

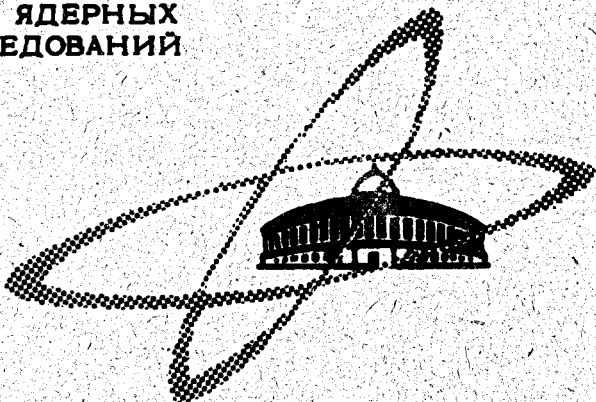
12/10-70

3-91

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 4892



В.Н. Зубарев, В.И. Иванов, Н.С. Мороз,  
В.Б. Радоманов, В.С. Ставинский

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

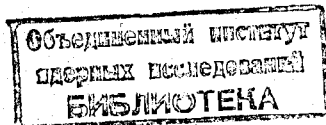
ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ  
СЧЕТНАЯ СИСТЕМА  
НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

1970

В.Н. Зубарев, В.И. Иванов, Н.С. Мороз,  
В.Б. Радоманов, В.С. Ставинский

**ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ  
СЧЕТНАЯ СИСТЕМА  
НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА**

Направлено в ПТЭ



## 1. В в е д е н и е

Современная счетная электронная аппаратура, как правило, работает от сцинтилляционных и черенковских вспышек, преобразуемых в токовой сигнал фотоэлектронного умножителя. Для улучшения разрешения по скорости в черенковских счетчиках и ослабления рассеяния частиц в сцинтилляционных счетчиках при высокой эффективности регистрации электронная аппаратура должна обладать высокой чувствительностью. Когда импульсы тока на выходе ФЭУ малы, эффективность аппаратуры определяется статистическими флуктуациями распределения фотоэлектронов, выбиваемых с фотокатода. Полагая, что распределение фотоэлектронов будет описываться законом Пуассона, можно найти эффективность ( $\epsilon$ ) аппаратуры, регистрирующей импульсы тока, соответствующие  $n$  фотоэлектронам:

$$\epsilon = \frac{1 - e^{-\bar{n}} \sum_{n=0}^{n-1} \frac{\bar{n}^n}{n!}}{1 - e^{-\bar{n}}}, \quad (1)$$

где  $\bar{n}$  — среднее число фотоэлектронов, образующихся на фотокатоде. Уровень токового сигнала современных фотоумножителей от одного фотоэлектрона составляет  $\approx 2$  ма. Поэтому для обеспечения достаточно

высокой эффективности ( $\approx 80\%$ ) регистрации однофотозлектронных импульсов чувствительность аппаратуры должна быть около 1 ма. Повышение чувствительности электронной аппаратуры при фиксированных максимальных амплитудах импульсов с датчиков связано с увеличением динамического диапазона входных импульсов. Особенно существенной эта проблема становится при использовании тонких сцинтилляторов большой площади.

Разрешающее и мертвое времена влияют на стабильность и надежность работы аппаратуры в условиях большой, меняющейся во времени, фоновой загрузки. Однако в тех условиях, когда есть мониторирующий отсчет, можно осуществить включение схем в связанном режиме, когда одна из схем ("связанная") включается на совпадение с другой схемой (мониторной). При соблюдении некоторых условий относительная эффективность связанного канала будет равна 1 независимо от частоты следования и статистического разброса во времени входных сигналов. Эти условия следующие:

$$T_{\text{д}} > T_{\text{сп}} > T_{\text{п}},$$
$$\tau_{\text{м}} < \tau_{\text{с}},$$

где  $T_{\text{д}}$  - мертвое время дискриминатора мониторного отсчета,  $T_{\text{сп}}$  - мертвое время дискриминатора схемы пропускания,  $T_{\text{п}}$  - мертвое время пересчетного устройства,  $\tau_{\text{м}}$  - разрешающее время мониторного канала,  $\tau_{\text{с}}$  - разрешающее время связанной схемы.

Кроме того, чувствительность связанного канала должна быть выше чувствительности мониторного канала. Таким образом, связанный режим частично устраняет противоречия между требованиями получения высокой эффективности и малого разрешающего времени.

## II . Описание блоков аппаратуры

Система состоит из следующих блоков: формирователя, схемы совпадений на 2 и 6 каналов с антисовпадениями, смесителя-усилителя, размножителя и нелинейного смесителя.

### 1) Формирователь импульсов ФЭУ

Возможность работы в большом динамическом диапазоне обеспечивается использованием формирователя амплитуд на входе системы.

Формирование основано на принципе ограничения импульсов тока сверху с последующей формировкой по длительности посредством короткозамкнутого кабеля. На рис. 1 показана принципиальная схема формирователя. Он выполнен как параллельно-последовательный диодный ограничитель тока. В качестве последовательного элемента использован нормально открытый быстрый германиевый диод ( $D_2$  на рис. 1). Ток смещения этого диода определяет уровень ограничения формирователя. Германиевый обращенный диод  $D_1$ , включенный как параллельный ограничитель, в статическом режиме закрыт падением напряжения на диоде  $D_2$ . Нулевой потенциал на выходе формирователя обеспечивается включением короткозамкнутой линии  $L_{\phi}$ . Достаточно высокое качество согласования достигается за счет высокого сопротивления закрытых диодов  $D_1$  в случае малых сигналов и  $D_2$  в случае больших сигналов. Запаздывание момента открывания диода  $D_2$  относительно закрывания диода  $D_1$  на спаде входного импульса определяет собственное мертвое время формирователя. Для уменьшения его включено сопротивление  $R_4 = 150$  ом, шунтирующее часть входного тока.

На рис. 2 показана кривая зависимости выходной амплитуды формирователя от амплитуды импульса тока ФЭУ. Измерения были выполнены на ФЭУ-30 с использованием импульсного источника света, интенсив-

ность которого менялась двумя поляроидами. Из рис. 2 видно, что допустимый динамический диапазон входных сигналов не менее 1:250.

## 2. Усилитель и размножитель импульсов

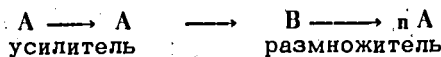
Схемы усилителя и размножителя импульсов разработаны на основе усилительной фазовращающей двойки /1/. На рис. 3 изображены два варианта двойки (А и В), отличающиеся только порядком включения транзисторов р-п-р и п-р-п типов. Коэффициент усиления каждой двойки  $k = 2,5$ . Выбранная схема обладает рядом важных достоинств:

1. Двойка имеет полосу пропускания свыше 400 Мгц (время нарастания выходного импульса  $\approx 1$  нсек), что достигается наличием межкаскадной отрицательной обратной связи через  $R_{oc}$  (рис. 3), внутрикаскадной обратной связи с частотной коррекцией ( $R_{э2}, C_3$ ), а также дополнительной коррекцией конденсаторами  $C_1$  и  $C_2$ .

2. Малое входное сопротивление первого каскада двойки может быть использовано для сложения сигналов от нескольких датчиков с достаточно хорошим качеством согласования и развязки входов.

3. Двойки А и В имеют примерно равный по величине и противоположный по знаку температурный коэффициент изменения выходного потенциала. Это обстоятельство позволяет найти ряд температурностабильных комбинаций последовательного включения различного числа двоек типов А и В.

