

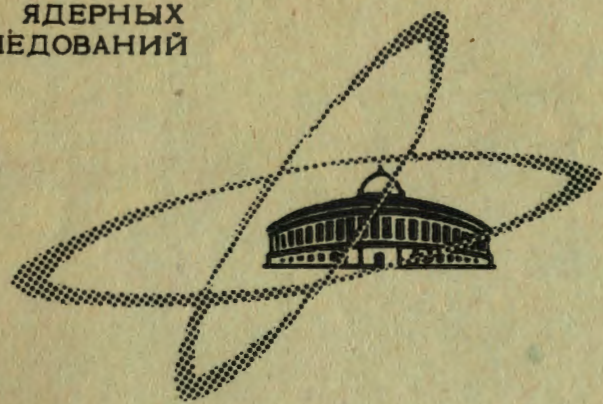
Фр-534

18/IX-68

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 3958



П.И. Филиппов

ИМПУЛЬСНОЕ ПИТАНИЕ БЕСФИЛЬМОВЫХ  
ИСКРОВЫХ КАМЕР

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

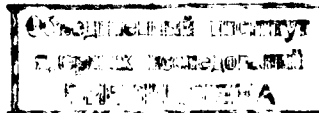
1968

13 - 3958

7468/2 чф.

П.И. Филиппов

ИМПУЛЬСНОЕ ПИТАНИЕ БЕСФИЛЬМОВЫХ  
ИСКРОВЫХ КАМЕР



В работе рассматриваются генераторы высоковольтных импульсов для питания бесфильмовых искровых камер на электронных вакуумных лампах. Проводится качественное описание переходного процесса в схеме оконечного каскада генератора с простой RC цепью при нелинейной нагрузке - искровой камере. Экспериментально исследуется вопрос о выборе длительности высоковольтного импульса для бесфильмовых искровых камер. Установлено, что время задержки развития разряда в искровой камере сильно зависит от параметров камеры и условий в ней, а также от характеристик оконечного каскада генератора высоковольтных импульсов. При исследовании зависимости времени задержки развития разряда в искровой камере от длительности импульса, подаваемого на оконечный каскад, была обнаружена оптимальная длительность импульса, при которой для разных значений анодного напряжения на оконечном каскаде имеется минимум времени задержки развития разряда в искровой камере. Для импульсного питания бесфильмовых искровых камер (ИК) используются генераторы высоковольтных импульсов (ГВИ) со "ждушим" режимом работы. Способы генерирования высоковольтных импульсов для питания бесфильмовых искровых камер практически все основаны на разряде и заряде конденсатора. Другие методы конструирования ГВИ, такие, как, например, формирование импульсов с помощью однородной и неоднородной длинной линии или с использованием ударных электромагнитных волн в длинных линиях с ферритом только начинают находить применение. Особые требования к формированию импульсов предъявляются в тех случаях, когда используется режим работы ИК с многократным числом срабатываний в одном цикле ускорителя. При этом "мертвое" время ИК различными способами стараются сделать возможно наименьшим, например, путем под-

бора длительности высоковольтного импульса, с тем, чтобы получать минимально возможную энергию, выделяющуюся в искре /6,7/. В докладе /6/ из простых рассуждений на иллюстрирующем рисунке приводится такой выбор длительности сформированного импульса:

$$t_1 < t_2 < t_3, \quad (1)$$

где  $t_1$  - длительность сформированного импульса,  $t_2$  - длительность фронта нарастания высоковольтного напряжения на ИК,  $t_3$  - время задержки развития разряда до максимального значения тока в искре.

В работе /7/ тоже на рисунке приводятся более правильные пределы выбора длительности сформированного импульса:

$$t_2 < t_1 < t_3. \quad (2)$$

В сложных физических экспериментах, использующих бесфильмовые искровые камеры в предельно быстродействующем режиме с передачей информации на ЭВМ, в качестве коммутирующих элементов целесообразно применять электронные лампы. Такие лампы, по сравнению с водородными тиратронами и вакуумными искровыми реле (ВИР), в оконечных каскадах ГВИ обладают целым рядом преимуществ. Они имеют малые времена задержек срабатывания и длительности процесса коммутации. Для управления ими требуются маломощные импульсы, что приводит к небольшой нагрузке источника пусковых импульсов сеточной цепью лампы оконечного каскада. Электронные лампы позволяют использовать предварительную формирование импульсов по длительности в предшествующих каскадах, имеют большой срок службы без существенного изменения своих параметров в процессе эксплуатации. Приемлемые в качестве ключей, эти лампы достаточно широкополосны. К недостаткам электронных ламп как коммутирующих элементов можно отнести большее внутреннее сопротивление в момент переключения по сравнению с водородными тиратронами и ВИР - порядка десятков и сотен ом. Если и есть электронные лампы,

сравнимые в этом отношении с водородными тиратронами, то они громоздки и неудобны в эксплуатации. Выбор электронных ламп среди импульсно-модулярных и импульсно-генераторных для коммутирующих элементов оконечных каскадов ГВИ весьма ограничен, поэтому желательны специальные разработки таких ламп.

#### Оконечный каскад ГВИ с простой RC-цепью

Схемы оконечных каскадов ГВИ с простой RC-цепью, в которых разряд конденсатора осуществляется через ключ, а заряд — через сравнительно высокоомное сопротивление от источника постоянного напряжения, являются наиболее простыми и распространенными. Эти схемы приведены на рис.1(а); (б) и (в).

Нагрузкой в схемах оконечного каскада является емкость искровой камеры  $C_{ик}$ , шунтированная омическим сопротивлением —  $R_{ш}$ . В случае, когда в объеме между электродами ИК, заполненном газовой смесью, очень мало зарядов, искровая камера представляет собой линейный элемент. В случае бурного лавинообразного образования зарядов при развитии искры камера представляет нелинейный элемент. Поэтому эквивалентную схему ИК во время формирования и пробоя искры, без учета индуктивностей, можно представить как параллельное соединение нелинейной емкости —  $C_{ик}$  и нелинейного сопротивления искры  $R_{ш\ ик}$ , рис.2(а). В общем случае емкость искровой камеры должна определяться как дифференциальная емкость:

$$C_{\text{дифф. ик}} = \frac{dq}{d|u|} \quad (3)$$

В частном случае, когда в камере искрового пробоя нет, ее можно представить как статическую емкость:

$$C_{\text{стат. ик}} = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon S}{d} \quad (4)$$

В период формирования и пробоя искры в камере эти емкости не равны. Здесь существенную роль начинает играть нелинейное сопротивление искры —  $R_{ш\text{ик}}$ . При этом сопротивление искры  $R_{ш\text{ик}}$  изменяется от очень большой величины, определяемой началом развития лавины стримера, до величин долей единицы, единиц и десятков ом, в зависимости от мощности искрового пробоя. Таким образом, особенностью окончных каскадов ГВИ с ИК является то, что они работают на нелинейную нагрузку. Оконечный каскад ГВИ, в случае, когда нагрузка ( $R_{ш}; C_{ик}$ ) линейна, можно представить эквивалентной схемой, изображенной на рис.2(б), где

$$R_{\ominus} = \frac{R_3 R_1}{R_3 + R_1} \quad (5)$$

При этом мы пренебрегаем паразитными емкостями и индуктивностями монтажа, ключа и ИК, и считаем ключ безинерционным. Переходные процессы в таких эквивалентных схемах хорошо описаны и исследованы [1,3,4 и др.]. Характер изменения напряжения  $u(t)$  на электродах искровой камеры можно наблюдать на осциллограмме (б) рис.3.

Из анализа таких эквивалентных схем известно: постоянная времени  $\tau_1$ , определяющая скорость нарастания переднего фронта, равна произведению  $R_3$  на эквивалентную емкость последовательного соединения  $C_3$  и  $C_{ик}$ . Здесь решающую роль играют внутреннее сопротивление  $R_1$  замкнутого ключа в  $R_{\ominus}$  (т.к.  $R_3 \gg R_1$ ) и меньшая из емкостей  $C_{ик}$  ( $C_3 \gg C_{ик}$ ). Спадание напряжения практически происходит по экспоненциальному закону с постоянной времени  $\tau_2 = R_{ш}(C_3 + C_{ик})$ . Отсюда ясно неравенство (2), где наименьшая длительность сформированного по времени импульса в окончном каскаде или подаваемого на окончный каскад, должна быть:

$$\tau_{имп} \geq \tau_1 \quad (6)$$

В противном случае, если  $r_{\text{имп}} < r_1$ , статическая емкость искровой камеры не сможет успеть зарядиться до амплитуды высоковольтного импульса -  $U_m$ , и коэффициент использования напряжения питания  $K_E$  уменьшится. В этом случае, чтобы удержать эффективность работы ИК на прежнем уровне, мы должны повышать  $E_3$ .

