

3

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР



В.Т.Астрелин, В.В.Воробьев, В.М.Лагунов,
В.С.Николаев, М.А.Щеглов

**МАЛОИНДУКТИВНЫЙ ГИН
С ВОЗДУШНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ
(1,8 МВ, 180 кДж)**

ПРЕПРИНТ 82 - 06



Новосибирск

МАЛОИНДУКТИВНЫЙ ГИИ С ВОЗДУШНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

(1,8 МВ, 180 кДж)

В.Т.Астрелин, В.В.Воробьев, В.М.Лагунов,
В.С.Николаев, М.А.Шеглов

А Н Н О Т А Ц И Я

В качестве отдельного модуля мегаджоульного ГИИ предлагается использовать LC -генератор с воздушной изоляцией. Рассмотрена конструкция, приведены результаты численных расчетов отдельных узлов и электрических испытаний модуля.

Для генерирования мегаджоульных релятивистских электронных пучков, необходимых в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу, могут быть использованы генераторы импульсных напряжений (ГИН) с запасом энергии порядка нескольких мегаджоулей. При создании таких генераторов целесообразно использовать модульный принцип, т.е. составлять большой генератор из однотипных ГИН (модулей) меньшего энергозапаса в количестве порядка 10-20 штук [1]. Такой принцип облегчает конструирование, изготовление и обслуживание мегаджоульного комплекса. Кроме того, появляется возможность создания искусственных длинных линий из отдельных модульных генераторов для формирования заданной выходной формы импульса и улучшения согласования с вакуумным диодом.

При объединении большого числа модулей важное значение приобретают проблема их синхронизации и вопросы надежности, в частности, уменьшение числа самопробоев. Для облегчения решения проблемы синхронизации можно для каждого отдельного модуля использовать схему LC-генератора [2]. Эта схема обладает рядом преимуществ. Так, в каждом модуле, основанном на LC-схеме, количество разрядников вдвое меньше, чем в модуле на основе классической схемы Аркадьева-Маркса. Другое преимущество этой схемы связано с тем, что в LC-генераторе время работы разрядников, равное времени переплюсовки конденсаторов, оказывается достаточно большим (~ 40 мкс в нашем случае). Поэтому синхронизация 10-20 модулей будет удовлетворительной даже при временном разбросе разрядников порядка 5 мкс, что значительно легче обеспечить, чем разброс, требуемый для синхронизации модулей на основе схемы Аркадьева-Маркса. Столь большой временной разброс разрядников допускает работу при напряжениях значительно ниже уровня самопробоя, что обеспечивает надежную работу большого числа разрядников (100-300 шт.) мегаджоульного комплекса.

Определенные трудности в LC-схеме создает наличие выходного коммутатора, который должен надежно работать при коммутации суммарного тока всех модулей при полном напряжении. В частности, электрическая прочность и стабильность работы выходного коммутатора в значительной степени определяется состоянием поверхностей электродов, которое не должно заметно изменяться при большом числе импульсов. В качестве параметра, существенно влияющего на эрозию поверхности электродов импульсных разрядников, можно рассмат-

ривать количество заряда α , проходящее в течение импульса через единицу площади поперечного сечения искрового канала. Пользуясь результатами теории [3] и экспериментальными данными [4,5], можно получить следующее соотношение:

$$\alpha = 0,3 (q\rho/t)^{1/3} \text{ (к/см}^2\text{)} \quad (I)$$

Здесь q - количество заряда за импульс, К; t - длительность импульса, мкс; ρ - давление газа, атм. Влияние эрозии электродов выходного коммутатора мегаджоульного комплекса можно оценить сравнением по параметру α с разрядниками зарядной системы импульсного электронного ускорителя "Акваген" [6], которые обеспечивают надежную работу этого генератора в течение ряда лет. Оказывается, что отношение заряда q к длительности импульса t для выходного коммутатора не превосходит этого отношения для разрядников "Аквагена", т.е. параметр α одинаков для этих коммутаторов. Следовательно, можно ожидать, что работа выходного коммутатора мегаджоульного комплекса должна быть достаточно надежной.

Как видно из формулы (I), параметр α уменьшается с ростом t при заданных значениях q и ρ . Поэтому в разрядниках LC-контуров мегаджоульного комплекса вследствие большой длительности импульса поверхности электродов должны работать в облегченных условиях, что значительно повышает их надежность.

Схема LC-генератора обладает определенными недостатками, которые необходимо учитывать при конструировании и эксплуатации. В частности, большая длительность процесса формирования высокого напряжения, равная времени переполюсовки конденсаторов, может сокращать срок службы изоляции и увеличивает активные потери через вспомогательные сопротивления.

