

1558 1558



Экз. чит. зала

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

И.А. Голутвин, Ю.В. Заневский

1558

СОВРЕМЕННЫЕ СХЕМЫ СОВПАДЕНИЙ
НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА,
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УСКОРИТЕЛЯХ

(О б з о р)

Дубна 1964

И.А. Голутвин, Ю.В. Заневский

1558

СОВРЕМЕННЫЕ СХЕМЫ СОВПАДЕНИЙ
НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА,
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УСКОРИТЕЛЯХ

(Обзор)

Дубна 1964

1. Введение

Основными активными элементами схем совпадений наносекундного диапазона, применяемых в физических лабораториях, в настоящее время почти исключительно являются транзисторы и туннельные диоды.

Применение транзисторов с $f_a = 200 \div 1000$ МГц и туннельных диодов с $\frac{C}{I_p} < 1$ пф/ма позволяет почти полностью реализовать те возможности, которые содержатся в сигналах со сцинтилляционных или черенковских счетчиков.

Уже несколько лет в экспериментах используются схемы совпадений, имеющие разрешающие времена порядка наносекунды и позволяющие осуществлять счет при средней частоте следования импульсов, близкой к 10^8 имп./сек.

С другой стороны, применение в ядерной электронике полупроводниковых приборов в значительной степени облегчило задачу стандартизации и унификации аппаратуры. Ячеечное или модульное выполнение схем позволяет быстро и легко собирать установки, необходимые для проведения тех или иных физических экспериментов.

Имеется очень большое количество статей, в которых дается описание схем совпадений, выполненных на полупроводниковых приборах, применяемых в различных физических лабораториях.

Вначале схемы совпадений в основном строились по принципу хорошо известных схем, выполненных на вакуумных лампах. После ограничения по амплитуде и формирования по длительности сигналы с фотоумножителей подавались на входы схем совпадений, выполненных обычно по типу схем Гарвина или Росси. Подобные системы описаны в разделе II.

Применение туннельных диодов позволило разработать дискриминаторы, имеющие настолько малый временной разброс и высокое быстродействие, что появилась возможность устанавливать их непосредственно на выходе фотоумножителя. Конструкция всех последующих схем при этом максимально упростилась, так как они стали работать от стандартных импульсов. Это привело также во многих экспериментах к значительному снижению числа случайных совпадений, что, в конечном счете, также позволило упростить аппаратуру.

Схемы этого типа описаны в разделе III.

При необходимости увеличения чувствительности схем совпадений до максималь-

ной, соответствующей одному фотоэлектрону, применение столь низкого порога приводит к тому, что момент пролета частицы через детектор отсчитывается от момента сбора на аноде ФЭУ заряда, соответствующего вылету первых фотоэлектронов из фотокатода, который может сильно флюктуировать.

Разрешающее время в этом случае, при хорошей эффективности счета, не может быть сделано слишком малым.

В разделе V описаны схемы, основанные на методе регистрации момента пересечения нуля продифференцированным импульсом с фотоумножителем. В этом случае используется временная информация, содержащаяся почти во всем импульсе, а не только в первых фотоэлектронах.

Этот метод, по-видимому, является в настоящее время оптимальным для схем с чувствительностью, соответствующей нескольким фотоэлектронам.

II. Схемы совпадений, не содержащие дискриминатора на входе

В этот раздел входят системы, выполненные по схеме, показанной на рис. 1. Они строятся в основном по принципу известных схем, выполненных на вакуумных лампах.

В^{1/} описана простая схема совпадений на диодах, которая имеет разрешающее время 3 нсек и работает от импульсов с амплитудой более 2 в/рис. 2/.

Ограничение импульсов по амплитуде осуществляется диодами D_1 и D_2 , а формирование по длительности — трансформаторами Tr1 и Tr2. Трансформаторы изготовлены на ферритовых трубках. Индуктивности обмоток равны примерно 0,1 мкГн.

Время восстановления ограничительных диодов в этой схеме зависит от амплитуды входных импульсов, что при больших нагрузках будет приводить к просчетам полезных сигналов.

На рис. 3 а/ приведена кривая задержанных совпадений, полученная от генератора, вырабатывающего импульсы с фронтами ~ 7 нсек; на рис. 3б/ приведена кривая задержанных совпадений, полученная от сигналов с фотоумножителей.

Схема позволяет при необходимости увеличивать число входов. Таким же образом можно строить каналы антисовпадений. В этом случае для получения хорошей эффективности следует несколько увеличить индуктивность обмоток трансформатора.

В^{2/} описаны некоторые элементы, применяемые в схемах совпадений, выполненных на транзисторах 2 N 501 и 2 N 1500. Мертвое время этих элементов меньше 100 нсек. Разрешающее время такой схемы совпадений порядка 10 нсек. Чувствительность по входу ~ 0,3 вольта.

На рис. 4 показана схема входного ограничителя. Ограничение производится на диоде, некоторое ограничение происходит также во втором каскаде двухтранзисторного усилителя.

Время нарастания выходного импульса с такого ограничителя определяется пологостью пропускания усилителя, которая невелика при использовании транзисторов в схеме с общим эмиттером и составляет в данном случае 5 нсек.

Импульсы с ограничителей подаются на схему совпадений, приведенную на рис. 5. Эта схема легко может быть переделана в многократную.

После схемы совпадений ставится дискриминатор ждущего типа, схема которого изображена на рис. 6. Дискриминатор срабатывает от 0,3-вольтового 5-наносекундного импульса. Мертвое время немного более 50 нсек.

Антисовпадения можно получить с помощью схемы, показанной на рис. 7. Разрешающее время антисовпадений порядка 70 нсек.

В работе /4/ описана схема совпадений с разрешающим временем порядка нескольких наносекунд. Эта схема изображена на рис. 8. В отличие от предыдущей работы здесь используется ограничение на транзисторе, включенном по схеме с общей базой. Это дает меньшее время нарастания выходного импульса и соответственно более короткие разрешающие времена. Однако в этом случае не происходит усиления по току, и чувствительность схемы хуже. Если в предыдущей схеме чувствительность была 0,3 в, то здесь она равна примерно 1 в.

На рис. 9 показана подробная схема входной цепи. На входе стоит эмиттерный повторитель на транзисторе Т1, который позволяет отсекал сигналы, меньшие порога отпираания транзистора. Этот входной порог /отсечка/ регулируется смещением.

Диод в цепи базы транзистора Т1 предохраняет схему от положительных выбросов. Диод в цепи эмиттера защищает от чрезмерно больших отрицательных напряжений.

На рис. 10 показана зависимость времени нарастания импульса на выходе ограничителя от амплитуды импульса на входе при подаче на вход схемы импульсов от генератора с фронтом меньше 1 нсек.

Из графика видно, что время нарастания примерно 2 нсек. Расчет дает такое же значение. Время нарастания /10% ÷ 90%/
$$t_H = 2,5(r_a^2 + r_c^2)^{1/2}$$
, где
 $r_a = \frac{1}{2\pi f_a}$, а f_a - граничная частота усиления по току транзистора, r_c - постоянная времени коллекторной цепи.

Для транзисторов *Philco 2N501* $r_a \approx 0,4$ нсек. Постоянная коллекторной цепи $r_c = 15$ пф x 25 ом $\approx 0,4$ нсек. Ограниченные сигналы формируются на

закороченной формирующей линии. Разрешающее время схемы можно менять путем изменения длины формирующей линии. Отсечка от несовпадающих импульсов осуществляется диодом. С помощью сменной ячейки регулируется длительность выходного импульса.

В/10/ дается описание схемы многократных совпадений и антисовпадений.

Схема изображена на рис. 11. В качестве формирующего каскада применен ограничитель, аналогичный изображенному на рис. 9. Выделяющим элементом является мост, на входы которого поступают импульсы с ограничителей.

С помощью этой схемы удалось получить разрешающее время порядка двух наносекунд.

Чувствительность схемы порядка нескольких вольт. На рис. 12 приведены кривые временного разрешения, измеренные в пучке π^+ -мезонов с энергией 70 Мэв с помощью фотоумножителей 56 АУР.

III. Схемы совпадений, имеющие на входе дискриминатор

В/31/ дан обзор схем быстрых интегральных дискриминаторов, выполненных на электронных лампах, транзисторах и туннельных диодах. Дается определение "идеального" интегрального дискриминатора, т.е. схемы, переходная характеристика которой /зависимость $U_{\text{вых}}$ от $U_{\text{вх}}$ / представляет собой ступенчатую функцию. Другими словами, выходной сигнал равен нулю, если сигнал на входе меньше определенной величины V_0 ; и выходной сигнал равен E_0 , если входной превышает V_0 . Необходимо предъявлять два определенных требования к дискриминатору: одно относится к "статистической точности" дискриминации, т.е. порог должен быть очень резким; второе относится к "скорости" прибора, т.е. быстрому восстановлению схемы при поступлении на вход импульсов с большой амплитудой. В обычных схемах эти два требования были несовместимы.

Кроме того, "идеальный" дискриминатор должен надежно работать независимо от формы входных импульсов. Большинство дискриминаторов оценивается следующими критериями:

- 1/ наличие четкого порога;
- 2/ пороговый дрейф, включающий компоненты систематическую /например, температурную/ и случайную /например, шумы/;
- 3/ мертвое время, т.е. время восстановления схемы после срабатывания;
- 4/ зависимость работы от длительности входных импульсов;
- 5/ максимальная частота повторения /в связи с тем, что в схемах существуют элементы, накапливающие заряд/;

6/ изменение задержки выходного импульса в зависимости от величины превышения порога входным импульсом;

7/ способность к перегрузкам, т.е. восстановление схемы после поступления на вход импульса, во много раз превышающего порог по амплитуде.

Применение туннельных диодов позволяет создать схемы дискриминаторов, близкие к "идеальным". В связи с этим появилась возможность использования дискриминаторов в цепях, предшествующих совпадениям.

В^{11/} дается описание схемы, в которой в качестве входного дискриминатора применен туннельный диод. Основные элементы схемы совпадений изображены на рис. 13а/. Туннельные диоды ТД₁ и ТД₂ - германиевые, типа 1№ 2939. Их вольт-амперная характеристика приводится на рис. 13б/. Сопротивление R и напряжение питания V выбираются так, чтобы нагрузочная линия для каждого туннельного диода являлась прямой линией, проходящей через точку А.

Если на один вход, например, на Вх₁, поступает токовый импульс ~ 1 ма, то диод ТД₁ переходит в состояние, соответствующее точке В, а ток через сопротивление R останется почти неизменным. Сигнал на выходе, равный $V_B - V_A$, будет составлять при этом всего 0,01 в.

Если через оба туннельных диода будет протекать ток более 1 ма, они оба перейдут в состояние, соответствующее точке С. В таком случае на выходе появится сигнал, равный $V_C - V_A = 0,5$ в. Разрешающее время схемы равно в идеальном случае длительности импульсов, поступающих на вход. Следовательно, для уменьшения разрешающего времени входные импульсы должны быть сделаны возможно более короткими.

Однако укорочение входных импульсов приводит к уменьшению амплитуды выходного сигнала при совпадении /в то время как амплитуды выходного сигнала, вызванного "пролезанием" несовпадающих импульсов, почти не меняются/. Это происходит из-за влияния распределенной емкости выходной цепи.

На разрешающее время влияет также то, что обратный переход туннельного диода происходит лишь через несколько наносекунд после окончания входного импульса. Этот эффект может быть устранен путем переброса туннельного диода в прежнее состояние током обратного знака. Такой ток обязательно возникает при использовании для ограничения длительности входного импульса закороченной формирующей линии.

Полная схема приведена на рис. 14.

Выходной сигнал со схемы совпадений подается на эмиттерный повторитель, причем смещение на базе транзистора может изменяться от 0 до -0,6в. Это

позволяет регулировать порог дискриминации выходных сигналов в пределах от 0 до 0,2 в.

На рис. 15 приводятся кривые задержанных совпадений, когда с помощью двух фотоумножителей типа 8810А с пластическими сцинтилляторами толщиной 13мм регистрировались минимально ионизирующие частицы. Стригательные импульсы с анодов ФЭУ формировались при помощи отрезков кабеля длиной 30 см.

Для выяснения предельных возможностей данной схемы были сняты кривые задержанных совпадений при подаче на вход треугольных импульсов длительностью 0,3 нсек от импульсного генератора. Результаты приведены на рис. 16.

Основной недостаток этой схемы заключается в следующем. Для того, чтобы при значительном превышении входным сигналом порога выходной сигнал схемы мало менялся, сопротивление R_1 должно выбираться достаточно большим. Чувствительность схемы определяется положением рабочей точки и не может быть сделана большой, т.к. иначе туннельный диод перейдет в триггерный режим. В совокупности это приводит к тому, что в случае большого амплитудного разброса входных сигналов схема имеет низкую чувствительность.

В случае применения в этой схеме диодов из GaAs чувствительность схемы понижается еще в 2 раза.

В^{/12/} описана схема совпадений, в которой в качестве дискриминаторов применены туннельные диоды, работающие в таком же режиме, что и в^{/11/}. Принципиальная схема показана на рис. 17. Входной дискриминатор построен на туннельном диоде ТД₁, смещенном током эмиттерного повторителя Т₁, который можно регулировать с помощью потенциометра в цепи базы этого триода.

Вследствие небольшого амплитудного разброса сигнал с ТД₁ ограничивается на транзисторе Т₃, в эмиттер которого включен диод, работающий на запаривание. Далее сигнал усиливается на транзисторе Т₄. На выходе этого триода получается стандартный по амплитуде сигнал, который формируется по длительности короткозамкнутым отрезком кабеля.

Импульсы со всех входных дискриминаторов суммируются через сопротивление 2,2 ком и подаются на дискриминатор совпадений, собранный на туннельном диоде ТД₂, который в зависимости от смещения может переключаться от 2,3 или 4 импульсов.

Антисовпадения получаются при соответствующем переключении обмоток трансформатора Тр₁.

На рис. 18 приведена кривая задержанных совпадений, полученная при работе

с космическими лучами от фотоумножителей RCA 6810 А с пластическими скintилляторами $28 \times 10 \times 1$ см³.

Как уже указывалось, эти схемы имеют низкую чувствительность. Кроме того, разрешающее время определяется длительностью входного сигнала. Поэтому для получения малых разрешающих времен требуется формировать импульс на отрезке кабеля.

В ряде работ [13-17, 21-23, 25, 29] и др. в качестве дискриминатора входных импульсов применен одновибратор на туннельном диоде. Такой дискриминатор свободен от указанных выше недостатков.

Упрощенная схема одновибратора приведена на рис. 19а/. Амплитуда и длительность выходного импульса могут быть определены из рис. 19б/. С помощью постоянного смещения V_0 рабочая точка устанавливается в точку a . Для того, чтобы схема имела одно устойчивое состояние, сопротивление R_0 должно быть меньше отрицательного сопротивления диода R .

Сопротивление R_1 должно быть достаточно велико, чтобы обеспечить возможно меньший наклон нагрузочной прямой для входных импульсов. С другой стороны, R_1 очень большими делать нельзя, чтобы избежать искажения фронта входного импульса.

Время нарастания и спада выходного импульса определяется временем переброса туннельного диода из b в c и из d в e соответственно. Для современных туннельных диодов эти времена очень малы.

Длительность импульса определяется величиной $\tau = \frac{L}{R_0 + \frac{R_1 R_{ed}}{R_1 + R_{ed}}}$, где

R_{ed} - сопротивление, соответствующее среднему наклону характеристики диода между точками c и d . Время восстановления схемы определяется выбросом обратной полярности, который соответствует переходу туннельного диода из e в a . При этом напряжение уменьшается по экспоненте с постоянной времени:

$$T = \frac{L}{R_0 + \frac{R_1 R_{ea}}{R_1 + R_{ea}}}$$

R_{ea} - сопротивление, соответствующее среднему наклону характеристики между e и a .

Таким образом, выбирая L достаточно малой, можно получить небольшое время восстановления схемы.

На рис. 20 приведена зависимость τ и T от L при $R_0 = 13$ ом и R_1 достаточно большим для туннельных диодов из GaAs с $I_p = 10$ ма. Кривые соответствуют схеме, изображенной на рис. 21. Амплитуда выходного импульса одновибратора также зависит от индуктивности. Эта зависимость для туннельного диода из GaAs с $I_p = 10$ /при тех же параметрах схемы/ показана на рис. 22.

Как видно из графиков, при $R_0 = 13$ ом для туннельного диода из GaAs с $I_p = 10$ ма отношение $T/\tau = 14$ в широком диапазоне значений L . Это является определенным недостатком схемы, т.к. длительность импульса не должна быть сделана слишком малой.

Время восстановления схемы может быть существенно уменьшено путем применения режима схемы с нелинейной нагрузочной кривой.