Оконечный каскад ГВИ в общем (рабочем) положении, когда нагрузка ( $R'_{\text{ш}}, C_{\text{ик}}$ ) нелинейна (при срабатывании генератора происходит пробой искры в ИК), необходимо представлять эквивалентной схемой, приведенной на рис.2(в), где

$$R'_{\text{ш}} = \frac{R_{\text{ш}} R_{\text{ш ик}}}{R_{\text{ш}} + R_{\text{ш ик}}} \quad (7)$$

$$и \quad C_{\text{ик}} = C_{\text{дифф. ик}}$$

При этом принимается, что паразитные емкости и индуктивности монтажа, ключа и ИК пренебрежимо малы, и ключ считается безинерционным. Рассчитать переходный процесс в подобной эквивалентной схеме рис.2(в) с учетом нелинейной емкости  $C_{\text{ик}}$  и нелинейного сопротивления искры

$R_{\text{ш ик}}$ , даже с упрощающими приближениями, довольно громоздкая и сложная задача [5]. При этом можно упустить некоторые тонкости переходного процесса. Более целесообразно предварительно качественно рассмотреть переходный процесс и экспериментально исследовать поведение такой системы в различных необходимых режимах.

Рассмотрим работу выходного каскада генератора на нелинейную нагрузку - искровую камеру, рис.2(в).

В исходном состоянии ключ  $K$  разомкнут, и накопительная емкость  $C_3$  заряжена до напряжения  $=E_3$ .

Когда через ИК проходит заряженная частица, и логическая система, состоящая из счетчиков заряженных частиц и электронных устройств, отбирает эту частицу для регистрации, на замкнутый оконечный каскад ГВИ поступает отрицательный импульс, переводящий ключ  $K$  из непроводящего состояния с очень большим  $R_1$  в проводящее состояние с малым сопротивлением  $R_1$ . Накопительная емкость разряжается через это сопротив-

ление. Разрядным током за время  $0 + r_1$  статическая емкость камеры  $C$  стат. ИК заряжается на величину  $Q$  :

$$Q = \int_0^{r_1} i dt = \frac{1}{R} \int_0^{r_1} u du. \quad (8)$$

Процесс зарядки статической емкости  $C$  стат. ИК можно наблюдать на осциллограмме  $u = f(t)$  рис.3(б') и (г') (первый импульс-зарядный ток через ИК). Прошедшая через ИК заряженная частица оставляет в смеси газов, заполняющей камеру, ионизированный канал, который диффузно или под влиянием небольшого очищающего постоянного напряжения рассасывается за время памяти камеры -  $r_{\text{пам}}$ . Если напряжение  $U_m$  на электродах ИК превышает статическое пробивное напряжение после некоторого времени задержки -  $t_3$ , в течение которого происходит развитие разряда, то благодаря остаточным электронам в ионизированном канале происходит искровой пробой в камере.

В течение времени задержки  $t_3$  формирования искрового разряда статическая емкость  $C$  стат. ИК, заряженная до напряжения  $U_m$ , начинает разряжаться на сопротивление шунта  $R_{\text{ш}}$  с постоянной времени  $r_2$ . В момент формирования искрового пробоя в камере заряд, оставшийся на уже нелинейной емкости -  $C_{\text{дифф ик}}$ , разрядится через нелинейное сопротивление искрового канала  $R_{\text{ш ик}}$ . Ток разряда емкости  $C_{\text{дифф ик}}$  через сопротивление искры  $R_{\text{ш ик}}$  можно видеть на осциллограмме зарядного и разрядного тока через камеру (рис.3, г'-второй импульс). Поскольку сопротивление искрового пробоя  $R_{\text{ш ик}}$  значительно меньше шунтирующего сопротивления -  $R_{\text{ш}}$  камеры

$$R_{\text{ш ик}} \ll R_{\text{ш}}, \quad (9)$$

произойдет срез экспоненциально возрастающего или убывающего (в зависимости от полярности импульса) напряжения  $U(t)$  на электродах ИК с постоянной времени -  $r_2$  на постоянную времени среза -  $r_{\text{ср}}$ . На рис.3 (в) приведены для сравнения две осциллограммы напряжения на электродах ИК. Первая осциллограмма соответствует случаю, когда



в камере нет искрового пробоя и среза напряжения, вторая – когда имеется искровой пробой, и происходит укорачивание импульса напряжения на электродах ИК.

Скорость перехода  $R_{ш\text{ик}}$  из проводящего состояния с малым сопротивлением в практически непроводящее состояние и изменение  $C_{\text{дифф.ик}}$  при этом определяет длительность заднего фронта среза импульса  $U(t)$  на электродах ИК. Постоянную времени –  $\tau_{\text{ср}}$  можно определить, как:

$$\tau_{\text{ср}} = C_{\text{дифф.ик}} \left| \frac{C_{\text{стат.ик}}}{C_{\text{макс}}} \right| R_{ш\text{ик}} \left| \frac{R_{ш\text{мин}}}{R_{ш\text{макс}}} \right| \quad (10)$$

Оба эти параметра нелинейны и  $\tau_{\text{ср}}$  определяется экспериментально. На рис.3 приведены осциллограммы ( $\tau$ ) – изменения напряжения на электродах ИК при регистрации частицы, ( $\tau'$ ) – изменения зарядного и разрядного тока через ИК при этом.

#### Экспериментальная часть

При конструировании оконечных каскадов ГВИ необходимо знать, из каких данных исходить при выборе оптимальной длительности высоковольтного импульса, с тем, чтобы получать близкую к минимально необходимой для регистрации мощность в искре при пробое в ИК. Кроме того, необходимо иметь при этом более полную информацию о времени задержки  $t_d$  развития разряда в ИК, при изменении анодного напряжения на оконечном каскаде и длительности сформированного высоковольтного импульса, подаваемого на ИК. Все эти вопросы изучались на установке, блок-схема которой приведена на рис.4.

Эксперименты проводились на регистрации космических лучей, направление которых выбиралось двумя сцинтилляционными счетчиками  $C_1$  и  $C_2$ . Между ними размещалась бесфильмовая проволочная искровая камера размерами 200x200x8 мм, имеющая статическую емкость  $C_{\text{стат.}}=300\text{пф}$ .

Через камеру продувалась газовая смесь следующего состава: гелий (23,15%), неон (75,16%), азот (1,62%), кислород (0,03%), углекислый газ (0,02%), углеводороды (0,02%), этиловый спирт (1,5%).

Импульсы со сцинтилляционных счетчиков  $C_1$  и  $C_2$  через схему совпадений (С С)  $C_1+C_2$  и расчетверитель подавались на блок запуска оконечного каскада, а также на вход синхронизации скоростного осциллографа С1-10 и пересчетку (П). На экране осциллографа С1-10 можно наблюдать с делителя напряжения  $R_{ш}$ ,  $R_1$  напряжение  $u(t)$  на электродах ИК и напряжение, пропорциональное току  $i(t)$ , проходящему через ИК с безиндукционного малого сопротивления  $R_2$ , включенного последовательно ИК, (рис.5) и фиксировать на пленку с помощью фотокамеры ФК.

Принципиальная схема блока запуска оконечного каскада ГВИ показана на рис.6. Первые два каскада схемы представляют собою запертые блокинг-генераторы на лампах 6В2П. Оба блокинг-генератора имеют анодно-катодную обратную связь. С диодной нагрузки второго блокинг-генератора через разделительный конденсатор -  $C_{13}$  импульс подается на две запертые разрядные лампы ГИ-30, включенные параллельно. При открывании ламп ГИ-30 искусственная линия - бифилярно намотанный кабель РК-2 длиной  $l$ , разряжалась, и импульс отрицательной полярности с амплитудой  $3\frac{1}{2}$  кВ подавался на оконечный каскад. С помощью набора линий из РК-2 формировался импульс с длительностью  $t_{\text{к}}=40; 50; 60; 70; 80; 90$  и  $100$  мсек. Оконечный каскад собирался на лампе ГИ-17. Некоторыми неудобствами в эксплуатации ГИ-17 является воздушное принудительное охлаждение и для запираания лампы отрицательное смещение  $U_{\text{к1}} \geq 1000$  в. Лампа ГИ-17 была выбрана потому, что ее оксидный катод обладает большой эмиссионной способностью (площадь оксидного покрытия катода  $S = 8 \text{ см}^2$ ; оксидный катод позволяет снимать с  $1 \text{ см}^2$  до  $30 \text{ а}$  в импульсе);  $U_{\text{к}} = 3$  кВ, и лампа как четырехполюсник достаточно широкополостна (наибольшая рабочая частота до  $500$  МГц). Один блок оконечного каскада был собран по схеме с простой RC-цепью (рис.7), другой блок оконечного каскада - с неоднородной линией (рис.8). В сеточную цепь лампы ГИ-17 включен фазоинверсный трансформатор 1:2, на трех

ферритовых кольцах  $\delta$  70 мм с  $\mu = 265$ . Импульсный трансформатор имеет в первичной обмотке 8 витков, во вторичной – 16 витков кабеля РК-1. Общая задержка блока запуска и оконечного каскада на лампе ГИ-17 составляла 40 нсек. Осциллограммы высоковольтных импульсов с оконечного каскада (рис.8) на нагрузку (омическое сопротивление  $R_H=100$  ом), приведены на рис.9. Передний фронт импульсов равен – 10 нсек.