Для упрощения соединения модулей в мегаджоульный генератор и удобства эксплуатации предлагается открытая конструкция с воздушной изоляцией. При этом конструкция оптимизируется так, чтобы напряженность электрического поля на металлических частях в воздухе не превышала пробивных значений. В частности, мегаджоульный комплекс оснащается высоковольтным экранирующим электродом, обеспечивающим электрическую прочность генератора при размещении его в ограниченном экспериментальном помещении. Выходное напряжение

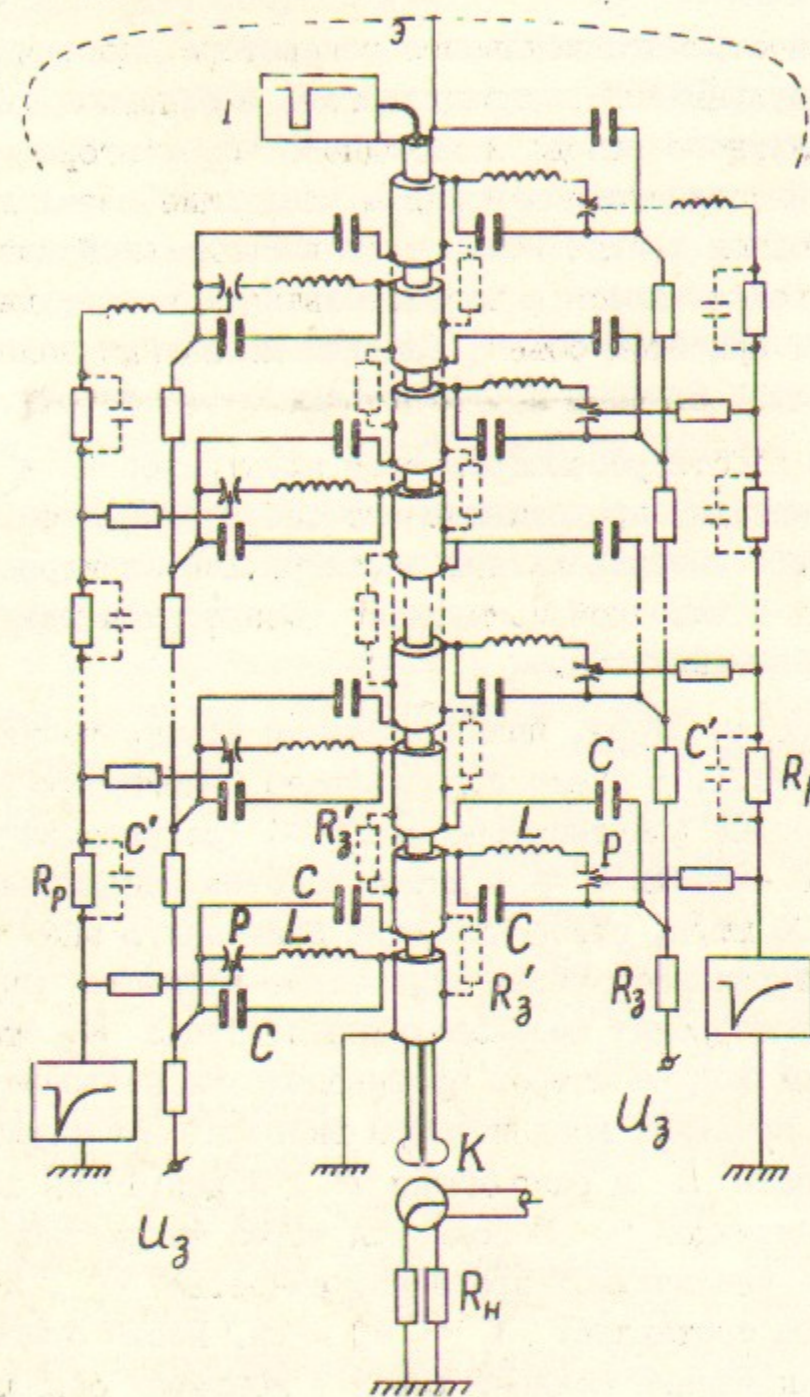


Рис. I
Электрическая схема генератора импульсных напряжений

мегаджоульного генератора передается к выходному коммутатору с помощью одного общего для всех модулей высоковольтного вывода.

Индуктивность мегаджоульного генератора, состоящего из большого числа модульных ГИН, определяется, в основном, индуктивностью высоковольтного вывода и выходного коммутатора. Для уменьшения индуктивности системы приняты следующие меры: высоковольтный вывод выполнен в виде компактной коаксиальной конструкции; конденсаторы подключаются к высоковольтному выводу двухшинными токопроводами. При этом объем, занятый магнитным полем, значительно уменьшен.

В данной работе рассматриваются электрическая и конструктивная схемы модуля, представляющего собой ГИН на основе LC-схемы и содержащего высоковольтный экранирующий электрод, высоковольтный вывод и выходной коммутатор. Приводятся результаты предварительных испытаний ГИН.