Если в схеме, изображенной на рис. 21, сопротивление 13 ом заменить быстрым диодом с малым прямым сопротивлением, то получится нагрузочная кривая /см. рис. 23/.

Напряжение на индуктивности V_L во время восстановления можно определить как расстояние между характеристикой туннельного диода и нагрузочной кривой.

Большие значения V_L , точнее, большее значение $L \frac{di}{dt}$, обеспечивает быстрое возвращение в исходную точку.

Восстановление в случае с сопротивлением происходит по экспоненте, с диодом - почти по прямой. В этом случае время 100% восстановления может быть четко определено.

Замечено, что в случае использования нелинейной нагрузочной кривой при малых L /меньше 0,5 мкГн/ схему трудно установить в точку высокой чувствительности. Поэтому параллельно с диодом ставят сопротивление 75 ом.

На рис. 24 приведены результаты измерений для туннельных диодов из GaAs типа ТД-173 RCA, для которых $I < \frac{I_p}{C} < 3$. Видно, что $\frac{T}{r}$ может быть сделано порядка 3.

В случае германиевых туннельных диодов в качестве нелинейной нагрузки могут быть применены обращенные диоды.

Между моментом прихода импульса на вход одновибратора и моментом срабатывания последнего имеется запаздывание, которое зависит от величины превышения порога, так что при изменении амплитуды входного импульса в 10 раз; кроме области вблизи порога, запаздывание изменяется примерно на 1 нсек. Если же амплитуда изменяется от порогового значения до величины, превышающей его на 5%, то разница в задержке будет около 2 нсек.

Эти данные относятся к идеальным прямоугольным импульсам и не включают в себя то изменение времени запаздывания, которое зависит от формы входного импульса.

В^{13/} описан дискриминатор, в котором использованы одновибраторы, аналогичные только что описанным, выполненные на германиевых туннельных диодах

1N 3123 RCA с $I_p = 10$ ма. Схема дискриминатора приведена на рис. 25, она работает от импульсов $\approx 0,1$ в.

При этом на выходе первого туннельного диода получается импульс, приблизительно равный 0,4 в, он возрастает примерно до 0,8 в для входных сигналов,

в 10 раз больших. Для устранения этого явления последовательно с первым применен второй одновибратор.

На рис. 26 показана зависимость амплитуды выходного импульса от длительности входного импульса $/a/$ и от длительности его фронта $/б/$.

Были проведены испытания схемы на работу от сдвоенных импульсов. На рис. 27 изображена зависимость амплитуды второго импульса от расстояния между импульсами.

Также подавалась пачка импульсов, и измерялось смещение порога от числа импульсов. Эта зависимость показана на рис. 28.

В $/15/$ описана быстрая схема совпадений с входными дискриминаторами, действующими по аналогичному принципу на германиевых туннельных диодах $2N241 RCA$. Разрешающее время - 5 нсек, порог схемы устанавливается от нескольких десятков мв до 1 в. Недостатком этой схемы является большое мертвое время каналов.

В $/21/$ показано, как на основе всего лишь одного весьма простого элемента, одновибратора на туннельном диоде, можно построить чрезвычайно сложные логические схемы, удовлетворяющие многим требованиям счета в ядерной физике и физике высоких энергий. При правильном изготовлении эта схема вполне надежна, что очень важно при использовании большого числа цепей.

В качестве основного элемента берется одновибратор на туннельном диоде из $GaAs$ типа 1№3118, схема которого приведена на рис. 21.

Применение туннельного диода из $GaAs$ позволяет легко, с помощью обычного быстродействующего германиевого диода, осуществлять сочленение элементов.

Схемы разработаны в виде модулей. На рис. 29 показан модуль дискриминатора, а на рис. 30 - модуль совпадений. Модуль совпадений управляется любой комбинацией от одного до пяти дискриминаторных модулей. Каскад дискриминатора задает нижний порог, который можно изменять смещением рабочей точки с помощью потенциометра $/500 \text{ ом}/$, который выведен на лицевую панель. Минимальное напряжение входного сигнала, при котором схема может устойчиво работать, составляет 50 мв /на 50-омном входе трансформатора/.

Наличие трансформатора дает возможность запуска схемы импульсами любой полярности.

С помощью потенциометра можно устанавливать величину порога до 1,5 в.

Импульс на выходе первого одновибратора зависит от процента перенапряжения на входе. Тангенс угла наклона кривой, характеризующей зависимость амплитуды выходного импульса от амплитуды входного, равен $1/40$ при небольшом превышении порога и возрастает до $1/20$ при больших перенапряжениях. Поэтому импульс пода-

ется на другой такой же каскад для стабилизации уровня. После этого каскада тангенс угла наклона меньше одной тысячной, так что выходные импульсы можно подавать на трех- или четырехкратную схему совпадений суммирующего типа.

Схема испытывалась 50-вольтными входными импульсами, и при этом "пролезания" одиночных импульсов не было.

Импульс с дискриминатора подается также на каскад "разветвления". Этот каскад передает по 50-омному кабелю импульс с амплитудой около 300 мв, который может использоваться другой схемой совпадений или быстрой счетной схемой.

Конденсаторы связи не используются. Это возможно благодаря тому, что все сопротивления связи велики по сравнению с сопротивлением 13 ом, и поэтому регулировка одного каскада не влияет на рабочую точку другого.

Выходы каскадов стабилизации уровня дискриминаторных модулей соединяются с модулем совпадений посредством коротких несогласованных кабелей. Для запуска первого одновибратора используется простое суммирование импульсов. Выделение одиночных, двойных или тройных совпадений выполняется с помощью десятиоборотного потенциометра на 1 ком.

В схеме антисовпадений используется перемена полярности импульса от дискриминатора и сложение его с импульсом совпадений от буферного каскада. Время антисовпадений определяется индуктивностью каскада стабилизации уровня.

Разрешающее время схемы измерялось с источником Co^{60} , помещенным между двумя пластическими сцинтилляторами кубической формы со стороной 2,5 см, которые просматривались фотоумножителями 58 АРР.

На рис. 31 показаны две кривые для различных смещений в каскаде совпадений. Индуктивности в каскадах стабилизации уровня были по 0,47 мкгн.

Данные на рис. 32 получены при индуктивности в каскадах стабилизации уровня по 0,1 мкгн. Дискриминатор совпадений был настроен так, чтобы получить самую узкую кривую без потерь в счете.

В /23/ дается описание еще одного прибора, построенного на одновибраторе, аналогичном описанному выше - дискриминатора амплитуды импульсов широкого диапазона,

Дискриминатор работает от отрицательных импульсов, амплитуда которых может изменяться от 0,5 в до 10 в, передний фронт - от 0,5 до 20 нсек, а длительность - от 5 до 100 нсек.

Уровень дискриминирования читается в абсолютных единицах на шкалах соответствующих десятиоборотных потенциометров.

Дискриминатор вырабатывает на выходе два импульса: отрицательный, с временем нарастания 3-4 нсек, длительностью 40 нсек и амплитудой 4 в, и положительный, более длинный, с амплитудой 8 в.

На рис. 33а/ приведена блок-схема дискриминатора, а на рис. 33б/ изображена его принципиальная схема.

IV. Описание системы универсальных элементов для использования в физических экспериментах на ускорителях

Sugrnan, Higinbotham и др. /18-20/ разработали сравнительно простые элементы, из которых могут собираться счетные системы с разрешающим временем порядка нескольких наносекунд и скоростью счета до 100 Мгц. Эти элементы представляют собой отдельные сменные модули. Большинство входов и выходов взаимозаменяемы, что дает возможность включать эти модули в различных комбинациях. Благодаря связям по постоянному току, возможно их использование при большой длительности рабочих циклов ускорителя. Все используемые схемы в общем включают в себя:

а/ 50-омный кабель для соединения всех сигнальных каналов;

б/ высокочастотные схемы с общим эмиттером, использующие транзисторы 2№700 или 2№502;

в/ туннельные диоды из германия или арсенида галлия; с пиковыми токами до 20 ма и емкостью ~ 1 пф/ма;

г/ трансформаторы, намотанные по распределенной схеме /4 витка двухнитевой или трехнитевой проволоки на ферритовом сердечнике/.

Основными сменными модулями являются:

а/ ограничители,

б/ быстрые совпадения,

в/ дискриминаторы,

г/ размножители.

а. Ограничители. В этих системах используются ограничители, основанные на эффекте выключения тока в транзисторах с общей базой. В зависимости от требований такие ограничители могут каскадироваться, либо совместно с транзисторами используются микровольтовые диоды /типа 1№23В/. Схемы ограничителей приведены на рис. 34 а/, б/. Через транзисторы в исходном состоянии протекает ток до 10 ма, что при использовании формировки дает 5-миллиамперный выходной сигнал. Входные сигналы, большие 10 ма, дают на выходе ограниченный сигнал. Использование высокочастотных транзисторов с $f_a = 1000$ Мгц позволяет получить собственный фронт ограничителя порядка 0,7 нсек. Это показано на рис. 35. Применение нескольких номиналов

питания дает возможность производить соединения между транзисторами по постоянному току, что позволяет иметь высокий диапазон счета. Ограничители работают непосредственно на схему совпадений.

б. Схема совпадений. Первоначально использовалась схема совпадений, изображенная на рис. 35. Через диод Гарвина в исходном состоянии течет ток до тех пор, пока на все входы не поступит сигнал. При этом транзистор T_6 отпирается, и на выходе появляется сигнал ~ 10 ма, который поступает на дискриминатор.

В дальнейшем эта схема была заменена более простой, изображенной на рис. 37. Имеется четыре совпадающих входа у транзисторов с общей базой. Выходные импульсы стандартизируются выключением диодов, включенных в коллектор последовательно. Параллельно включенные диоды восстанавливают коллекторное напряжение после выключения для обеспечения последующего быстрого включения.

Ток включенных диодов $/3-4$ ма на диод/ течет через 5-миллиамперный туннельный диод, смещая его в обратном направлении. Через сопротивление $1,6$ ком подается ток смещения в прямом направлении $/ \sim 6$ ма/. Таким образом, когда все последовательно включенные диоды выключаются, туннельный диод перебрасывается на диффузионную ветвь. Перед переключением туннельный диод работает как диод Гарвина с низким импедансом. Выходной транзистор выключен для малых сигналов /когда туннельный диод не переходит на диффузионную ветвь/. В самом худшем случае на выходе может быть сигнал в десять раз меньше совпадающего. Для стандартизации ширины импульса с этого дискриминатора используется ждущий дискриминатор с чувствительностью $2-5$ ма, который будет описан ниже.

Дрейф кривой совпадения от температуры показан на рис. 38. Это происходит из-за наличия для пикового тока туннельного диода температурного коэффициента $= 0,3\%/^{\circ}\text{C}$, что эквивалентно уменьшению тока смещения на 13% при изменении температуры от 20° до 50°C .

в. Дискриминатор. Дискриминаторы могут включаться как до совпадений, так и после них. Сначала был разработан дискриминатор на $2-10$ ма, в котором использовался туннельный диод из GaAs . Затем этот дискриминатор был заменен на два других, работающих по аналогичному принципу, но построенных на германиевых туннельных диодах $/20/$. Один дискриминатор $/2-5$ ма/ предназначен для работы с обычными сцинтилляционными счетчиками, а также для дискриминирования сигналов после совпадений.

Второй $/0,5 - 2$ ма/ предназначен для работы с черенковскими детекторами.

Дискриминатор на $2-5$ ма. Упрощенная схема дискриминатора показана на рис. 39. Ток смещения туннельного диода I устанавливается от 2 до 5 ма ниже пикового тока туннельного диода. Эта разность равна току, требуемому от входного буферно-

го транзистора для переключения схемы. Три других транзистора используются для того, чтобы выключить туннельный диод и получить фиксированный выходной ток. Транзистор используется как усилитель тока переключения туннельного диода и управляет током пары, образованной транзисторами T_2 , T_4 . T_2 нормально открыт и закрывается при переключении туннельного диода, T_4 закрыт и посылает через кабель сигнал на выключение диода. Длительность выходного импульса определяется длиной линии задержки плюс примерно 3 нсек на переключение триодов.

Мертвое время схемы равно двойной длительности импульса, т.к. отражения от туннельного диода поглощаются на коллекторной нагрузке T_4 . Эта схема позволяет иметь фиксированное мертвое время схемы. И само это время меньше, чем для обычного одновибратора на туннельном диоде.

Полная схема приведена на рис. 40. На рис. 41 показано относительное изменение чувствительности для пары импульсов, длительностью 1,8 нсек, по отношению к порогу для одиночного сигнала.

Порог для 1,1 - наносекундного импульса составляет 95% от порога для скачка тока. Изменение порога при изменении скорости счета от весьма низкого до 100 Мгц при длительности входного импульса 4 нсек не превышает 10%.

Температурный коэффициент для порога 3 ма составляет $0,8\%/^{\circ}\text{C}$ в диапазоне от 20° до 40°C .

Дискриминатор на 0,5-2 ма. Этот чувствительный дискриминатор был разработан для малых сигналов с черенковских детекторов. Упрощенная схема показана на рис. 42. Порог задается током смещения первого /на 5 ма/ туннельного диода. Когда отрицательный импульс переключает его на диффузионную ветвь, ток через сопротивление R вызывает переброс второго /на 10 ма/ туннельного диода. Выключающий импульс с кабеля возвращает оба туннельных диода в точку низкого потенциала. Такая конструкция допускает более широкий диапазон применения дискриминатора. При высокой чувствительности туннельный диод /на 5 ма/ отделен диодом на 10 ма от базы транзисторов. При низкой чувствительности преждевременное выключение невозможно, т.к. если диод на 5 ма выключится слишком рано, он не сможет выключить 10-миллиамперный диод, который смещен в пределах 20% от его пикового тока.

Полная схема приведена на рис. 43. Первые шесть транзисторов составляют два каскада псевдораспределенного усилителя. Коэффициент усиления - около 4 и время нарастания - 1,5 нсек.

г. Размножители. Схема размножителя приведена на рис. 44.

Два транзистора, включенные параллельно, инвертируют входной отрицательный импульс. Четыре выходных транзистора реинвертируют сигнал, так что на выходе схемы получается сигнал той же полярности. Триоды включены таким образом, что индуктивности выводов и паразитные емкости образуют линию с распределенными параметрами между входом и выходом.

Сигналы поступают на размножитель от схемы ограничителя. Это облегчает компоновку и настройку системы и позволяет увеличить число операций с импульсами от одного фотоумножителя. Собственный фронт нарастания сигнала с размножителя - около 1 нсек.

Во всех схемах применяются транзисторы 2№700 и 2№502 с $f_a = 700$ и 1000 МГц соответственно.

В системах использовались промежуточные быстрые пересчетные схемы на 4 или 8 для работы со стандартными 10-МГц декадами.

Результаты

Результаты испытаний систем сводились к определению главным образом:

- а/ разрешающего времени,
- б/ эффективности.

Разрешающее время системы было получено порядка 3,7 нсек при 100% эффективности.

В заключение можно отметить, что системы такого типа вместе с системой, описанной в /21/, являются оптимальными с точки зрения разрешения, мертвых времен, а также самой компоновки системы.

Очень удобна в использовании модульная конструкция элементов, что значительно сокращает время полного построения системы и легко позволяет производить нужные изменения.

V. Оптимальный метод получения временной информации из сигнала с фотоумножителя

Описанные в предыдущих разделах системы совпадений близки (в смысле технического выполнения) к идеальным. Они позволяют получать разрешающие времена порядка наносекунды. Мертвые времена в них сведены к минимуму. Они обладают очень хорошими дискриминирующими качествами, просты, надежны и т.д. Чувствительность этих схем достаточно хорошая. Однако все они основаны на принципе получения временной информации из сигнала с фотоумножителя, который при определенных условиях не является оптимальным.

Этот принцип заключается в том, что момент пролета частицы через детектор в этих схемах отсчитывается от точки пересечения сигналом с ФЭУ некоторого установленного порога. Причем схемы, содержащие на входе дискриминаторы, выполненные на туннельных диодах, позволяют осуществить в настоящее время почти идеальную реализацию этого принципа.

Имеется два основных недостатка, связанных с таким принципом получения временной информации.

1. Часто приходится передавать сигнал с фотоумножителя и схем совпадений по кабелю. Это приводит к затягиванию переднего фронта импульса.

Увеличение длительности переднего фронта импульса приводит к тому, что амплитудный разброс сигналов вызывает значительный временной разброс импульсов на выходе формирователей, что препятствует получению малых разрешающих времен. Эта трудность может быть преодолена, во-первых, постановкой дискриминатора непосредственно на фотоумножителе и, во-вторых, снижением порога дискриминатора до такой величины, чтобы амплитудный разброс не приводил к значительному временному разбросу. В этом случае в значительной мере утрачиваются преимущества, связанные с наличием в схеме совпадений входных дискриминаторов.

