

3095

Экс. Чит. Зала

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 3095



ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

В.Г. Горбенко, В.И. Лапшин, В.И. Рыкалин,  
З. Цисек, В.П. Хромов

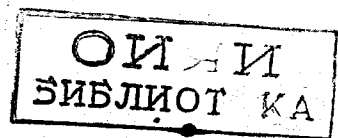
ЗАГРУЗОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

1967.

13 - 3095

В.Г. Горбенко, В.И. Лапшин, В.И. Рыкалин,  
З. Цисек, В.П. Хромов

ЗАГРУЗОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ



Интенсивности пучков ядерных частиц, которые регистрируются сцинтилляционными и черенковскими счетчиками, обычно не превышают  $10^5 - 10^8$  част/сек. Однако для мониторингования первичных пучков, выведенных из ускорителей, представляет интерес определение предельных интенсивностей потоков частиц, которые можно регистрировать счетчиками.

В условиях очень больших загрузок при регистрации пучков частиц счетчики работают также в непосредственной близости от места вывода пучков из ускорительной камеры. В этом случае основной вклад в загрузку счетчиков часто вносит радиационный фон, возникающий при работе ускорителя.

Изучение предельных нагрузочных характеристик представляет интерес и в связи с проектами создания так называемых "мезонных фабрик", т.е. ускорителей с энергиями до 1 Гэв и интенсивностями пучков протонов и мезонов, на несколько порядков превышающими существующие в настоящее время.

Условия работы счетчиков на различных ускорителях весьма различны. Так, длительность "плевков" различных пульсирующих ускорителей лежит в пределах от единиц микросекунд (линейные ускорители) до сотен миллисекунд (ускорители на энергию более 10 Гэв), частоты повторения их лежат в диапазоне от сотен герц у линейных ускорителей и синхротронов до десятых долей герца в ускорителях на энергии более 10 Гэв.

При малых временных интервалах между моментами прохождения частиц реакция сцинтилляционных и черенковских счетчиков определяется, в основном, характеристиками фотоумножителей. Поэтому изучение поведения счетчиков при различных нагрузках можно свести к исследованиям частотных характеристик фотоумножителей при освещении фотокатодов сериями световых импульсов. Для более полного моделирования условий работы счетчиков на различных ускорителях необходимо, чтобы частота повторения серий и частота повторения импульсов

соответствовали частотам "плевков" и интенсивностям потоков частиц в "плевках" на различных ускорителях.

В опубликованных работах приводятся результаты исследований частотных характеристик как при работе ФЭУ от серий световых импульсов, так и при работе от светового потока, модулированного различными частотами с определенной глубиной модуляции /1-4/. Для изучения поведения сцинтилляционных (с быстрыми сцинтилляторами) и черенковских счетчиков при больших нагрузках необходимо исследовать частотные характеристики ФЭУ при длительности отдельных световых импульсов в серии не более 1-4 нсек. Частотные характеристики фотоумножителей при работе от серии световых импульсов непосредственно связаны с длительностью одного импульса на выходе фотоумножителя.

Если фотоумножитель работает в линейной области, то предыдущие импульсы на выходе ФЭУ не влияют на последующие, и при сближении парных световых импульсов происходит простое сложение отдельных импульсов на выходе ФЭУ /5/. Поэтому, зная реакцию ФЭУ на отдельный световой импульс, можно рассчитать реакцию ФЭУ на серию световых импульсов. Отметим снова, что при этом предполагается работа ФЭУ в линейной области и независимость характеристики ФЭУ от предыстории.

Длительность импульса на выходе ФЭУ при коротком (1-2 нсек) импульсе света, в свою очередь, определяется разбросом времени пролета в промежутках фотокатод-первый диод, диодных промежутках, временем собирания электронов на анод и затягиванием импульса анодной емкостью ФЭУ.

При увеличении частоты световых импульсов отдельные импульсы ФЭУ начинают перекрываться, появляется постоянная составляющая и одновременно падает амплитуда переменной составляющей. Частотную характеристику фотоумножителя можно определить как зависимость переменной составляющей от частоты.

Необходимо различать частотные характеристики при короткой серии световых импульсов, когда усталость диодов не играет роли, и частотные характеристики при длинной серии, когда может проявиться усталость диодов. В обоих случаях предполагается, что на последние 4-8 диодных промежутков напряжение подается с источников напряжения с низким выходным сопротивлением.

В данной работе описан генератор серий световых импульсов, позволяющий моделировать условия работы счетчиков при больших нагрузках, рассмотрена ме-

тодика измерения частотных характеристик ФЭУ и приведены результаты измерений частотных характеристик ФЭУ в диапазоне частот повторений световых импульсов 2–200 Мгц.

### Генератор серии световых импульсов

Для изучения частотных характеристик фотоумножителей используется несколько типов генераторов световых сигналов с большой частотой повторения.

Электронно-лучевые трубки, отпираемые по модулятору<sup>/3/</sup>, позволяют получать серии световых импульсов с частотой повторения в серии до 10–20 Мгц. Длительность светового импульса определяется временем послесвечения экрана и составляет 30–40 нсек. В ряде работ описаны генераторы световых сигналов синусоидальной формы с частотами повторения до 100 и более Мгц<sup>/4/</sup>.

Длительность световых импульсов, регистрируемых фотоумножителями в сцинтилляционных (с быстрыми сцинтилляторами) и черенковских счетчиках не превышает 1–4 нсек, поэтому известные методы получения световых импульсов с большой частотой повторения не позволяют моделировать работу счетчиков при больших нагрузках. Только недавно появились сообщения о разработке генераторов световых импульсов с частотой повторения свыше 100 Мгц на основе использования газовых лазеров<sup>/6/</sup>. Однако такие генераторы сложны в устройстве, критичны к настройке, а сам излучатель – разрядная трубка лазера, имеет большие размеры. Авторами был разработан генератор серии световых импульсов, позволяющий достаточно полно моделировать работу ФЭУ в счетчиках при больших нагрузках. Блок-схема генератора световых импульсов представлена на рис. 1. Принципиальная схема генератора серии электрических импульсов представлена на рис. 2.

Импульс с запускающего генератора подавался на вход одновибратора<sup>/7/</sup>, выполненного на транзисторе  $T_1$  и туннельном диоде  $ТД_1$ . Подобный одновибратор позволял получать прямоугольные импульсы с фронтами не более 20 нсек и длительностью от 100 нсек до 100 и более мсек. Регулировка длительности осуществлялась ступенями с помощью переключателя  $П_1$  и плавно с помощью потенциометра  $R_1$ . Выходной импульс одновибратора дифференцировался и запускал триггер на туннельном диоде  $ТД_2$ . Через транзистор  $T_2$  импульсы с триггера с фронтами 2–3 нсек подавались на одновибратор на туннельном диоде  $ТД_3$ .

нагруженный на разомкнутый коаксиальный кабель. До прихода импульса с триггера одновибратор находился в огрубленном состоянии. Импульс с триггера "очувствлял" одновибратор и вызывал срабатывание его от переднего фронта за счет паразитных емкостей схемы. Отражения от разомкнутого конца коаксиального кабеля вызывали непрерывную генерацию одновибратора на туннельном диоде ТД<sub>3</sub>. Длительность серии импульсов определялась выдержкой одновибратора Т<sub>1</sub> - ТД<sub>1</sub>. Частота повторения импульсов в серии  $f_u = 1/2 T$ , где T - электрическая длина коаксиального кабеля.

Импульсы с одновибратора ТД<sub>3</sub> усиливались и формировались одновибратором на туннельном диоде ТД<sub>4</sub> с пиковым током 10 ма и через каскад с общей базой на транзисторе Т<sub>3</sub> поступали на выход.