Электрическая схема. Принципиальная электрическая схема ГИН приведена на рис.1. В схеме использованы малоиндуктивные ($L_k \approx 18$ нГн) касторовые конденсаторы МИК 50-4 (разработка ИЯФ СО АН СССР), имеющие емкость $C \approx 4$ мкФ и рабочее напряжение $U_3 \approx 50$ кВ в количестве 36 штук, обеспечивающие запасенную энергию до 180 кДж. Конденсаторы заряжаются через жидкостные зарядные сопротивления

R_3 и через электролит высоковольтного вывода R_3' так, что полярность четных конденсаторов противоположна полярности нечетных. При этом нечетные конденсаторы включены в контуры, содержащие индуктивности L и разрядники P . Поджигающий импульс разрядников с амплитудой 50 кВ подается через жидкостные сопротивления R_p с увеличенной проходной емкостью C' . Индуктивность каждого контура составляет $L \sim 40$ мкГн. После срабатывания разрядников напряжения конденсаторов в контурах осциллируют, так что потенциал высоковольтного электрода Φ начинает колебаться в пределах $0 \div 1,8$ МВ с периодом $T \sim 80$ мкс. Подключение высоковольтного электрода к нагрузке в определенный момент ($t \approx 40$ мкс) производится коммутатором K тригatronного типа, который управляется отрицательным импульсом с амплитудой 100 кВ, получаемым от автономного генератора G . Нагрузкой ГИН является либо диод (на схеме не показан), либо нагрузочное сопротивление R_H .

Конструктивная схема. ГИН монтируется на заземленной спорной площадке. Он собирается из однотипных секций, каждая из ко-

торых содержит четыре конденсатора с металлическими корпусами, расположенные горизонтально, два разрядника с индуктивностями, зарядные и управляющие сопротивления, четыре опорных изолирующих стойки и два градиентных кольца. Каждая секция обеспечивает прирост потенциала до 200 кВ. Рассматриваемый ГИН содержит девять таких секций и позволяет наращивать их количество. Конструкция каждой секции допускает замену конденсаторов и разрядников без разборки модуля в целом. Последняя верхняя секция, находящаяся под максимальным напряжением, закрыта высоковольтным экранирующим электродом. Его потенциал по высоковольтному выводу передается на коммутатор, размещенный под опорной площадкой. Схема размещения элементов ГИН представлена на рис.2.

Высоковольтный экранирующий электрод с наружным диаметром 300 см в сечении представляет собой сегмент тора, образованного сопряжением радиусов 62 см и на краях 15 см. Высота генератора составляет $H \approx 470$ см. Равномерность распределения потенциала по высоте обеспечивается градиентными кольцами с принудительным заданием потенциала. Кольца диаметром 200 см в поперечном сечении имеют радиус 2 см и находятся под потенциалами от 100 до 1500 кВ через 100 кВ. Положение и размеры градиентных колец, а также форма высоковольтного электрода были подобраны с использованием численных расчетов на ЭВМ (система КСИ - БЭСМ ВЦ СО АН СССР [7]) так, чтобы напряженности электрического поля на элементах конструкции были меньше пробивных значений в воздухе при заданных габаритах помещения. При расчете корпусы конденсаторов имитировались дисками радиусом 74 см и высотой 28 см. Считалось, что между дисками потенциал удовлетворял условию $\partial u / \partial R = 0$. Нижняя половина градиентных колец заменялась на границу с линейно нарастающим потенциалом. Расчет проводился в предположении, что модуль окружен заземленной металлической поверхностью с $R = 350$ см.

Полученные эквипотенциалы показаны на рис.3 пунктирными линиями. Максимальные напряженности электрических полей достигаются для градиентных колец с потенциалами 1,2 и 1,3 МВ, а также на нижней стороне высоковольтного электрода. На рис.3 эти элементы показаны в более крупном масштабе. Максимальные напряженности составляют $E \sim 29$ кВ/см. Напряженность электрического поля на боковой поверхности высоковольтного электрода достигает $E \sim 27$ кВ/см.