2. Второй недостаток носит более принципиальный характер и связан с работой в условиях большого динамического диапазона световых вспышек. В этом случае бывает необходимо иметь такой порог чувствительности аппаратуры, чтобы она могла работать от отдельных фотоэлектронов. При таком низком пороге рассматриваемый принцип получения временной информации приводит к тому, что момент появления импульса на выходе дискриминатора будет определяться прилетом на анод ФЭУ электронов, связанных с первым фотоэлектроном, вылетающим с фотокатода.

Известно, что отдельные фотоэлектроны могут давать весьма значительный временной разброс импульсов тока на аноде ФЭУ.

Искажения импульсов при прохождении кабелей различных длин исследовались в /30/.

На рис. 45 и 46 приводятся переходные характеристики некоторых отечественных кабелей при различной их длине.

В /24-26/ описаны схемы, в которых за основу взят метод, основанный на регистрации момента пересечения нуля продифференцированным импульсом с фотоумножителя. Применение этого метода позволяет при чувствительности аппаратуры, соответствующей одному фотоэлектрону, и при большом динамическом диапазоне световых вспышек получать хорошую точность регистрации момента пролета частицы. Естественно, что точность определения момента пролета детектора частицей, сигнал

от которой соответствует одному фотоэлектрону, при этом не улучшается.

Пересекающий нулевую линию импульс, имеющий достаточно фиксированный момент пересечения нуля, может быть получен путем дифференцирования импульса с фотоумножителя с постоянной времени, сравнимой с фронтом ФЭУ и временем высвечивания сцинтиллятора. Такое дифференцирование может быть сделано либо при помощи формирующей линии, либо при помощи резонансного LC контура с критическим затуханием.

При использовании формирующей линии длительность импульса /момент пересечения нулевой линии/ определяется длиной и волновым сопротивлением формирующей линии. При дифференцировании на резонансном контуре момент пересечения нулевой линии определяется резонансной частотой контура.

Для "привязки" к моменту пересечения нуля используется дискриминатор на туннельном диоде. Эта схема состоит из сбалансированного моста с туннельным диодом в одном из плеч. Дискриминатор срабатывает в момент пересечения нуля. Поскольку вся временная информация заключена в начале импульса с туннельного диода, последний дифференцируется, и его задний фронт срезается.

Результирующий выходной импульс содержит всю временную информацию, содержащуюся в исходном сигнале с ФЭУ, однако не меняется по амплитуде.

Схема с использованием дифференцирования на резонансном контуре приведена на рис. 47. Чтобы добиться максимальной чувствительности дискриминатора, схема была смонтирована в панель фотоумножителя RCA 6810-A. Дискриминатор состоит из сбалансированного моста с туннельным диодом в одном из плеч. Импульс с ФЭУ подается к мосту через слегка передемпфированный LC контур, настроенный на 80 МГц, и запускает дискриминатор в момент первого пересечения нуля. Выходной импульс с дискриминатора привязан к исходному импульсу с ФЭУ с точностью лучше чем 0,5 нсек во всем диапазоне входных импульсов /20:1/.

Зарядовая чувствительность схемы равна $4 \text{ мкккулона} = 2,5 \cdot 10^7 \text{ е.}$

При использовании ФЭУ 6810А, таким образом, чувствительность достаточна для регистрации отдельных фотоэлектронов с фотокатода ФЭУ. При этом выходной импульс изменяется только в два раза.

Амплитуды выходных импульсов имеют разброс от ячейки к ячейке примерно от 40 мв до 100 мв, если не производить отбора туннельных диодов и транзисторов.

Пороговая стабильность, отнесенная к выходу V , составляет $240 \text{ мкв} / ^\circ\text{C}$ без компенсации и может быть уменьшена до $10 \text{ мкв} / ^\circ\text{C}$ в температурном диапазоне $-3^\circ\text{C} - +35^\circ\text{C}$.

Для не очень критичных применений панели взаимозаменяемы для нескольких типов фотоумножителей.

Регулировка порога дискриминатора вынесена на расстояние. Можно снимать два сигнала на разные 125-омные кабели: с выхода *A* - выходной сигнал дискриминатора и с выхода *B* - пересекающий нулевую линию исходный сигнал. Последний пропорционален заряду, собранному на аноде фотоумножителя, и имеет амплитуду, равную примерно 10% от той, которая получилась бы на аноде, если бы с него сигнал снимался прямо на 125-омный кабель. По этому импульсу можно производить амплитудный анализ. Его также можно использовать для мониторингования.

Дискриминатор монтируется непосредственно под панелью ФЭУ на круглой печатной плате.

На рис. 48 показана зависимость задержки выходного импульса дискриминатора от амплитуды входного сигнала.

Для малых сигналов с ФЭУ имеется существенное изменение задержки. При примерно трехкратном превышении порога задержка становится малой и не увеличивается до тех пор, пока не начинается насыщение ФЭУ. При насыщении ФЭУ изменяется форма импульса, что приводит к большим задержкам. Чтобы устранить это, применяется специальный высоковольтный делитель, обеспечивающий более высокие напряжения на последних диодах ФЭУ.

На рис. 49 показана зависимость амплитуды сигнала на выходе *B* от числа фотоэлектронов, вылетающих с фотокатода. Минимальный порог дискриминатора составляет примерно 5 ма /по выходу *B* /. Это соответствует динамическому диапазону 100:1.

Так как верхняя граница линейной области определяется параметрами фотоумножителя, динамический диапазон может быть увеличен только за счет повышения чувствительности дискриминатора.

Однако минимальная величина порога ограничивается по двум причинам. Первая - возможность генерирования при очень низком пороге. В этом смысле германиевый туннельный диод лучше диода из GaAs.

Вторая причина заключается в том, что при снижении порога происходят большие изменения амплитуды выходного импульса.

Время восстановления дискриминатора составляет 25 нсек. Форма импульса на выходе дискриминатора показана на рис. 50. Импульс-треугольной формы, длительность по основанию - 9 нсек. На рис. 51 показана форма импульса на выходе *B*

В^{/25/} приводятся результаты испытаний подобной схемы с несколько другим дискриминатором нуля.

Схема вместе с фотоумножителем испытывалась от генератора коротких световых импульсов, измерялась кривая задержанных совпадений импульсов с выхода дискриминатора и с генератора. Эти кривые приведены на рис. 52.

Спад кривой для 100 фотоэлектронов равен 0,125 нсек на декаду.

С такими схемами осуществлялось разделение по времени пролета электронов, пионов и мюонов с импульсом 200 Мэв/с на базе 144 см. Результирующая кривая приведена на рис. 53.

В^{/26/} приводится анализ схемы с резонансным контуром для входного импульса тока треугольной формы, изображенного на рис. 54.

Эквивалентная схема резонансного контура приведена на рис. 55.

Треугольный импульс тока, который прикладывается к этому контуру, можно записать в виде:

$$i(t) = k_1 t - (k_1 + k_2) \cdot (t - t_*) \mu(t - t_*), \quad \text{где}$$

$$\mu(t - t_*) = 0 \quad \text{для } 0 \leq t \leq t_*,$$

$$\mu(t - t_*) = 1 \quad \text{для } t \geq t_*.$$

Для случая критического затухания контура

$$\frac{Z_0}{R} = 2, \quad \text{где } Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

напряжение на сопротивлении

$$V(t) = L \left\{ k_1 \left[1 - (1 + t') e^{-t'} \right] - (k_1 + k_2) \left[1 - (1 + t' - t'_*) e^{-(t' - t'_*)} \right] \mu(t' - t'_*) \right\},$$

где $t' = \frac{t}{\sqrt{LC}}$,

$$t'_* = \frac{t_*}{\sqrt{LC}}$$

и $0 \leq t \leq t_* \left[\frac{k_1}{k_2} + 1 \right]$. Момент пересечения нуля t_* найдем из уравнения

$$V(t_*) = 0.$$

Или

$$0 = 1 - (1 + t'_*) e^{-t'_*} - \left(1 + \frac{k_2}{k_1} \right) \left[1 + t'_* - t'_* \right] e^{-(t'_* - t'_*)},$$

где

$$t'_* = \frac{t}{\sqrt{LC}}$$

для

$$t_* \leq t_* \leq t_* \left[\frac{k_1}{k_2} + 1 \right].$$

Последнее уравнение можно решить графически в зависимости от параметров t'_*

и $\frac{k_1}{k_2}$.

Решения в виде семейства кривых приведены на рис. 58.

Чтобы определить временную неопределенность, надо оценить значение $\frac{dV}{dt}$ в точке t_* или, что то же самое, $\frac{di_R(t_*)}{dt}$.

$$\frac{di_R(t_*)}{dt} = 2K_1 e^{-t_*'} \left\{ t_*' - \left(1 + \frac{k_2}{k_1}\right) (t_*'' - t_*') e^{t_*''} \right\}.$$

K_1 можно определить, зная полный заряд Q_1 , собранный на аноде ФЭУ, следующим образом:

$$Q = \int_0^{t_* \left(\frac{k_1}{k_2} + 1\right)} i(t) dt = \\ = \frac{k_1 t_*^2}{2} \left(1 + \frac{k_1}{k_2}\right).$$

Отсюда

$$k_1 = \frac{2Q}{t_*^2 \left(1 + \frac{k_1}{k_2}\right)}.$$

Таким образом,

$$\frac{di_R(t_*)}{dt} = \frac{4Q}{t_*^2 \left(1 + \frac{k_1}{k_2}\right)} e^{-t_*'} \left\{ t_*' - \left(1 + \frac{k_2}{k_1}\right) (t_*'' - t_*') e^{t_*''} \right\}$$

для

$$t_* \leq t_* \leq t_* \left(\frac{k_1}{k_2} + 1\right).$$

Для импульса с передним фронтом 5 нсек, задним фронтом 10 нсек, полным зарядом 10^{-12} кулона и резонансной частоты контура 80 Мгц имеем $Q = 10^{-12}$ кулона, $t_* = 5 \cdot 10^{-9}$ сек, $\frac{k_1}{k_2} = 2$, $\sqrt{LC} = 2 \cdot 10^{-9}$ сек, $t_*' = 2,5$, $t_*'' = 4,7$ (см. рис. 55).

Подставляя эти числа, получаем

$$\frac{di_R(t_*)}{dt} = 17 \frac{\text{мкА}}{\text{нсек}}.$$

Для германиевого туннельного диода с $I_p = 5$ ма, шумовой ток составляет величину порядка 1 или 2 мкА. Таким образом, временная неопределенность составляет величину порядка 0,1 нсек.

На рис. 57 приведена схема, отличающаяся от ранее описанной только тем, что дифференцирование входного сигнала осуществляется с помощью формирующей линии. Другое отличие заключается в том, что дискриминатор и фотомножитель соединены кабелем.

Расчеты, аналогичные предыдущим, показывают, что в случае, когда эта схема устанавливается непосредственно на ФЭУ, величина $\frac{di_R}{dt} \approx 20 \frac{\text{мкА}}{\text{нсек}}$ при тех же условиях, что и раньше. Описанные в /24-26/ схемы надежны в работе.

VI. З а к л ю ч е н и е

Имеется несколько общих требований, которым должны удовлетворять схемы для применения в экспериментах на ускорителях. Это:

1. Возможность получения малых разрешающих времен. Этому требованию удовлетворяют все схемы, описанные в обзоре.

2. Малый временной разброс после схемы совпадений, что важно при последовательном включении нескольких схем. Этому требованию удовлетворяют схемы, описанные в разделах III, IV и V, позволяющие свести временной разброс до уровня 1-2 наносекунд.

3. Малое мертвое время. Схемы, описанные в /11, 17-21, 24-26/ и др., позволяют иметь скорости счета порядка 50-100 Мгц.

4. Большая продолжительность рабочего цикла. Загрузки каналов могут достигать 10^6-10^7 импульсов за цикл. Это приводит к тому, что схемы должны иметь, как правило, связи по постоянному току, чтобы избежать смещения уровней за счет заряда конденсаторов.

5. Универсальность. Схемы должны допускать возможность их каскадирования в различных комбинациях. В этом отношении особенно перспективным кажется выполнение их в виде модулей.

В обзоре приведено описание нескольких систем, удовлетворяющих всем этим требованиям.

Возникает естественный, казалось бы, очень простой вопрос, какая из этих систем лучше. Так как на него вряд ли можно дать однозначный ответ, рассмотрим два наиболее часто встречающихся на практике случая.

Случай не очень большого разброса амплитуд сигналов с фотоумножителя.

В этом случае, по-видимому, не требуется иметь очень высокую чувствительность, и применение систем, описанных в разделах III и IV, дает преимущество по сравнению с системами, описанными в разделе V, т.к. позволяет снизить число случайных совпадений на выходе.

Случай очень большого разброса амплитуд сигналов с фотоумножителя. В этом случае необходимо иметь чувствительность аппаратуры, соответствующую нескольким фотоэлектронам, и применение схем, подобных описанным в разделе V, по-видимому, в настоящее время является единственным методом достижения малых разрешающих времен.

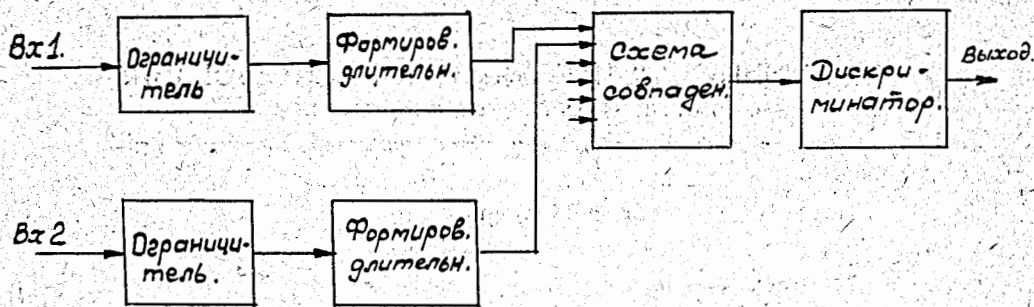
В заключение авторы благодарят сотрудников Лаборатории высоких энергий

Б.А. Кулакова, С.В. Мухина, В.С. Пантуева, С.В. Рихвицкого, В.С. Ставинского и
Э.Н. Цыганова за обсуждение вопросов, затронутых в обзоре.

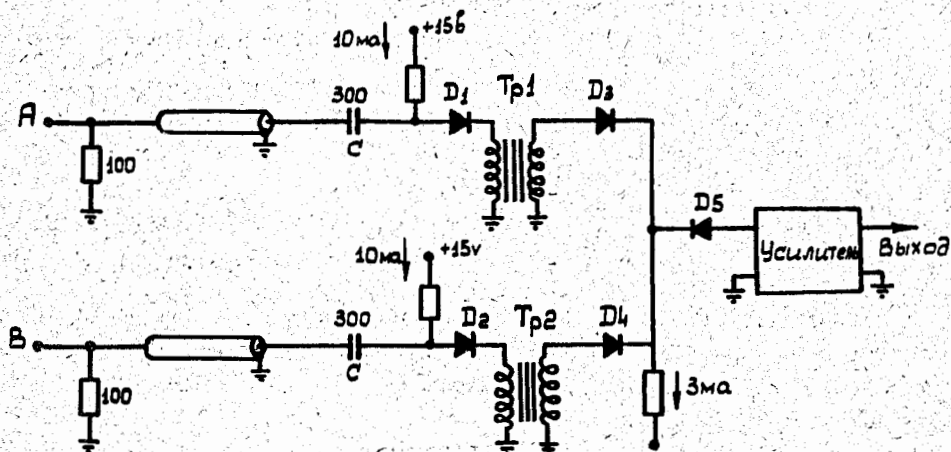
Л и т е р а т у р а

1. Chaplin and Candy. Nucl. Instr. and Meth., 5 (1959), 242-246.
2. Gabriel and Segar. Nucl. Instr. and Meth., 12 (1961), 307.
3. Rosen and Altman. Nucl. Instr. and Meth., 17 (1962), 337-341.
4. Barna, Marshall and Sands. Nucl. Instr. and Meth., 7 (1960), 124-134.
5. Baker, Kirsten, Mack and Wiegand. Nucl. Instr. and Meth., 12 (1961), 11-19.
6. Baker. Nucl. Instr. and Meth., 12 (1961), 20-24.
7. Barna, Marshall and Sands. Nucl. Instr. and Meth., 12 (1961), 43-59.
8. Verweij. Nucl. Instr. and Meth., 10 (1961), 308-314.
9. Ageno. Nucl. Instr. and Meth., 12 (1961), 341-344.
10. Дунайцев. Препринт ОИЯИ 1421, Дубна, 1963.
11. Franzini. Rev. Sci. Instr., 32, 11 (1961).
12. Infante and Pandarese. Conf. on Nucl. Electr., Belgrad, III (1962), 29-40.
13. Adler, Palmal and Perez-Mendez. Nucl. Instr. and Meth., 13 (1961), 197-200.
14. Gorodetzky, Muser, Zen. and Armbruster. Nucl. Instr. and Meth., 13 (1961),
N 3.
15. Gorodetzky, Muser, Yen and Armbruster. Nucl. Instr. and Meth., 14 (1961),
N 2.
16. Колпаков. Препринт ОИЯИ 1417, Дубна, 1963.
17. Голутвин, Заневский. Препринт ОИЯИ 1424, Дубна, 1963.
18. Sugarman and Higinbotham. Conf. on Instr. for high-energy Physics (1960),
54-58.
19. Sugarman et al., Conf. on Instr. for high-energy Physics (1960), 50-61.
20. Sugarman, Higinbotham and Yonda. Conf. on Nucl. Electr., Belgrad, III (1962).
21. Whetstone and Kounosu. Rev. Sci. Instr., 33, 4 (1962), 422-428.
22. Whetstone. Rev. Sci. Instr., 34 (1963), 412.
23. Ward and York. Nucl. Instr. and Meth., 23 (1963), 213-217.
24. Kerns, Bjerke, Nunamaker. Conf. on Instr. for high-energy Physics (1960),
62-63.
25. Wiegand. Nucl. Instr. and Meth., 20 (1963), 313-318.
26. Bjerke, Kerns, Nunamaker. Nucl. Instr. and Meth., 15 (1962), 249-267.
27. Pandarese and Villa. Nucl. Instr. and Meth., 20 (1963), 319-322.
28. Hazoni. Nucl. Instr. and Meth., 10 (1961), 231-239.
29. Van Zurk. Nucl. Instr. and Meth., 16 (1962), N 2.
30. Горбачев и др. ПТЭ, № 2 (1962).
31. Infante and Pellegrini. Conf. on Instr. for high-energy Physics (1960),
75-83.
32. Sugarman. IRE Trans. on Nucl. Sci., 7 (1960), N 1.

