

УДК 539.1.03(621.384+533.9.07:533.952)

Управляемый газонаполненный разрядник на рабочее напряжение 1 МВ

**В. А. Балакин, С. Л. Глушков,
М. А. Моисеевских, Г. А. Мысков,
С. А. Путевской**

Описан газонаполненный разрядник тригатронного типа для 36-канального кольцевого коммутатора пятикаскадной водоизолированной двойной ступенчатой формирующей линии с выходным импедансом 2,9 Ом сильноточного ускорителя электронов «Гамма-1». При рабочем напряжении на разряднике 1 МВ его габариты: высота 160 мм, диаметр 240 мм. При использовании в качестве рабочей среды смеси элегаза (40 %) с азотом (60 %) при давлении 1,7 МПа время и разброс времени срабатывания разрядника составляют 16 и ± 2 нс соответственно при запасе электрической прочности не менее 1,5. Средняя коммутируемая через один разрядник энергия 3,3 кДж, ток 95 кА.

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ ведутся работы по созданию мощной многомодульной электрофизической установки ГАММА, предназначенной для исследований в области радиационной физики. К настоящему времени изготовлен и экспериментально отработан ее первый модуль – ускоритель «Гамма-1» [1]. Система формирования высоковольтных импульсов ускорителя выполнена на основе водоизолированной пятикаскадной двойной ступенчатой формирующей линии (ДСФЛ) с электрической емкостью ~ 235 нФ (рис. 1). Зарядка ДСФЛ до напряжения 1 МВ отрицательной полярности за время $\sim 0,9$ мкс осуществляется от двух включенных параллельно генераторов Аркадьева – Маркса с максимальным суммарным энергозапасом 190 кДж. Многоканальная коммутация линии осуществляется 36 газонаполненными управляемыми разрядниками тригатронного типа, расположенными симметрично по азимуту на корпусе ДСФЛ.

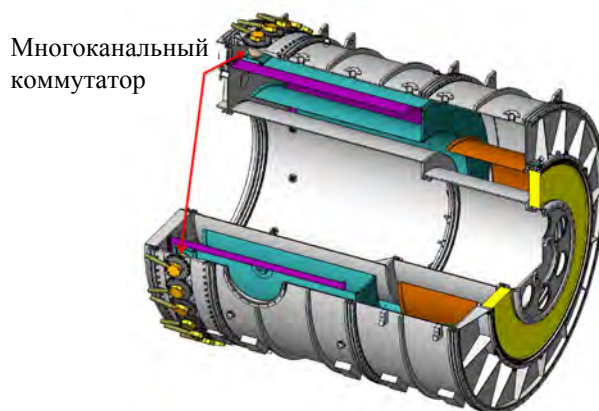


Рис. 1. Разрез ДСФЛ ускорителя «Гамма-1»

Следует отметить, что многоканальный коммутатор ДСФЛ является одним из наиболее ответственных узлов ускорителя, непосредственно влияющим на его выходные параметры, поэтому к его разрядникам предъявляются достаточно высокие требования по электропрочности, а также синхронности и стабильности запуска под действием управляющих импульсов.

Конструкция разрядника

На начальном этапе, используя в качестве прототипа разрядник на рабочее напряжение 500 кВ [2], разработанный во ВНИИЭФ для ускорителя ЛИУ-30 [3], был создан макет разрядника на 1 МВ (рис. 2). Изоляционный корпус, изготовленный из капролона, имеет коническую форму, что в условиях имеющихся ограничений по габаритам разрядника позволило заметно снизить максимальную напряженность электрического поля на его поверхности. Электроды, изготовленные из нержавеющей стали, имеют вставки из вольфрамового сплава. Высота разрядника 160 мм, диаметр 240 мм. Заземленный электрод разрядника с помощью болтов закрепляется на корпусе ДСФЛ. Высоковольтный электрод присоединяется к высоковольтному электроду ДСФЛ цанговым разъемом. Запуск разрядника осуществляется импульсом напряжения положительной полярности с амплитудой ~ 150 кВ, длительностью на полувысоте 20 нс и длительностью фронта ~ 10 нс, поступающим на управляющий электрод.

