

6533

Экз. чит. зала

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13 - 6533



М.М.Кулюкин, Д.Б.Понтекорво, В.М.Сороко,
И.В.Фаломкин, Ю.А.Щербаков

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ
ДЛЯ ПИТАНИЯ СТРИМЕРНЫХ КАМЕР

1972

P13 - 6533

**М.М.Кулюкин, Д.Б.Понтекорво, В.М.Сороко,
И.В.Фаломкин, Ю.А.Щербаков**

**ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ
ДЛЯ ПИТАНИЯ СТРИМЕРНЫХ КАМЕР**

Новый трековый прибор - стримерная камера ^{/1,2/}, предложенный советскими физиками в 1963 году, уже нашел достаточно широкое применение в практике физического эксперимента. Для работы таких камер требуются электрические импульсы амплитудой в несколько сотен киловольт, обладающие определенными временными параметрами ^{/3/}.

Наиболее популярными генераторами импульсных высоковольтных напряжений, применяемых для питания стримерных камер, являются генераторы типа Аркадьева-Маркса ^{/4/}, обладающие рядом достоинств, а именно: малым выходным импедансом, малой собственной индуктивностью ^{/5,6/}, стабильностью параметров; они достаточно просты в изготовлении и обслуживании. Применение этих генераторов для питания стримерных камер предъявляет к ним специфические требования, поскольку реализация ряда достоинств нового детектора тесно связана с такими характеристиками импульсного генератора как время и частота срабатывания, фронт и форма импульса, нагрузочные характеристики и пр.

В данной работе рассмотрены некоторые принципы конструирования емкостных импульсных генераторов и дан обзор конструкций генераторов, разработанных нами для питания гелиевых стримерных камер ^{/7/}.

Общие требования

Генератор импульсных напряжений (ГИН), предназначенный для питания стримерных камер, должен удовлетворять следующим требованиям:

а) быть управляемым, иметь возможно меньшую задержку между запускающим и выходным импульсами и минимальный разброс этой задержки;

б) обеспечивать требуемую частоту срабатываний;

в) иметь малое (порядка 10 нсек) время нарастания переднего фронта (если не применяются специальные схемы "обострения" импульса);

г) число ступеней генератора и разрядная емкость должны обеспечивать получение заданного выходного напряжения на нагрузке.

В ряде случаев полезно иметь возможность легко менять амплитуду и полярность выходного импульса. На рис. 1а изображена принципиальная электрическая схема генератора. Время задержки выходного импульса генератора существенно зависит от времени формирования разряда в управляющем разряднике. Наилучшие результаты показала система поджига, при которой на управляющий искровой промежуток ГИН'а одновременно воздействует ионизация от дополнительной искры и перенапряжение. Это достигается тем, что поджигающий электрод располагается у заземленного через сопротивление электрода первого разрядного промежутка. На управляющий электрод через небольшую емкость (470 пф) подается импульс от тиратронного генератора амплитудой 10–15 кВ. Полярность его с помощью импульсного трансформатора выбирается обратной зарядному напряжению. Таким образом, после пробоя дополнительного искрового промежутка на первом искровом промежутке возникает значительное перенапряжение. Снижение амплитуды импульса первой ступени за счет шунтирующего действия конденсатора окупается

уменьшением времени коммутации и стабильностью работы при значительных изменениях зарядного напряжения ГИН'а или амплитуды управляющего импульса.

Последующие разрядники пробиваются за счет перенапряжения, возникающего на них при пробое предыдущих разрядников. При этом определяющую роль в стабильности и скорости коммутации разрядников играют такие факторы, как материал и форма разрядников, предварительная ионизация газа в разрядном промежутке, величина и время воздействия перенапряжения, определяемые межкаскадными сопротивлениями, емкостью разрядника и емкостью секции генератора на землю.

Из металлов, применяемых для изготовления разрядников, минимальное время запаздывания дает алюминий за счет малой работы выхода и наличия диэлектрической пленки на поверхности. Основную роль в пробое таких промежутков играют катодные процессы, поэтому важен выбор величины напряженности поля у поверхности разрядника, определяемой кривизной этой поверхности. Максимальная кривизна определяется отсутствием электрической короны при максимальном зарядном напряжении.