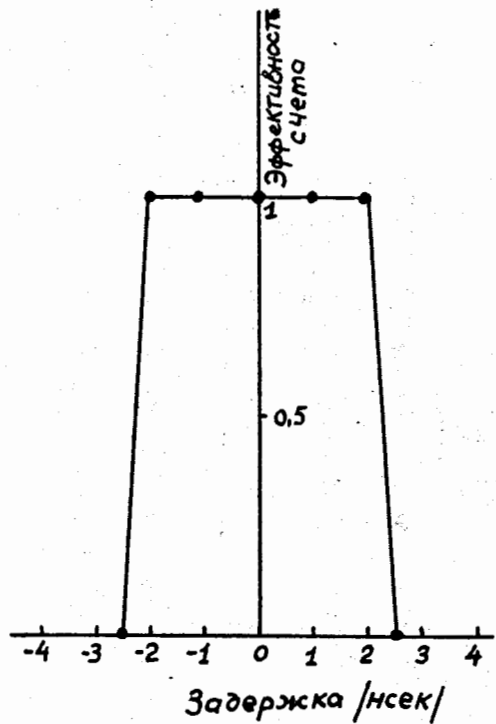
Рукопись поступила в издательский отдел
8 февраля 1964 г.



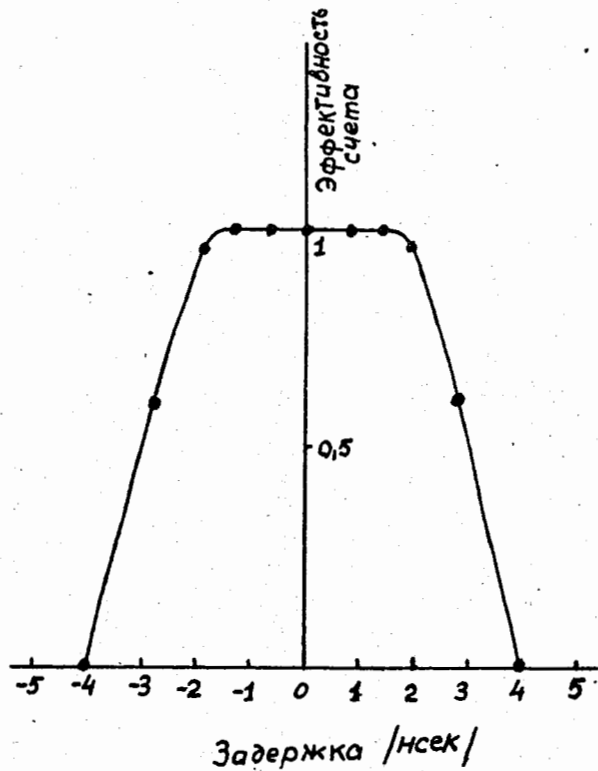
Р и с. 1. Блок-схема системы, не содержащей на входе дискриминатора.



Р и с. 2. Схема совпадений на диодах.

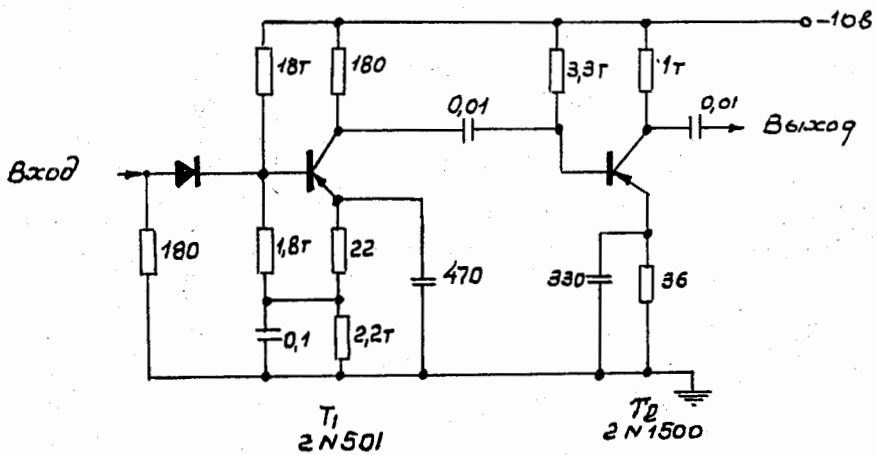


а)

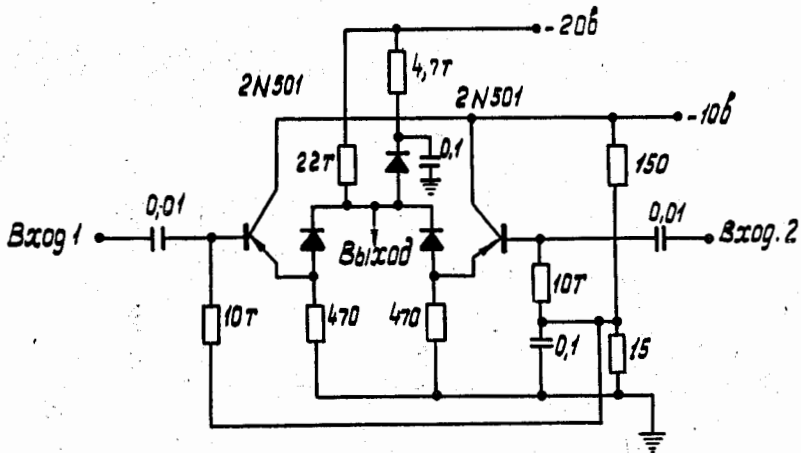


б)

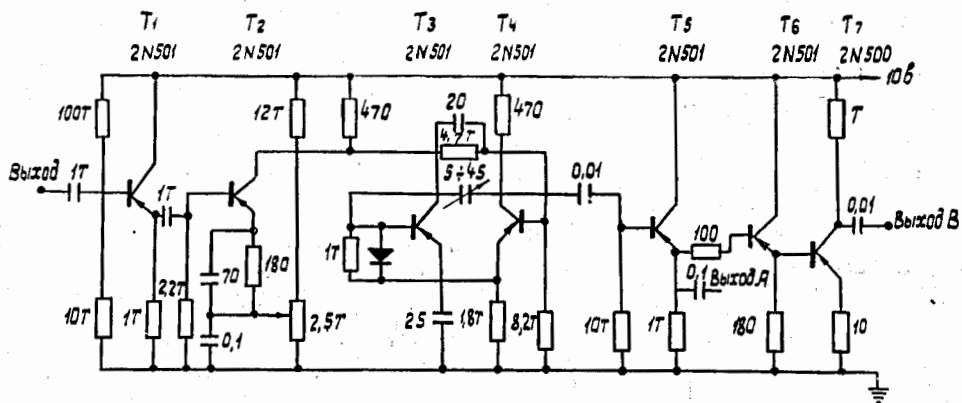
Р и с. 3. Кривые задержанных совпадений: а/ от импульсов генератора; б/ от сигналов с фотоумножителей.



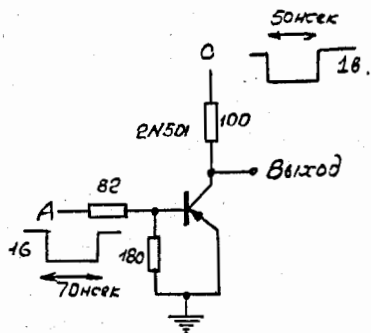
Р и с. 4. Схема входного ограничителя.



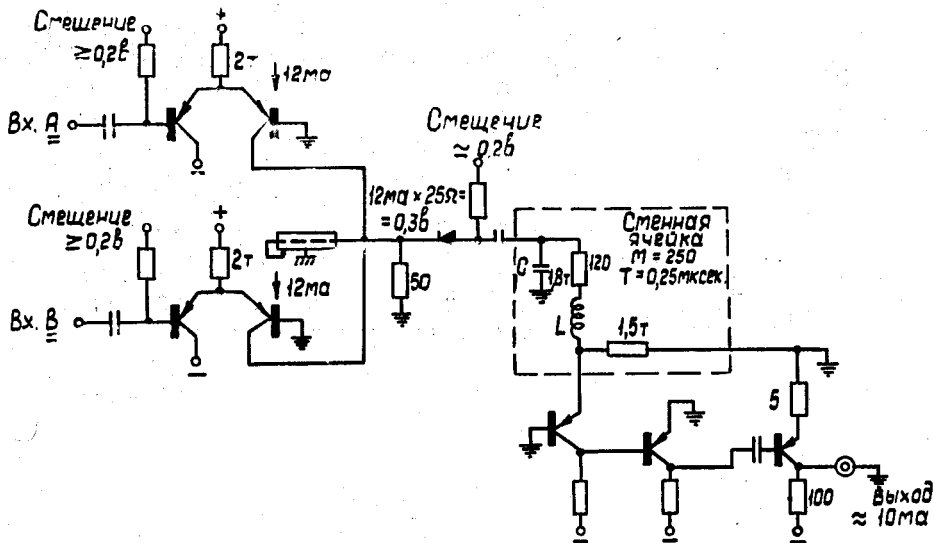
Р и с. 5. Схема совпадений.



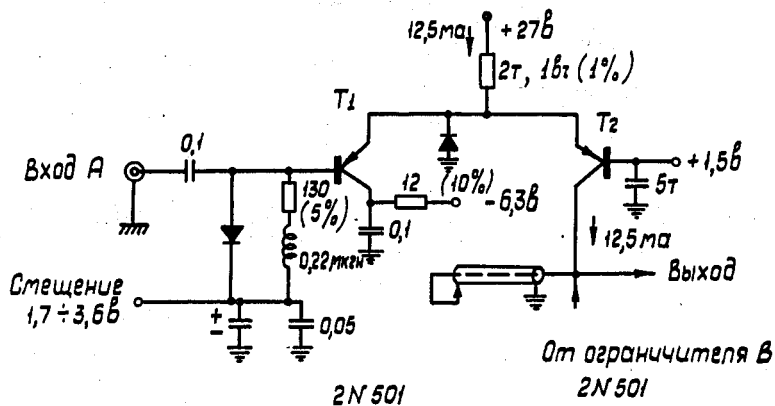
Р и с. 6. Схема дискриминатора, которая используется после схемы совпадений.



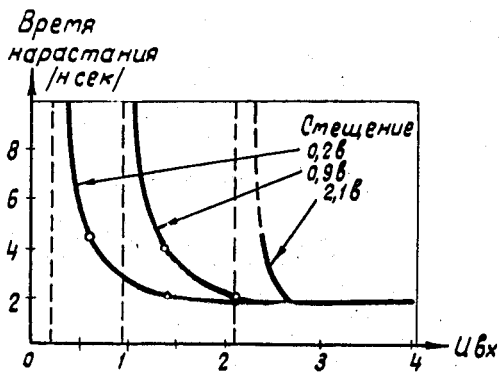
Р и с. 7. Схема антисовпадений.



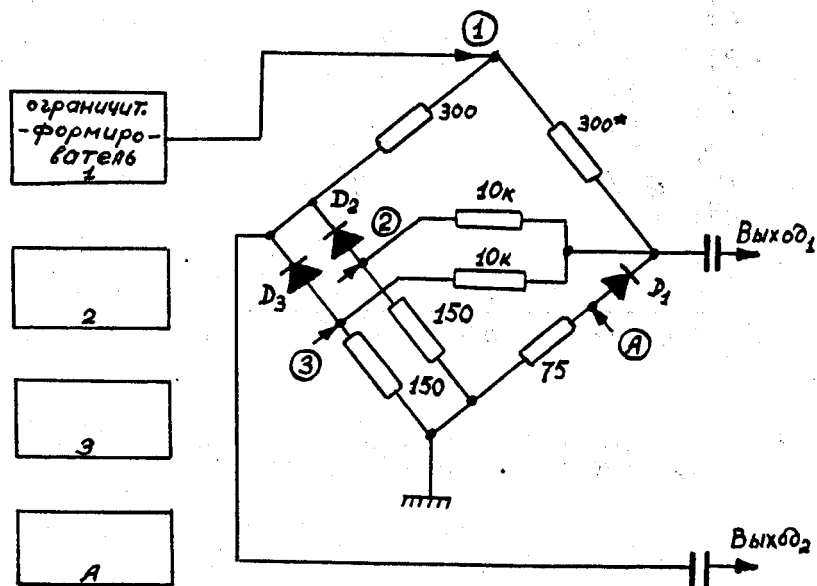
Р и с. 8. Схема совпадений с разрешающим временем порядка нескольких наносекунд.



Р и с. 9. Схема входной цепи.

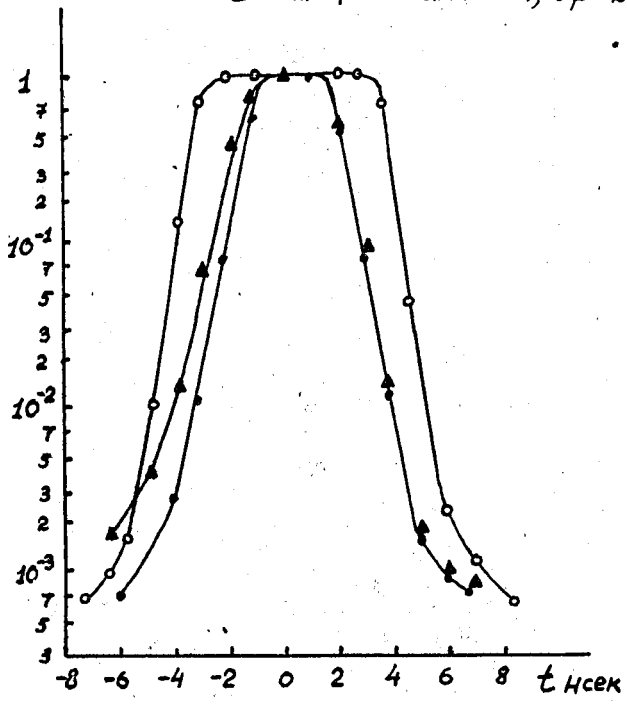


Р и с. 10. Зависимость времени нарастания импульса на выходе ограничителя от амплитуды на входе.