### Результаты экспериментов

Со схемой оконечного каскада (рис.8) исследовалась зависимость эффективности работы ИК от длительности запускающего импульса  $\tau_a$ . Полученные результаты сведены в графики (рис.10). Первые две кривые (1) и (2) сняты с сопротивлением шунта  $R_{ш}=300$  ом. В этом случае  $R_{ш}$  – одного порядка с внутренним сопротивлением лампы ГИ-17 в открытом состоянии, следовательно, постоянная времени немаленькая больше  $\tau_1$ . Поэтому, как видно из кривых (1) и (2), чтобы иметь приемлемую эффективность работы ИК, необходимо повышать зарядное напряжение –  $E_3$ , и выбирать большую величину длительности запускающего импульса.

Кривая (3) эффективности работы ИК снята с  $R_{ш}=3000$  ом. Это примерно в 2-3-10 раз больше внутреннего сопротивления  $R_i$  лампы ГИ-17 в открытом состоянии. Характер этой кривой показывает, что эффективность работы ИК не так резко зависит от длительности запускающего импульса. При длительности запускающего импульса, равной постоянной времени нарастания переднего фронта высоковольтного импульса на электродах ИК –  $\tau_a = \tau_1$  (см. рис.17  $\tau_{ф} = 70$  нсек), эффективность работы ИК выходит на плато и достигает 94-95%. Неэффективность  $\approx 5\%$  объясняется, по-видимому, недостаточно совершенной системой запуска ИК. Время задержки  $t_3$  развития разряда в ИК определялось по фото-осциллограммам тока –  $I_{ик}$ , проходящего через ИК, от начала подачи высоковольтного импульса на электроды ИК, т.е. от момента начала импульса зарядного тока через ИК, до момента начала развития разряда в ИК. Для каждой длительности запускающего импульса  $\tau_a=50$  нсек; 60 нсек; 70 нсек; 80 нсек; 90 нсек; 100 нсек, снималась кривая времени задержки

С уменьшением длительности импульса, подаваемого на вход оконечного каскада, в течение которого лампа ГИ-17 открыта, увеличивается время задержки  $t_3$  развития разряда в ИК (кривые (5) и (6) рис.11).

С другой стороны, и при увеличении длительности запускающего импульса до  $r_u = 100$  нсек происходит также некоторое увеличение времени задержки развития разряда в ИК, (кривая (1) рис.11). Для более полного представления о характере изменения времени задержки  $t_3$  развития разряда в ИК в зависимости от длительности запускающего импульса были построены кривые  $t_3 = f(r_u)$ , приведенные на рис.13. Средне-геометрический разброс  $\Delta t_3$  задержки времени развития разряда от среднестатистического не превышает 6 нсек и в основном относится для меньших значений анодного напряжения. Для  $E_3 = 7+8$  кв,  $\Delta t_3$  не превышает 2+3 нсек.

На графиках (2); (3); (4) и (5) имеется плоская платформа минимума времени задержки развития разряда в камере при изменении длительности импульса. Очевидно, для стабильности по времени задержки развития разряда в камере длительность импульса следует выбирать посредине плоской платформы минимума времени задержки. Если проанализировать все кривые рис.13, то можно отметить оптимальную длительность запускающего импульса, при которой для всех кривых наблюдается минимум времени задержки развития разряда в ИК. На плоской платформе минимума задержки графиков (2), (3), (4) и (5) оптимальная длительность запускающего импульса приходится на среднюю ее часть.

Для данной конструкции искровой камеры, смеси газов, нормального давления и схемы оконечного каскада, по графикам рис.13, оптимальная величина длительности запускающего импульса  $r_{u \text{ опт}} = 80$  нсек. При увеличении длительности импульса, начиная от оптимальной величины, происходит и увеличение времени задержки развития разряда в камере. Это особенно заметно при малых значениях анодного напряжения на оконечном каскаде, (кривая (1)), рис.13). При рассмотрении графиков рис.13 можно подметить характерную черту этого явления. Если мы увеличиваем длительность импульса от оптимальной величины  $r_{u \text{ опт}} = 80$  нсек на  $\Delta t_u = 20$  нсек, т.е. до  $\Delta t_u = 100$  нсек, то и на всех графиках время за-

держки развития разряда  $t_3$  увеличивается тоже примерно на такую же величину  $\Delta t_3 = 20$  нсек.

Экспериментальные предпосылки к объяснению этого явления с радиотехнической стороны мы можем найти из сопоставления осциллограмм тока заряда и разряда в ИК для различных длительностей запускающего импульса, при одном и том же анодном напряжении на окончательном каскаде (рис.14). Первый импульс отражает ток заряда через ИК, второй – ток разряда через искру. Начала зарядных импульсов тока совмещены.

При сопоставлении осциллограмм (а), (б) и (в) хорошо видно, что при удлинении запускающего импульса, в течение которого лампа окончательного каскада открыта, уширяется зарядный импульс тока через ИК.

На осциллограмме (в) можно также заметить, что процесс заряда статической емкости камеры еще полностью не завершился, а начинается уже развитие разряда. При этом к энергии, запасенной искровой камерой, добавляется еще энергия из формирующей линии, и амплитуда разрядного тока по сравнению с осциллограммами (а) и (б) возрастает в 1,6 раза.

Для сопоставления схем окончательных каскадов с использованием неоднородной линии (рис.8) и с простой RC цепью (рис.7), были сняты кривые времени задержки развития разряда в ИК в зависимости от величины анодного напряжения (рис.15). В схеме (рис.7) бралось  $C_3 > C_{\text{стат.ИК}}$  и поэтому происходила некоторая потеря напряжения на емкостном делителе  $C_3$ ,  $C_{\text{стат.ИК}}$ . Отсюда получалась такая значительная разница по временам задержки развития разряда в камере (кривые (1) и (2)). Если брать  $C_3 \gg C_{\text{стат.ИК}}$ , то эта разница будет меньше.

Для наглядного представления о переходном процессе, происходящем на нелинейной нагрузке – ИК окончательного каскада ГВИ и последовательности изменения времени задержки развития разряда в камере при последовательно возрастающем анодном напряжении –  $E_3$ , на рис.16 приведены осциллограммы напряжения  $u(t)$  (буквы без штриха) на электродах ИК и тока  $i(t)$  (буквы со штрихом) через камеру. Начала всех импульсов совмещены. По этим осциллограммам можно проследить, как по мере возрастания анодного напряжения от 4,5 кв до 8 кв уменьшается время

задержки развития разряда, укорачивается импульс напряжения на электродах ИК, разрядный импульс тока приближается к зарядному. При  $E_3 = 8,0$  кв (осциллограммы (е) и (е')), статическая емкость камеры не успела еще полностью зарядиться, как начинается развитие разряда и разряд через искру в камере. Амплитуда разрядного импульса тока по мере приближения к зарядному растет. Начало спада напряжения на электродах ИК приходится на максимум амплитуды разрядного тока в камере. На рис.17 приведены осциллограммы напряжения  $u(t)$  на электродах ИК при тех же значениях зарядного напряжения, что и на рис.16. Начала импульсов также совмещены. На этих осциллограммах можно сравнить длительность импульсов напряжения на электродах камеры в зависимости от  $E_3$ , оценить длительность переднего фронта и заднего среза.

#### Выводы

1. В физических экспериментах, в которых используются бесфильмовые искровые камеры в режиме многократного срабатывания в цикле ускорителя к генератору высоковольтных импульсов для ИК предъявляются повышенные требования. Эти требования технически хорошо разрешаются при использовании в оконечных каскадах электронно-вакуумных ламп.

2. Оптимальная длительность сформированных высоковольтных импульсов (на активном сопротивлении) определяется из соотношения:

$$r_{\text{и опт}} = 1,08 \pm 1,2 r_{\phi} = t_3, \quad (11)$$

где  $r_{\phi}$  - передний фронт нарастания высоковольтного напряжения на электродах статической емкости камеры,  $t_3 = f(U_3)$ . При таком зарядном напряжении  $U_3$ , где полностью завершается процесс заряда статической емкости ИК, сразу начинается процесс развития разряда.