Короткозамкнутый кабель служил для получения на выходе схемы двуполярных импульсов, что необходимо для устранения перегрузки последующего усилителя.

Частота повторения импульсов внутри серии регулировалась в пределах от 2 до 200 Мгц. Их осциллограммы на выходе генератора серии, снятые при различных частотах повторения, приводятся на рис. 3. Переход от одной частоты к другой не требует никаких дополнительных регулировок. Амплитуда импульсов на выходе генератора и их форма оставались постоянными на всех частотах.

Импульсы генератора серии электрических импульсов подавались на вход широкополосного усилителя УЗ-11. С выхода усилителя двуполярные импульсы, амплитуда которых достигала 20 в, подавались на электролюминесцентный диод из фосфида галлия. Схема подключения диода приводится на рис. 4. На электролюминесцентный диод Д подавалось постоянное смещение в обратном направлении на несколько вольт ниже напряжения пробоя. Наличие смещения значительно увеличивает световой выход от импульсов обратной полярности. При прямой относительно электролюминесцентного диода полярности импульсов смещение на нем остается обратным благодаря наличию шунтирующего диода Д<sub>18</sub>. Таким образом, световой диод работал только в обратном направлении, что обеспечивало получение коротких световых импульсов.

## Исследование характеристик генератора серии световых импульсов

При исследовании характеристик генератора серии световых импульсов использовалась установка, блок-схема которой изображена на рис. 5. Генератор запуска имел частоты повторения 100, 50 и 1/7 гц, что соответствовало частотам посылок некоторых существующих в СССР ускорителей элементарных частиц.

Импульсы с генератора запуска подавались одновременно на генератор серии электрических импульсов 2а и блок задержки 2б. Генератор запуска, генератор серии электрических импульсов и генератор задержки были объединены в одном приборе.

Серия электрических импульсов усиливалась усилителем 3 и подавалась на электролюминесцентный диод 4. С выхода фотоумножителя 5 импульсы поступали на отклоняющую систему осциллографа 6 с полосой пропускания 1000 Мгц. Развертка осциллографа запускалась выходным импульсом блока задержки. Задержка могла изменяться ступенями и плавно в диапазоне от 100 нсек до 100 мсек. Принципиальная схема блока задержки выполнена на основе одновибратора, полностью аналогично одновибратору  $T_1 - ТД_1$ .

В работе использовался фотоумножитель типа SKP-1 /8-9/ с управлением по сетке, помещенной между катодом и первым диодом. Открывание этого фотоумножителя осуществлялось генератором прямоугольных импульсов 7, запускаемым от блока задержки.

Наличие задержанного запуска устройств, регистрирующих световые сигналы, обеспечивало возможность исследования формы и амплитуды световых сигналов на быстрой развертке осциллографа в любой части световой серии.

Длительность импульса открывания ФЭУ не превышала 2 мсек, поэтому практически исключалось влияние длительности серии световых импульсов и частоты импульсов в серии на результаты измерений.

С помощью этой методики было установлено, что при длительности серии до 5 мсек амплитуда и форма световых импульсов оставались постоянными. При длительности серии 100 мсек уменьшение амплитуды световых импульсов не превышало 30%.

На рис. 6 приведены осциллограммы световых импульсов, снятые с помощью фотоумножителя 56- AVP при различных частотах повторения в серии. Длительность световых импульсов в серии при частоте повторения более 30 Мгц не превышает 3 нсек по основанию. Это видно из сравнения осциллограммы от-

дельного импульса серии, представленной на рис. 7 и осциллограммы светового импульса от СаР диода, приведенной в работе /2/. Длительность светового импульса, измеренная в этой работе с помощью "одноэлектронного" метода, составляла не более 3 нсек по основанию. Отдельный световой импульс серии выбивал из фотокатода ФЭУ типа 56-АУР приблизительно 60 фотоэлектронов при чувствительности фотокатода 40 мка/лм.

При частотах повторения электрических импульсов, больших чем 60 Мгц, форма импульсов на выходе усилителя начинает зависеть от частоты, так как временные интервалы между соседними двуполярными импульсами становятся сравнимыми со временем установления усилителя ( $\tau = 4$  нсек для УЗ-11). Изменение формы электрических импульсов приводит к изменению формы и длительности световых импульсов. Как показывают измерения, длительность светового импульса не превышает 3 нсек, в то же время собственные фронты исследуемых фотоумножителей составляют более 1,6 нсек для переднего и более 2 нсек для заднего. Поэтому изменение формы светового импульса приводит, в основном, к изменению амплитуды импульсов на выходе фотоумножителя. Следствием этого является искажение частотной характеристики фотоумножителя.

Рассмотрим способ измерения частотных характеристик фотоумножителей, исключая влияние измерения формы световых импульсов в зависимости от частоты электрических импульсов. Способ основан на суммировании на фотокатоде двух серий световых импульсов с одинаковой частотой следования импульсов, но сдвинутых по фазе на  $180^\circ$ . Для получения двух серий световых импульсов используются оба выхода широкополосного усилителя и два источника света из СаР. Изменением задержки между сериями электрических импульсов световые импульсы сдвигаются по фазе на  $180^\circ$ . При одинаковых амплитудах световых импульсов от обоих источников включение второго источника эквивалентно удвоению частоты, причем форма и длительность светового импульса изменяются незначительно. Этим способом зависимость амплитуды импульсов фотоумножителей от частоты определяется в точках  $f$  и  $2f$ . Для измерения значения в точке  $4f$  частота следования электрических импульсов удваивается, т.е.  $f' = 2f$ . В точке  $f' = 2f$  при работе каждого источника путем изменения электрического импульса, поступающего на источник, выходные импульсы фотоумножителя в этой точке уравниваются с импульсами в точке  $2f$  (при работе от двух



источников). При удвоении частоты  $f'$ , т.е. при включении второго источника, измеряется точка  $2f' = 4f$ . Таким образом, все измеряемые пары точек  $f', 2f$  и  $f', 2f'$  оказываются "сшитыми".

Описанный способ позволяет получить с помощью генератора серии частоты повторения световых импульсов до 400 Мгц.

### Результаты измерений частотных характеристик фотоумножителей

Частотные характеристики фотоумножителей исследовались с помощью установки, блок-схема которой приведена на рис. 8. Развертка осциллографа запускалась от блока задержки, что позволяло изучать поведение фотоумножителя на всей длительности серии световых импульсов. Исследования фотоумножителей проводились в трех режимах.

1. При длительности серий световых импульсов 1,0 мсек и частоте повторения серий 100 гц. Частота повторения световых импульсов менялась в пределах 2-100 Мгц. Такой режим работы генератора серий световых импульсов моделировал условия работы счетчиков на синхротроне Объединенного института ядерных исследований.

2. При длительности серий световых импульсов  $t_0 = 0,1$  сек и частоте повторения 1/7 гц. Максимальная частота повторения в серии составляла 100 Мгц. В таком режиме моделировались условия работы на синхрофазотроне ОИЯИ и строящемся ускорителе на 70 Гэв Института физики высоких энергий.

3. При длительности серий световых импульсов  $t_0 = 1$  мсек и частоте повторения 100 гц. Максимальная частота повторения импульсов в серии могла достигать 300-400 Мгц. В этом режиме определялась предельная частота повторения, при которой с помощью данного типа фотоумножителя можно регистрировать (считать) каждый импульс.

