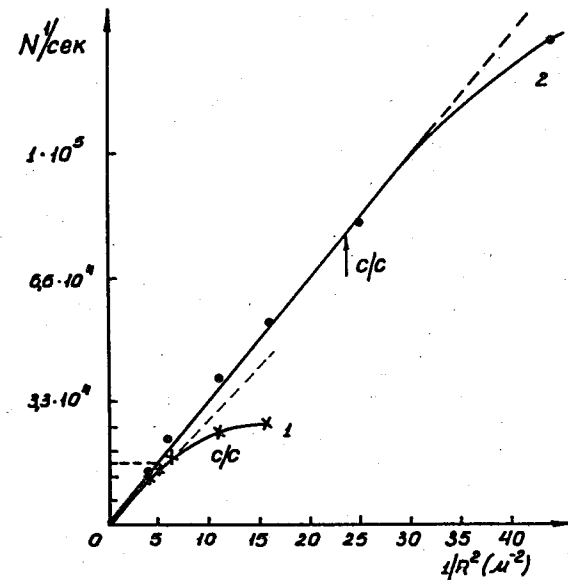


Рис. 11. Загрузочная характеристика детектора.
 1) Зависимость счета на выходе дискриминатора от положения источника.
 2) Зависимость счета на выходе U_{IV} от положения источника при отключенных схемах совпадений и пропускания.

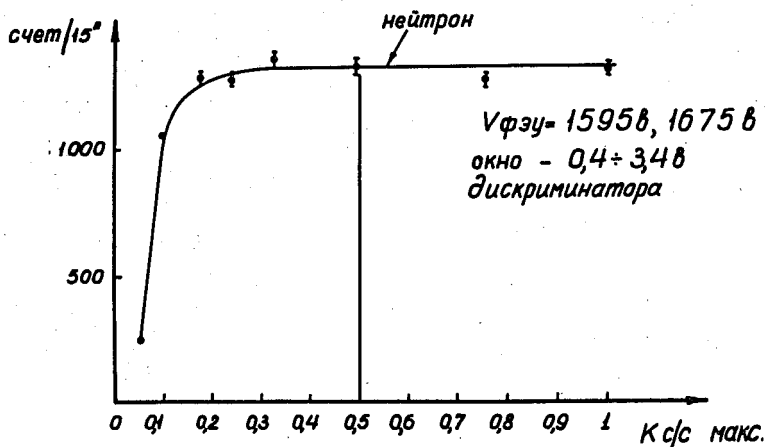


Рис. 10. Зависимость счета кадмиевой разности в окне дискриминатора от коэффициента усиления У1

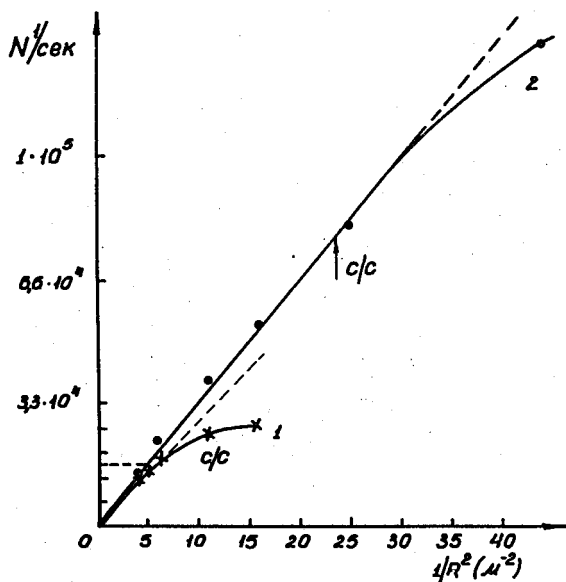


Рис. 11. Загрузочная характеристика детектора.

- 1) Зависимость счета на выходе дискриминатора от положения источника.
- 2) Зависимость счета на выходе У IV от положения источника при отключенных схемах совпадений и пропускания.