Поскольку облучение искрового промежутка ионизирующим излучением уменьшает время коммутации, целесообразно располагать разрядники так, чтобы они взаимно облучались возникающим при пробое промежутка ультрафиолетовым излучением.

Зависимость величины и длительности перенапряжения на разряднике от параметров генератора можно определить по эквивалентной схеме для второго разрядника, который имеет минимальное перенапряжение по сравнению с остальными разрядниками. Переходный процесс схемы, изображенной на рис. 1б, определяется следующей зависимостью:

$$P < \frac{C_3}{C_3 + C_p} e^{-\frac{t}{r(C_3 + C_p)}} + 1, \quad (1)$$

где P - перенапряжение, C_3 и C_p - величины емкостей конденсаторных секций на землю и между собой, а r - межсекционное сопротивление (в данном случае $r = Z$ для схемы на рис. 1а). Учитывая среднее статистическое время запаздывания разряда для материала и условий работы разрядника, можно для конкретного генератора определить минимальное значение межкаскадных сопротивлений. Например, для генераторов с выходной емкостью $C_B = 330$ пф эта величина оказывается порядка 10 ком при $C = 6600$, $n = 20$ (где C - емкость конденсаторной секции, n - число секций). Это в свою очередь, ограничивает максимальную частоту срабатывания многокаскадного генератора единицами герц.

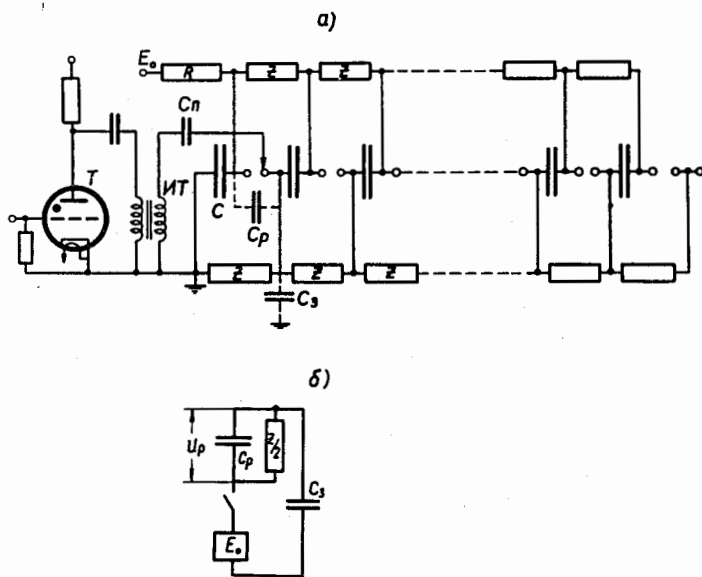


Рис. 1а). Принципиальная схема генератора: Т - водородный тиратрон, ИТ - импульсный трансформатор, C_n - переходная емкость, C - емкость конденсаторной секции, C_p - монтажная емкость между секциями, C_3 - монтажная емкость секции на землю, R - зарядное сопротивление, Z - разделительные импедансы.

б) Эквивалентная схема второго разрядного промежутка.

Поскольку скорости процессов зарядки и разрядки разнятся на несколько порядков, целесообразно применить вместо межкаскадных сопротивлений индуктивности. При выборе величины собственного периода такой системы много большей, чем длительность электрических процессов в нагрузке, такая замена мало повлияет на форму импульса, поскольку импеданс нагрузки (газовый разряд) много меньше импеданса межкаскадных индуктивностей. Для сравнительно медленного процесса зарядки легко обеспечивается частота срабатываний генератора до нескольких десятков герц, и ограничение на верхнюю границу частоты срабатывания будет накладывать уже внутреннее сопротивление питающего выпрямителя и время деионизации разрядников.

Передний фронт выходного импульса генератора определяется в основном величиной собственной индуктивности схемы генератора. Величина этой индуктивности наиболее существенно зависит от расположения, типа и размеров применяемых деталей. Следует заметить, что в настоящее время уже общепринято применение безиндукционных керамических конденсаторов.

Как правило, лабораторные образцы генераторов собираются из стандартных конденсаторов номинальной емкости C_0 , которые монтируются в параллельные секции по m конденсаторов, а n секций включаются последовательно. Генератор работает на емкостную нагрузку C_H .