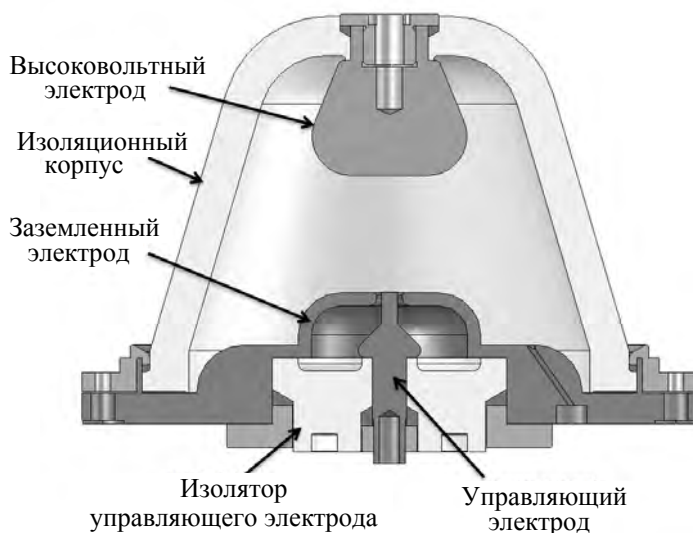


Рис. 2. Конструкция макета разрядника

В ходе экспериментальной отработки, подробно описанной в [4], была разработана окончательная конструкция разрядника, а также определены оптимальные состав и давление газовой смеси азота и элегаза ($N_2 + SF_6$) в его рабочем объеме. Внешний вид и разрез разрядника представлены на рис. 3.

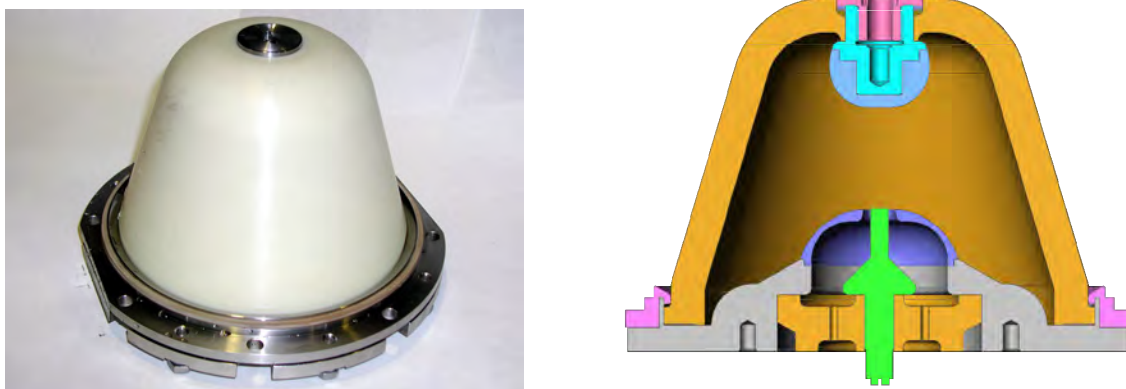


Рис. 3. Внешний вид (слева) и разрез разрядника на 1 МВ коммутатора ДСФЛ

Конструкция изоляционного корпуса осталась неизменной. Высоковольтный электрод приобрел шаровидную форму. Почти вся рабочая поверхность электрода выполнена из вольфрамового сплава. Основной искровой зазор разрядника остался неизменным, но был смещен в сторону высоковольтного электрода. Форма заземленного электрода изменилась: вся его выступающая центральная часть, а также управляющий электрод целиком выполнены из вольфрамового сплава. Разрядник наполняется газовой смесью через четыре отверстия в изоляторе управляющего электрода. Кроме того, было изменено крепление высоковольтного электрода разрядника к ДСФЛ: для обеспечения надежного электрического контакта цанговый разъем заменен на винтовой (рис. 4).