Для пары усилитель-размножитель нами была принята следующая комбинация:



Температурные коэффициенты усилителя  $\Delta u$  и размножителя  $\Delta p$  равны:

$$\Delta y = \delta (k-1) \left[ \frac{\text{мВ}}{\text{°C}} \right], \quad (2)$$

$$\Delta p = -\delta \left( \frac{k}{n} + 1 \right) \left[ \frac{\text{мВ}}{\text{°C}} \right], \quad (3)$$

где  $\delta$  - модуль температурного коэффициента,  $k$  - коэффициент усиления отдельной двойки, а  $n$  - число выходов размножителя. Для коэффициента передачи размножителя, равного единице ( $n = k^2$ ), из условия наилучшей температурной стабильности ( $\Delta y + \Delta p = 0$ ), следует:

$$k = 1 + \sqrt{2} \approx 2,414,$$

$$n = k^2 \approx 6.$$

В таком варианте расположения двоек в усилителе и размножителе все двойки, кроме первой, работают на открывание для отрицательных входных импульсов.

На рис. 4 и 5 представлены принципиальные схемы усилителя с коэффициентом усиления 6 и размножителя на 6 каналов с коэффициентом передачи, близким к 1. Транзисторы первой двойки усилителя ( $T_1$  и  $T_2$  на рис. 4) работают на закрывание. Уровень ограничения выходных сигналов, определяемый током транзистора  $T_2$  и коэффициентом усиления второй двойки, установлен в соответствии с выбранной рабочей амплитудой схемы совпадений и равен 400 мВ (8 ма).

Малый ток транзистора  $T_4$  позволяет ограничить выбросы противоположной полярности.

### 3. Схема совпадений

В настоящей системе используются двух- и шестикратные схемы совпадений с диодным элементом отбора. Диодная схема с нелинейным сложением обладает рядом важных преимуществ: она не критична к качеству формирования входных сигналов по амплитуде, допускает большую кратность совпадений и обеспечивает достаточно высокую чувствительность аппаратуры.

На рис. 6 представлена принципиальная схема диодного элемента отбора с  $n$  входами. Коэффициент передачи входного сигнала ( $E_{вх}$ ) в общую точку диодов  $A$  близок к 1 в случае прихода сигналов одновременно на  $n$  входов. При этом величина суммарного тока через диоды должна быть равной:

$$i_0 \geq \frac{C E_{вх.}}{t_{и}}, \quad (4)$$

где  $t_{и}$  - длительность входного сигнала,  $C$  - паразитная емкость в точке  $A$ .

В том случае, если это неравенство нарушается (для больших сигналов  $E_{вх}$  или малых токов  $i_0$ ), амплитуда импульса  $U_n$  в точке  $A$  практически не зависит от величины  $E_{вх}$  и равна

$$U_n \approx \frac{i_0 t_{и}}{C}. \quad (5)$$

Когда сигналы приходят одновременно только на  $(n-1)$  входов, сигнал в точке  $A$  будет равен

$$U_{n-1} = \frac{n-1}{n} i_0 \tau + U_0 \ln n \quad (6)$$



(полагаем, что вольт-амперная характеристика диодов имеет вид

$$i_g = I_0 \left( e^{\frac{U}{U_0}} - 1 \right), \quad (7)$$

где  $I_0$ ,  $U_0$  - константы для данного диода,  $r$  - внутреннее сопротивление источника сигналов). Из выражения (7) следует, что величина  $U_{n-1}$  является суммой двух членов, один из которых ( $U_0 \ln n$ ) зависит только от типа диода и кратности совпадений, а второй пропорционален  $i_0$  и  $r$ . Поскольку величина общего тока диодов определяет коэффициент передачи сигнала в случае  $n$  - кратных совпадений, понижения уровня сигналов  $U_{n-1}$  можно достигнуть только уменьшением величины внутреннего сопротивления источника сигналов  $r$ . С этой точки зрения представляется разумным подавать сигналы на диодную схему совпадений через эмиттерные повторители, которые могут одновременно служить согласующими каскадами.

На рис. 7 представлена шестикратная схема совпадений с одним каналом антисовпадений.

Сигнал совпадений снимается с общей точки диодов через выходной усилитель с коэффициентом усиления 3 ( $T_9, T_{10}$ ). Инвертированный и усиленный в  $\approx 3$  раза с помощью усилительной двойки на транзисторах  $T_7, T_8$  импульс антисовпадений линейно складывается с импульсом совпадений в общей точке диодов. Схема имеет управление от внешнего импульса пропускания. Для этой цели служит ключ на транзисторе  $T_{11}$ .

На рис. 8а показана зависимость  $U_n$  и  $U_{n-1}$  от амплитуды входного сигнала для шестикратной схемы совпадений. Из рисунка видно, что чувствительность схемы совпадений 80 мВ ( $\approx 1,5$  ма), если рабочую амплитуду выбрать в области  $\approx 300-400$  мВ, что разумно, т.к. начиная с амплитуд  $\approx 300$  мВ при увеличении входной амплитуды происходит насыщение сигнала полных совпадений.

На рис. 8б показаны зависимости амплитуды выходного сигнала схемы совпадений от задержки сигналов совпадений и антисовпадений с амплитудой  $U_{\text{вх}} = 350$  мв. Характеристики получены на шумовых импульсах одиночного фотоумножителя с размножением сигнала.

#### 4. Смеситель

Смеситель используется для подключения нескольких датчиков антисовпадений к схеме совпадений, имеющей один канал антисовпадений, а также для расширения возможности различных логических включений. Схема показана на рис. 9. В качестве нелинейных элементов здесь используются обращенные германиевые диоды ( $D_1 + D_4$ ) со смещением, близким к 0. Для согласования входов используются эмиттерные повторители ( $T_1 + T_4$ ). На выходе смесителя включен усилитель на транзисторах  $T_5, T_6$ , охваченных обратной связью по напряжению. Температурный коэффициент не превышает  $1 \text{ мв}/^\circ\text{C}$  и имеет знак, противоположный знаку усилителя канала антисовпадений, с которым обычно соединен, так что общий температурный коэффициент этих двух схем не превышает  $\pm 0,5 \text{ мв}/^\circ\text{C}$ .

### III . Конструктивное оформление

Все блоки системы, кроме стандартизатора, который расположен в кожухе ФЭУ, оформлены как блоки стандартной стойки с размером по передней панели  $160 \times 80$  мм. Детали размещены на платах с двухсторонним монтажом. Блоки двойных схем совпадений, усилителей и смесителей выполнены сдвоенными. В блоках, где имеется соединение нескольких каналов в одной точке, применен кольцевой монтаж, дающий возможность компактного размещения деталей и сведения к минимуму

паразитных индуктивностей и емкостей. В качестве примера такого монтажа на рис. 10 приведена фотография размножителя.

Все соединения между блоками осуществлены кабелями РК-50-2-13 через высокочастотные разъемы ВР-73, установленные на передней панели. Все блоки запитаны от источников питания напряжением  $+ 6$  в, что ведет к уменьшению потребляемой мощности и к повышению надежности аппаратуры.

#### IV. Обсуждение результатов

Описанная в данной работе аппаратура представляет набор основных блоков, необходимых для комплектации быстрых счетных систем. Подобные системы характеризуются следующими основными параметрами:

- 1) чувствительностью,
- 2) динамическим диапазоном входных амплитуд,
- 3) разрешающим временем,
- 4) мертвым временем,
- 5) относительной эффективностью в связанном режиме.

Как было показано в разделе III .3, чувствительность схемы совпадений составляет 2 ма, что при коэффициенте усиления 5,5-6 соответствует уровню входного тока усилителя 0,4 ма. Согласно амплитудной характеристике формирователя (рис. 2) импульс тока ФЭУ при этом равен 1 ма, что при использовании современных быстрых фотоумножителей обеспечивает работу от импульса, соответствующего выбиванию 1 фотоэлектрона с фотокатода с высокой эффективностью. Из этой же характеристики видно, что динамический диапазон входных сигналов, поступающих от ФЭУ, может быть не менее 1:250.