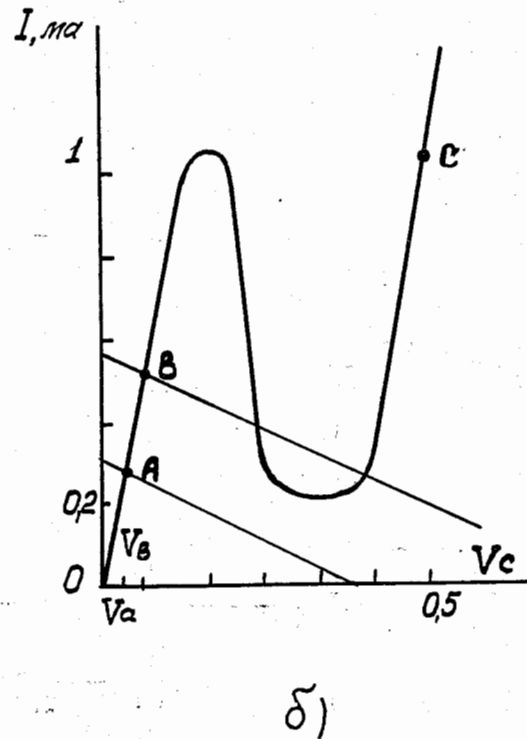
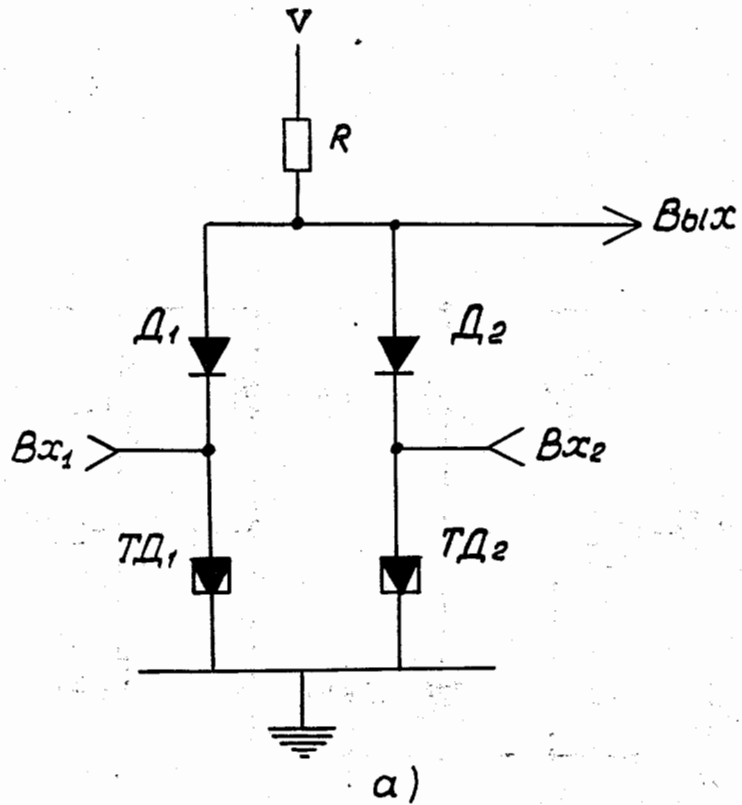


Р и с. 11. Схема многократных совпадений мостового типа.

N , отн. ед.
 ○ - для двойной схемы совп.; $\tau_p = 50$ нс.
 ● - для тройной схемы совп.; $\tau_p = 20$ нс.
 ▲ - для тройной схемы совп.; $\tau_p = 20$ нс.

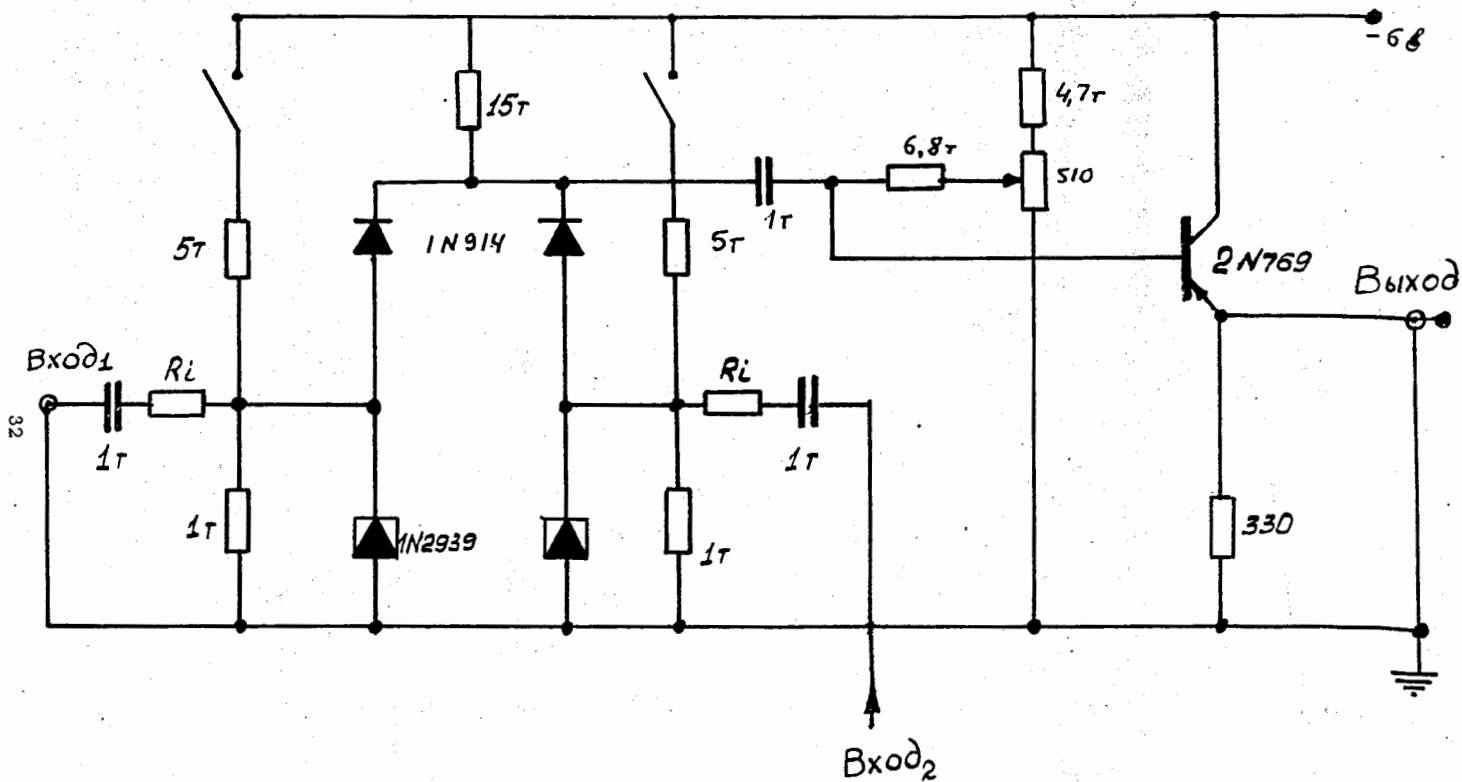


Р и с. 12. Кривые временного разрешения, измеренные в пучке π^+ -мезонов с энергией 70 Мэв /фотоумножители - 56 АУР /.

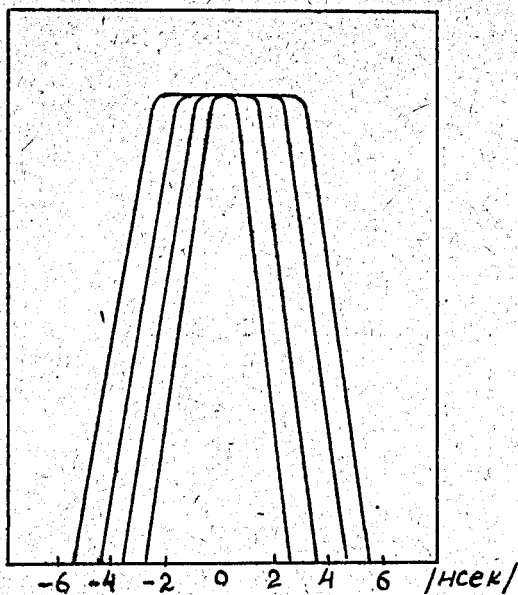


Р и с. 13.а/ Схема совпадений на диодах и туннельных диодах.

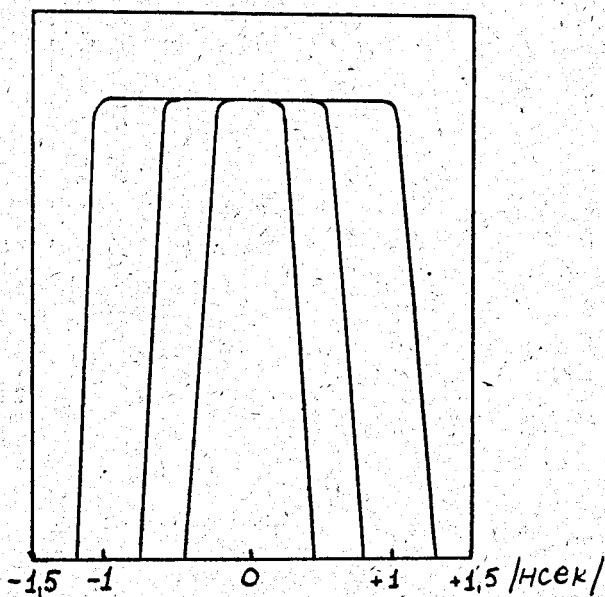
б/ Иллюстрация работы схемы с помощью вольтамперной характеристики туннельного диода.



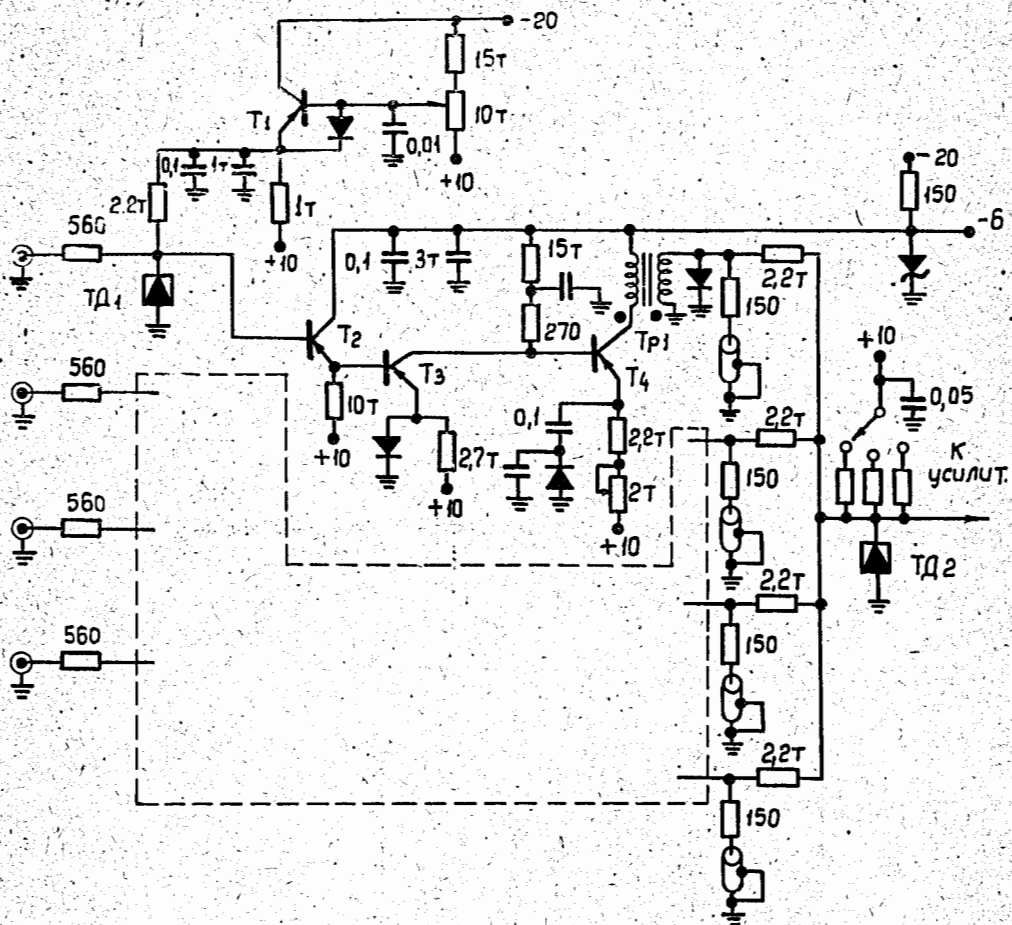
Р и с. 14. Полная принципиальная схема совпадений на диодах и туннельных диодах.



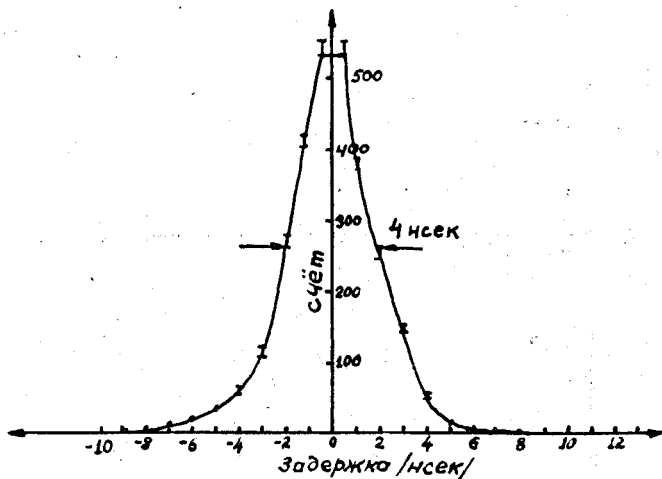
Р и с. 15. Кривые задержанных совпадений в пучке минимальной ионизации.



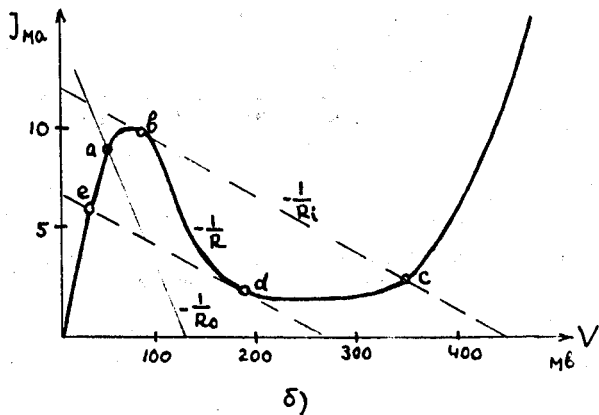
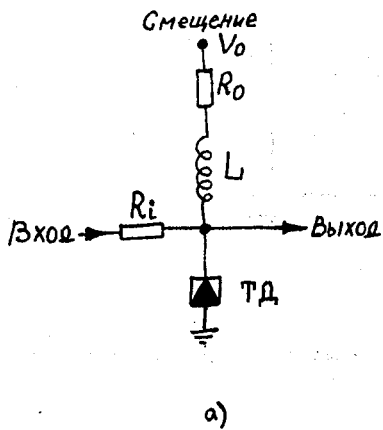
Р и с. 16. Кривые задержанных совпадений, полученные от генератора /длительность входных импульсов 0,3 нсек/.



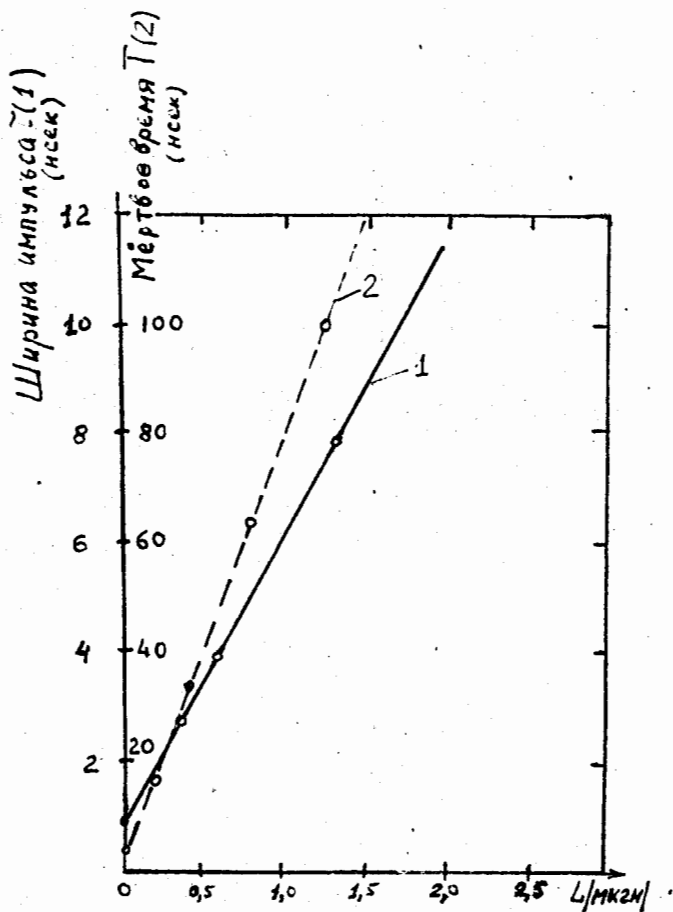
Р и с. 17. Четырехканальная схема совпадений.