Для всех фотоумножителей были проведены измерения, при которых исключалась зависимость частотных характеристик от величины сопротивлений делителей и шунтирующих диодные промежутки емкостей. Измерения проводились при запитывании нескольких последних диодных промежутков от отдельных стабилизаторов с допустимыми токами нагрузки до 500 ма. Подобные измерения особенно необходимы при длительности серии световых импульсов до 0,1 сек и

больших частотах повторения внутри серии. В таких условиях изменение напряжения на диодных промежутках за счет разряда шунтирующих емкостей и усталость диодов могут одновременно влиять на величину амплитуды импульсов от фотоумножителей. Запитывание диодных промежутков от отдельных стабилизаторов позволяет разделить оба эффекта.

Токи через делители фотоумножителей в установках, содержащих несколько десятков счетчиков, обычно не превышают 2-3 ма, поэтому особый практический интерес имеют характеристики фотоумножителей при таких токах.

Подбор делителей фотоумножителей осуществлялся при постоянном токе через делитель ( $I = \text{const}$ ) и при постоянном напряжении на делителях ( $E = \text{const}$ ). В первом случае делителя подключались к стабилизатору тока, во втором - к стабилизатору напряжения. Исследовались характеристики пяти типов фотоумножителей: ФЭУ-30, ФЭУ-36, ФЭУ-72, 56-AVP, XP1020.

#### Фотоумножитель 56 AVP

Фотоумножители этого типа широко используются в спинтилляционных и черенковских счетчиках в экспериментах на различных ускорителях. Для фотоумножителей 56-AVP в ЦЕРН<sup>е</sup> был разработан стандартный делитель, показанный на рис. 9. В работах <sup>11,12/</sup>, выполненных на синхроциклотроне, во всех черенковских и спинтилляционных счетчиках использовались фотоумножители этого типа. Интенсивности пучков частиц, регистрируемые счетчиками, в указанных работах достигали  $3 \cdot 10^5$  част/сек, что соответствует интенсивности в импульсе от синхроциклотрона  $= 2 \cdot 10^6$  ч/сек.

С делителем, приведенным на рис. 9, были измерены частотные характеристики фотоумножителей до частоты 100 Мгц для пяти экземпляров фотоумножителей. При длительности серий световых импульсов в 1 мсек и частоте повторения серий 100 гц амплитуда импульсов на выходе фотоумножителя была постоянна по всей длительности серии и достигала 10 в на сопротивлении 100 ом. Измерения при длительности серии до 0,1 сек и частоте повторения серий 1/7 гц показали, что фотоумножитель с таким делителем не может регистрировать всю серию световых импульсов даже при амплитуде импульсов на выходе ФЭУ около 2 в и частоте повторения световых импульсов 30 Мгц. На рис. 10 приведена зависимость амплитуды импульсов на выходе фотоумножителя от длительности

серии. Увеличение амплитуды импульсов на выходе фотоумножителя при длительности серии более 2 мсек связано с перераспределением напряжений на диодах фотоумножителя: при разряде емкостей, шунтирующих последние диоды, напряжения на остальных диодных промежутках увеличиваются. При дальнейшем разряде емкостей (при больших  $t_0$ ) амплитуда импульсов фотоумножителя резко падает, что связано с накоплением в области последних диодов пространственного заряда, который из-за падения напряжения на последних диодах не успевает рассасываться. Одновременно с падением амплитуды импульсов начинает возрастать постоянная составляющая. При увеличении емкостей, шунтирующих последние диодные промежутки, в 5 раз (т.е. до значений емкостей соответственно 20 мкф, 10 мкф, 2,5-3 мкф, 2,5-3 мкф), фотоумножитель передает всю серию без изменения амплитуды, вплоть до частоты повторения световых импульсов 100 Мгц (рис. 10). Амплитуда импульсов фотоумножителя при этом достигала 10 в. С помощью реперного светового импульса было установлено, что изменение усиления фотоумножителя в конце серии не превышало 10%. На рис. 11 представлены осциллограммы импульсов на выходе фотоумножителей 56 - AVR при различных частотах световых импульсов. Аналогичные результаты были получены при запитывании последних 3-х диодов от отдельных стабилизаторов с выходным напряжением  $U = 300$  в и шунтировании последних пяти диодов емкостями по 4 мкф.

#### Фотоумножитель ФЭУ-30

При запитывании последних трех диодов от отдельных стабилизаторов с выходным напряжением  $U = 300$  в и шунтировании последних пяти диодов емкостями по 4 мкф амплитуда на выходе фотоумножителя не менялась на всей длительности серии ( $t_0 = 0,1$  сек) и достигала 10 в на сопротивлении 100 ом в диапазоне изменения частоты повторения серии от 2 до 100 Мгц. Одинаковые результаты были получены как в случае подбора части делителя с постоянным напряжением  $E = \text{const}$ , так и при подборе с постоянным током  $I = \text{const}$ . Для подбора делителей использовалась схема, приведенная на рис. 12. При подборе делителя с  $E = \text{const}$  наблюдаются максимумы в коэффициенте усиления по каждому переменному сопротивлению  $R_1$ . Делитель, подобранный при  $E = \text{const}$  и шунтирующих емкостях:  $C_1 = 4$  мкф,  $C_2 = 2$  мкф,  $C_3 = 1$  мкф,  $C_4 = 500$  пф,

обеспечивает постоянство амплитуды выходных импульсов, достигающей 10 в, в пределах серии длительностью до 1 мсек и с частотой повторения  $f_c = 100$  гц. Однако при длительности серии более 10 мсек ( $f_c = 1/7$  гц) амплитуда импульсов падает до нуля даже при емкостях  $C_1 = 50$  мкф,  $C_2 = 25$  мкф,  $C_3 = 10$  мкф и т.д. Дальнейшее увеличение не имеет смысла, так как габариты делителя с такими емкостями значительно увеличиваются.

Делитель, подобранный при постоянном токе, не имеет максимумов по всем переменным сопротивлениям, за исключением первых трех от фотокатода. С увеличением остальных сопротивлений наблюдается монотонный рост усиления. Если установить на средних диодных промежутках напряжение около 100 в ( $U_0 = 100$  в), а на последних трех промежутках соответственно  $\approx 2U_0$ ,  $\approx 3U_0$ ,  $\approx 4U_0$ , то амплитуда импульсов на выходе фотоумножителя ФЭУ-30 с таким делителем остается постоянной на всей серии длительностью в 0,1 сек ( $t_0 = 0,1$  сек,  $f_c = 1/7$  гц,  $f_u = 100$  Мгц,  $C_1 = 30$  мкф,  $C_2 = 20$  мкф,  $C_3 = 10$  мкф,  $C_4 = C_5 = 2$  мкф, остальные  $C_i = 500$  пф). Схема делителя приведена на рис. 13.

При делителе, подобранном с  $I = \text{const}$ , длительность отдельного импульса ФЭУ уменьшается, что видно из сравнения рис. 14 а, б, в и рис. 14 г, на которых представлены осциллограммы импульсов фотоумножителя ФЭУ-30 при различных частотах с делителем, подобранным при  $E = \text{const}$  (а, б, в) и при  $I = \text{const}$  (г). Необходимо также отметить, что в случае подбора напряжений на первых от фотокатода электродах при  $I = \text{const}$  на минимальную длительность переднего фронта выходного импульса зонная характеристика (зависимость амплитуды импульса от координат освещаемой точки фотокатода) получается достаточно однородной.

На основании приведенных данных можно считать, что в случае подбора делителей с  $E = \text{const}$  максимумы по коэффициенту усиления возникают из-за перераспределения потенциалов на остальных электродах, и в результате возможен выбор неправильного режима питания фотоумножителя, ухудшающего, например, зонную характеристику по фотокатоду.

Были исследованы 12 фотоумножителей ФЭУ-30, и для всех образцов получены аналогичные результаты.