В приближении, не учитывающем внутреннее сопротивление, индуктивность генератора и шунтирующее влияние токов утечки, выходное напряжение E будет определяться зарядным напряжением E_0 и отношением емкостей генератора и нагрузки:

$$\frac{E}{n E_0} = \frac{m C_0}{m C_0 + n C_H} \quad (2)$$

Для обеспечения частоты срабатывания f общая емкость генератора, пропорциональная $m n^3$, должна удовлетворять соотношению:

$$m n = \frac{2P}{C_0 E_0^2 f}, \quad (3)$$

где P - мощность источника питания.

Из выражений (2) и (3) определяется емкость секции генератора $m C_0$ и число его секций. При выборе значения E следует иметь в виду, что неучтенные факторы могут снизить амплитуду выходного импульса на 15-20%.

Ниже приводятся конкретные конструкции емкостных импульсных генераторов, разработанных для питания стримерных камер.

Генератор для экспериментальных целей

Генератор был сконструирован и изготовлен для исследования работы стримерных камер в большом диапазоне значений амплитуд электрических импульсов ($U_{\text{раб}} = 40 - 500$ кВ).

Генератор имеет 20 секций и собран по схеме, приведенной на рис. 1а. Каждая секция состоит из трех конденсаторов К15-4 и имеет общую емкость 6600 пф. Четные и нечетные секции расположены в две колонны (рис. 2). При таком расположении секций возникают дополнительные межсекционные емкости, улучшающие работу разрядников^{4/}. Обе колонны вписаны в цилиндр и находятся в его противоположных секторах. В районе оси цилиндра находятся разрядники, разрядные промежутки которых направлены поперек оси цилиндра и имеют взаимную прямую видимость. Разрядники, соединенные с высоковольтными сторонами конденсаторных секций, укреплены на штанге, при вращении которой изменяется длина всех разрядных промежутков одновременно.

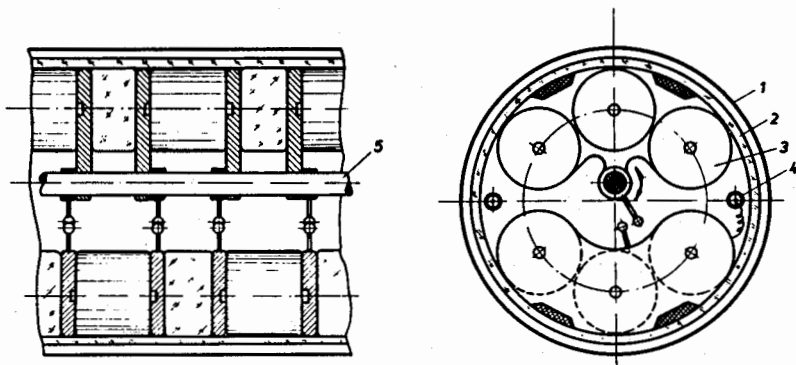


Рис. 2. Расположение деталей в генераторе с регулируемыми разрядными промежутками. 1 - металлический кожух-экран, 2 - изолирующий кожух, 3 - конденсаторы, 4 - разделительные сопротивления, 5 - изолирующая ось подвижных электродов разрядников.

Конденсаторные секции закрыты изолирующим кожухом, состоящим из плексигласового стакана, закрывающего высоковольтную часть, и приклеенного к нему цилиндра из винипласта. Генератор в изолирующем кожухе помещен в стальной бак, позволяющий увеличить давление газа в генераторе до 8 атм. Высоковольтный вывод генератора осуществлен через плексигласовый изолятор. При необходимости соединение генератора с нагрузкой может осуществляться через масляную ванну, исключая появление воздушной короны и уменьшающую габариты соединения.

Ввод напряжения для зарядки конденсаторов, тиратронный генератор пускового сигнала, вывод хвостовика штанги регулировки разрядных промежутков, вентиль подачи газа в кожух и манометр контроля давления расположены на заднем фланце.

Общая длина генератора без выходного изолятора и тиратрона равна 750 мм. Диаметр металлического кожуха равен 250 мм. На рис. 3 приведена фотография генератора со снятым кожухом.