3. Из экспериментальных данных было замечено, что время задержки развития разряда в ИК является очень чувствительным параметром,

характеризующим как камеру и условия в ней, так и окончательный каскад генератора высоковольтных импульсов. Поэтому для правильного выбора режима работы ИК необходимо снимать не только ее эффективность, но и кривую задержки времени развития разряда в ИК, в зависимости от зарядного напряжения.

4. При исследовании зависимости времени задержки развития разряда в ИК с различными значениями зарядного напряжения от длительности импульса, подаваемого на окончательный каскад, наблюдается такое явление: для каждого значения зарядного напряжения имеется оптимальная длительность импульса, при которой наблюдается минимум времени задержки развития разряда в ИК. Для всех значений зарядного напряжения этот минимум совпадает или лежит в средней части плоской платформы. При удлинении запускающего импульса, начиная от оптимального (по минимальному времени задержки развития разряда в ИК), в течение которого лампа окончательного каскада открыта, уширяется зарядный импульс тока через статическую емкость ИК. При этом переходный процесс в зарядной цепи статической емкости ИК и переходный процесс поляризации молекул смеси газов удлиняются. Вполне очевидно, что удлиняется и фронт нарастания высоковольтного напряжения на электродах ИК. Это связано, по-видимому, с тем, что электронная лампа как генератор тока не обеспечивает низкого импеданса окончательного каскада. Все это оказывает влияние на начальную стадию развития разряда в ИК.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность Э.Н.Цыганову, Б.А.Кулакову за внимание к работе и полезные дискуссии, Т.С.Нигманову за помощь в работе, В.А.Сутулнину за выполнение монтажа ряда схем и Н.В.Печенову за оперативное выполнение и обеспечение фотографических работ.

#### Л и т е р а т у р а

1. Л.А.Меерович, Л.Г.Зеличенко. Импульсная техника. Сов. радио, 1953г.
2. Г.А.Воробьев, Г.А.Месяц. Техника формирования высоковольтных наносекундных импульсов. Госатомиздат, 1963г.
3. В.Т.Фролкин. Импульсные устройства. Изд. Машиностроение. 1966г.
4. И.И.Теумин. Справочник по переходным электрическим процессам. Связьиздат, 1952г.

5. В.Хьюз. Нелинейные электрические цепи. Энергия. 1962г.
6. J.Fischer. IEEE Transactions on Nucl. Sci., V. NS-12, no 4, p.37, 1965.
7. E.Bieser, et. al., Nucl. Instr. and Meth. 44, p. 1, 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел

1 июля 1968 года.



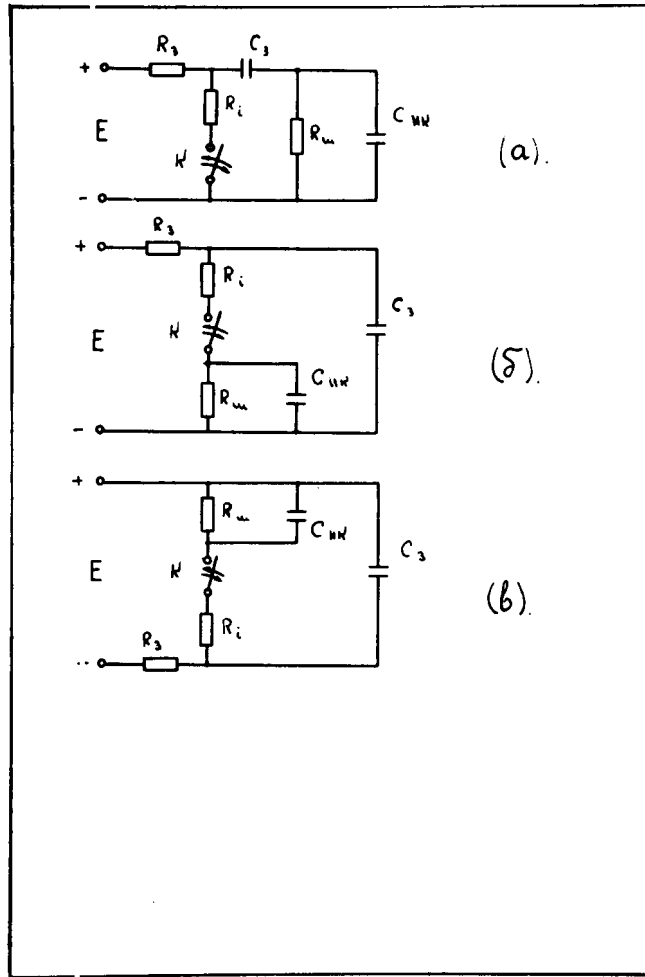
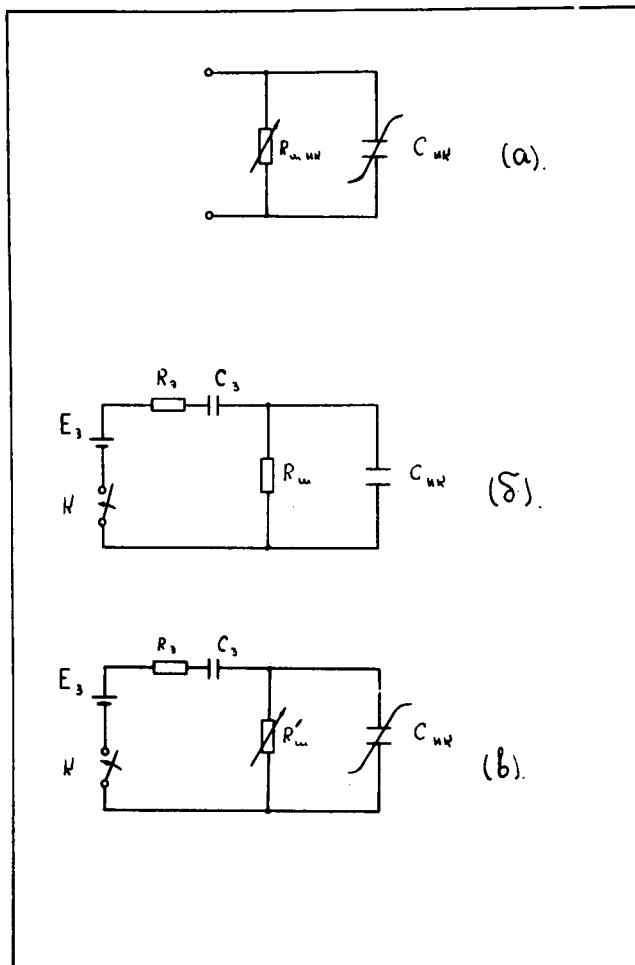


Рис.1. Схемы оконечных каскадов с простой RC цепью и нагрузкой  $C_{ик}$  и  $R_{ш}$  ИК,  $E$  -высоковольтное анодное напряжение,  $R_3$  -зарядное сопротивление,  $K$  -коммутирующий ключ,  $R_i$  -внутреннее сопротивление ключа,  $C_3$  -зарядная накопительная емкость,  $C_{ик}$  -статическая емкость ИК,  $R_{ш}$  -сопротивление шунта.



- Рис.2(а). Эквивалентная схема искровой камеры (без учета индуктивностей)  $C_{ик}$  - нелинейная емкость искровой камеры,  $R_{ш\ ик}$  - нелинейное сопротивление искры.
- (б) Эквивалентная схема оконечного каскада с простой  $RC$ -цепью, когда в нагрузке -  $C_{ик}$  и  $R_{ш}$  пробоя искры нет,  $K$  - коммутирующий ключ,  $E_з$  - зарядное напряжение,  $R_э$  - эквивалентное сопротивление,  $C_з$  - зарядная накопительная емкость,  $R_{ш}$  - сопротивление шунта,  $C_{ик}$  - статическая емкость ИК.
- (в) Эквивалентная схема оконечного каскада с простой  $RC$ -цепью, когда нагрузка  $R'_{ш}$  и  $C_{дифф\ ик}$  - нелинейны (пробой искры в ИК),  $K$  - коммутирующий ключ,  $E_з$  - зарядное напряжение,  $R_э$  - эквивалентное сопротивление,  $C_з$  - зарядная, накопительная емкость,  $R'_{ш}$  - эквивалентное сопротивление (шунта -  $R_{ш}$  и нелинейного сопротивления искры -  $R_{ш\ ик}$ ),  $C_{ик}$  - нелинейная емкость ИК.