#### Фотоумножитель ФЭУ-36

Оптимальным по частотным характеристикам является делитель, подобранный при  $I = \text{const}$ . Усиление ФЭУ-36 очень критично к напряжениям на диодных

промежутках, поэтому для регистрации без искажений даже серий импульсов длительностью до 1 мсек ( $t_n = 100$  гц) и частоте повторения световых импульсов 100 Мгц необходимо шунтирование большими емкостями семи-восемью последних диодов. При шунтирующих емкостях, соответственно равных (считая от последнего диода) 30, 20, 10, 4, 2, 0,5, 0,1 мкф и остальных  $C_1 = 500$  пф, амплитуда на выходе ФЭУ-36 не меняется при длительности серии  $t_n = 1$  мсек и  $f_n = 100$  Мгц. Однако ни дальнейшее увеличение емкостей, ни запитка последних семи диодов от отдельных стабилизаторов не устраняет амплитуды выходных импульсов при длительности серии световых импульсов более 5 мсек. При запитке от отдельных стабилизаторов (с допустимым током нагрузки до 500 ма) амплитуда импульсов фотоумножителя ФЭУ-36 падает в 5-8 раз при длительности серии более 5 мсек.

Можно считать, что в этом фотоумножителе ограничение на длительность регистрируемой серии световых импульсов накладывает усталость диодов /10/. Аналогичные результаты были получены для всех 5 исследованных экземпляров ФЭУ-36. На рис. 15 представлены осциллограммы импульсов ФЭУ-36 при различных частотах следования световых импульсов.

#### Фотоумножитель ФЭУ-72

Диодные системы фотоумножителей ФЭУ-36 и ФЭУ-72 полностью идентичны (за исключением наличия у ФЭУ-72 коаксиального вывода сигнала). Поэтому поведение на длинных сериях световых импульсов у этих фотоумножителей одинаково. Максимальная амплитуда импульса, которую можно было получить с исследованного образца ФЭУ-72, составила 2 в, поэтому измерения частотных характеристик были проведены с помощью стробоскопического осциллографа с полосой пропускания 1000 Мгц. Из приведенных на рис. 16 осциллограмм видно, что с помощью ФЭУ-72 можно регистрировать световые импульсы с частотой следования более 100 Мгц.

#### Фотоумножитель ХР1020

Делитель, подобранный для фотоумножителя ХР 1020 при постоянном токе, соответствует (для первых диодных промежутков) делителю, рекомендованному фирмой-изготовителем для динамического режима.

При длительности серии до 1 мсек и частоте повторения серий 100 гц фотоумножитель XP 1020 передает без уменьшения амплитуды всю серию, если последние диоды зашунтированы соответственно емкостям 10, 5, 2, 2, 1, 0, 0,5 мкф, остальные по 500 пф. В случае длительности световой серии до 0,1 сек и частоте повторения световых импульсов до 100 Мгц для регистрации световых импульсов без изменения их амплитуды к концу серии необходимо запитывать последние 5-7 диодов от низкоомного делителя с током через него не менее 20 ма. С делителем, подобранным при  $I = const = 3$  ма и шунтировании последних диодов емкостями до 50 мкф, амплитуда импульсов фотоумножителя XP 1020 падала в 3-4 раза при длительности серии более 10 мсек.

Необходимость сильноточного делителя для последних диодов вызывается в случае XP 1020 сильной зависимостью коэффициента усиления от распределения напряжения на диодных промежутках. На рис. 17 представлена осциллограмма импульсов фотоумножителя XP 1020, полученная при частоте следования световых импульсов 100 Мгц. Как и в случае ФЭУ-72, из осциллограммы видно, что фотоумножитель может регистрировать световые импульсы с частотой повторения более 100 Мгц.

#### Частотные характеристики ФЭУ в диапазоне 80 - 200 Мгц

Результаты, полученные для различных типов фотоумножителей в диапазоне частот 2-100 Мгц, показывают, что эти ФЭУ при правильно выбранных режимах питания могут регистрировать световые импульсы, следующие с частотой повторения до 100 Мгц. Измерения частотных характеристик при  $f_u > 100$  Мгц проводились по методу удвоения частоты. Наблюдалось различное поведение ФЭУ разных типов в частотном диапазоне 100-200 Мгц. На рис. 18 приведены зависимости выходного сигнала от частоты для четырех типов ФЭУ: XP1020, ФЭУ-30, 56 AVR и ФЭУ-72. Из рис. 18 видно, что выходные импульсы, кроме переменной части имеют значительную постоянную составляющую, доля которой растет с увеличением частоты.

Для фотоумножителей XP1020 сумма переменной и постоянной составляющих выходного сигнала не меняется с увеличением частоты до 200 Мгц, в то время как переменная часть уменьшается. Для фотоумножителей типов ФЭУ-30

и 56 AVR при амплитудах выходных сигналов 2-3 в переменная составляющая быстро убывает с увеличением частоты в области 150-200 Мгц, а доля постоянной составляющей растет. На основании сравнения зависимостей рис. 18а (1) и рис. 18б (1) можно считать, что частотные характеристики ФЭУ-56 AVR и ФЭУ-30 мало отличаются. В диапазоне амплитуд 6-10 в доля постоянной составляющей для ФЭУ-30 в 1,5-2 раза больше, чем для 56 AVR (рис. 18а (2) и 18б (2)).

У фотоумножителя типа ФЭУ-72 при амплитудных выходных сигналах 0,1-0,5 в сумма переменная и постоянной составляющих не меняется с увеличением частоты, а переменная часть убывает (рис. 18в (1) и 18в (2)). При увеличении амплитуды наблюдается уширение импульсов, что ведет к ухудшению частотных характеристик. Увеличение длительности выходного сигнала у фотоумножителей XP 10/20 наблюдается при амплитудах более 5-7 в.

В заключение пользуемся случаем поблагодарить И.Н. Новоселову за любезно предоставленные электролюминесцентные диоды, Н.Н. Хованского за монтаж и наладку схемы генератора электрических импульсов.

#### Л и т е р а т у р а

1. P. Cachon et al. J. Phys. et Radium Suppl. 22 N11, 173 (1961).
2. Ж.М. Ронкин. Радиотехника и электроника, T10, 1282 (1965).
3. С. Cernigoi et al. Nucl. Instr. and Meth., 6, 193 (1960).
4. Е.Г. Риттер, З.Х. Гуланиян и др. Вопросы радиоэлектроники, серия общетехн. № 29, 86 (1965).
5. В.И. Рыкалин, Т.Г. Кмыта, И.В. Рыжиков, И.Н. Новоселова. Препринт ОИЯИ, № 2466, Дубна 1965.
6. R.C. Miller, N.C. Wittner, IEEE Trans. Quantum Electronics, QE-2, N1, 49 (1965).
7. P. Heffner, Electronics, 37, 75 (1965).
8. S.V. Muchin, H.J. Pohl, S.V. Richwizhy, I.N. Semenyushin, I. Foltin, Nucl. Instr. Meth. 33, 339 (1965).
9. P. Gorlich, S.V. Muchin, H.J. Pohl. "Новые экспериментальные возможности фотоумножителя SKP-1". Материалы симпозиума по ядерной электронике, Дрезден, 1965.

10. А.Г. Берковский и др. ПТЭ, 5, 201. (1965).
11. А.Ф. Дунайцев, В.И. Петрухин, Ю.Д. Прокошкин, В.И. Рыкалин. ЖЭТФ, 42, 632 (1962).
12. И.М. Василевский, В.В. Вишняков, А.Ф. Дунайцев, Ю.Д. Прокошкин, В.И. Рыкалин, А.А. Тяпкин. "Исследование угловой корреляции  $\gamma$ -квантов, образованных при захвате  $\pi^-$ -мезонов протонами. Труды XII Международной конференции по физике высоких энергий, Дубна, 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел  
30 декабря 1966 г.