Для поджига управляемого искрового промежутка используется водородный тиратрон ТГИ1-325/16. Тиратрон и зарядный конденсатор помещены в экран и представляют собой коаксиальную конструкцию. Это, наряду с повышением напряжения канала тиратрона и подачей на его сетку импульса амплитудой 1-1,5 кв, позволило снизить задержку пробоя тиратрона до 80-100 нсек.

Поскольку генератор не рассчитывался на большую частоту срабатываний, в качестве межкаскадных сопротивлений использованы объемные сопротивления, изготовленные из проводящей бумаги и имеющие величину 30 ком. При атмосферном давлении сухого азота в кожухе генератор устойчиво работает в диапазоне зарядных напряжений от 2 до 15 кв. При повышении давления до 4 атм диапазон зарядных напряжений смещается до 7-30 кв. Точная подстройка генератора под заданное напряжение осуществляется изменением длины разрядных промежутков.

Давление азота в 4 атм уже существенно уменьшает паразитное коронирование с электродов генератора, шунтирующее выходной импульс (рис. 4). Время нарастания переднего фронта импульса не превышает 10 нсек. Осциллограммы выходного импульса приведены на рис. 5а и б. Минимальное время задержки появления высоковольтного импульса по отношению к стартовому импульсу тиратронного генератора составляет 0,4 мксек. Такое сравнительно малое время задержки реализуется за счет точной подстройки разрядников генератора, их интенсивного взаимного облучения и компактности конструкции генератора.

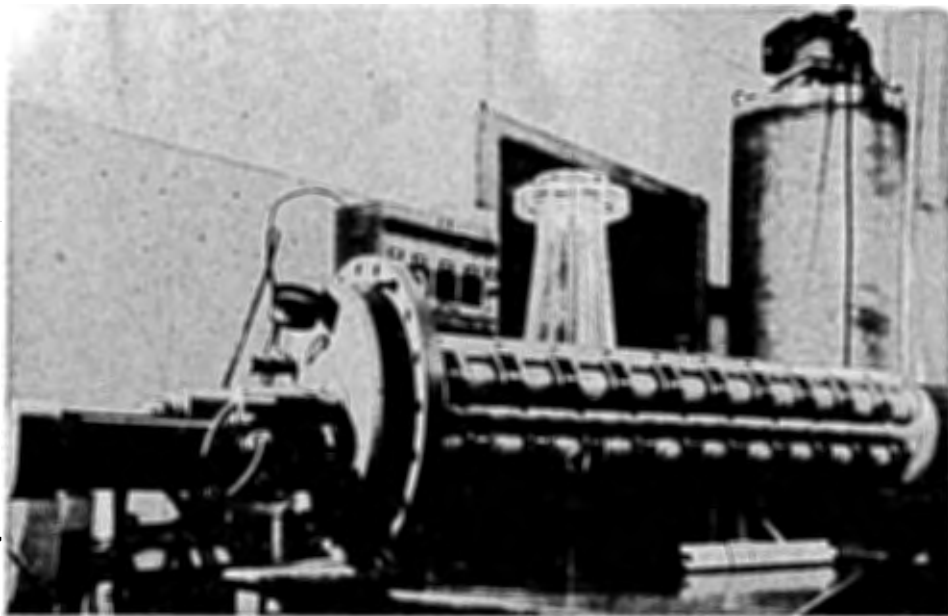


Рис. 3. Генератор для экспериментальных целей со снятым кожухом.

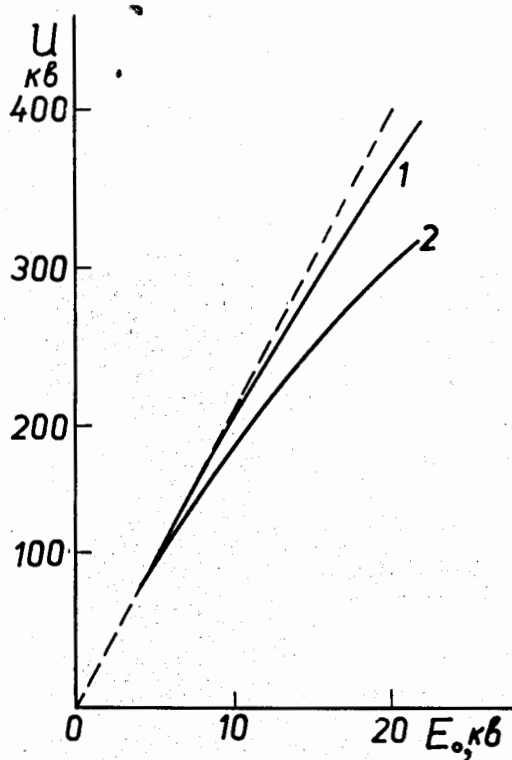


Рис. 4. Амплитудная характеристика холостого хода генератора при давлении азота в 4 атм. 1 - выходной электрод в масле, 2 - выходной электрод в воздухе.