Для разработанной конструкции разрядника был проведен компьютерный расчет электрических полей с учетом геометрии формирующей линии. Согласно расчету максимальное значение напряженности электрического поля в газовом промежутке достигает 340 кВ/см на поверхности высоковольтного электрода и 280 кВ/см на поверхности заземленного. Максимальное значение напряженности на границе *газ – изоляционный корпус* 100 кВ/см.

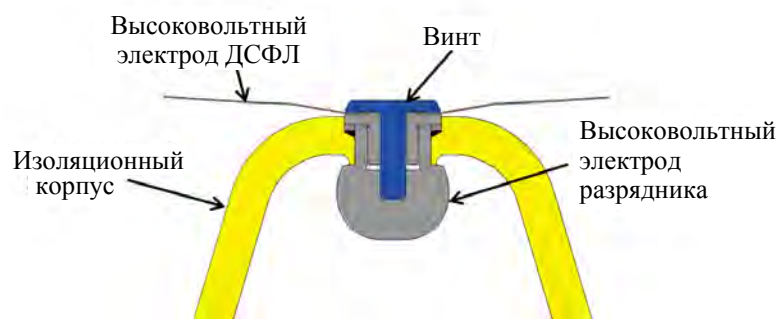


Рис. 4. Разрез крепления высоковольтного разъема разрядника к ДСФЛ

Соотношение элегаза и азота в газовой смеси в результате экспериментальной отработки выбрано равным 2:3 по объему. Для данного состава газовой смеси при давлении 1,7 МПа и рабочем напряжении 1 МВ разброс времени срабатывания разрядника составляет ± 2 нс, что не превышает времени распространения электромагнитной волны от одного разрядника до другого и обеспечивает синхронность работы всех разрядников в коммутаторе. При этом запас электропрочности разрядника – не менее 1,5.

Работа разрядника в составе коммутатора

Разработанные разрядники успешно эксплуатируются в составе коммутатора ДСФЛ. На рис. 5 представлена полученная с помощью емкостного делителя осциллограмма импульсов напряжения, формируемых на выходе ДСФЛ при работе на согласованную резистивную нагрузку.

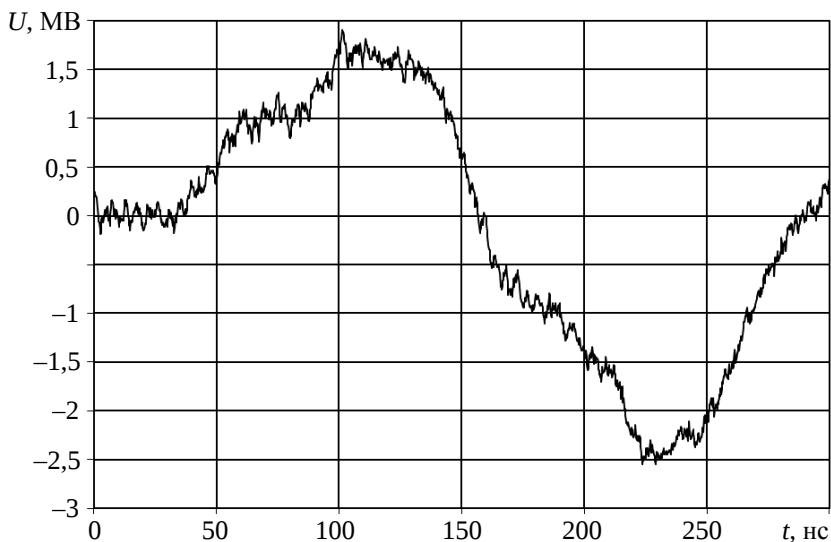
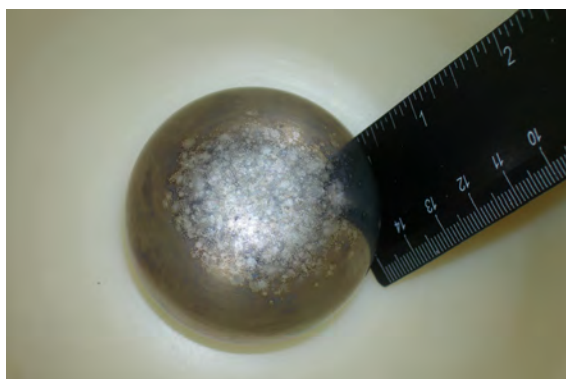