Разрешающее время аппаратуры определяется длительностью импульсов, поступающих на вход схемы совпадений, которую можно изме-

нять, меняя длину короткозамкнутого кабеля на выходе формирователя ( $L_{\phi}$ ). Очевидно, что уменьшение длительности входных импульсов повлечет за собой уменьшение амплитуды сигнала полных совпадений  $U_n$ , в то время как величина  $U_{n-1}$  будет меняться слабо. Кривая зависимости отношения  $\frac{U_n}{U_{n-1}}$  от длины формирующего кабеля для шестикратной схемы совпадений приведена на рис. 11. Кривая снята для длин формирующего кабеля от 8 до 20 нсек. При длине  $\approx 2$  нсек импульс имеет треугольную форму, и длительность его не меняется с уменьшением длины формирующего кабеля. Следовательно, минимальное разрешающее время системы составляет  $\approx 2$  нсек. При выбранной системе формирования импульсов ФЭУ и при наличии большого динамического диапазона входных импульсов центр тяжести сформированного импульса имеет временной сдвиг, определяемый фронтом входного сигнала и равный  $\approx (1+1,5)$  нсек, что также ограничивает разрешающее время. С учетом этого обстоятельства длина формирующей линии была выбрана равной 4 нсек.

На рис. 12 (а,б,в) приведены осциллограммы импульсов на выходе стандартизатора после прохождения их через кабель длиной 20 м для импульсов тока умножителя а) 2 ма; б) 20 ма; в) 200 ма.

На рис. 13 (а,б,в) приведены эти же осциллограммы для случая, когда импульсы проходят через кабель длиной 1 м. Выброс, имеющийся на переднем фронте импульса, показанного на рис. 13, полезен для коррекции затухания высокочастотных составляющих спектра сигнала при передаче его по длинному кабелю.

На рис. 14 (а,б,в) даны осциллограммы импульсов на выходе усилителя, размножителя и смесителя при последовательном соединении этих блоков и подаче на вход усилителя сигнала от формирователя через кабель длиной 20 м.

На рис. 15 (а,б,в) приведены аналогичные осциллограммы для случая поступления на вход усилителя пары импульсов с интервалом 8 нсек.

Осциллограммы показывают, что эти блоки, по-видимому, не обладают собственным мертвым временем. Собственным мертвым временем в системе обладает стандартизатор из-за запаздывания момента открывания диода  $D_2$  относительно момента закрывания диода  $D_1$  (рис. 1) на спаде импульса тока ФЭУ. При этом мертвое время не превышает 3 нсек. Схемы были испытаны в связанном режиме для получения высокой относительной эффективности аппаратуры. При установлении порога в мониторирующей схеме, обеспечивающей 80% абсолютной эффективности, относительная эффективность связанной схемы в широком диапазоне порогов равна 1 с точностью  $(10^{-6} + 10^{-7})$ . Этот результат был получен для однофотозлектронных импульсов в случае как черенковских, так и сцинтилляционных вспышек. Система была испытана на пучке пионов синхрофазотрона с черенковскими датчиками сигнала. Полученные временные и пороговые характеристики не отличаются от характеристик, полученных в режиме самосовпадений. Для иллюстрации на рис. 16 приведена зависимость счета шестикратных совпадений от порога дискриминатора датчиков со средним числом фотоэлектронов  $< 1$ .

Система, состоящая из 20 усилителей, 20 множителей, 16 схем совпадений и 8 смесителей эксплуатировалась на пучке синхрофазотрона в течение года. Исследования подтвердили все выше приведенные параметры при высокой надежности и стабильности аппаратуры.

В заключение считаем своим приятным долгом поблагодарить В.А. Свиридова, И.А. Голутвина, Л. Ондриша, А.П. Сергеева, С.Н. Пляшкевича, В.Г. Перевозчикова за помощь в работе.

## Л и т е р а т у р а

1. M.Goyot, J.-J. Samuele, A.Sarazin. Nucl.Instr.Meth., 46, N1, 149-152 1967.
2. Charles J.Rush. Rev.Sci.Instr., 35, 2, 149-156 (1964).
3. Ю.Б. Бушнин, А.Ф. Дунайцев, В.А. Сенько. Унифицированная система функциональных модулей логической электроники с максимальной скоростью счета 100 Мгц. Препринт ИФВЭ, СЭФ 67-36-К, 1967.
4. А.С. Вовенко, Б.А. Кулаков, М.Ф. Лихачев, Ю.А. Матуленко, И.А.Савин, В.С. Ставинский. Газовые черенковские счетчики. УФН, т. LXXXI, вып. 3 (1963).

Рукопись поступила в издательский отдел  
15 января 1970 года.

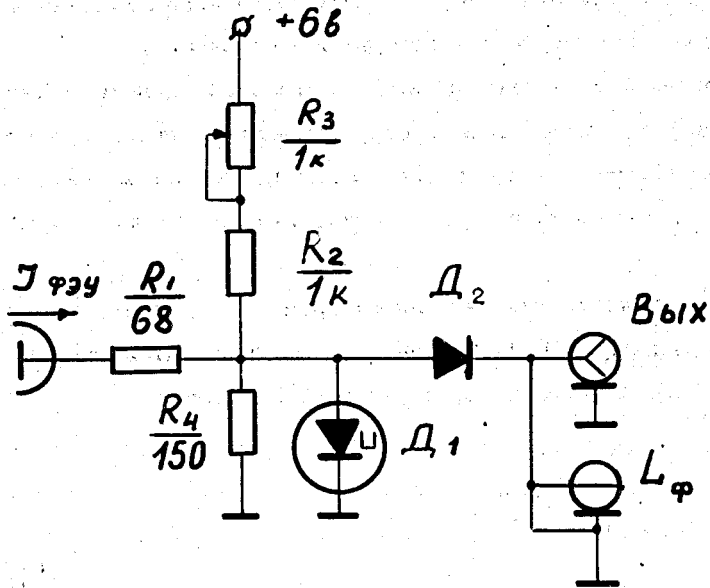


Рис.1. Принципиальная схема формирователя импульсов тока ФЭУ.

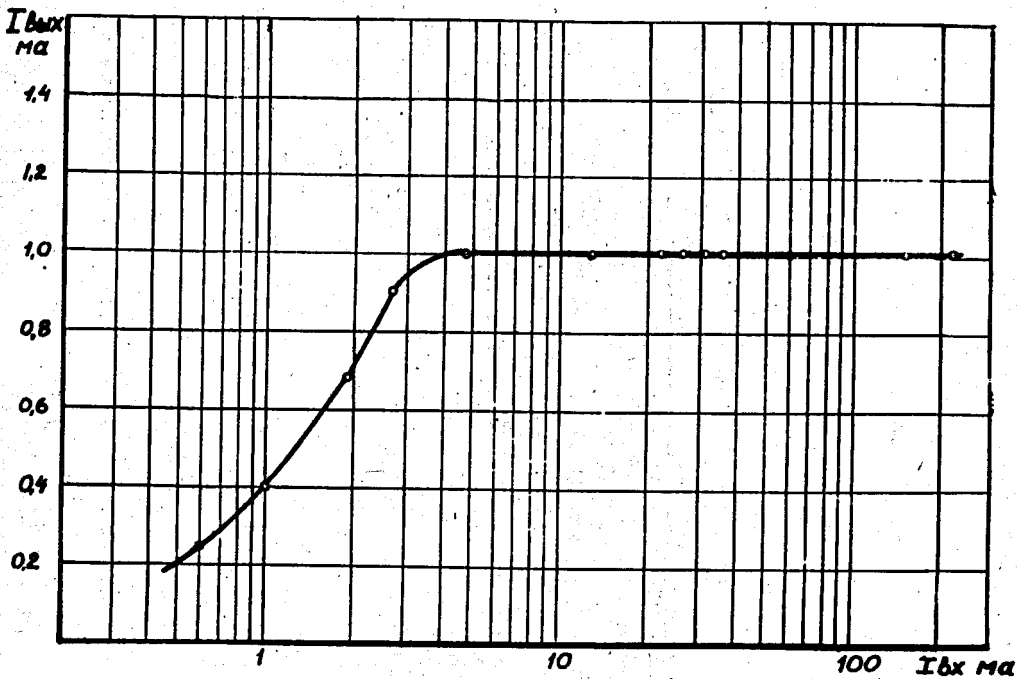


Рис.2. Зависимость выходной амплитуды формирователя от амплитуды импульса тока ФЭУ.