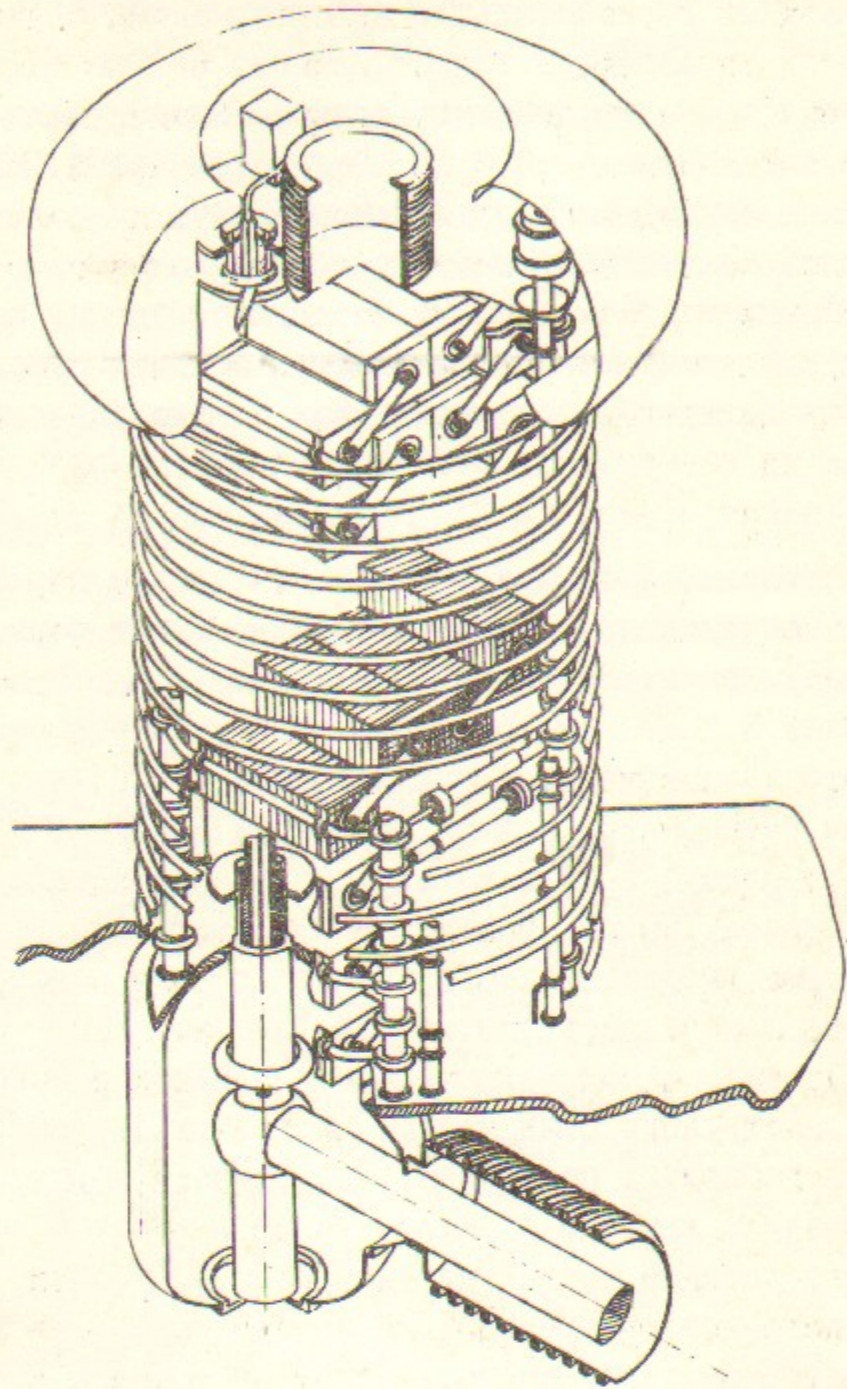


Рис. 2

Конструктивная схема генератора импульсных напряжений

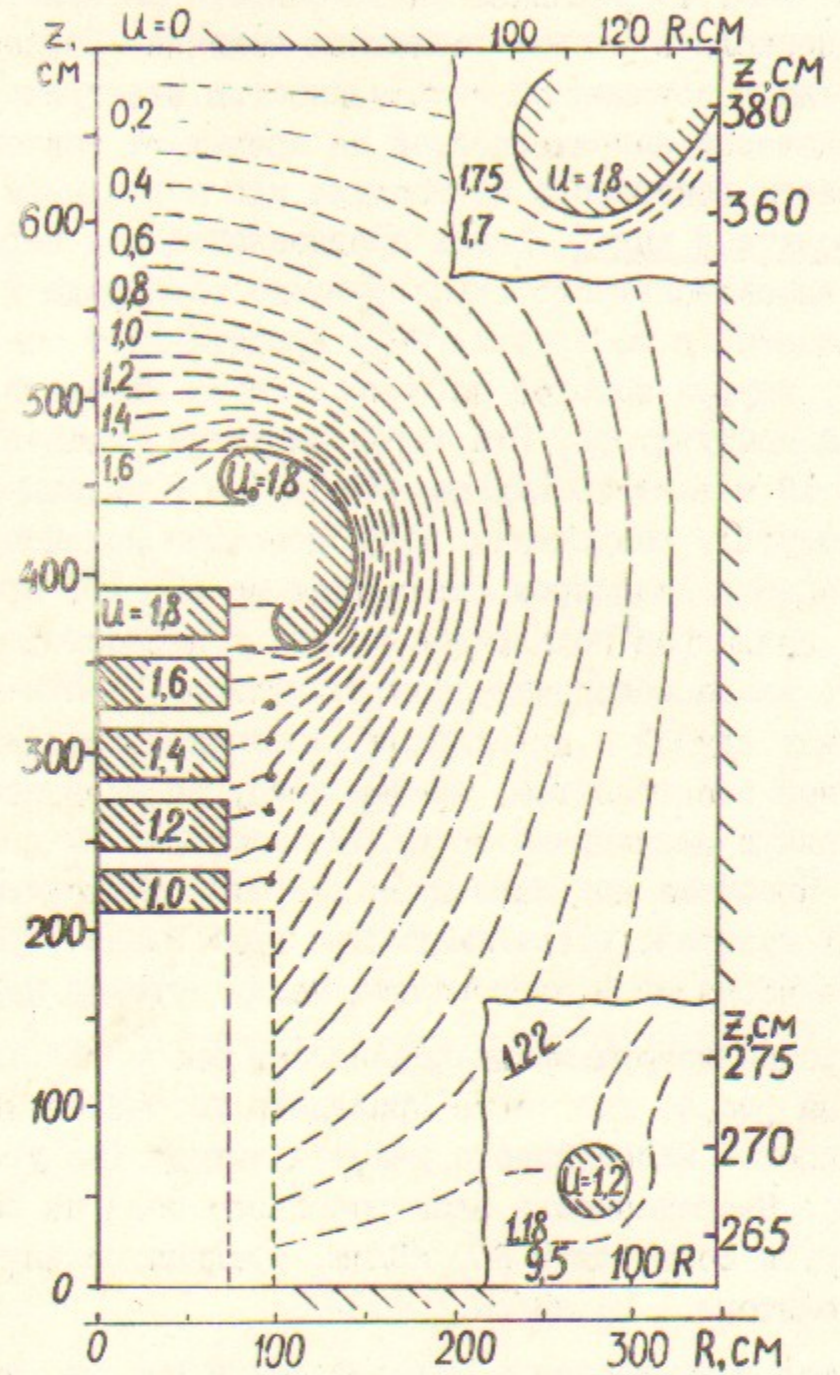


Рис. 3.

Распределение потенциала вокруг высоковольтного экранирующего электрода и колонны ГИН

Поскольку на самом деле металлические стены, расположенные около ГИИ, представляют собой плоскости, с наименьшим расстоянием до электрода $\sim 2\text{м}$, то реальные напряженности на кольцах и электроде будут несколько меньше расчетных величин. Расчет позволил выявить участки с повышенной напряженностью электрического поля. Полученные значения напряженностей не превышают значение 30кВ/см , что допускает работу генератора на воздухе при нормальных условиях.

Высоковольтный вывод. Вывод предназначен для передачи напряжения от высоковольтного экранирующего электрода к коммутатору. Он размещается в габаритах ГИИ и представляет собой металлическую трубу, внутри которой находится линия передачи запускающего импульса коммутатора. Эта труба окружена внешней трубой, состоящей из 18 металлических цилиндров (по 2 цилиндра на каждую секцию модуля), разделенных капролоновыми кольцевыми изоляторами. Потенциалы цилиндров отличаются на 100кВ , причем к каждому разрыву цилиндров подключены по два конденсатора (см. рис. 1). Герметичность ввода обеспечивается резиновыми уплотнениями. Пространство