Генератор для питания стримерной камеры в магнитном поле

Для того чтобы избежать длинных электрических цепей при питании стримерной камеры, расположенной в зазоре магнита, был сконструирован и изготовлен ГИН, который располагался в зазоре между катушками магнита и непосредственно соединялся с камерой. Он является конструктивным развитием генератора, применявшегося нами для питания стримерной камеры с пропорциональными счетчиками ^{17/}. По конструктивным

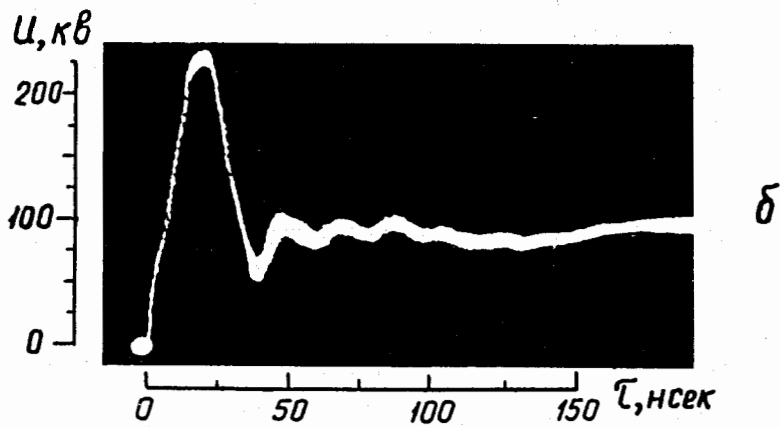
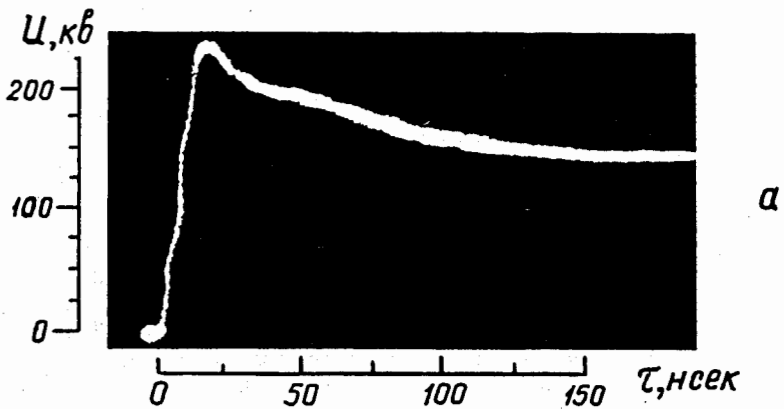


Рис. 5. Осциллограммы импульса: а - пробой в камере отсутствует, б - пробой в камере (трек).

условиям поперечный размер ГИН не должен превышать 200 мм. Использовалась коаксиальная конструкция расположения конденсаторных секций при сохранении прямой видимости между разрядниками. Схематически конструкция секций генератора изображена на рис. 6.

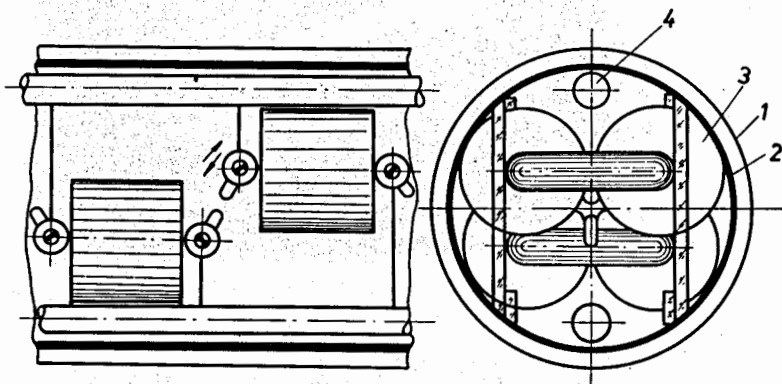


Рис. 6. Расположение деталей в генераторе для стримерной камеры в магнитном поле. 1 - металлический экран, 2 - изолирующий кожух, 3 - конденсаторы, 4 - разделительные индуктивности.