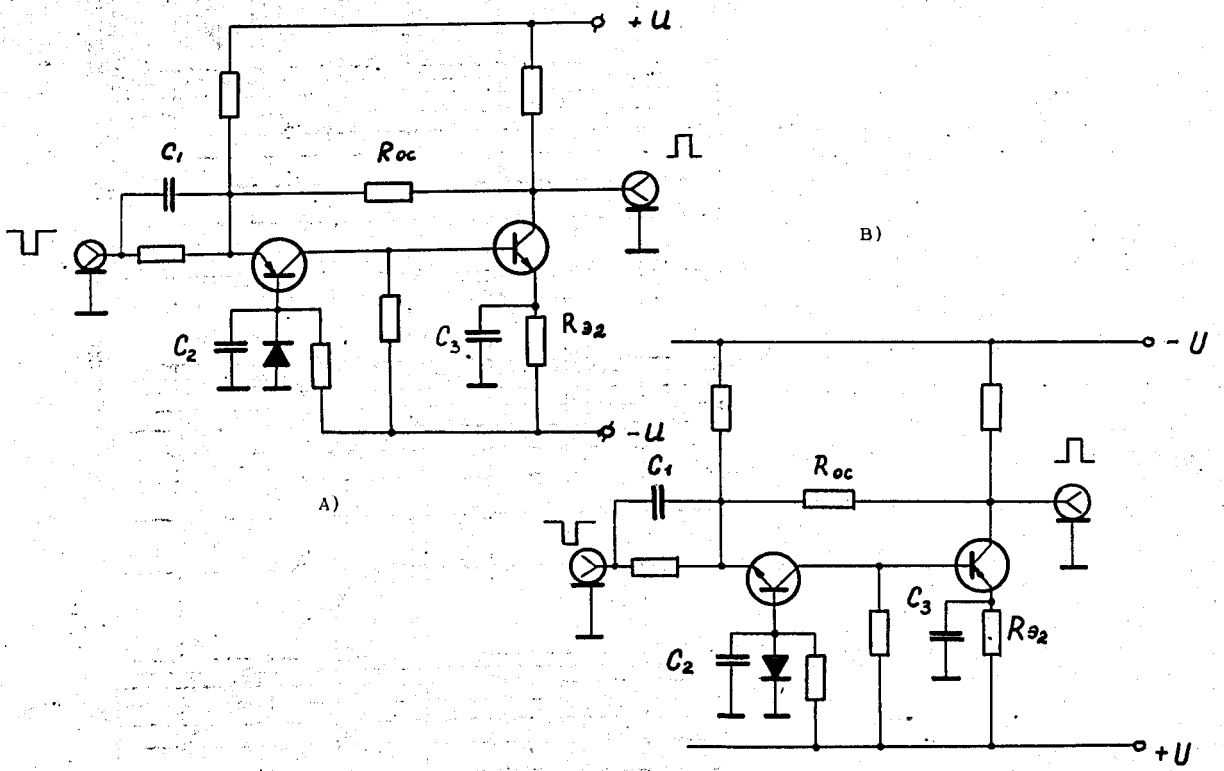


Рис.3. Принципиальные схемы усилительных двоек типов А и В.

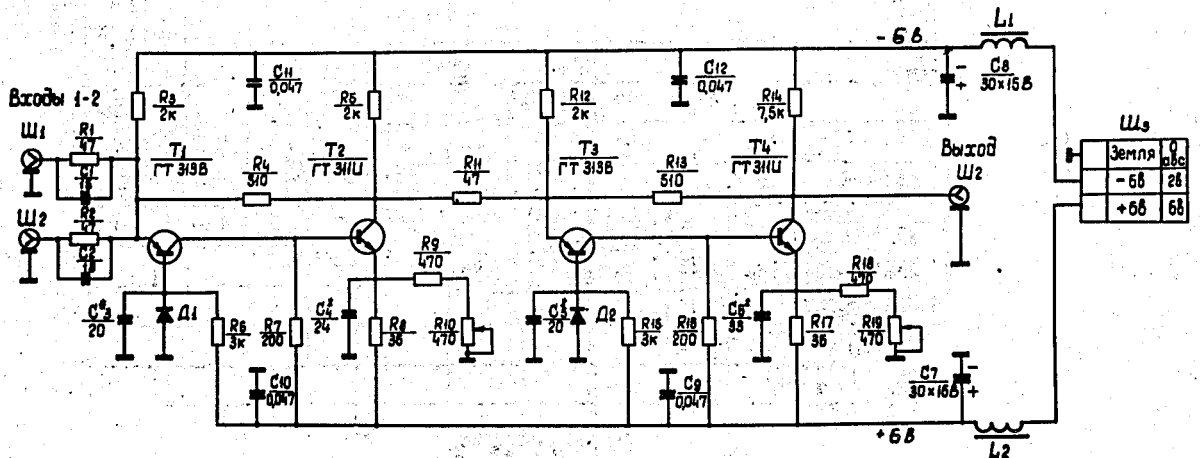


Рис.4. Принципиальная схема усилителя.



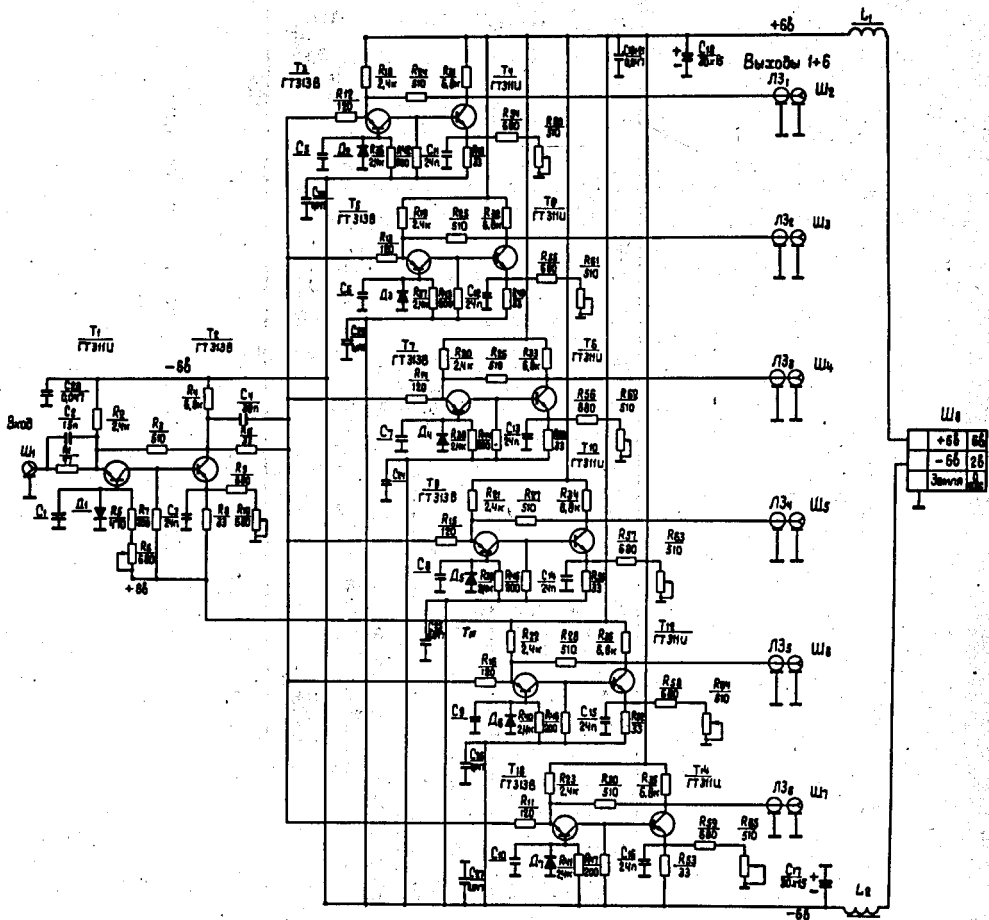


Рис.5. Принципиальная схема размножителя.