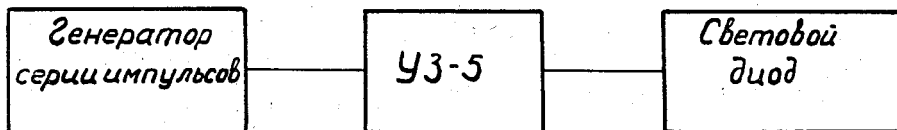


Рис. 1. Блок-схема генератора световых импульсов.





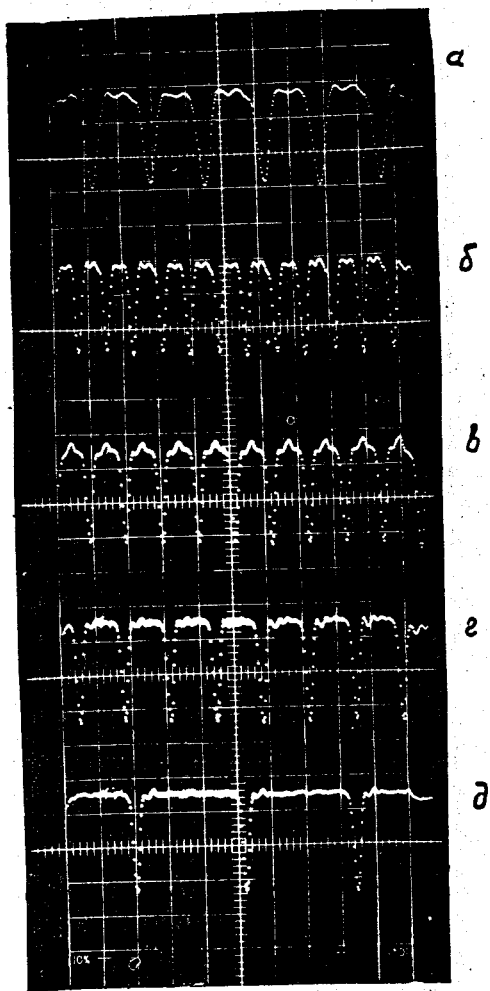


Рис. 3. Осциллограммы импульсов на выходе генератора. Частота электрических импульсов в серии: а - 150 МГц - развертка 5 нсек/см; б - 150 МГц - 10 нсек - 10 нсек/см; в - 100 МГц - 10 нсек/см; г - 60 МГц - 10 нсек/см; д - 30 МГц - 10 нсек/см.

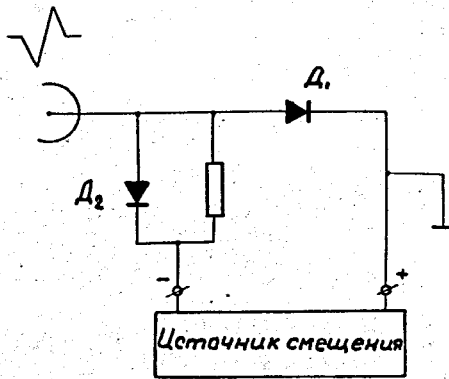


Рис. 4. Схема включения электролюминесцентного диода из GaP.  $D_1$  - электролюминесцентный диод;  $D_2$  - Д18.

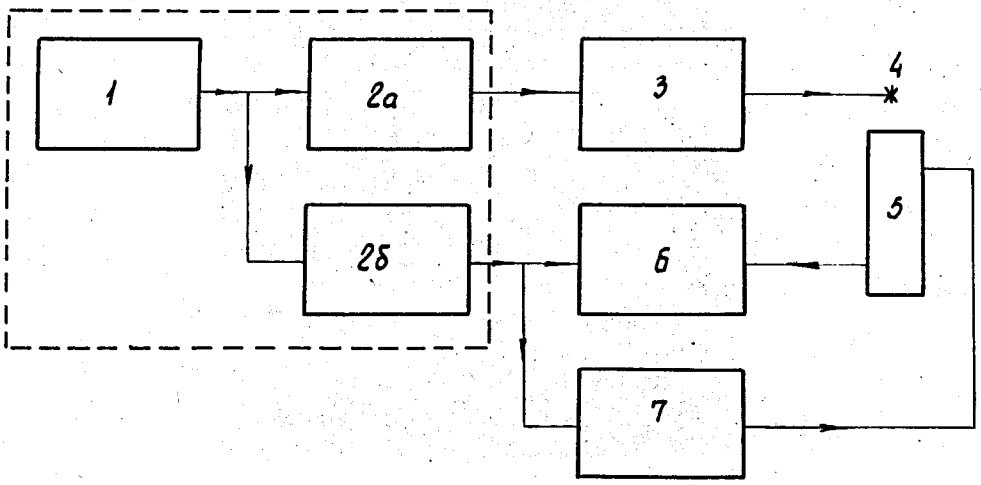


Рис. 5. Блок-схема установки для исследования характеристик генератора световых импульсов; 2б - блок задержки; 3 - усилитель УЗ-11; 4 - электролюминесцентный диод; 5 - фотоумножитель СКР-1; 6 - осциллограф с полосой 1000 Мгц; 7 - генератор прямоугольных импульсов.

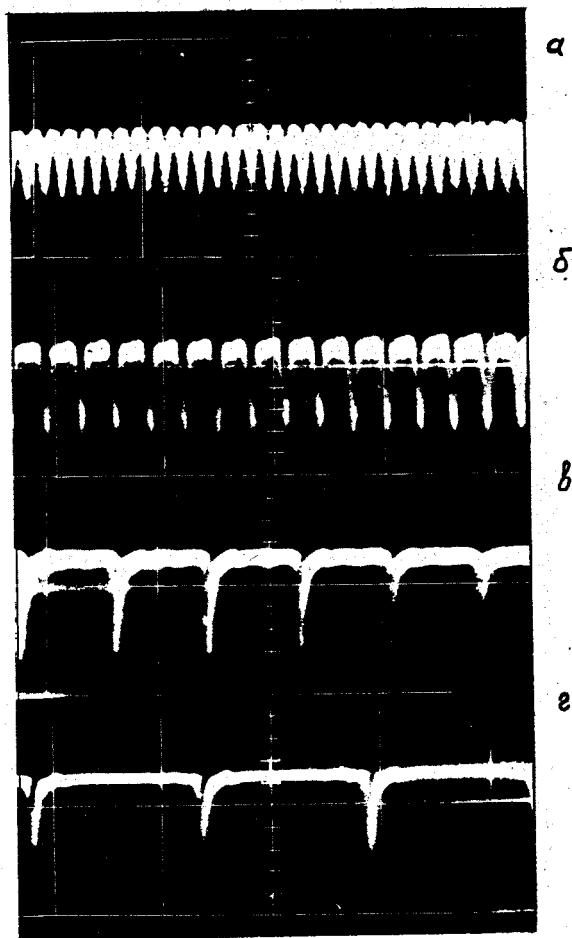


Рис. 6. Осциллограммы световых импульсов, снятые с помощью ФЭУ 38 АУР . Частота световых импульсов в серии: а - 600 Мгц; б - 30 Мгц; в - 14 Мгц ; г - 7 Мгц развертка 100 нсек/см.



Рис. 7. Осциллограмма отдельного импульса серии. Скорость развертки 10 нсек/см. Частота повторения в серии 30 Мгц.