Генератор состоит из 19 конденсаторных секций емкостью 500 пф каждая (2 параллельно соединенных конденсатора К15-4).

Чтобы обеспечить требуемое быстродействие ГИН^{*}_д (10 сек^{-1}), в качестве межкаскадных импедансов использованы дроссели. Они представляют собой индуктивности, намотанные однослойной сплошной намоткой на стеклянной трубке диаметром 2 см. Намотка производилась эмалированным проводом, диаметр которого выбирался из условия отсутствия межвиткового пробоя. Для выполнения этого условия достаточно ограничить межвитковое напряжение в дросселе 200 вольтами. При этом диаметр провода в данных габаритах катушки равен 0,12 мм, а индуктив-

ность катушки равна 3 мги. При таких параметрах собственный период контура генератора составляет ~ 25 мксек и за время 50-100 нсек, потребное для развития процесса в нагрузке, выходное напряжение с достаточной точностью можно считать постоянным. Волновое сопротивление системы по крайней мере на порядок больше, чем сопротивление нагрузки (газовый разряд), и процесс разряда конденсаторов ГИНа остается аperiodическим.

Конструкция поджига управляемого разрядника и тиратронного генератора для поджига этого разрядника такие же, как в вышеописанном генераторе. Генератор вставляется в изолирующий кожух, представляющий собой стандартную электроизоляционную трубу из бакелизированной бумаги с толщиной стенки 5 мм, которая, в свою очередь, вставляется с зазором 2 см в металлический экран. Высоковольтный конец генератора открыт и входит в специальное гнездо конструкции стримерной камеры. Для питания генератора используется высоковольтный выпрямитель ВС-20-10.

Генератор для стримерной камеры высокого давления

Необходимость увеличения напряжения для получения следов стандартной яркости при увеличении давления газа в камере привела к созданию ГИНа с повышенным выходным напряжением. Для этой цели был сконструирован и изготовлен ГИН с максимальным выходным напряжением 800 кв. Поскольку в нашем распоряжении имелись только конденсаторы на 20 кв, то для сокращения коммутируемых секций была принята схема двухполярной зарядки конденсаторных секций ^{/5/}. Электрическая схема генератора изображена на рис. 7.

Каждая секция представляет собой две группы конденсаторов, соединенных последовательно. Группа состоит из 6 конденсаторов емкостью 2200 пф. Конденсаторы крепятся к трем пластинам, являющимся электро-

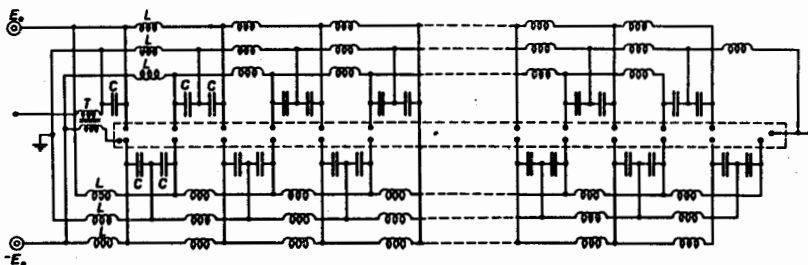


Рис. 7. Принципиальная схема генератора с симметричным питанием. Т - импульсный трансформатор, С - емкость секции, L - разделительные индуктивности.

дами секции (рис. 8). Секции вставляются в пазы плексигласовой кар-
каса и соединяются с электродами разрядников и системой зарядки. Все
элементы генератора погружены в кабельное масло, которое является
основной изолирующей средой.

Разрядники находятся в герметической плексигласовой трубе, по-
зволяющей увеличить давление газа в разрядных промежутках до 6 атм.
Электроды разрядников имеют возможность осевого перемещения благо-
даря использованию сальников для герметизации.