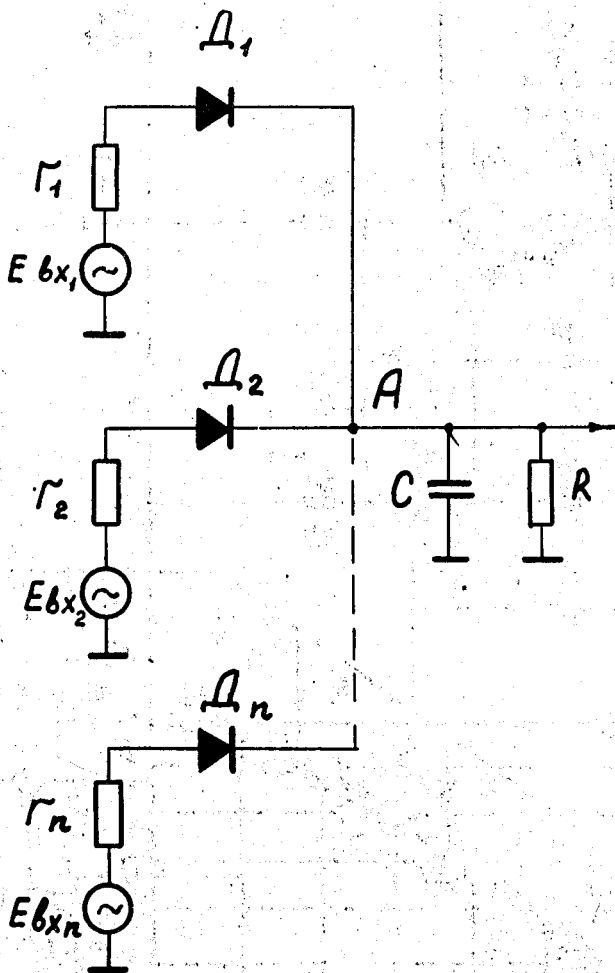


Рис.6. Принципиальная схема диодного элемента отбора с  $n$  входами.

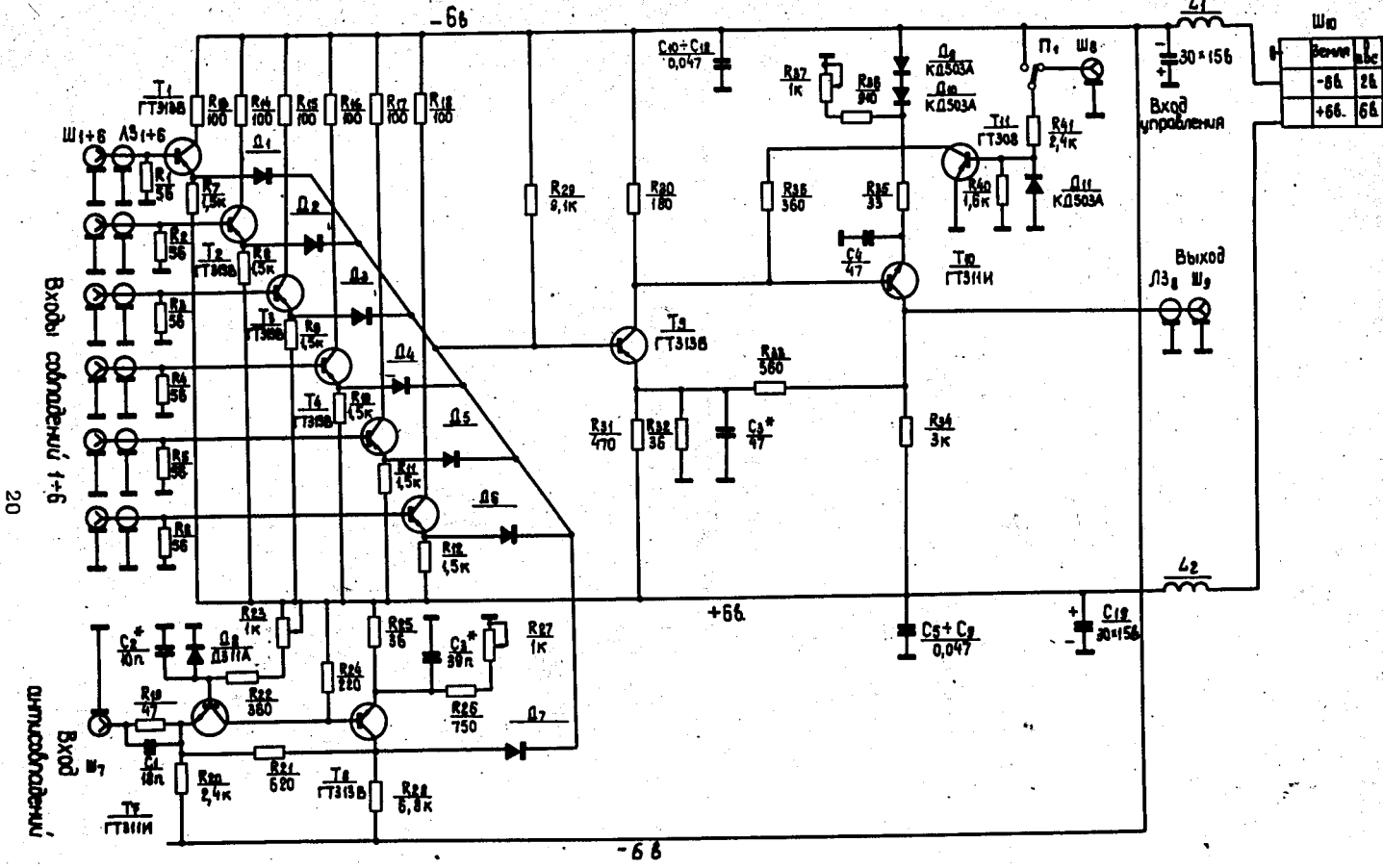
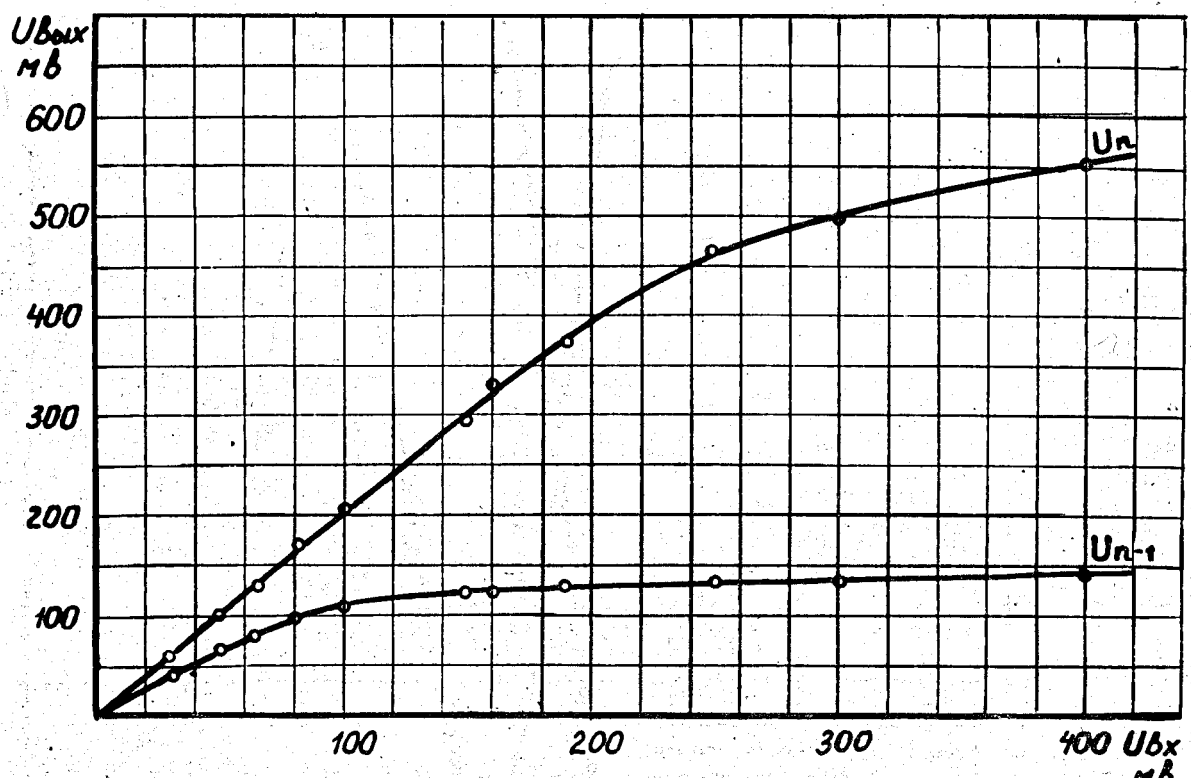