Рис. 5. Осциллограмма напряжения на выходе ДСФЛ при работе на резистивную нагрузку

К настоящему времени проведено более 600 включений ускорителя «Гамма-1». В большинстве случаев зарядное напряжение ДСФЛ находилось в пределах от 0,9 до 1 МВ. При таких напряжениях средняя коммутируемая через один разрядник энергия составляет 2,6 и 3,3 кДж, а ток – 86 и 95 кА соответственно. Неуправляемые пробои газового промежутка не наблюдались. Вероятность пробоя изолятора разрядника по его поверхности составила, по оценкам, менее 0,05 %. На рис. 6 показаны электроды одного из разрядников многоканального коммутатора ДСФЛ после 200 рабочих включений.



а



б

Рис. 6. Высоковольтный (а) и заземленный (б) электроды после 200 включений

Заключение

Для многоканального коммутатора ДСФЛ ускорителя «Гамма-1» создан компактный управляемый газонаполненный разрядник на рабочее напряжение 1 МВ с размерами $\varnothing 240 \times 160$ мм². Запас электрической прочности разрядника составляет не менее 1,5, средние коммутируемые энергия и ток – 3,3 кДж и 95 кА, время и разброс срабатывания – 16 и ± 2 нс соответственно. Разработанная конструкция обеспечивает требуемые надежность, стабильность и синхронность работы разрядников в составе формирующей системы ускорителя.

Список литературы

1. Gordeev V. S., Myskov G. A., Mikhailov E. S., Laptev D. V. Design of a high-current pulse electron accelerator // Problems of Atomic Sci. and Techn. Series «Nuclear Physics Investigations» (34). 1999. № 3. P. 68–70.
2. Афанасьев Б. А., Герасимов А. И., Кулешов Г. Д. и др. Многоканальный кольцевой разрядник на 500 кВ // ПТЭ. 1976. № 5. С. 100.
3. Pavlovskii A. I., Bosamykin V. S., Gerasimov A. I. et al. Linear accelerator with radial lines LIA-30 // Proc. of the 9th Int. conf. on High-Power Particle Beams. Washington, DC, USA, May 25–29, 1992.
4. Балакин В. А., Глушков С. Л., Моисеевских М. А., Путевской С. А. Экспериментальная отработка высоковольтного разрядника для мощного импульсного ускорителя электронов // Сб. докл. IV научно-техн. конф. «Молодежь в науке». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006. С. 229–233.

1 MV Operating Voltage Controlled Gas-Filled Gap

V. A. Balakin, S. L. Glushkov, M. A. Moiseevskikh, G. A. Myskov, S. A. Putevskoy

Here is described a gas-filled trigatron type gap for a 36-channel ring switch of a five-cascade water-insulated double step forming line with output impedance of 2.9 Ohm high-current electron accelerator «Gamma-1». At discharger operating voltage of 1 MV its overall dimensions are: height – 160 mm, diameter – 240 mm. A mixture of insulating gas and nitrogen is in proportion 40 % SF₆ and 60 % N₂ under pressure of 17 MPa. The time and spread of the gap actuation time is 16 and ± 2 ns, correspondingly. When operating as a part of the double step forming line switch, the average energy, switched through a single gap, is 3.3 kJ, and the current is 95 kA.