В качестве зарядных импедансов используются индуктивности. Ин-
дуктивности представляют собой плотную однослойную намотку провода
ПЭЛ 0,15 на плексигласовом каркасе диаметром 20 мм и длиной 120 мм.
Каркас имеет медную оконцовку для надежного контакта с пружинными
гнездами на электродах секций, которыми и осуществляется крепление
межсекционных индуктивностей.



Рис. 8. Генератор для стримерной камеры высокого давления.

Высокое напряжение выводится через плексигласовый цилиндрический изолятор диаметром 200 мм. В верхней части изолятора имеется полость, заполненная маслом, под слоем которого находится гнездо для соединения генератора с нагрузкой. Вокруг изолятора имеется контактное кольцо для экрана. На крышке смонтирован также высоковольтный делитель для измерения величины и формы импульсов генератора.

Генератор питается от промышленного выпрямителя типа ВС-50-50, который, благодаря заземлению средней точки высоковольтной обмотки, превращен в двухполярный выпрямитель с максимальным напряжением ± 25 кв.

Поджиг первого искрового промежутка осуществляется с помощью третьего электрода, имеющего независимую регулировку величины искрового зазора. Конструкция тиратронного генератора и система поджига управляющего разрядника не отличаются от подобных элементов, применяемых нами в других конструкциях ГИНов.

Генератор работает в диапазоне зарядных напряжений от 7 до 20 кв при изменении давления в разрядниках от 1 до 4 атм без перестройки длины разрядных промежутков. По сравнению с другими генераторами данная конструкция обладает повышенной индуктивностью, на что указывает затяжка переднего фронта импульса до 40 нсек и наличие значительных осцилляций на спадающей ветви выходного напряжения. Увеличение индуктивности в данной конструкции вызвано значительной протяженностью цепей, коммутирующих секции (общая длина разрядников плюс длина соединений конденсаторных секций с разрядниками). Следует иметь в виду, что последовательная индуктивность в некоторых случаях может оказаться полезной, поскольку она увеличивает величину максимальной амплитуды выходного импульса (в пределе до двух раз).

Задержка выходного импульса генератора по отношению к пусковому импульсу не превышает 0,6-0,7 мксек. Эта задержка включает в себя задержку импульса запуска тиратрона, задержку импульса тиратронного

генератора, время развития разряда в управляемом разряднике ГИИ^н и время коммутации разрядников ГИИ^н. Настроенный генератор имеет флюктуации этой задержки < 100 нсек и нечувствительность задержки к изменению питающего напряжения в пределах не менее $\pm 10\%$.

Каждый из описанных генераторов в процессе наладки и работы выдержал $\approx 10^6$ срабатываний без ощутимого изменения устойчивости запуска, диапазона зарядных напряжений или времени задержки.

Опыт показал, что наиболее частой причиной нарушения работы генератора, выражающейся в спонтанных пробоях или сильном уменьшении диапазона зарядных напряжений, является нарушение контактов в общих цепях заряда-разряда конденсаторов за счет электроэрозии под действием сильных токов в разряде. В связи с этим применение в ряде узлов пружинных контактов предпочтительно, особенно при работе конденсаторов в масляной ванне.

Авторы выражают благодарность Л.К. Богомоловой и А.Г. Потехину за помощь при конструировании и наладке генераторов.

Литература

1. В.А. Михайлов, В.И. Райнишвили, Г.Е. Чиковани. ЖЭТФ, 45, 3, 818 (1963).
2. Б.А. Долгошеин, Б.И. Лучков. ЖЭТФ, 46, 1, 393 (1964).
3. Б.А. Долгошеин, Б.И. Лучков, Б.У. Родионов. ЖЭТФ, 46, 6, 1953.
4. "Высоковольтное испытательное оборудование и измерения" под ред. А.А. Воробьева, Госэнегиздат (1960).
5. E.Gygi, F.Schneider. Prepr. CERN, 64-46, Geneva (1964).
6. F.Bulos, A.Odian, F.Willa, D.Jonnt. SLAC Rep. No 74 (1967).
7. М.М. Кулюкин, Д.Б. Понтекорво, И.В. Фаломкин, Д.М. Хазинс, Ю.А. Шербаков. ПТЭ, 4, 48 (1967).

Рукопись поступила в издательский отдел
20 июня 1972 года.