

## КОММУТИРУЮЩИЙ РАЗРЯДНИК УСКОРИТЕЛЯ МЕГААМПЕРНОГО КЛАССА РАПИД-2

*Н. М. Вагина, А. М. Гафаров, А. В. Комиссаров, А. В. Власова*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» им. академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

Представляются результаты работ по созданию конструкции рельсового газонаполненного коммутирующего разрядника для ускорителя РАПИД-2. Впервые удалось применить стандартную полиэтиленовую трубу для изготовления корпуса трехканального разрядника, работающего по принципу искажения поля, выдерживающего статическое напряжение 400 кВ при двуполярной зарядке и способного коммутировать токи порядка 500 кА. Проведены расчеты распределения электрического поля внутри корпуса разрядника в статическом режиме для оптимизации конструкции поджигающих электродов. Получены кривые самопробоя для 8-ми разрядников и определена зона управляемости при давлениях рабочего газа до 0,6 МПа. Данная разработка позволила создать индуктивно-емкостной накопитель энергии для ускорителя РАПИД-2.

Создание импульсно-периодических ускорителей электронов для получения сильноточных релятивистских электронных пучков требует создания различных систем ускорителя, в том числе зарядных устройств – генераторов импульсного напряжения (ГИН). Самыми простыми и дешевыми являются генераторы на основе индуктивно-емкостных накопителей энергии, собранных по схеме Аркадьева – Маркса с одно или двуполярной зарядкой. Электрическая энергия в батарее ГИН накапливается за счет параллельного заряда конденсаторов от внешнего зарядного устройства в течение относительно длительного времени, а затем выделяется в нагрузку за относительно короткий промежуток времени при последовательном разряде конденсаторов. Специально созданный коммутирующий разрядник отделяет нагрузку от батареи в процессе зарядки и подключает её в нужный момент времени [1]. Для получения больших значений импульсов тока батареи за время  $\sim 1$  мкс используют низкоиндуктивные коммутирующие газонаполненные разрядники. Такие разрядники имеют широкий диапазон управления без регулировки длины межэлектродного зазора и могут работать параллельно.

Для создания индуктивно-емкостного накопителя энергии ускорителя РАПИД-2 создана конструкция трехканального газонаполненного коммутирующего рельсового разрядника с двуполярной зарядкой, выдерживающая статическое напряжение 400 кВ в масляной изоляции.

Впервые корпус трехэлектродного высоковольтного газонаполненного разрядника изготов-

лен из стандартной полиэтиленовой трубы с продольными и кольцевыми пазами, а также отверстиями для крепления электродов. Внутреннее устройство высоковольтного рельсового разрядника представлено на рис. 1.

Разрядник с двуполярной зарядкой работает по принципу искажения электрического поля. В момент зарядки острая кромка поджигающего электрода находится вдоль нулевой эквипотенциали и не вносит никакого искажения в распределение электрического поля внутри разрядника. При подаче поджигающего импульса на торце поджигающего электрода возникает сильное искажение электрического поля и увеличение напряженности, что приводит к появлению стримеров и пробую разрядного промежутка.

Основной разрядный промежуток образован двумя протяженными латунными электродами и может варьироваться в диапазоне от 21 до 29 мм с помощью фторопластовых втулок и резиновых уплотнений разной толщины. После сборки проводится проверка зазора между основными электродами по всей длине с помощью специального шаблона. Три конусных поджигающих электрода из нержавеющей стали устанавливаются на диэлектрические втулки через резиновые уплотнения разной толщины. Расстояние от поджигающего электрода до центральной оси разрядника может варьироваться от 15 до 18 мм в зависимости от режима работы.