между трубой и цилиндрами заполнено пленочной изоляцией, пропитанной электролитом, причем между внешней стороной пленочной изоляции и цилиндрами оставлен зазор $3\text{--}5\text{мм}$ для прокачки электролита. Прокачка под давлением $2\text{--}3\text{атм}$ необходима для удаления газовых пузырей, возникающих при протекании зарядного тока конденсаторов через слой электролита между торцами цилиндров.

Конфигурация зазора между цилиндрами высоковольтного вывода показана на рис. 4, где также приведены рассчитанные эквипотенциалы для наиболее напряженного участка вывода (на уровне опорной площадки). Напряженность электрического поля на поверхности внутренней трубы составляет 660кВ/см , средняя по внутренней поверхности изолятора — 24кВ/см .

Коммутатор размещается в металлической камере, заполненной элегазом под давлением. Выходное напряжение модуля через высоковольтный вывод передается на верхний электрод коммутатора (рис. 5). Нижний электрод соединен с диодной частью ускорителя горизонтальным вводом и поддерживается изолирующей стойкой. Нижняя часть высоковольтного вывода и ввод диода выполнены идентичным образом. Передача высокого напряжения производится по металлическим трубам, покрытым пленочной изоляцией, пропитанной электролитом. Изоляция высоковольтных электродов коммутатора обеспечивается изо-