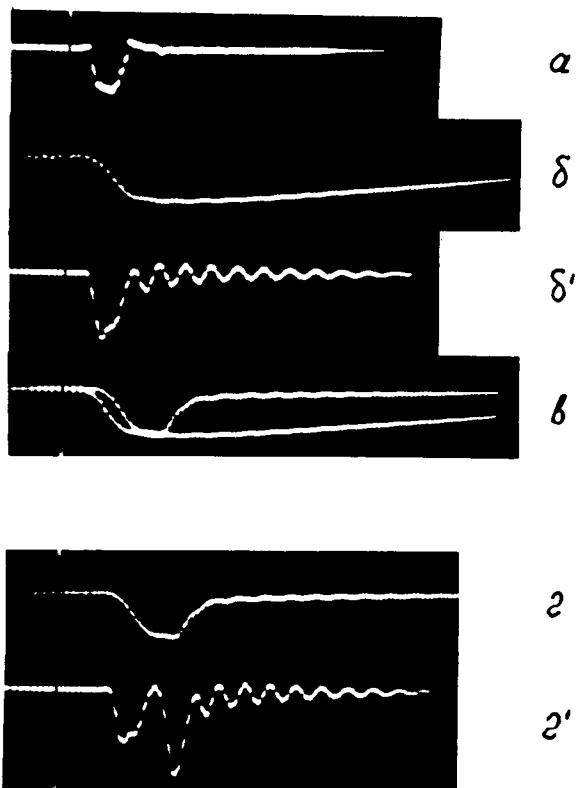


Рис.3. Осциллограммы импульсного напряжения на электродах ИК и тока заряда и разряда через ИК, (а) - импульс высоковольтного напряжения с оконечного каскада на нагрузку, омическое сопротивление  $R_H = 100 \text{ ohm}$ ; (б) - импульс напряжения на электродах ИК, когда искрового пробоя нет; (б') - импульс зарядного тока через ИК, когда искрового пробоя нет; (в) - импульс напряжения на электродах ИК, удлиненный при отсутствии искрового пробоя, укороченный при искровом пробое; (г) - импульс напряжения на электродах ИК при искровом пробое в камере; (г') - импульс зарядного и разрядного тока через ИК для этого случая.

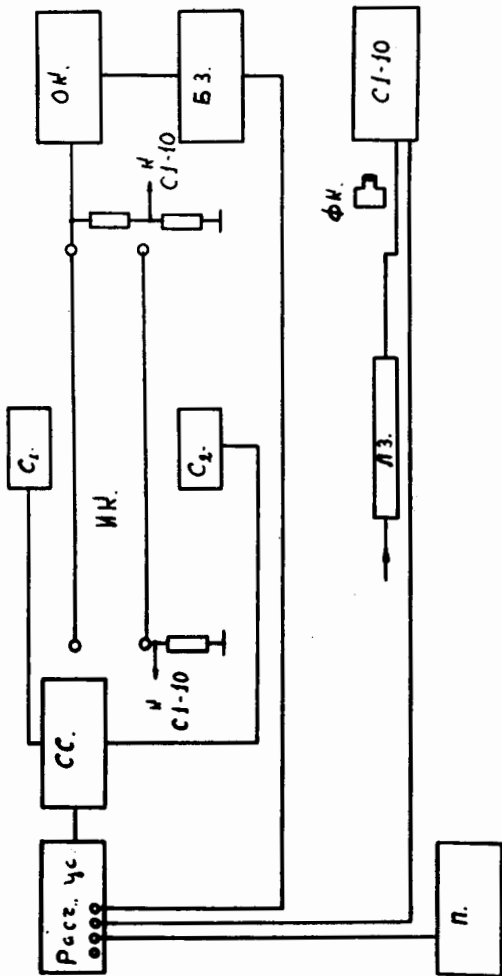


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

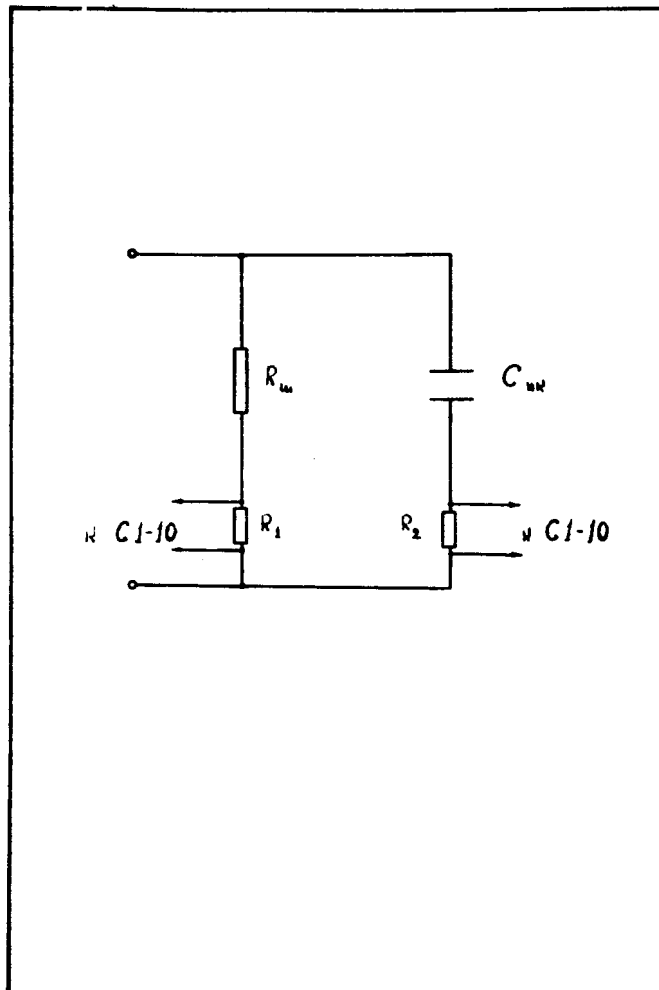


Рис.5. Схема включения безиндукционных сопротивлений делителя напряжения  $R_{ш}$  и  $R_1$  и последовательно включенного с ИК-  $R_2$ .

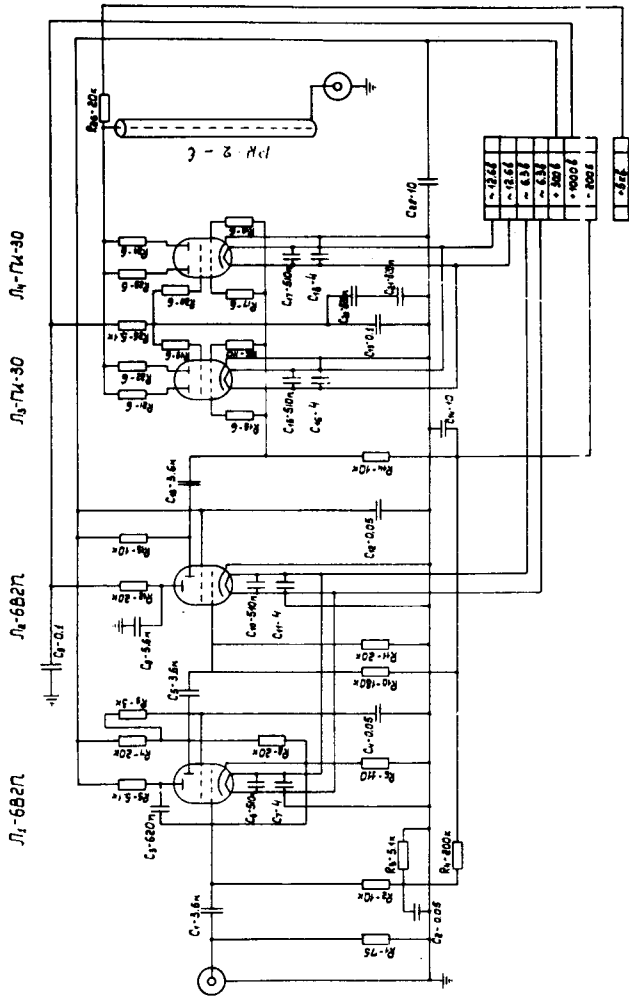


Рис.6. Принципиальная схема блока запуска оконечного каскада.