Рис. 1. Внутреннее устройство высоковольтного рельсового коммутирующего разрядника

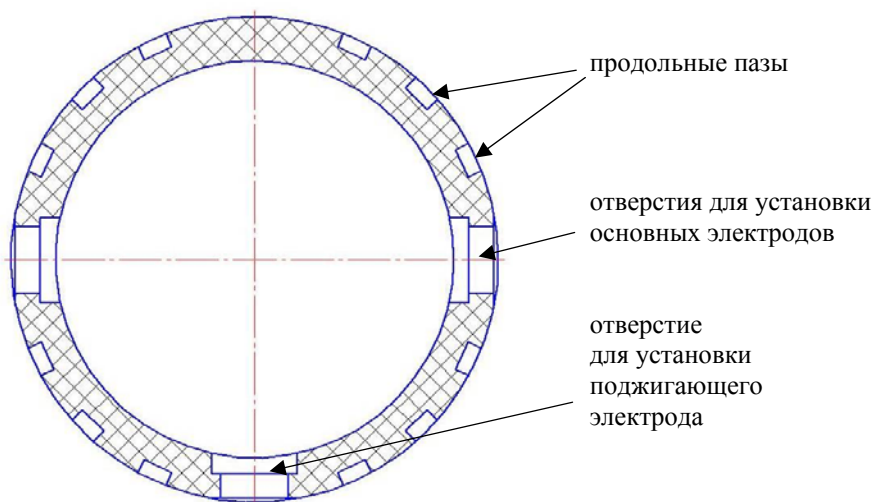


Рис. 2. Поперечное сечение полиэтиленового корпуса разрядника

При работе разрядника в трансформаторном масле двенадцать продольных пазов на внешней поверхности корпуса разрядника увеличивают электрическую прочность стандартной полиэтиленовой трубы до 400 кВ в статическом режиме (см. рис. 2). Для увеличения электрической прочности по внутренней поверхности в разрядник подается

избыточное давление рабочего газа от 0,2 до 0,6 МПа в зависимости от режима работы. В корпусе выполнены отверстия для крепления двух основных и трех поджигающих электродов. В качестве рабочих газов может быть использован аргон, элегаз, углекислота или их смеси.

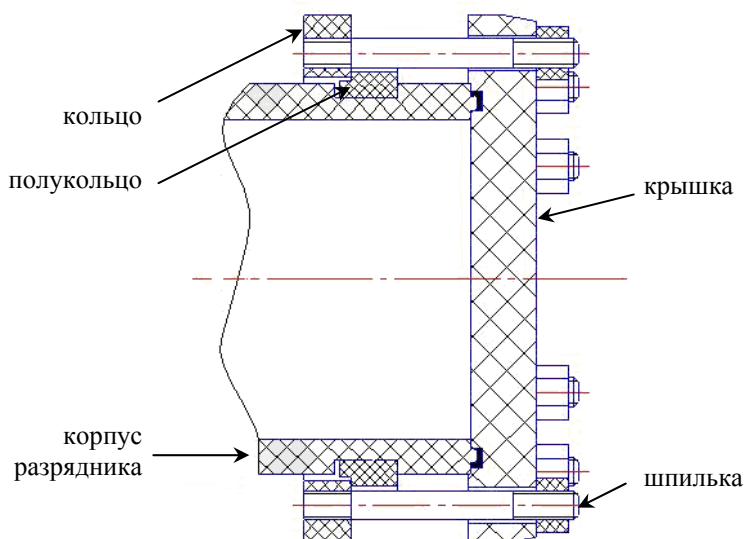


Рис. 3. Поперечное сечение корпуса разрядника

Два кольцевых паза (см. рис. 3) предназначены для установки в каждом из них двух полуколец, которые служат упорами для кольцевого фланца. К кольцевым фланцам посредством шпилек крепятся крышки корпуса. Материал крышек, кольцевых фланцев, полуколец и крепежных деталей – поликарбонат марки ПК-ЭТ-3,5. Для обеспечения герметичности внутреннего объема корпуса используются резиновые уплотнения.

Перед работой корпус разрядника испытывается на герметичность давлением 0,1 МПа сжатого воздуха в течение 24 часов, после чего разрядник устанавливается в конденсаторную батарею, и контейнер ГИН заполняется трансформаторным маслом.