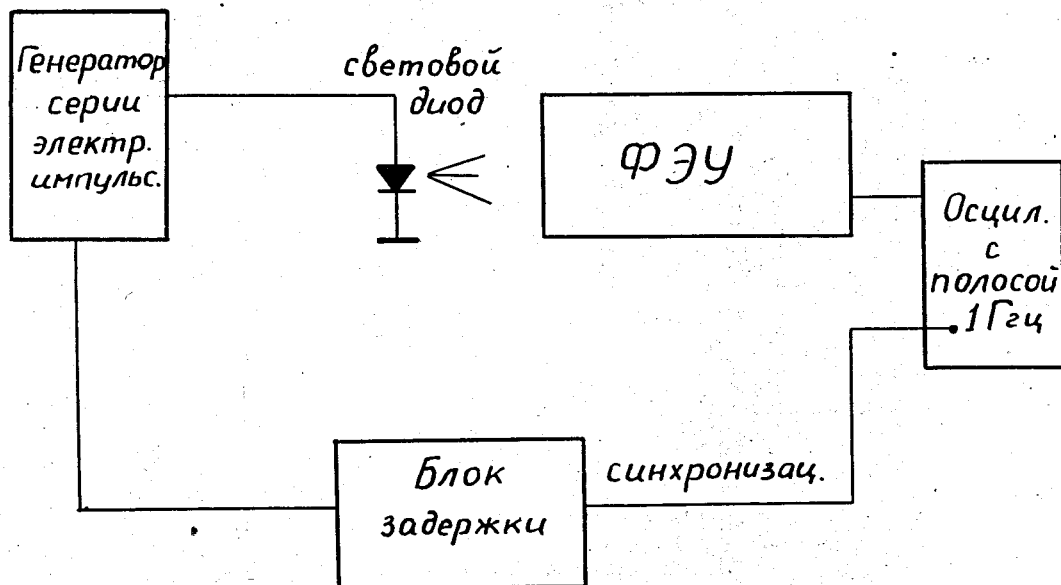
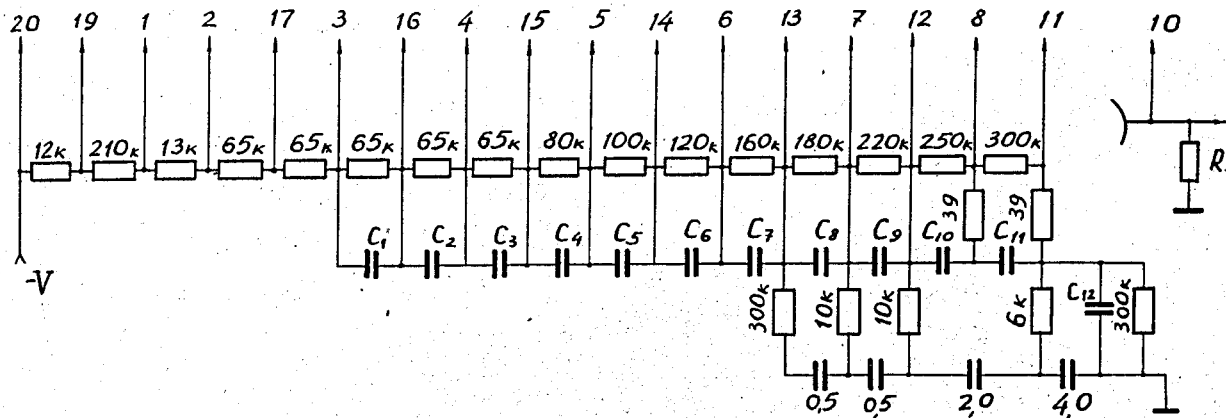


Рис. 8. Блок-схема установки для исследования частотных характеристик ФЭУ.



$C_1 - C_3 - 120 \mu\text{F}$   
 $C_4 - 510 \mu\text{F}$   
 $C_5 - C_{12} - 9100 \mu\text{F}$

Рис. 9. Схема делителя ФЭУ 68-АVR.

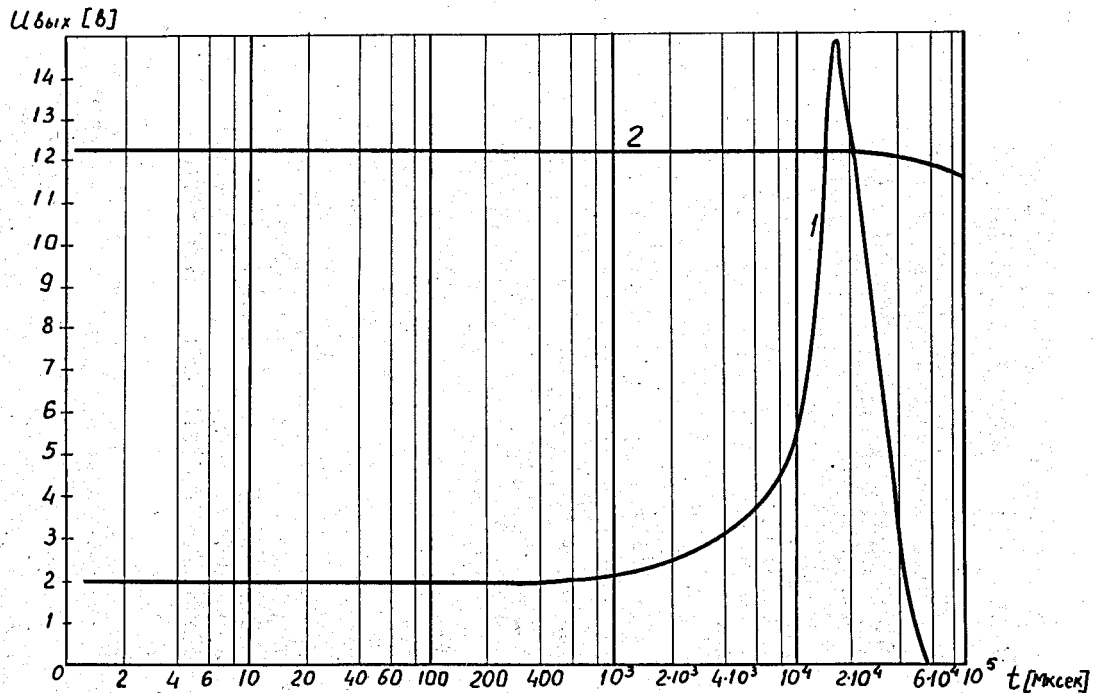
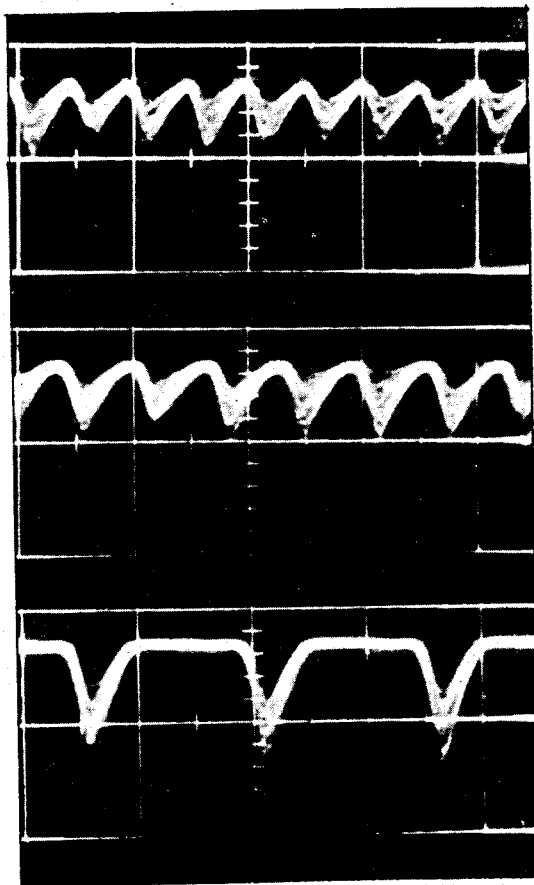


Рис. 10. Зависимость амплитуды импульсов на выходе фотоумножителя 56-APV от длительности серии. Частота импульсов в серии  $f_{\text{и}} = 100$  Мгц. Кривая 1 получена при значениях емкостей, шунтирующих последние диоды - 4,0 мкф; 2,0 мкф; 0,5 мкф; 0,5 мкф. Кривая 2 - при значениях емкостей - 20,0 мкф; 10,0 мкф; 3,0 мкф; 2,0 мкф.



a

б

в

Рис. 11. Осциллограммы импульсов на выходе фотоумножителя 58 АУР при скорости развертки 20 нсек/см для частот повторения 100 МГц (а); 60 МГц (б); 30 МГц (в).