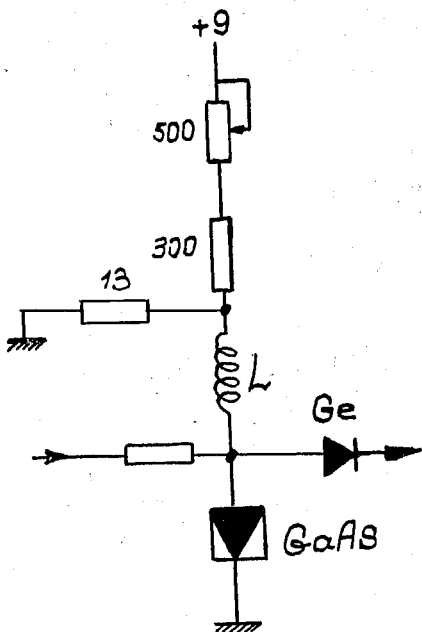
Р и с. 18. Кривая задержанных совпадений, полученная при работе с космическими лучами.



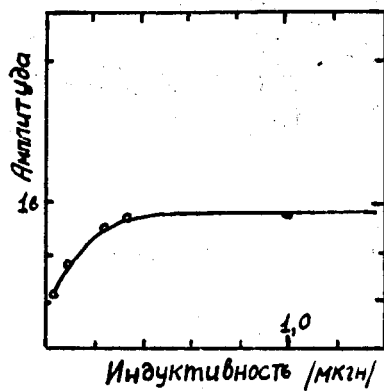
Р и с. 18. а/ Схема формирователя на туннельном диоде.
 б/ Иллюстрация работы формирователя с помощью характеристики туннельного диода.



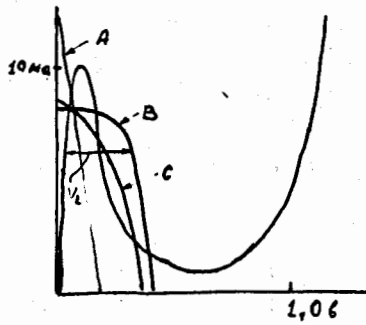
Р и с. 20. Зависимость ширины выходного импульса и мертвого времени формирователя от индуктивности.



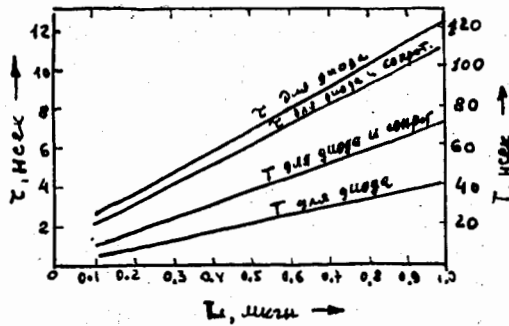
Р и с. 21. Формирователь на туннельном диоде из арсенида галлия.



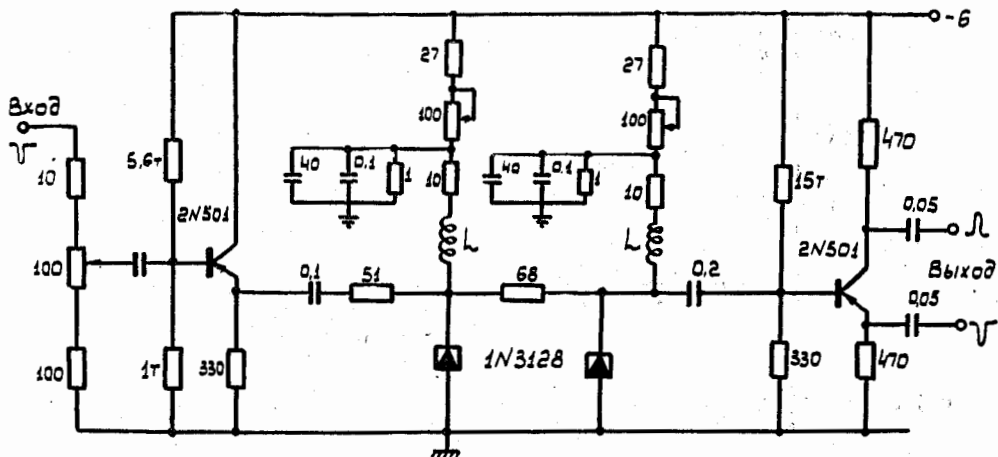
Р и с. 22. Зависимость амплитуды выходного импульса формирователя от индуктивности.



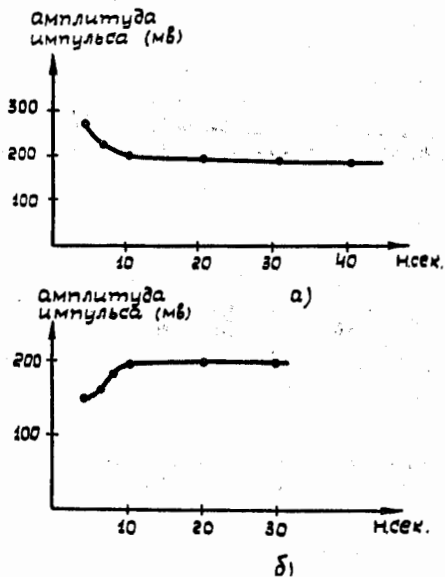
Р и с. 23. Вольтамперная характеристика туннельного диода на 10 ма из арсенида галлия (А) с 18-омным сопротивлением, (В) с диодом и (С) с диодом и сопротивлением 75 ом, включенными параллельно.



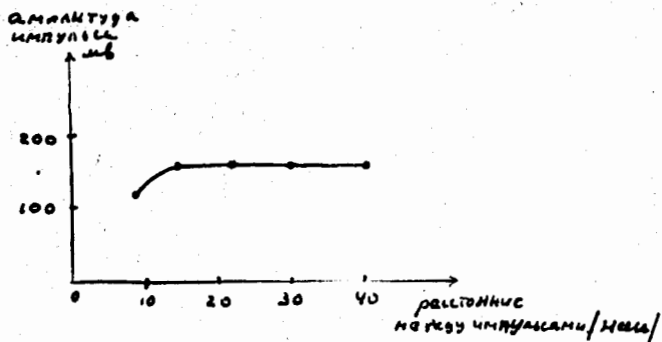
Р и с. 24. Зависимость T и τ от индуктивности для схем с диодом.



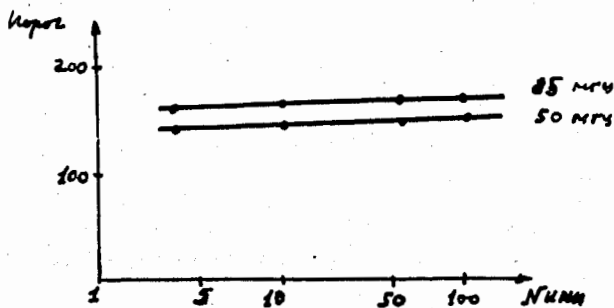
Р и с. 25. Принципиальная схема дискриминатора .



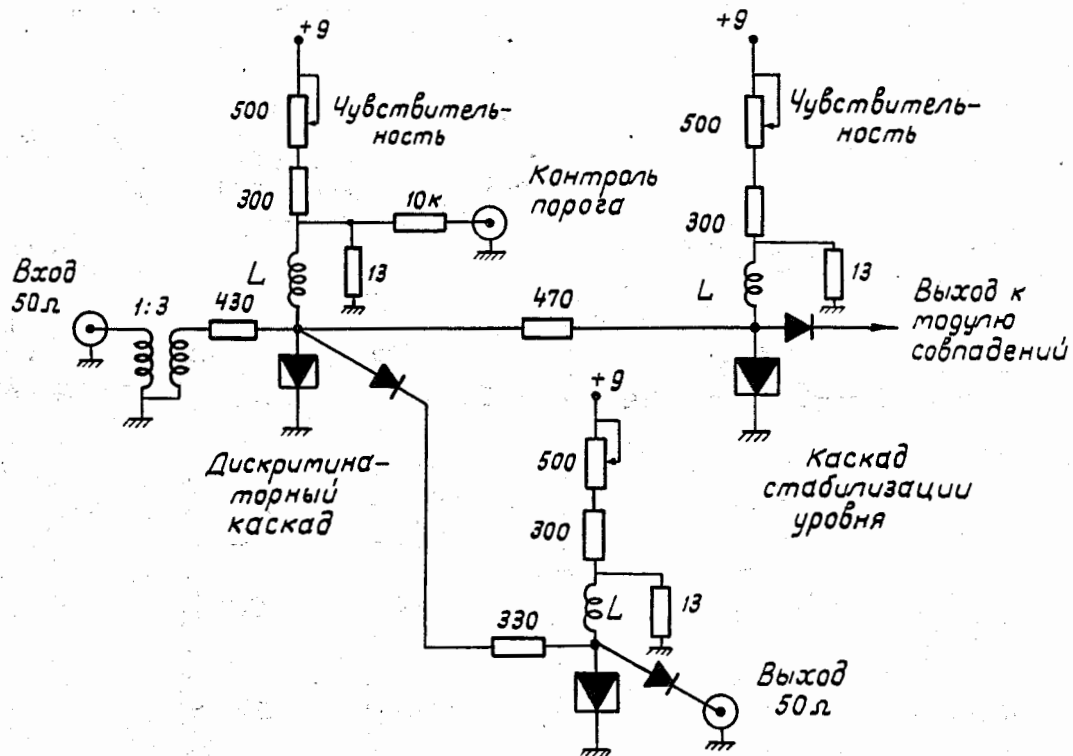
Р и с. 26. Зависимость амплитуды выходного импульса а/ от длительности входного импульса и б/ от длительности фронта входного импульса для схемы, изображенной на рис. 25.



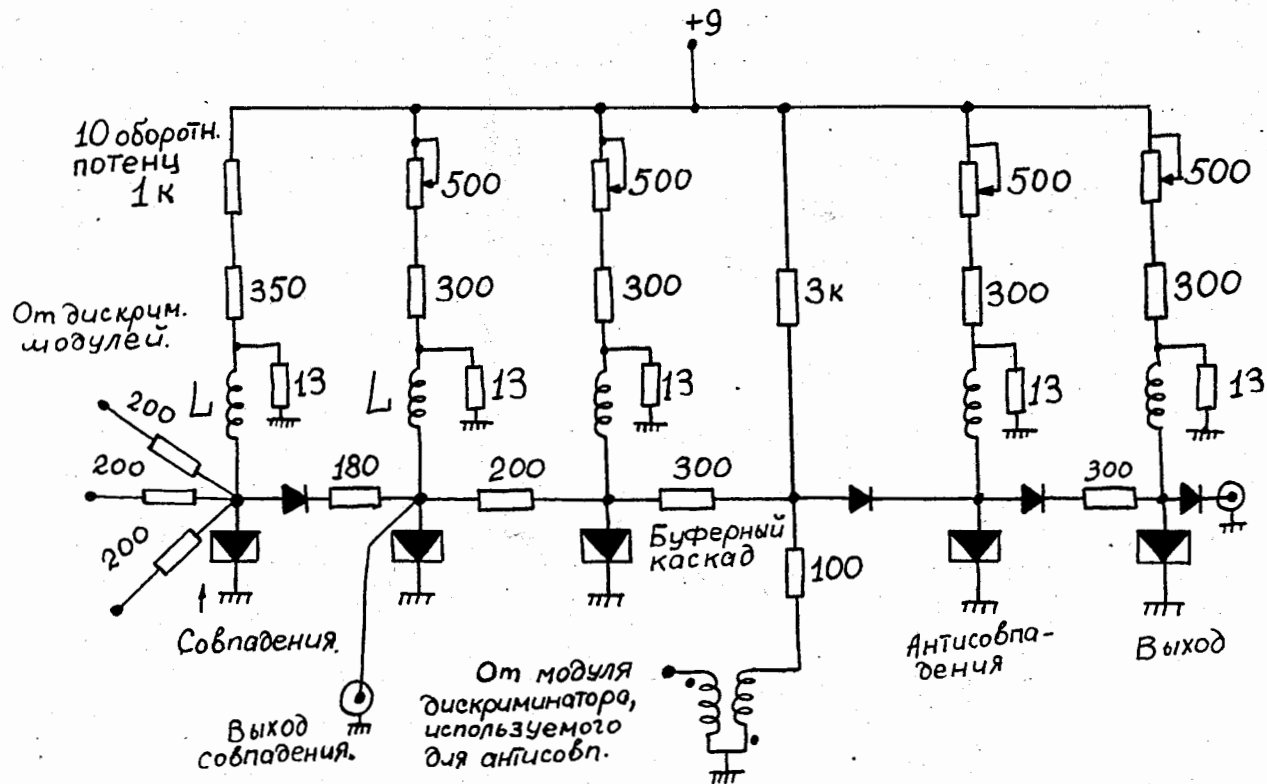
Р и с. 27. Зависимость амплитуды второго импульса от величины задержки его относительно первого импульса.



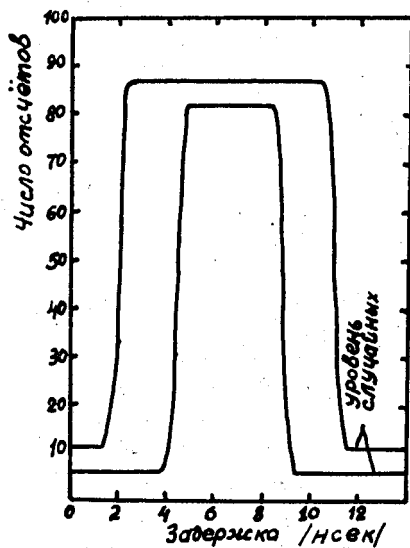
Р и с. 28. Зависимость величины порога от числа импульсов, поданных на схему, при испытании от "пачки" импульсов.



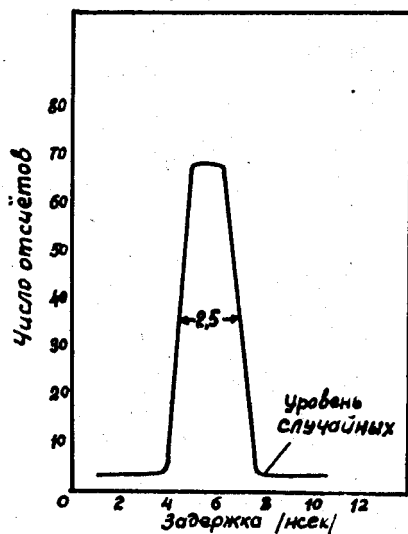
Р и с. 29. Принципиальная схема модуля дискриминатора.



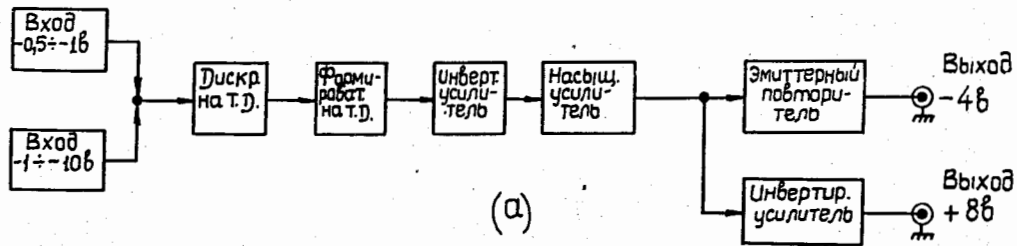
Р и с. 30. Принципиальная схема модуля совпадения.