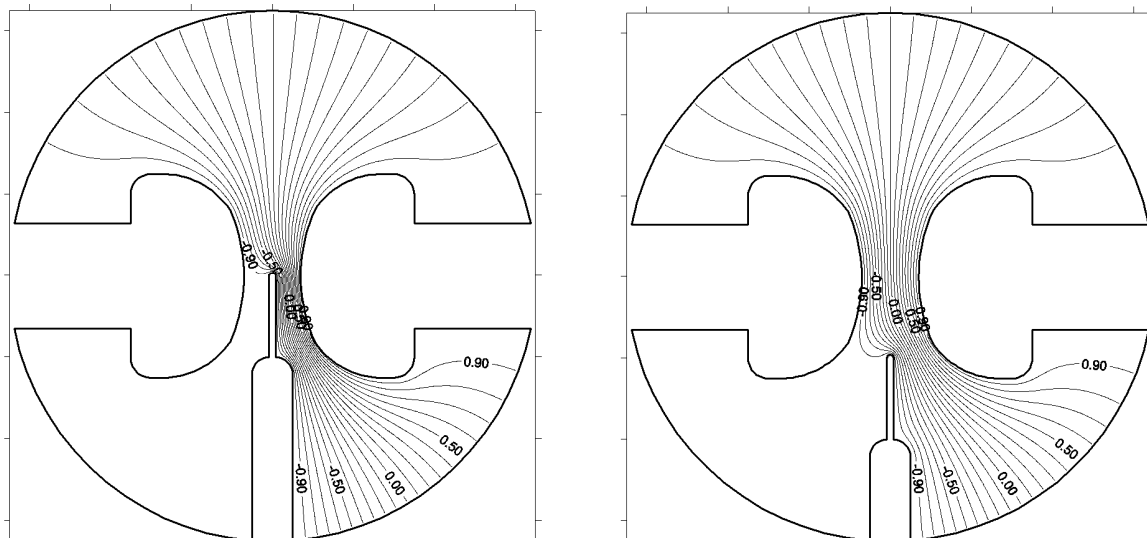
Расстояние между электродами выбирается с учетом математического моделирования электрических полей внутри корпуса. Расчетным способом определены области наибольшей напряженности электрического поля в межэлектродном зазоре. В данной работе представлены результаты исследования зависимости конфигурации электрического поля от расстояния между центральной осью разрядника и поджигающим электродом. Расчеты проводились для случая, когда на левый электрод подается напряжение  $U_I = -100$  кВ, на правый  $U_{II} = +100$  кВ, а на поджигающий электрод  $U_H = -100$  кВ. Считалось, что пространство между электродами заполнено неионизированным газом. Корпус разрядника выполнен из диэлектрика, и электрическое поле в корпусе отсутствует. Электроды полностью металлические.

Расчеты распределения потенциала электрического поля проведены для случаев, когда острая кромка поджигающего электрода находилась на расстоянии 0, 5, 10, 15 и 20 мм от оси разрядника (рис. 4). По результатам расчета видно, что в случае расстояния 20 мм искажение электрического поля максимально только на острой кромке поджигающего электрода. Это облегчает появление первого стримера и образование искрового канала между основными электродами, уменьшая износ поджигающего электрода. От небольшого перенапряжения на полусфере поджигающего электрода можно избавиться, изменив его форму. В окончательной конструкции поджигающий электрод выполнен в виде гладкого стального конуса на фторопластовой вставке (см. рис. 1).

Для оценки влияния так называемых «тройных» точек – точек сопряжения металл – диэлектрик – газ в месте крепления основных электродов и корпуса разрядника при расчетах были заданы углубления размером 0,5 мм. Получены следующие максимальные значения напряженности электрического поля:

- в точке соприкосновения основания поджигающего электрода с корпусом разрядника  $E_{max} = 40$  кВ/см;

- в точке соприкосновения основания положительного электрода с диэлектриком  $E_{max} = 10$  кВ/см.



а) – поджигающий электрод находится на расстоянии 0 мм от оси разрядника;

б) – поджигающий электрод находится на расстоянии 20 мм от оси разрядника.