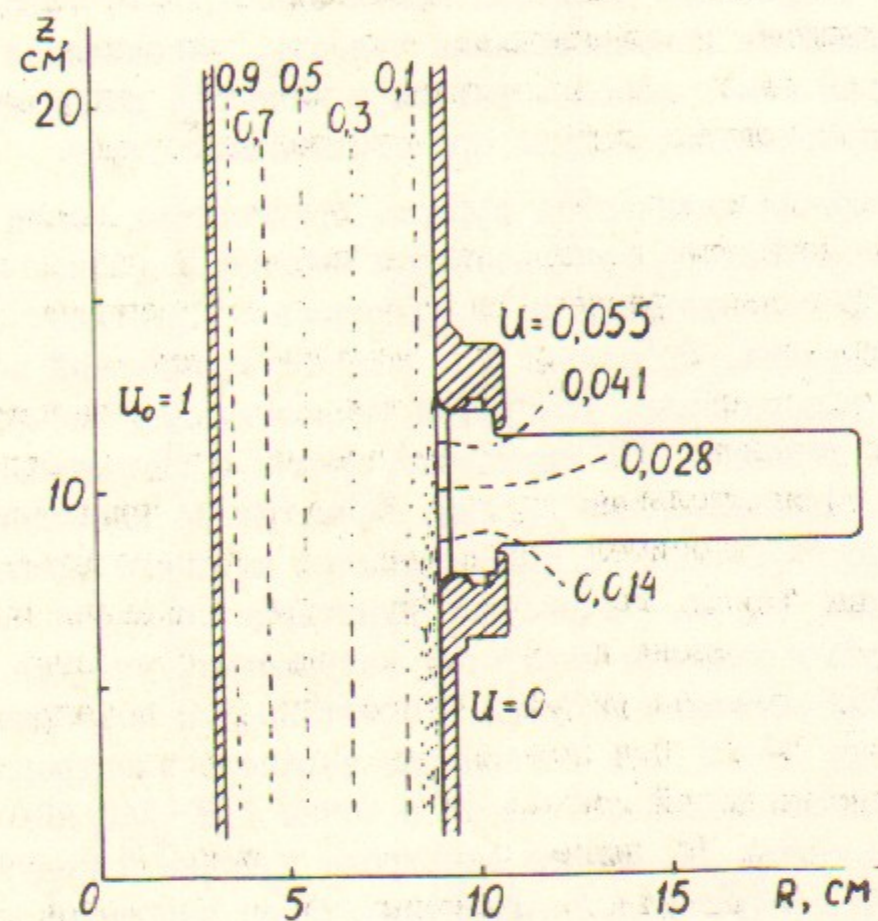


Рис. 4

Распределение потенциала в высоковольтном выводе генератора импульсных напряжений

лирующими кольцами из оргстекла, разделенными градиентными кольцами из нержавеющей стали с принудительным равномерным распределением потенциала за счет электролита. Часть колец показана на рис. 5 в разрезе. Система градиентных колец со слоем электролита в изолирующей стойке нижнего электрода используется в качестве измерительного омического делителя напряжения. Кроме того, в этой стойке размещена дополнительная полость, заполненная электролитом, которая может использоваться в качестве нагрузочного жидкостного сопротивления модуля при отключенном диоде.

Для определения количества и формы градиентных колец и формы электродов коммутатора использовался численный расчет электрических полей. Проведение расчета осложнялось отсутствием осевой симметрии конструкции. Поскольку при решении трехмерной задачи система КСИ не обеспечивает требуемой точности, для расчета узлов коммутатора решались две двумерные задачи с вертикальной осью симметрии. Окончательный вариант коммутатора приведен на рис. 5. При расчетах относительный потенциал верхнего электрода принимался равным $U_0 = 1$. На рисунке пунктиром показаны эквипотенциальные линии и указаны некоторые напряженные участки. Эквипотенциалы правой половины рисунка рассчитаны для потенциала нижнего электрода $U = 0$. При потенциале верхнего электрода 1,8 МВ напряженности полей составили в точке 1 $E \sim 260$ кВ/см, в точке 2 — ~ 200 кВ/см. На нижнем электроде в точке 3 получено ~ 190 кВ/см. На поверхности градиентных колец напряженность составляет ~ 100 кВ/см в точке 4, но с учетом усиления электрического поля за счет цилиндричности относительно горизонтальной оси напряженность должна возрасти до ~ 150 кВ/см. На поверхности изолирующих колец напряженность минимальна в местах заделки изоляторов, а средняя по поверхности напряженность составляет ~ 27 кВ/см.

Расчет для случая закороченного межэлектродного зазора ($U = U_0$) приведен на левой половине рисунка. В этом случае поле на участках 2 несколько уменьшается, но значительно возрастает в точке 5 нижнего электрода (~ 130 кВ/см).

По величинам полученных напряженностей можно определить минимальное значение рабочего давления газа в коммутаторе. Для газа его давление должно превышать $\sim 3,5$ атм.