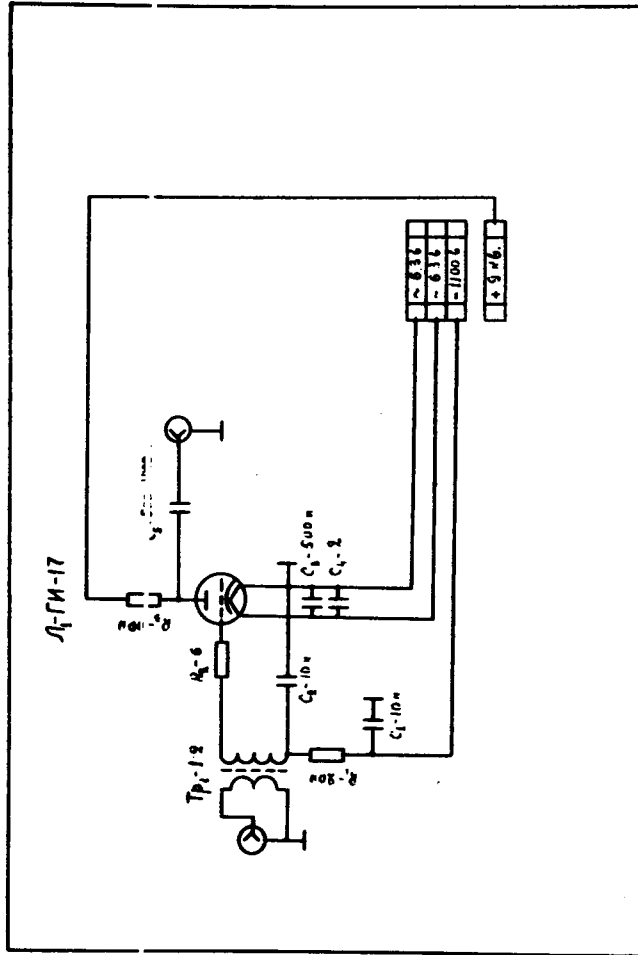


Рис.7. Принципиальная схема оконечного каскада с простой RC -целью.

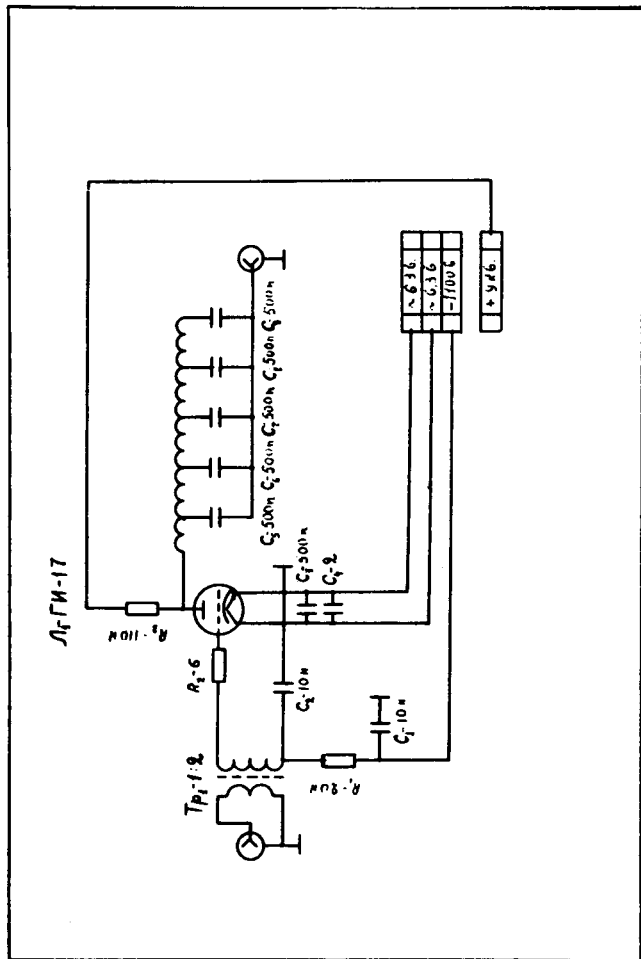


Рис.8. Принципиальная схема оконечного каскада с неоднородной линией.



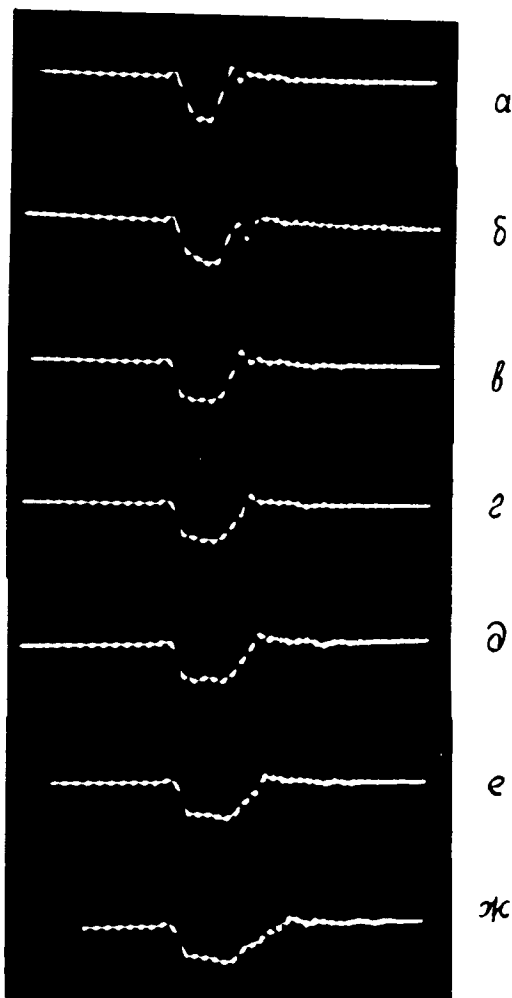


Рис.9. Осциллограммы сформированных высоковольтных импульсов с оконечного каскада (рис.8) на нагрузку  $R_H = 100$  ом. Длительность импульсов: (а) -  $t_u = 40$  нсек; (б)  $t_u = 50$  нсек; (в)  $t_u = 60$  нсек; (г)  $t_u = 70$  нсек; (д)  $t_u = 80$  нсек; (е)  $t_u = 90$  нсек; (ж)  $t_u = 100$  нсек. Развертка 300 нсек на весь экран, метки - 10 нсек.

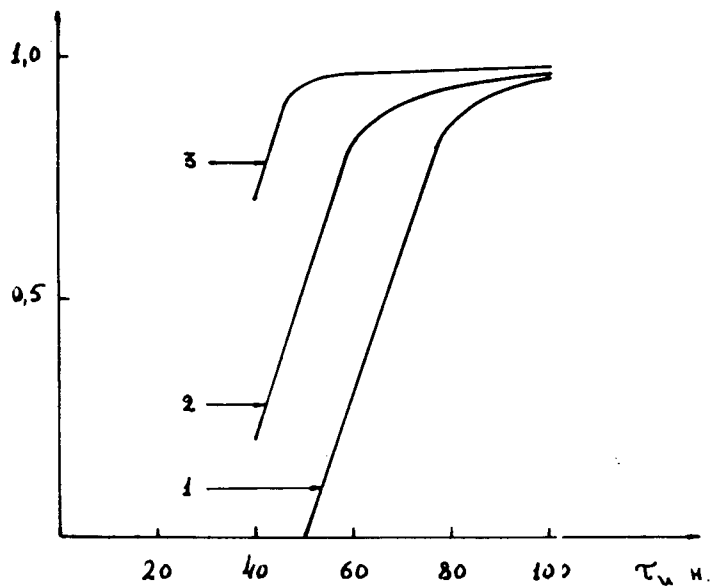


Рис.10.Графики эффективности работы ИК в зависимости от длительности импульсов  $\tau_{и}$  запускающих окончный каскад.

(1) $E_3 = 7$ кВ;	$R_{ш} = 300$ ом;	$C_{ик} = 300$ п.
(2) $E_3 = 8$ кВ;	$R_{ш} = 300$ ом;	$C_{ик} = 300$ п.
(3) $E_3 = 5,5$ кВ;	$R_{ш} = 3000$ ом;	$C_{ик} = 300$ п.