Рис. 4. Распределение потенциала электрического поля внутри корпуса разрядника

Полученные значения напряженности электрического поля в местах сопряжения электродов с корпусом разрядника на порядок меньше, чем в межэлектродном пространстве и не окажут существенного влияния на распределение электрического поля в разряднике. Исключить источник электронов с «тройной» точки и самоход разрядника по поверхности можно заглубив ввод основного электрода и заэкранировав капролоновой втулкой, закрыв тем самым «тройную» точку телом электрода и дополнительным изолятором.

Проверка работоспособности модели разрядника проводилась на специально созданном стенде ВИС-400 (рис. 5) на базе конденсаторов ИК-200-0,1.

Высоковольтный импульсный стенд состоит из стального маслонаполненного контейнера (1) на подставке (5). На боковых поверхностях расположены два стальных фланца (2) для крепления высоковольтных вводов. Данный стенд позволил оперативно провести эксперименты по выбору конструкции макета коммутирующего разрядника.

Отработка режима работы коммутирующего разрядника проводилась на ускорителе РАПИД-М [2]. Получены кривые самопробоя для восьми коммутирующих разрядников и определена зона управляемости при давлениях рабочего газа до 0,6 МПа при напряжениях до  $\pm 200$  кВ. Типичная зависимость напряжения самопробоя (показана величина

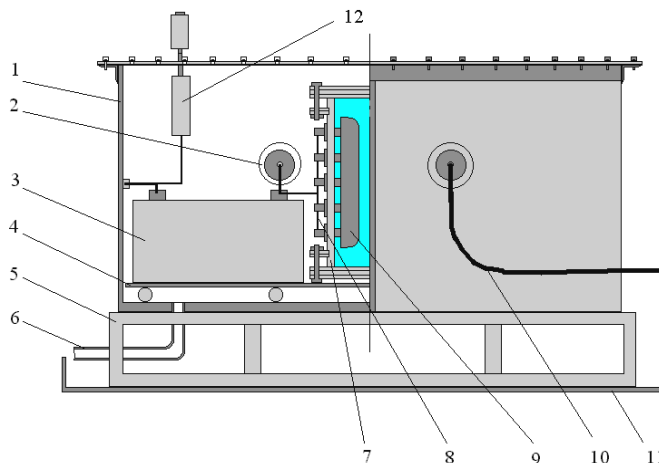


Рис. 5. Высоковольтный импульсный стенд ВИС-400: 1 – корпус; 2 – стальной фланец; 3 – конденсатор; 4 – гетинаксовая подставка; 5 – металлическая подставка; 6 – сливная труба; 7 – корпус разрядника; 8 – медная шина; 9 – основной электрод; 10 – высоковольтный кабель; 11 – поддон; 12 – делитель напряжения

одной из полярностей статического напряжения) разрядников от давления смеси аргона (20 %) и элегаза (80 %) представлена на рис. 6. Основной зазор составляет 29 мм. Зона управляемой коммутации разрядника лежит в диапазоне от 90 % напряжения самопробоя и выше при определенном давлении газа (рис. 6, заштрихованная область).

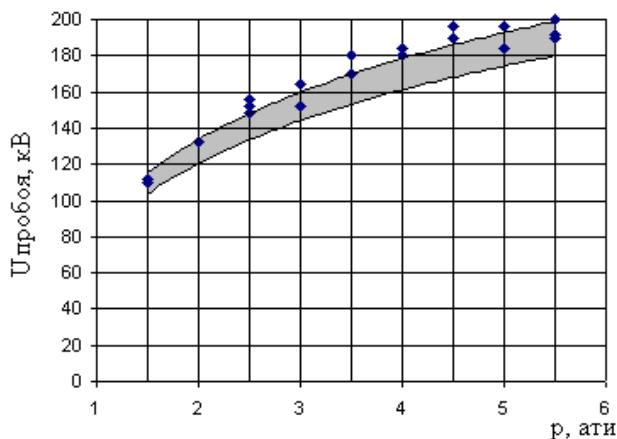


Рис. 6. Типичная зависимость напряжения самопробоя от давления газа и зона управляемости разрядника

Результаты этих работ позволили создать двухступенчатый генератор импульсов напряжения ускорителя РАПИД-2 [3], в котором восемь трехканальных коммутирующих разрядников располагаются между этажерками конденсаторной батареи попарно, один под другим. При двуполярной зарядке  $\pm 200$  кВ ударное напряжение ГИИ составляет 800 кВ. Схема расположения коммутирующих разрядников между конденсаторными

батареями ГИИ ускорителя РАПИД-2 представлена на рис. 7.