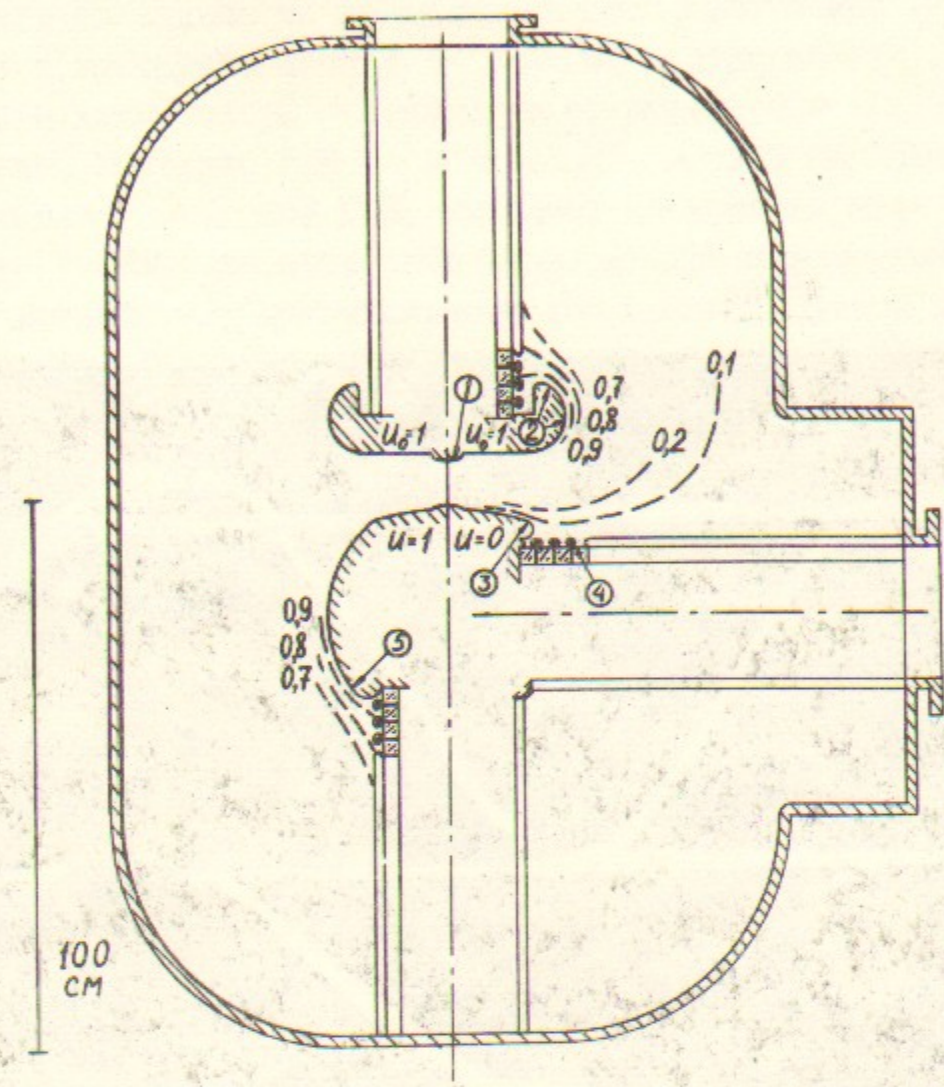


Рис. 5

Распределение потенциала в коммутаторе генератора импульсных напряжений

Электрические испытания ГИИ. Оценим сопротивление нагрузки для согласованного режима работы ГИИ. Импеданс ГИИ определяется его емкостью в ударе $C/36 \sim 0,1$ мкф и индуктивностью. Полная индуктивность складывается из индуктивности собственно ГИИ (конденсаторы и токоведущие шины) $L \sim 1$ мкГн, индуктивности вывода $\sim 0,8$ мкГн и коммутатора ~ 1 мкГн, т.е. составляет $\sim 2,8$ мкГн. Следовательно, импеданс ГИИ $Z \sim \sqrt{L/C} \geq 5,3$ Ом. Поскольку диод, являющийся нагрузкой ГИИ, изменяет во времени свое сопротивление, то необходимо проверить изоляцию ГИИ и коммутатора при длительном воздействии максимального напряжения. С этой целью была установлена величина нагрузочного сопротивления $R_H \sim 200$ Ом, что значительно превышает импеданс модуля.

Проверка электрической прочности проводилась посекционно с зарядным напряжением $U_3 \sim 50$ кВ. Производилось включение всего ГИИ. На рис.6 приведены осциллограммы напряжения на высоковольтном электроде (а) и на электроде коммутатора (б). Полученное значение напряжения составляет $\sim 1,1$ МВ.