Рис.7. Принципиальная схема шестикратной схемы совпадений с одним каналом антисовпадений.





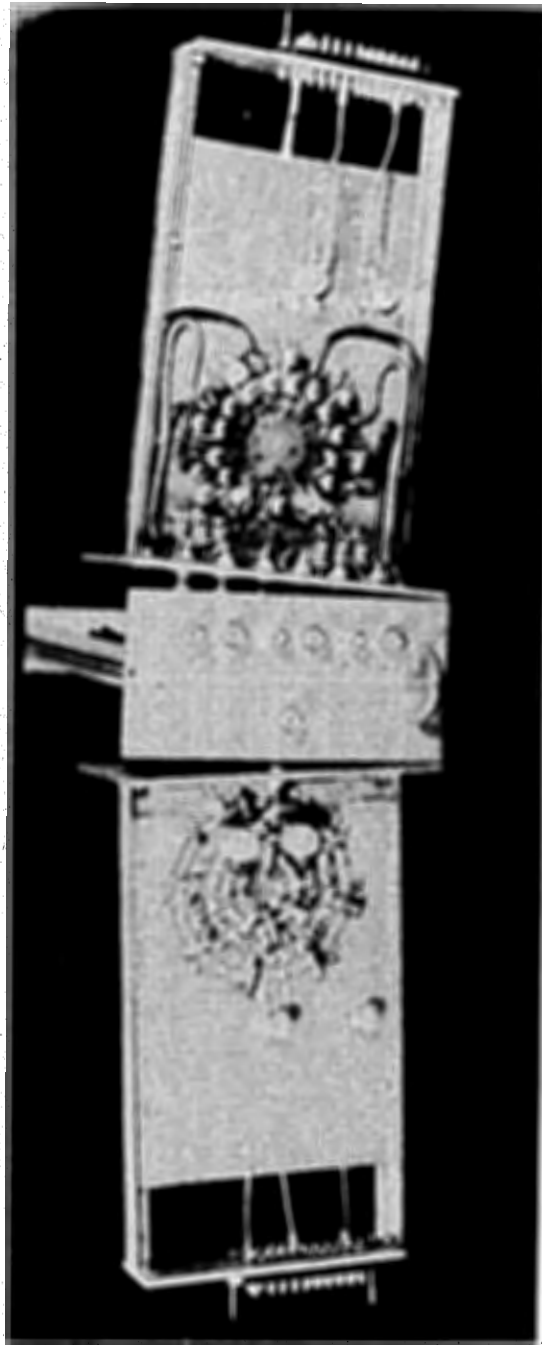


Рис.10. Внешний вид блока размножителя.

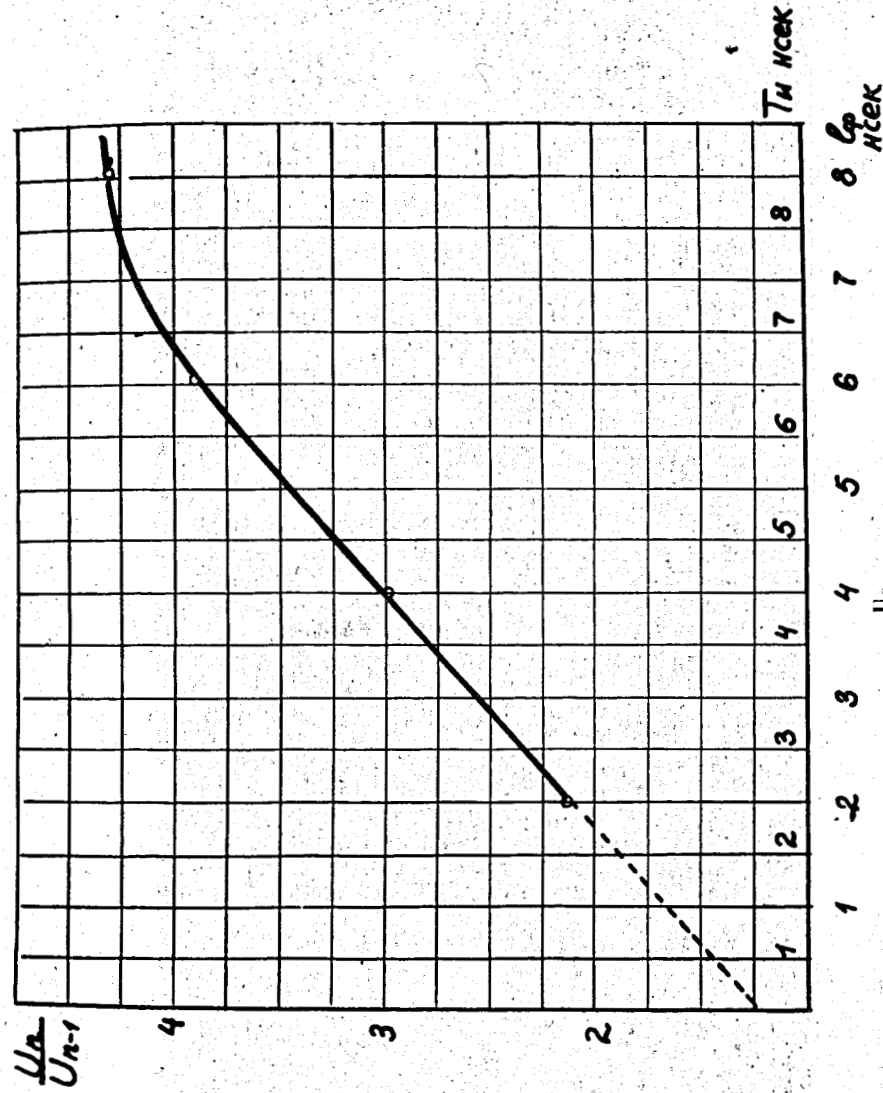


Рис.11. Зависимость отношения  $\frac{U_n}{U_{n-1}}$  от длины формирующего кабеля в формирователе для шестикратной схемы совпадений.