Запуск коммутирующих разрядников ускорителя РАПИД-2 осуществляется параллельно от одного внешнего генератора запуска модулей импульсом напряжения амплитудой 350...500 кВ с фронтом  $\sim 120$  нс и позволяет коммутировать ток до 1 МА в область плазменного размыкателя [4].

В результате проведенной работы создана конструкция трехканального газонаполненного коммутирующего рельсового разрядника с двуполярной зарядкой, выдерживающая статическое напряжение 400 кВ в масляной изоляции. Впервые корпус трехэлектродного высоковольтного газонаполненного разрядника изготовлен из стандартной полиэтиленовой трубы. По результатам проведенных работ поданы заявки на два изобретения – способ изготовления корпуса высоковольтного разрядника, изготовленного из стандартной полиэтиленовой трубы, и сильноточный коммутирующий газонаполненный рельсовый разрядник с двуполярной зарядкой. Данная разработка позволила создать индуктивно-емкостной накопитель энергии для ускорителя мегаамперного класса – РАПИД-2 в целях создания мощного источника тормозного излучения.

### Список литературы

1. Дашук, Зейнц др. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. Под ред. В. С. Комелькова, М., Атомиздат, 1970.
2. Гафаров А. М., Филатов В. А., Корепанов В. М., Пудов В. П., Антонов Н. Д., Плотникова А. В., Пьянков М. А. Сильноточный ускоритель

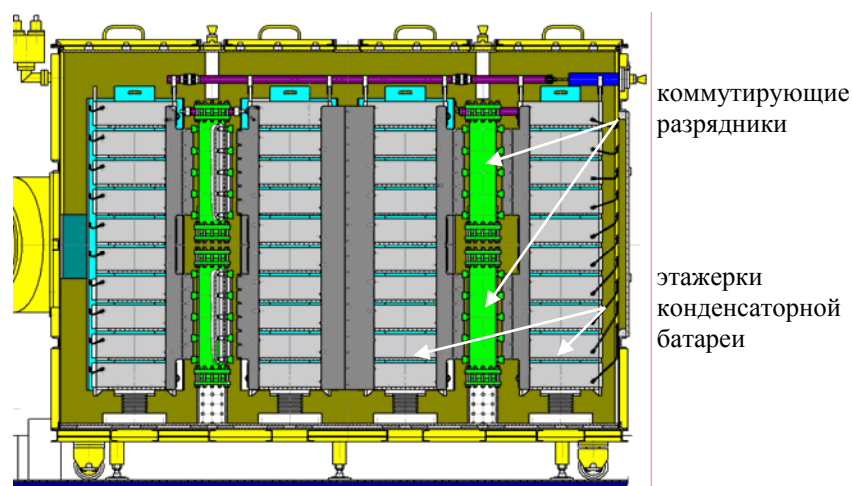


Рис. 7. Схема расположения коммутирующих разрядников между конденсаторными батареями ГИИ ускорителя РАПИД-2

РАПИД-М для генерации рентгеновского излучения / Вопросы атомной науки и техники, 2006. Вып. 3–4. С. 146–148.

3. Вагина Н. М., Гафаров А. М. и др. / О ходе работ по созданию ускорителя РАПИД-2/ 9 Межотраслевая конференция по радиационной стойкости, сборник докладов г. Снежинск, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2010. С. 213–218.

4. Вагина Н. М., Гафаров А. М. и др. / РАПИД-2 – новый источник тормозного излучения мегаамперного класса / Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру» Москва, Лыткарино, 2013. № 4. С. 70–73.