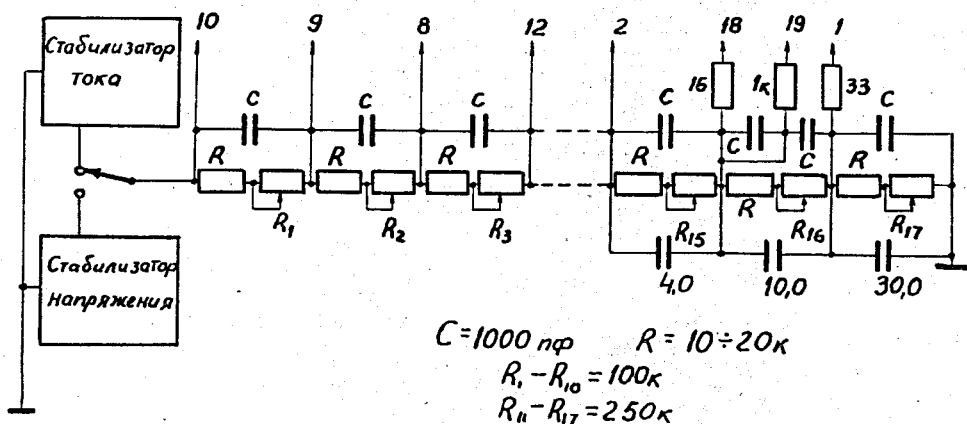


Рис. 12. Схема подбора делителя ФЭУ-30.

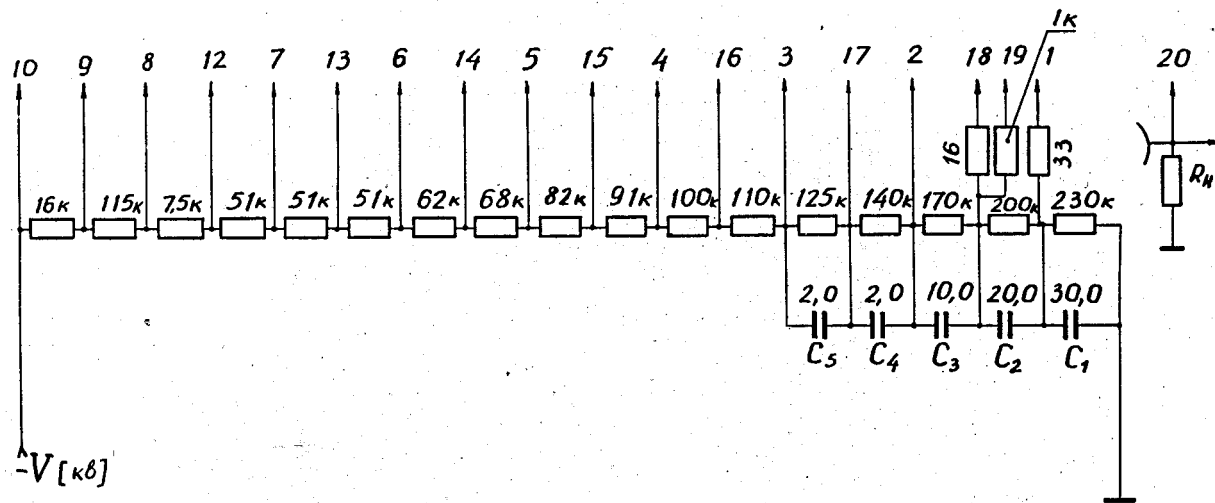
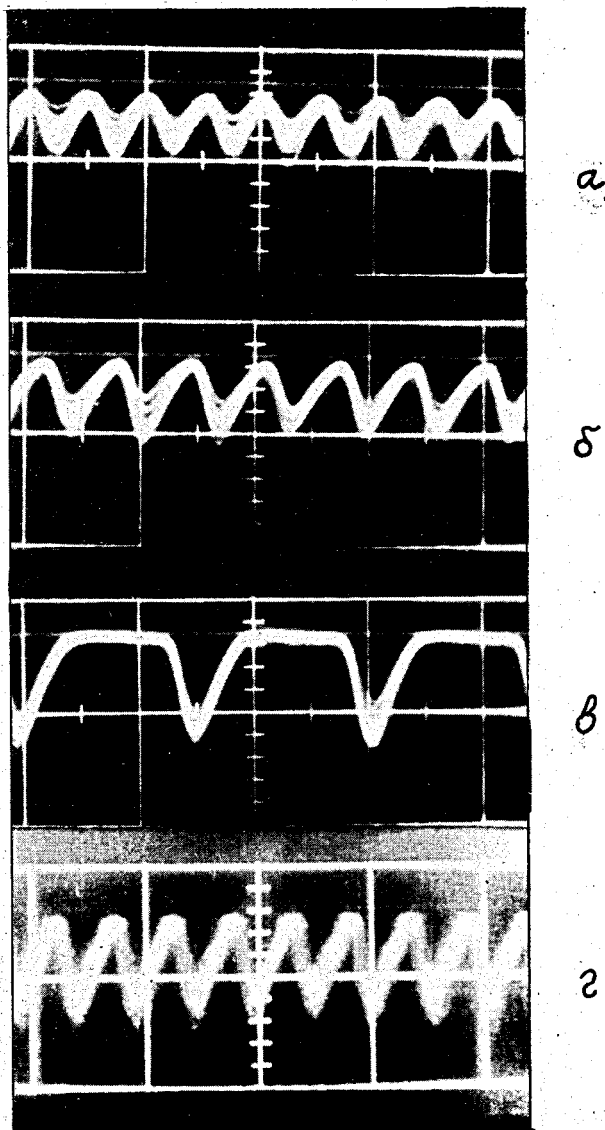


Рис. 13. Схема делителя ФЭУ-30.



14. Осциллограммы импульсов на выходе ФЭУ-30 при скорости развертки 20 нсек/см для частот повторения 100 Мгц/(а) ; 60 Мгц (б); 30 Мгц (в) - делитель подбирался при  $E = \text{const}$  ; 100 Мгц (г) - делитель подбирался при  $J = \text{const}$ .