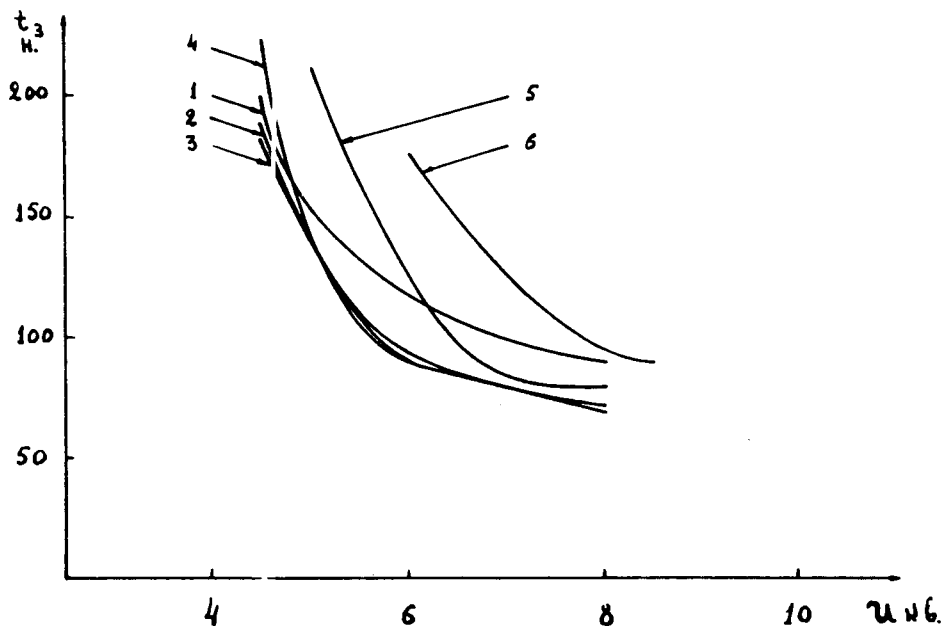


Рис.11. Графики времени задержки  $t_3$  развития разряда в ИК в зависимости от высоковольтного анодного напряжения на окончном каскаде при различных длительностях запускающего импульса

- |                       |                      |                   |
|-----------------------|----------------------|-------------------|
| (1) $r_a = 100$ нсек; | $R_{III} = 3000$ ом; | $C_{ИК} = 300$ п. |
| (2) $r_a = 90$ нсек;  | $R_{III} = 3000$ ом; | $C_{ИК} = 300$ п. |
| (3) $r_a = 80$ нсек;  | $R_{III} = 3000$ ом; | $C_{ИК} = 300$ п. |
| (4) $r_a = 70$ нсек;  | $R_{III} = 3000$ ом; | $C_{ИК} = 300$ п. |
| (5) $r_a = 60$ нсек;  | $R_{III} = 3000$ ом; | $C_{ИК} = 300$ п. |
| (6) $r_a = 50$ нсек;  | $R_{III} = 3000$ ом; | $C_{ИК} = 300$ п. |

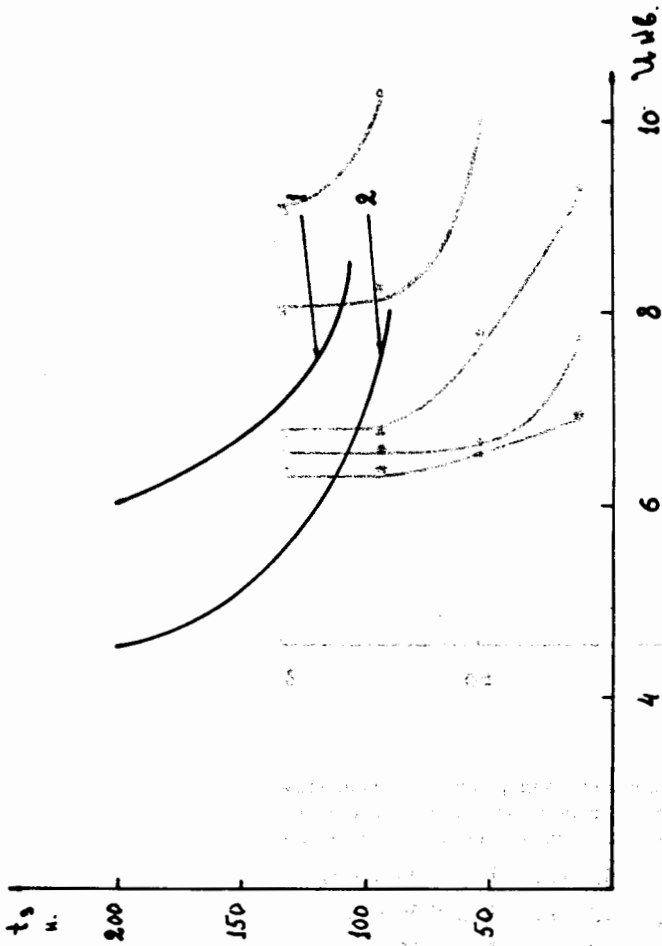


Рис.12. Графики времени задержки  $t_s$  развития разряда в ИК в зависимости от высоковольтного анодного напряжения при различных значениях

(1) -  $r_u = 100$  нсек;  $R_{ш} = 300$  Ом;  $C_{икк} = 300$  п.  
 (2) -  $r_u = 100$  нсек;  $R_{ш} = 3000$  Ом;  $C_{икк} = 300$  п.

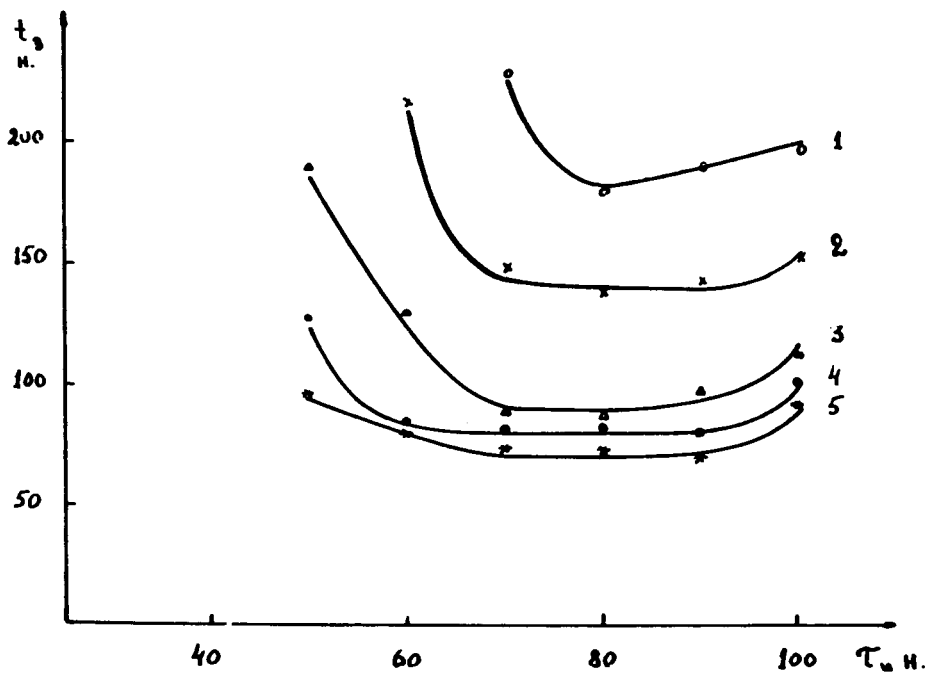


Рис.13. Графики времени задержки  $t_d$  развития разряда в ИК в зависимости от длительности запускающего импульса при возрастающем анодном напряжении на окончном каскаде:

- (1)  $E_1 = 4,5$  кв;  $R_{ш} = 3000$  ом;  $C_{ик} = 300$  п.
- (2)  $E_1 = 5,0$  кв;  $R_{ш} = 3000$  ом;  $C_{ик} = 300$  п.
- (3)  $E_1 = 6,0$  кв;  $R_{ш} = 3000$  ом;  $C_{ик} = 300$  п.
- (4)  $E_1 = 7,0$  кв;  $R_{ш} = 3000$  ом;  $C_{ик} = 300$  п.
- (5)  $E_1 = 8,0$  кв;  $R_{ш} = 3000$  ом;  $C_{ик} = 300$  п.

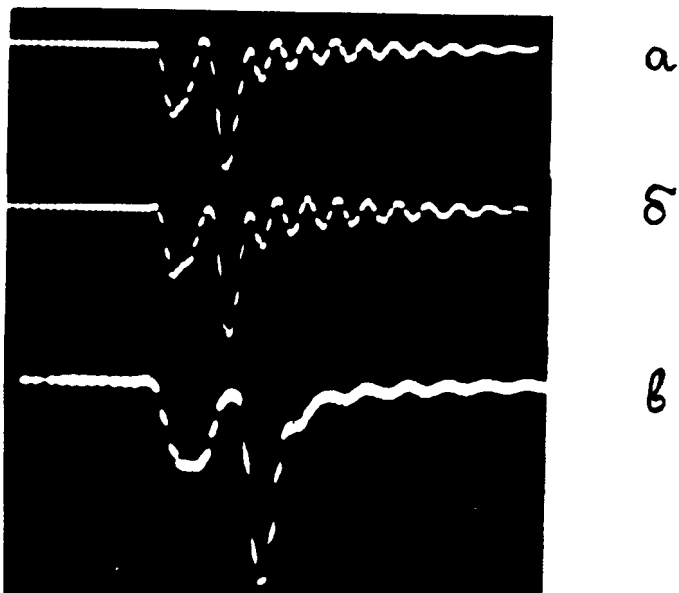


Рис.14. Осциллограмма тока заряда и разряда через ИК, при  $U_0 = 7,0$  кв и длительностях запускающих импульсов: (а) -  $t_{\text{за}} = 70$  нсек; (б) -  $t_{\text{за}} = 80$  нсек; (в) -  $t_{\text{за}} = 100$  нсек. Развертка - 1 микро-секунда на весь экран, метки - 10 нсек.