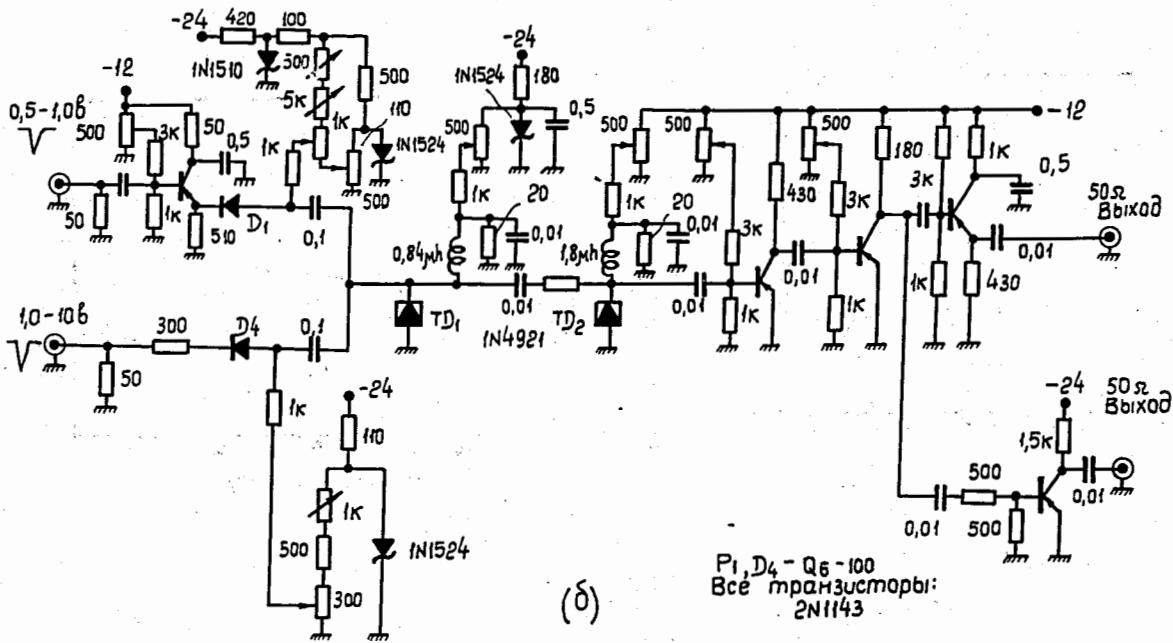
Р и с. 31. Кривые задержанных совпадений при различных смещениях в каскаде совпадений. Индуктивности в каскадах стабилизации уровня по 0,47 мкГн.



Р и с. 32. Кривая задержанных совпадений при индуктивности в каскадах стабилизации уровня по 0,1 мкГн.

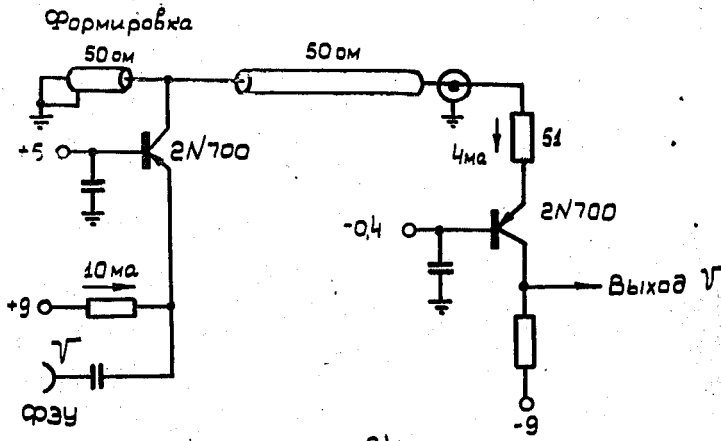


(a)

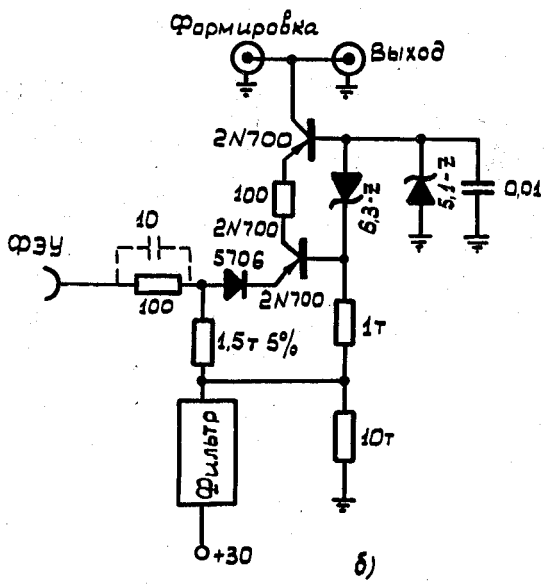


(b)

Р и с. 33. а/ Блок-схема дискриминатора.
б/ Принципиальная схема дискриминатора.

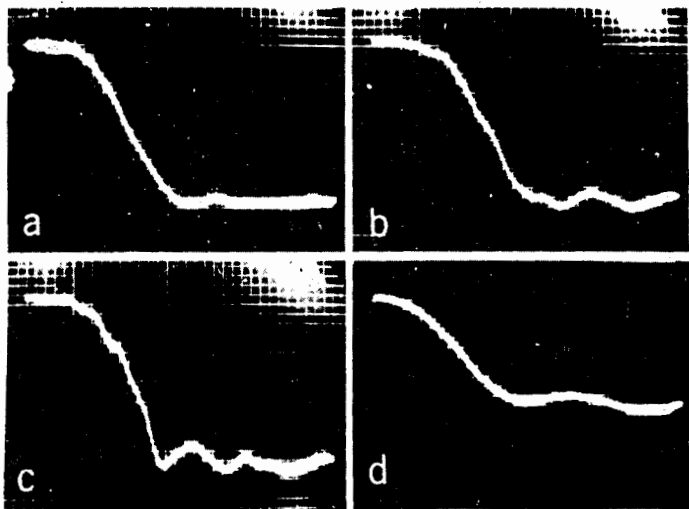


а)

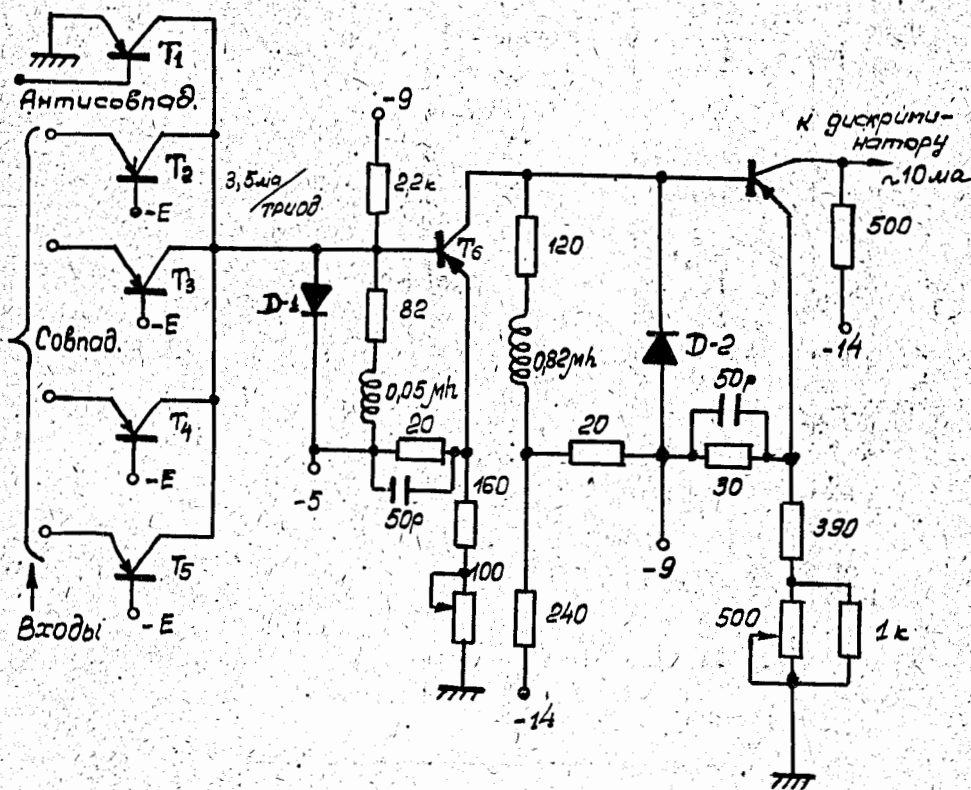


б)

Р и с. 34. Схемы ограничителей импульсов.
 а/ Ограничитель с высокой чувствительностью.
 б/ Ограничитель для сигналов с амплитудой более 10 вольт.



Р и с. 35. Осциллограмма выходных сигналов со схемы ограничителя. На вход подавался скачок тока: а/ 10 ма; в/ 50 ма; с/ 100 ма; д/ 5 ма. Одно маленькое деление = 0,1 нсек.



Р и с. 36. Четырехканальная схема совпадений с антисовпадениями /1-ый вариант/

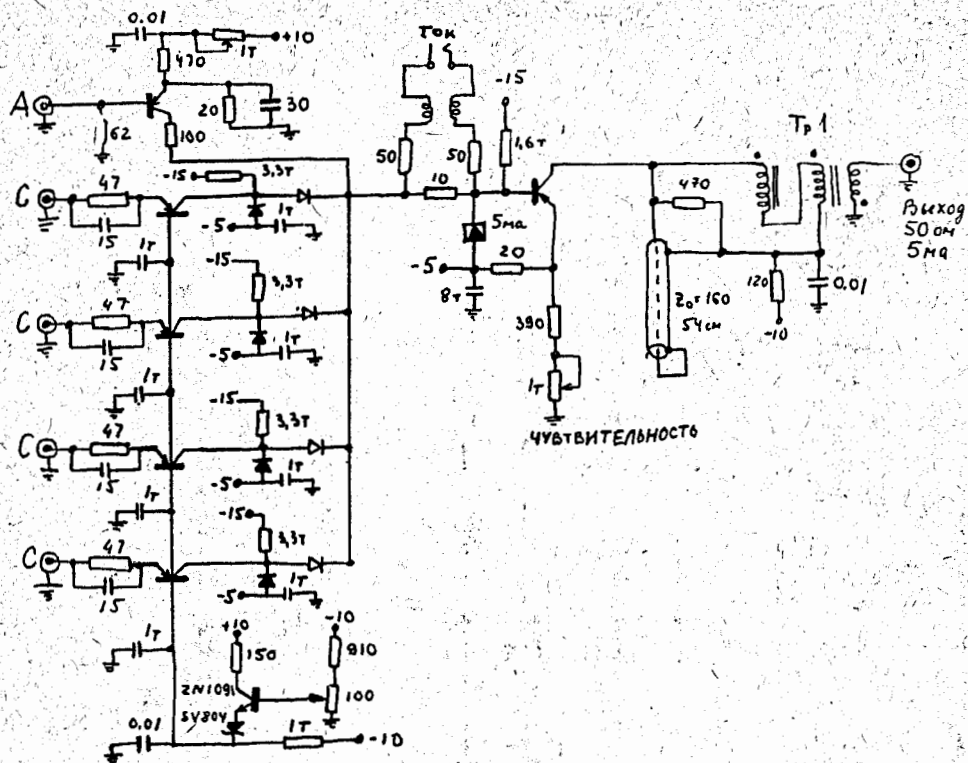


Рис. 37. Четырехканальная схема совпадений с антисовпадениями /2-ой вариант/.

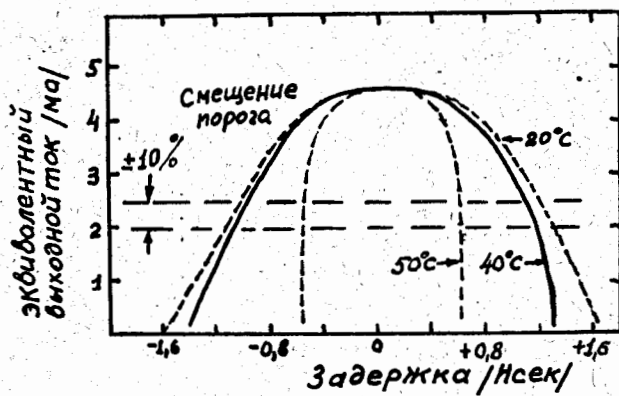


Рис. 38. Дрейф кривой совпадений в зависимости от изменения температуры /от 20 до 50°C/.

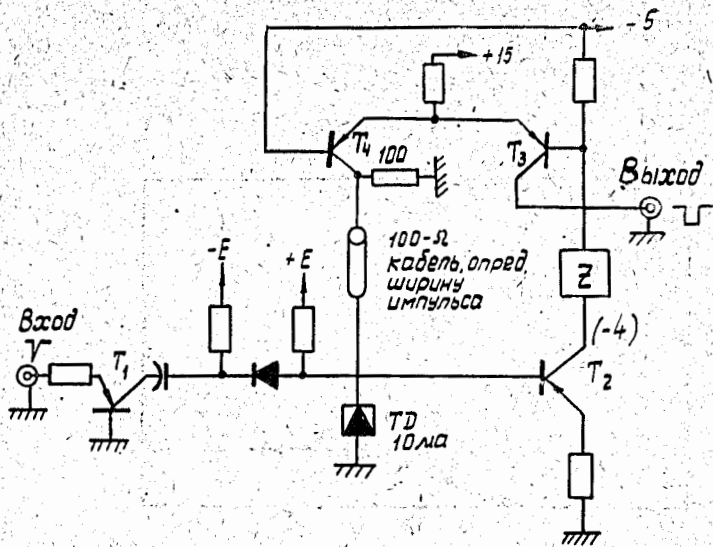


Рис. 39. Упрощенная схема дискриминатора на 2-5 ма.

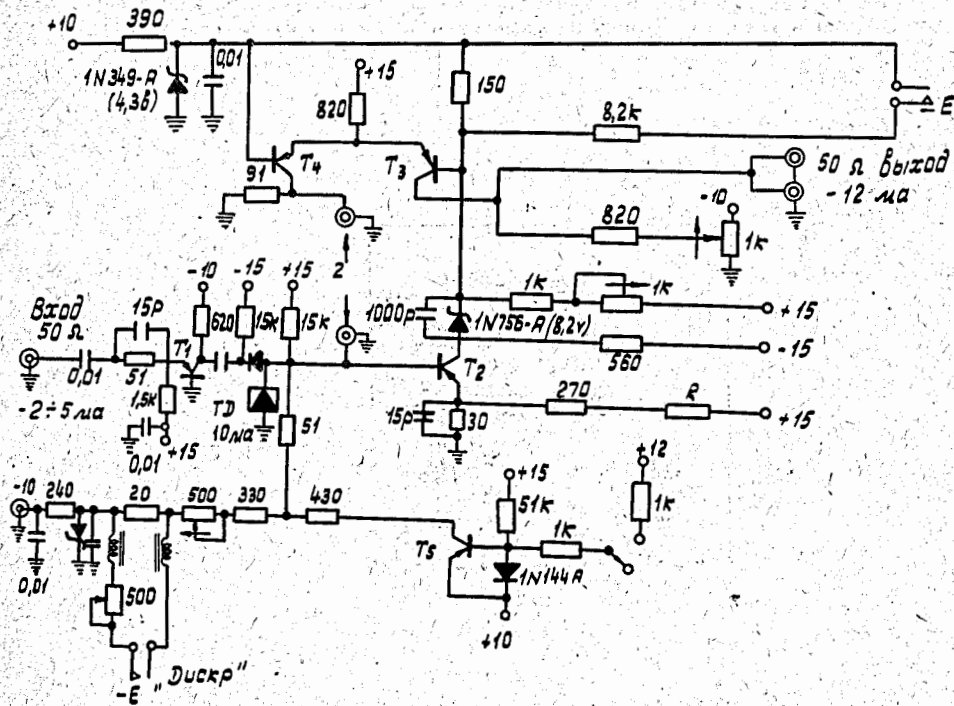
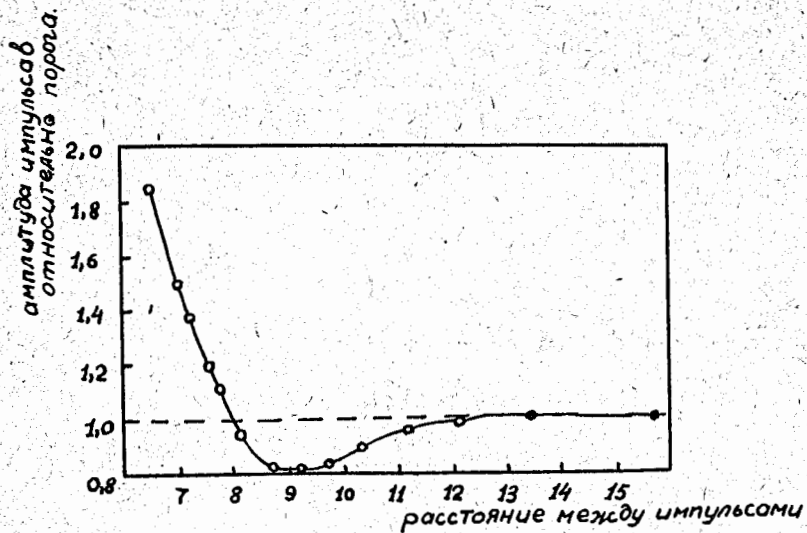
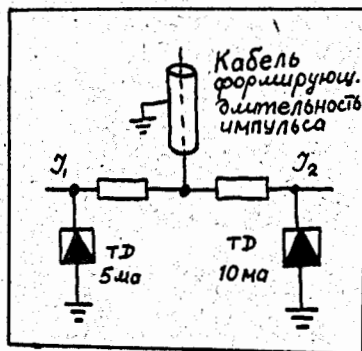