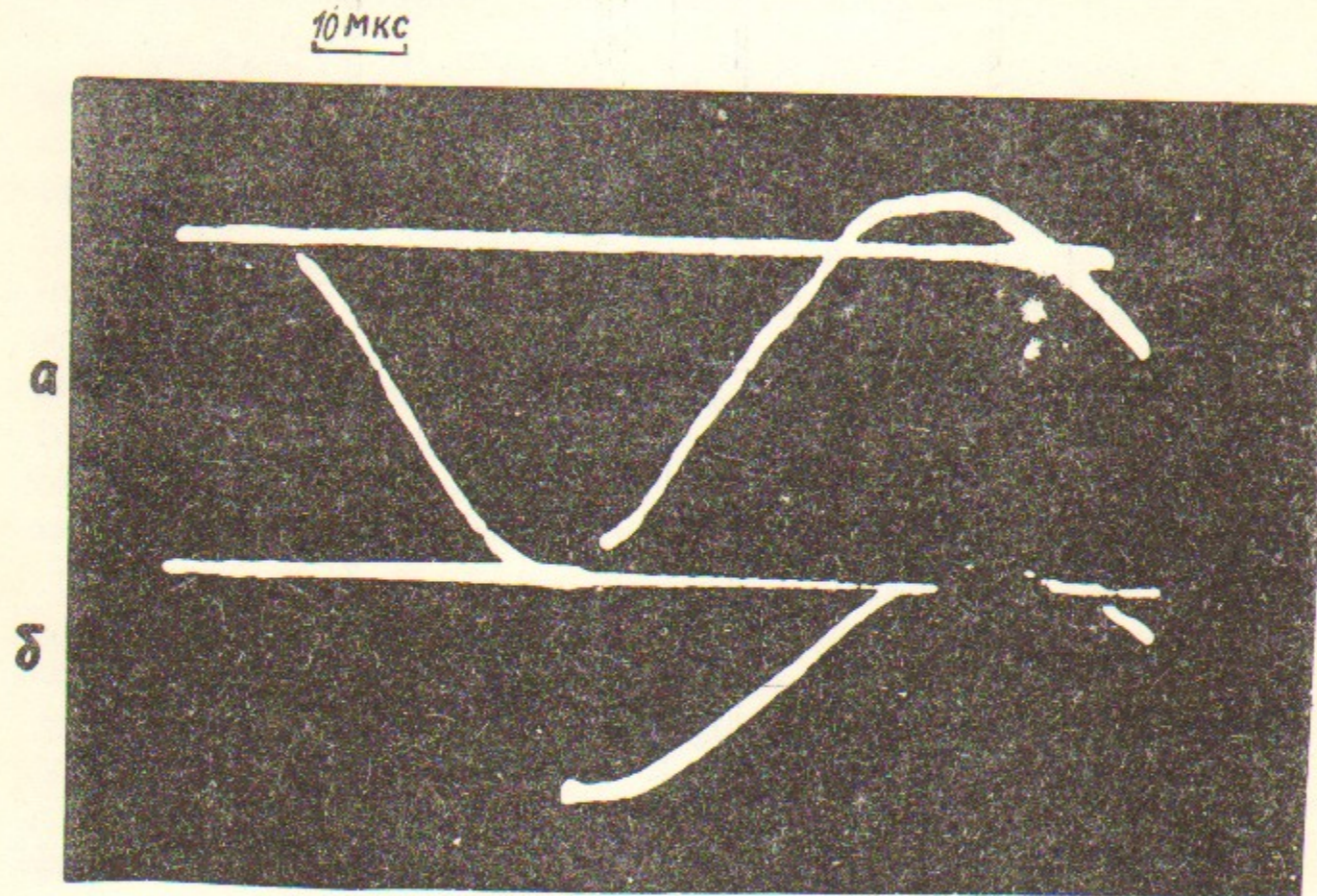


Рис. 6

Испытательные осциллограммы

Л и т е р а т у р а

1. T.H.Martin, J.P.VanDevender, D.L.Johnson, D.H.McDaniel, M.Aker. Proto-II - a short pulse water insulated accelerator. Proc. of the Intern. topical conf. on electron beam research and technology. Albuquerque, 1975.
Ye.P.Velikhov, V.A.Glukhikh, O.A.Gusev et al. Angara-5 Accelerator. Preprint NIIIEFA D-0301, Leningrad, 1976.
2. R.A.Fitch, V.T.S.Howell. Novel principle of transient high-voltage generator. - Proc. IEE, 111, N 4, 1964.
3. С.И.Брагинский. К теории развития канала искры. ЖЭТФ, 34, в.6, 1547, 1958.
4. В.М.Лагунов, А.Г.Пономаренко, Л.П.Фоминский. Формирование интенсивного электронного пучка. ЖТФ, 42, в.9, 1947, 1972.
5. С.И.Баранник, С.Б.Вассерман, А.Н.Лукин. Измерение сопротивления и индуктивности канала мощного искрового разряда в газе. ЖТФ, 44, в.2, 2352, 1974.
6. A.P.Avrarov, V.T.Astrelin, E.L.Boyarintsev, V.A.Kapitonov, V.M.Lagunov. A pulsed electron beam accelerator "AQUAGEN". Proc. of the Intern. Pulsed Power Conf., III E-11-1, Lubbock, 1976.
7. В.П.Ильин. Численные методы решения задач электрооптики. "Наука", Новосибирск, 1974.

Работа поступила - 17 декабря 1981 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 22.I-1982г. МН 03048
Усл. 1,0 печ.л., 0,8 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно
Заказ № 6.

Отпечатано на ротапринте ИЯФ СО АН СССР