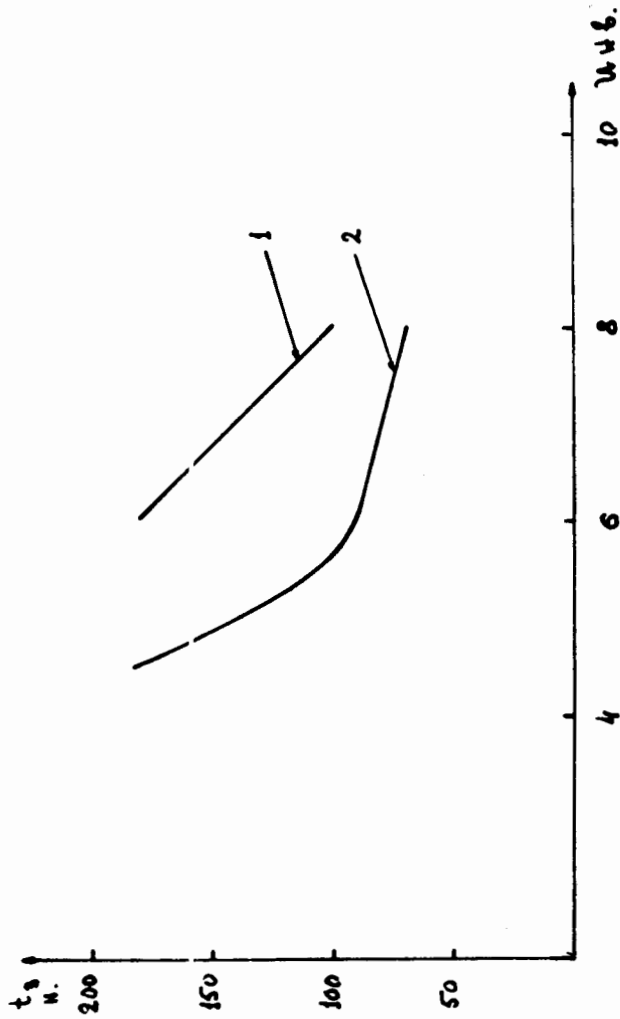


Рис.15. Графики времени задержки  $t_a$  развития разряда в ИК в зависимости от анодного напряжения на оконечном каскаде для каскада с простой RC - цепью и искусственной линией.

(1) -  $r_{\text{ш}} = 80$  нсек;  $R_{\text{ш}} = 3000$  ом;  $C_{\text{ик}} = 300$  п.  $C_{\text{ш}} = 500$  п.  
 (2) -  $r_{\text{ш}} = 80$  нсек;  $R_{\text{ш}} = 3000$  ом;  $C_{\text{ик}} = 300$  п. Исх. линия

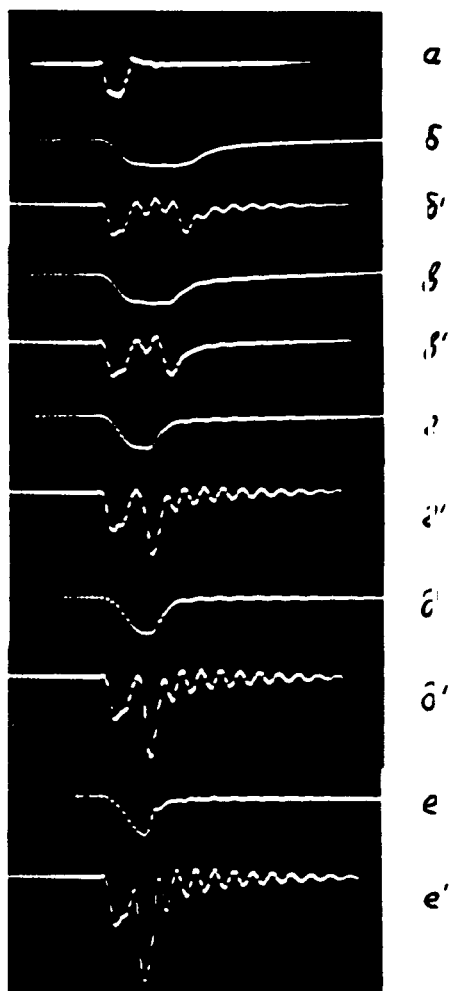


Рис.16. Осциллограммы напряжения на электродах и тока через ИК при регистрации заряженной частицы и последовательно возрастающем анодном напряжении на оконечном каскаде. (а) - импульс напряжения с выхода оконечного каскада на активной нагрузке  $R_H = 100$  ом;  $E_3 = 6$  кв;  $r_a = 80$  нсек, (б) - импульсы напряжения на электродах ИК при  $E_3 = 4,5$  кв, (б') - импульсы тока заряда и разряда через ИК при  $E_3 = 4,5$  кв, (в) - импульс напряжения на электродах ИК при  $E_3 = 5,0$  кв, (в') - импульсы тока заряда и разряда через ИК при  $E_3 = 5,0$  кв, (г) - импульс напряжения на электродах ИК при  $E_3 = 6,0$  кв, (г') - импульсы тока заряда и разряда через ИК при  $E_3 = 6,0$  кв; (д) - импульс напряжения на электродах ИК при  $E_3 = 7,0$  кв; (д') - импульсы тока заряда и разряда через ИК при  $E_3 = 7,0$  кв; (е) - импульс напряжения на электродах ИК при  $E_3 = 8,0$  кв; (е') - импульсы тока заряда и разряда через ИК при  $E_3 = 8,0$  кв. Развертка - 1 микросекунда на весь экран, метки - 10 нсек.



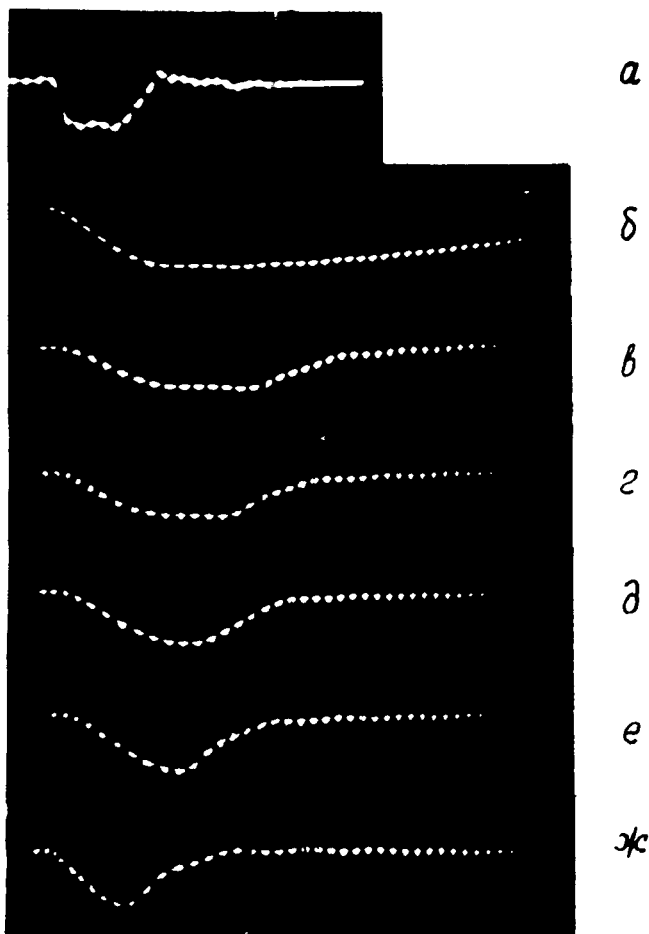


Рис.17. Осциллограммы напряжения на электродах ИК при возрастающем анодном напряжении на оконечном каскаде: а) - импульс напряжения с выхода оконечного каскада на активной нагрузке  $R_H = 100$  ом,  $E_3 = 6,0$  кв и  $r_a = 80$  нсек; б) - импульс напряжения на электродах ИК при  $E_3 = 6,0$  кв (нет пробоя искры); в) - импульс напряжения на электродах ИК при  $E_3 = 4,5$  кв; г) - импульс напряжения на электродах ИК при  $E_3 = 5,0$  кв; д) - импульс напряжения на электродах ИК при  $E_3 = 6,0$  кв; е) - импульс напряжения на электродах ИК при  $E_3 = 7,0$  кв; ж) - импульс напряжения на электродах ИК при  $E_3 = 8,0$  кв. Развертка 300 нсек на весь экран, метки - 10 нсек.