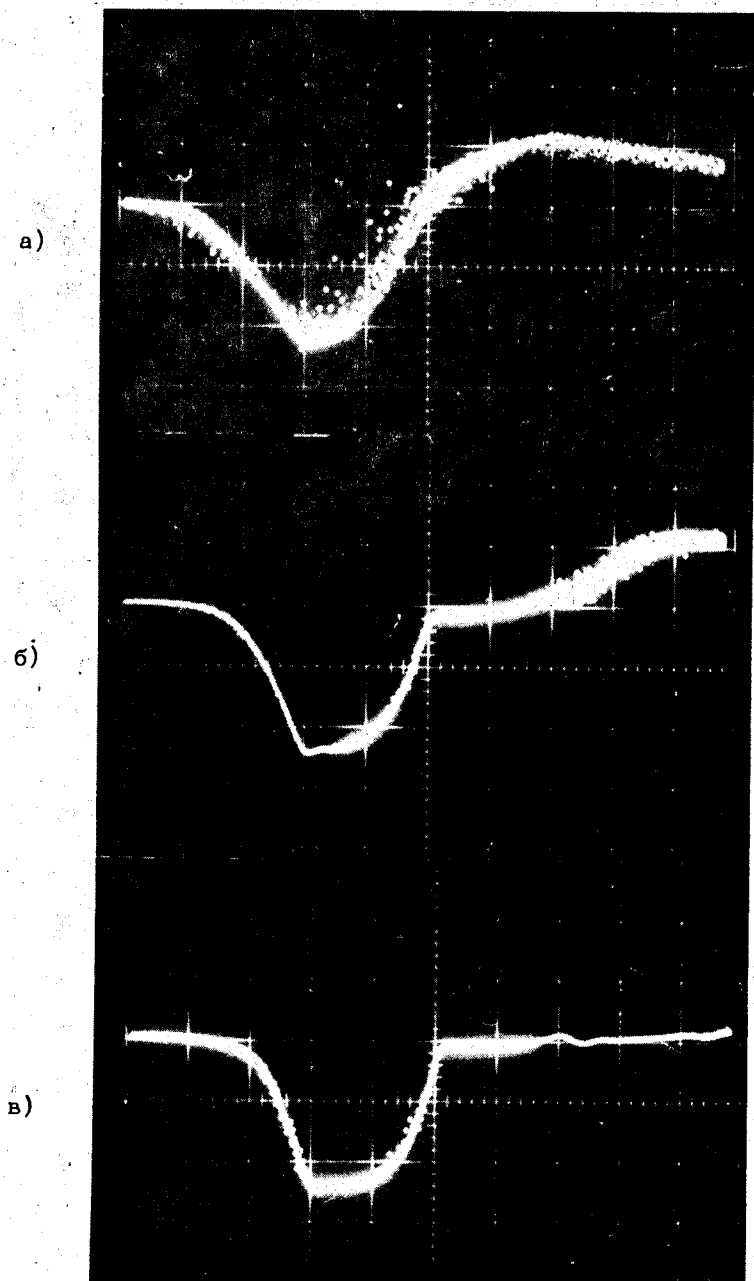


Рис.12. Осциллограммы импульсов на выходе формирователя при прохождении их через кабель длиной 20 м для импульсов тока умножителя а) 2 ма, б) 20 ма, в) 200 ма (20 мв/дел, 2 нсек/дел).

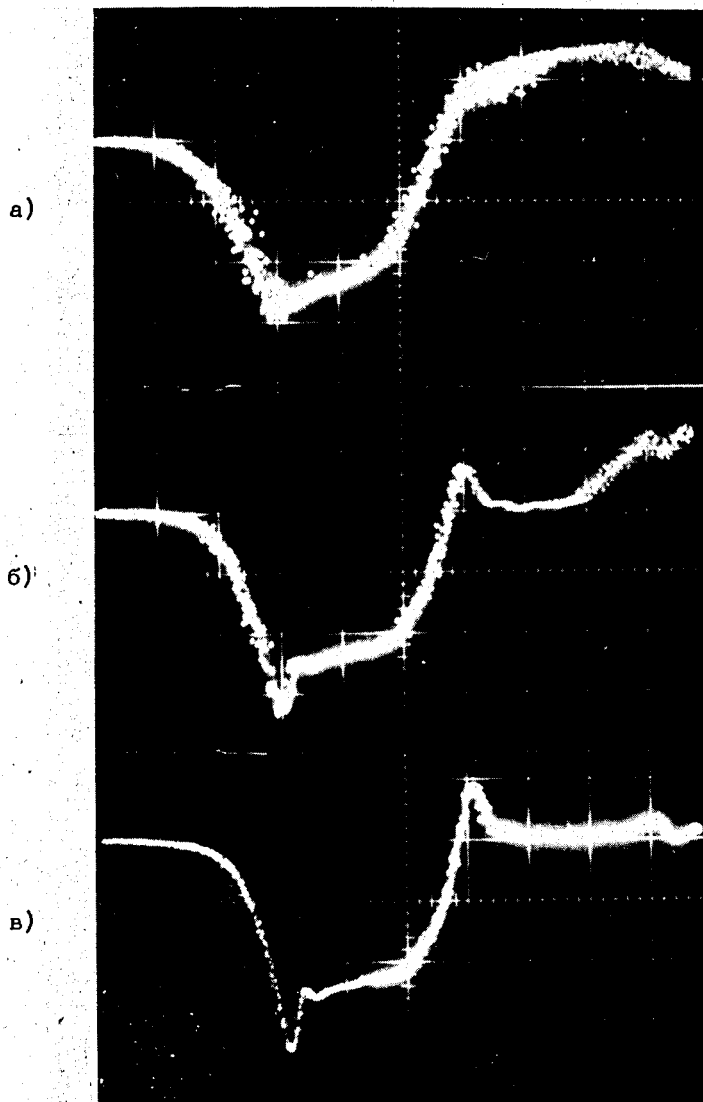


Рис.13. Осциллограммы импульсов на выходе формирователя, прошедших через кабель длиной 1 м, для амплитуд тока входных сигналов а) 2 ма, б) 20 ма, в) 200 ма (20 мв/дел, 2 нсек/дел).

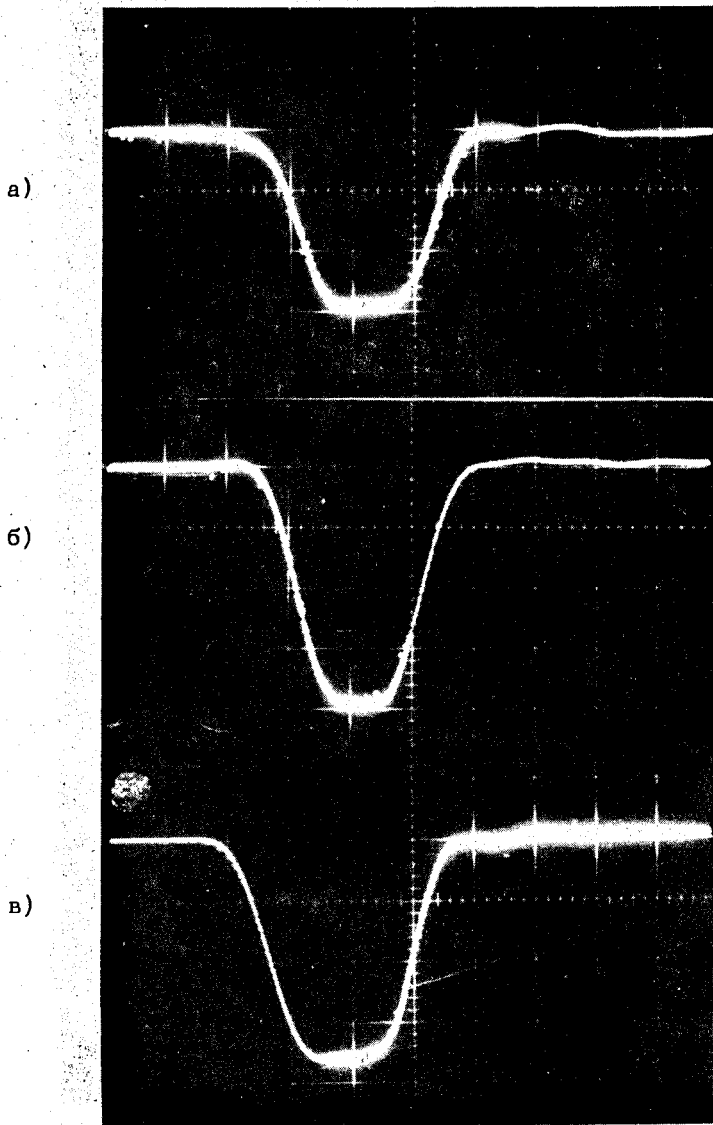


Рис.14. Осциллограммы импульсов на выходе блоков при последовательном включении а) усилителя, б) размножителя, в) смесителя, (200 мв/см, 2 нсек/дел).