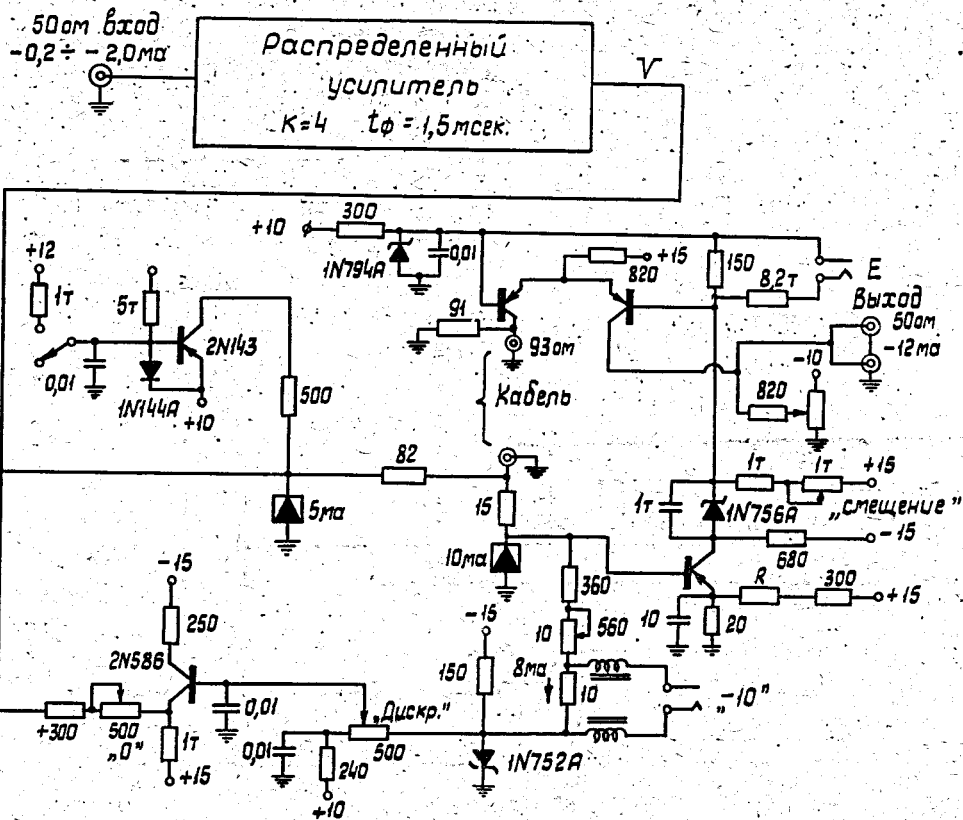
Рис. 40. Полная схема дискриминатора на 2-5 ма.



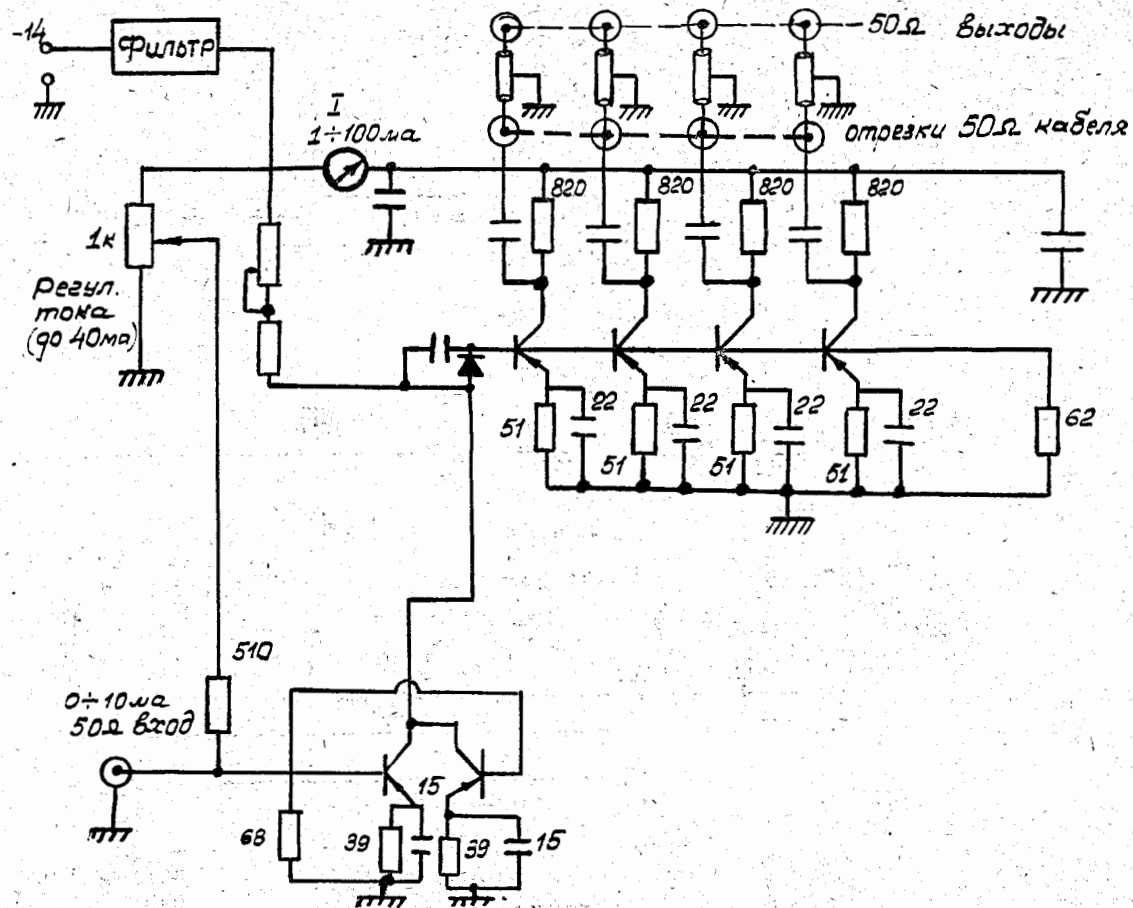
Р и с. 41. Изменение чувствительности для пары импульсов, длительностью 1,8 нсек, по отношению к порогу для одиночного сигнала.



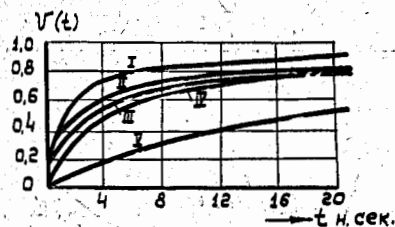
Р и с. 42. Упрощенная схема дискриминатора на 0,5-2 ма.



Р и с . 43. Полная схема дискриминатора на 0,5-2 ма.



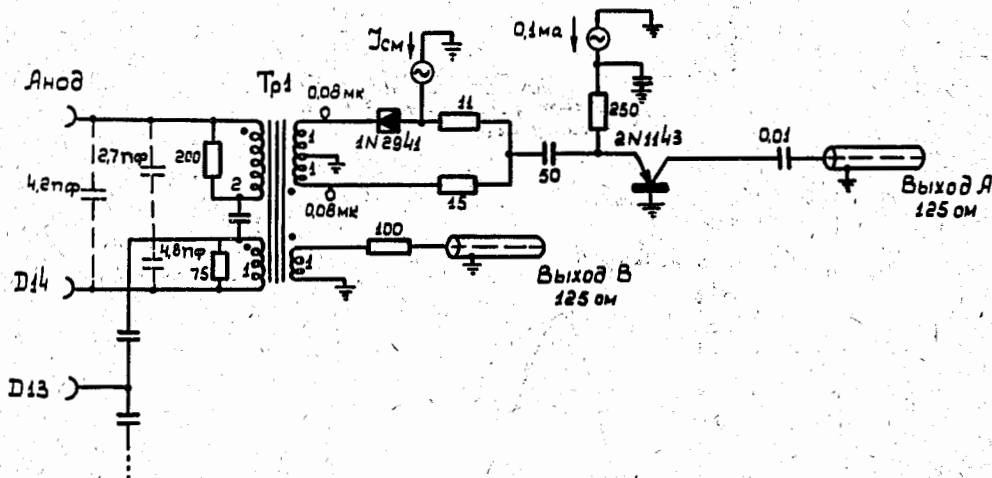
Р и с. 44. Принципиальная схема размножителя.



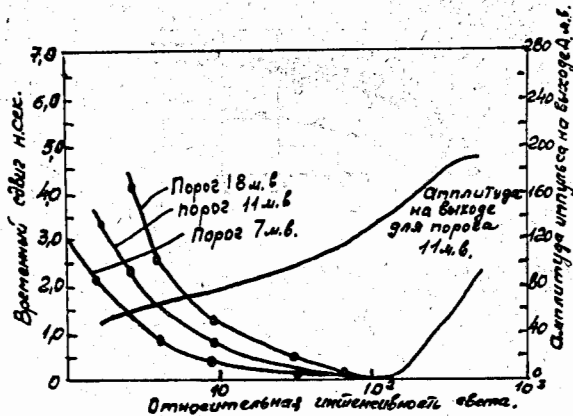
Р и с. 45. Переходные характеристики различных коаксиальных радиочастотных кабелей /длина кабелей 100 м/. I - РК-6 и РК-3, II - РК-2, III - РК-50, IV - РК-1, V - РК-19.



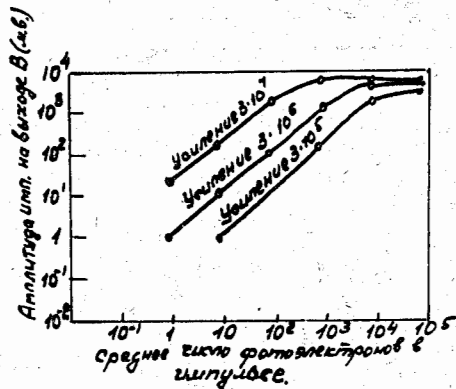
Р и с. 46. Зависимость переходных характеристик от длины кабелей РК-6 /плотная линия/ и РК-2 /пунктирная линия/, I - 10 м, II - 50 м, III - 100 м, IV - 200 м.



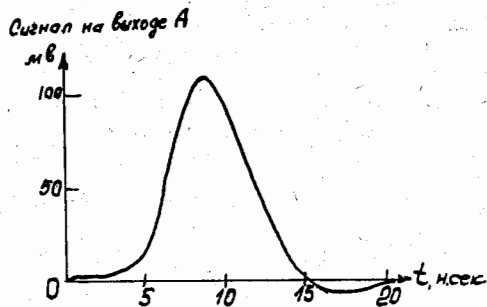
Р и с. 47. Схема формирователя на резонансном контуре.



Р и с. 48: Зависимость величины задержки выходного импульса /на выходе / формирователя от амплитуды входного импульса.

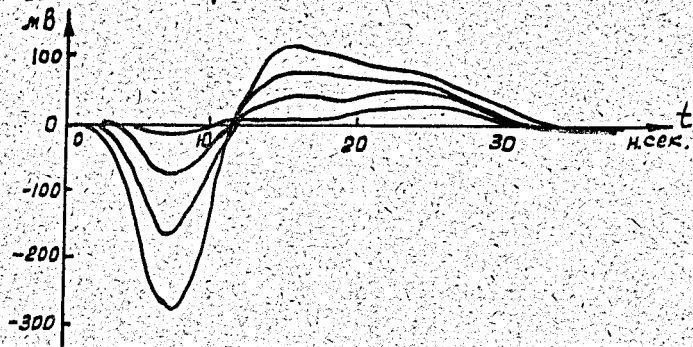


Р и с. 49. Зависимость амплитуды сигнала на выходе В от количества фотоэлектронов.

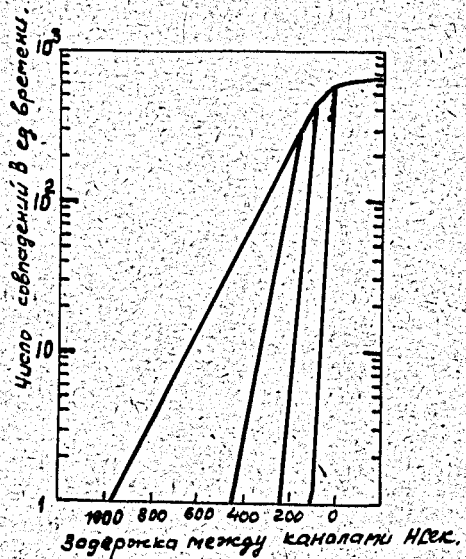


Р и с. 50. Форма импульса на выходе А формирователя.

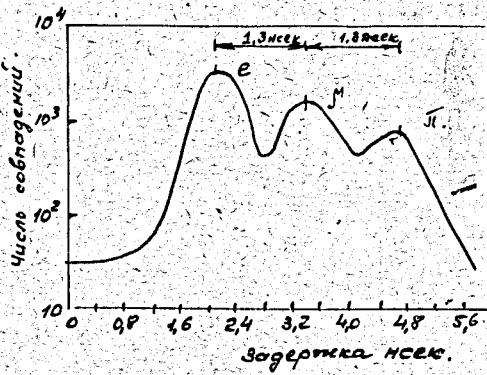
Сигнал на выходе В



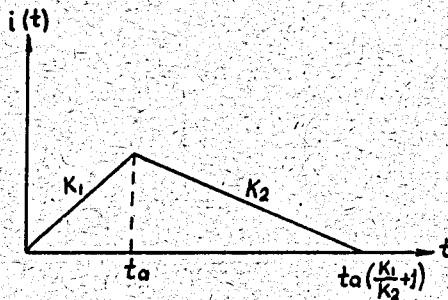
Р и с. 51. Форма импульса на выходе В формирователя.



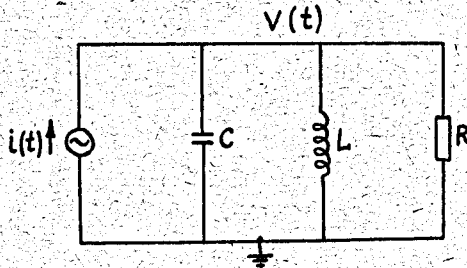
Р и с. 52. Кривые задержанных совпадений для испытаний от коротких световых вспышек.



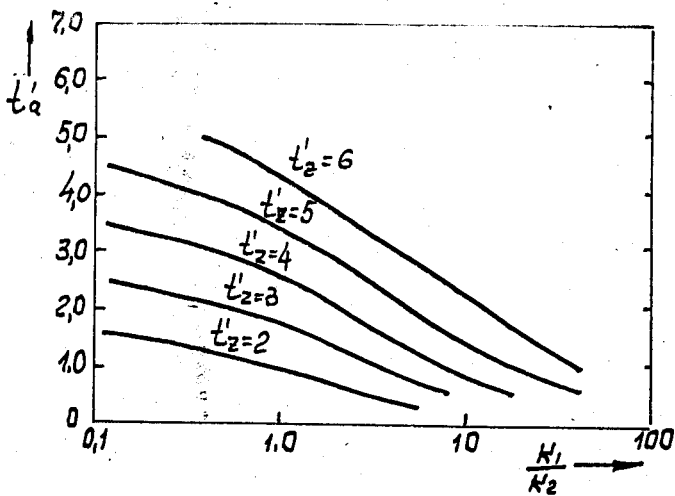
Р и с. 53. Кривая задержанных совпадений для пучка, содержащего e^- , π^- и μ^- с импульсом 200 МэВ/с . Счетчики разнесены на 144 см .



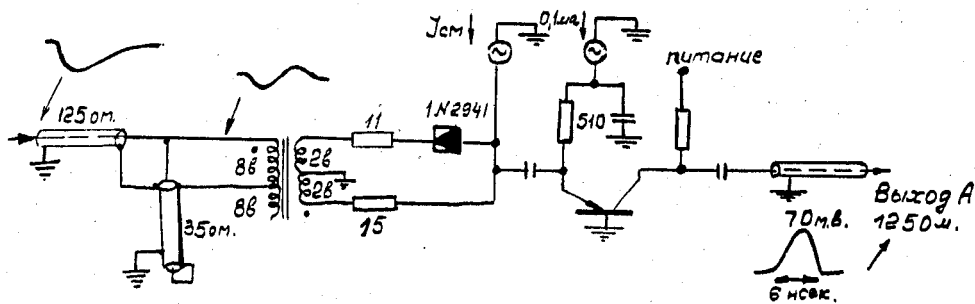
Р и с. 54. Идеальный импульс треугольной формы: k_1 - крутизна переднего фронта, k_2 - крутизна заднего фронта, t_0 - момент максимального значения тока, $t_0 \left(\frac{k_1}{k_2} + 1 \right)$ - длительность импульса по основанию.



Р и с. 55. Эквивалентная схема резонансного контура.



Р и с. 56. Зависимость t'_2 от t'_1 и $\frac{k_1}{k_2}$.



Р и с. 57. Схема формирователя на кабеле.