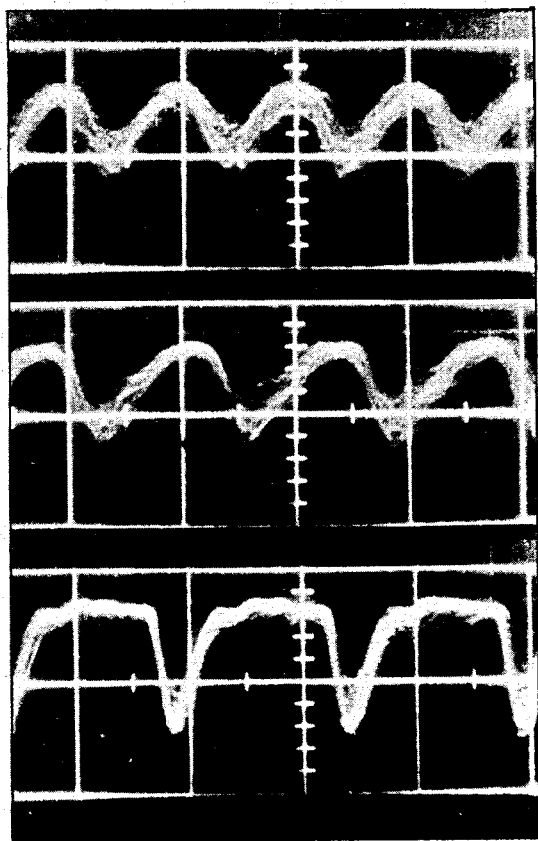
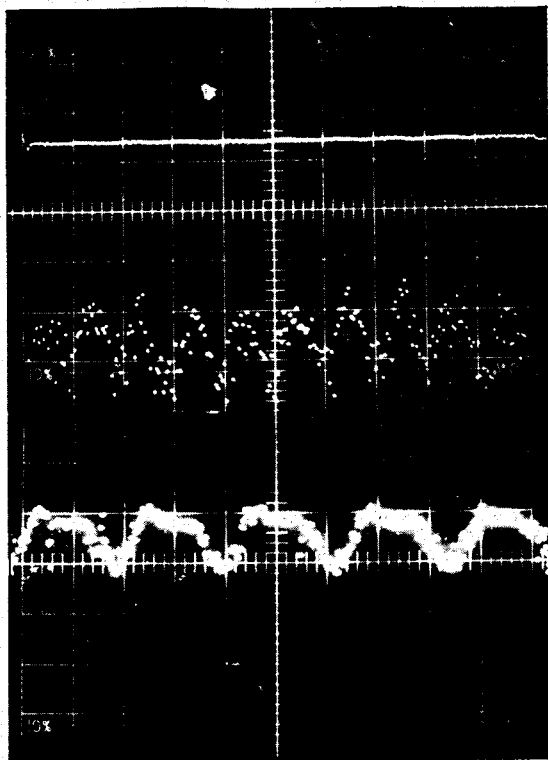


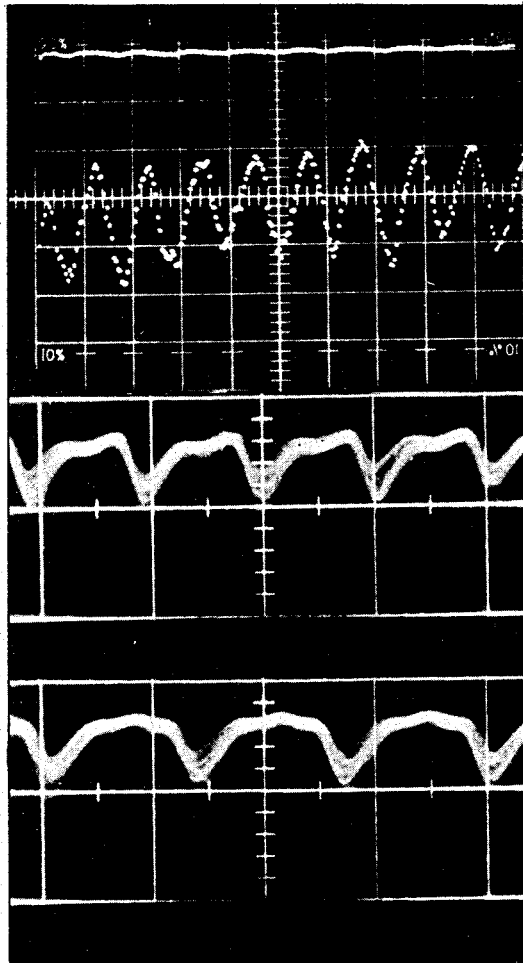
Рис. 15. Осциллограммы импульсов на выходе ФЭУ-36 для частот повторения 100 Мгц (а), 60 Мгц (б) - скорость развертки 10 нсек/см; 30 Мгц (в) - скорость развертки 20 нсек/см.



a

б

Рис. 16. Осциллограммы импульсов на выходе ФЭУ-72 при скорости развертки 5 нсек/см для частот повторения 200 Мгц (а); 100 Мгц (б). (Горизонтальная линия - нулевой уровень).



а

б

в

Рис. 17. Осциллограммы импульсов на выходе ФЭУ ХР1020 0 для частот повторения 200 Мгц.(а) - скорость развертки 5 нсек/см. (горизонт. линия - нулевой уровень); 100 Мгц (б); 60 Мгц (в) - скорость развертки 10 нсек/см.

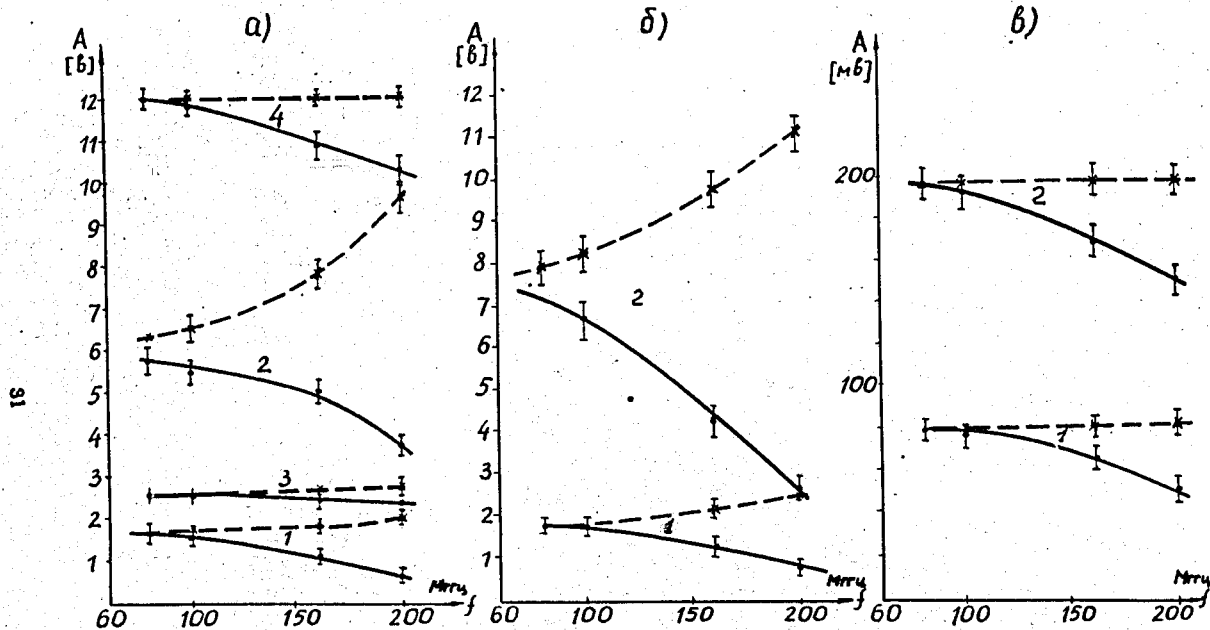


Рис. 18. Частотные характеристики фотоумножителей.

а) 1, 2 - частотные характеристики ФЭУ 58-APV при разных амплитудах выходного сигнала; 3, 4 - частотные характеристики ФЭУ XR1020. б) 1, 2 - частотные характеристики фотоумножителя ФЭУ-30; в) 1, 2 - частотные характеристики фотоумн. ФЭУ-72. (непрерывная линия - переменная составляющая выходного сигнала; пунктирная линия - сумма переменной и постоянной составляющих).