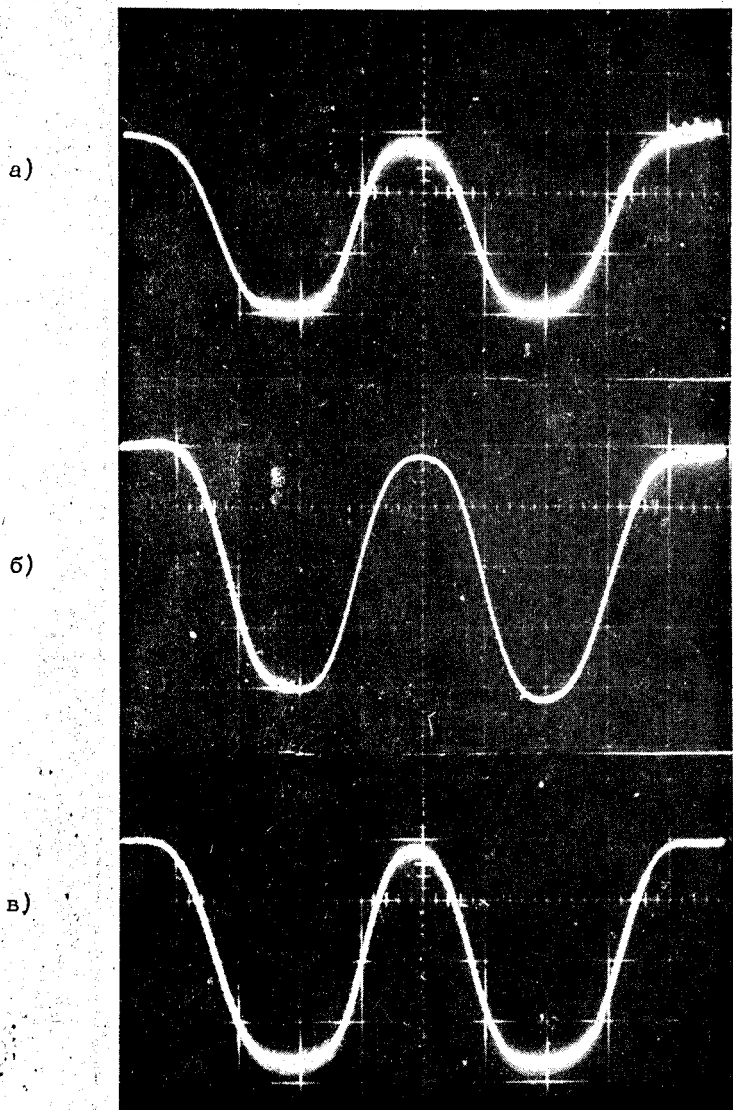


Рис.15. Осциллограммы выходных импульсов при подаче на вход усилителя пары импульсов с интервалом 8 нсек для различных блоков: а) усилителя, б) размножителя, в) смесителя (200 мв/дел, 2 нсек/дел).

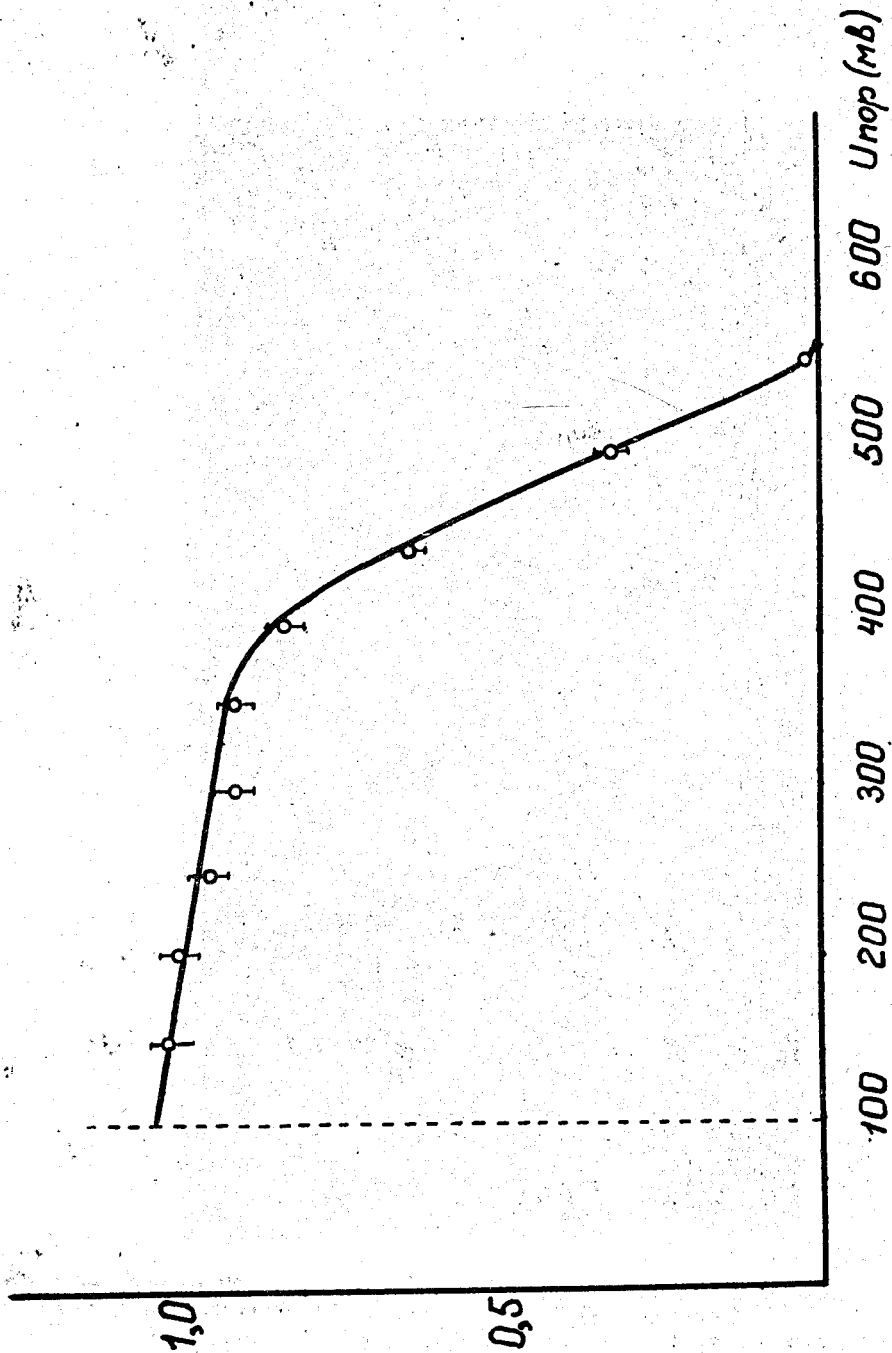


Рис.16. Зависимость счета шестерных совпадений от порога дискриминаторов для датчиков со средним числом фотоэлектронов  $< 1$ .