

УПРАВЛЯЕМЫЙ МНОГОЗАБОРНЫЙ ГАЗОВЫЙ РАЗРЯДНИК

© 2012 г. В. В. Кладухин, С. В. Кладухин, С. П. Храмцов, В. Ю. Ялов

Институт электрофизики УрО РАН

Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

E-mail: laepr@iep.uran.ru

Поступила в редакцию 23.11.2011 г.

Рассмотрены конструкция, принципы работы и реализация высоковольтного управляемого многозаборного газового разрядника, обеспечивающего наносекундную коммутацию потоков энергии гигаваттного уровня мощности. Работа разрядника основана на новой модели коммутационной структуры, в которой процесс коммутации обеспечивается распространением перенапряжения вдоль цепи коммутационных зазоров за счет ее взаимодействия с двумя емкостными делительными цепочками, образованными электродами разрядника. Разрядник ориентирован на его применение в генераторах высоковольтных наносекундных импульсов на основе разряда двойных формирующих линий коаксиального типа. Показано его использование для коммутации 25-омной формирующей линии, заряжаемой до напряжения 600 кВ.

ВВЕДЕНИЕ

Коммутаторы являются одними из основных компонентов формирователей импульсов и в значительной степени определяют их характеристики. Они могут состоять как из одного, так и из цепочек коммутационных элементов, организованных в распределенные коммутационные структуры. Для генерации высоковольтных импульсов значительный интерес представляют коммутационные структуры, выполненные из цепочек коммутационных элементов, каждый из которых обладает ограниченной электрической прочностью. Важнейшим свойством таких структур является наличие механизма распространения условий коммутации по цепочке коммутационных элементов — свойства автокоммутации [1].

В данной статье рассматривается вариант реализации сильноточного высоковольтного газового разрядника на основе модели коммутационной структуры [2], обладающей свойством автокоммутации. Разрядник имеет аксиальное исполнение и ориентирован на коммутацию формирующей линии коаксиального типа в генераторах наносекундных импульсов гигаваттного уровня мощности по схеме Блюмляйна [3].

СХЕМА И КОНСТРУКЦИЯ РАЗРЯДНИКА

Разрядник выполнен в виде двух коаксиальных, смещенных между собой, групп электродов: внешней и внутренней. Электроды обеих групп имеют кольцевую форму.

Электроды внутри одной группы разделены штырьковыми изоляторами, которые служат несущими элементами и задают величину межэлек-

тродных зазоров. При этом зазоры между смежными электродами каждой из групп образуют емкостные делительные цепочки, а зазоры между смежными электродами внешней и внутренней групп образуют коммутационные элементы разрядника. Размеры электродов и зазоров между ними выбраны из условия доминирования емкостей делительных цепочек над емкостями коммутационных зазоров, т.е. распределение напряжения по коммутационным зазорам определяется распределением напряжения в делительных цепочках.

Разрядник ориентирован на размещение в торцевом зазоре коаксиальной формирующей линии генератора между ее внешним (нулевым) и внутренним (потенциальным) токовыми и заполняется рабочим газом с избыточным давлением до нескольких десятков бар. Запуск коммутационного процесса в разряднике осуществляется изменением потенциала крайнего (инициирующего) электрода внутренней секции разрядника.

На рис. 1 приведена конструктивная схема разрядника с десятью коммутационными зазорами и его сопряжение с наружной формирующей линией генератора.

Эквивалентная электрическая схема разрядника представлена на рис. 2, где C_1-C_5 — межэлектродные емкости внешней, а $C_0^*-C_5^*$ — внутренней электродной системы разрядника; S_1-S_{10} — коммутационные элементы порогового типа, образованные газовыми зазорами между электродами внешней и внутренней систем; C_{Sk} — емкость коммутационных элементов S_1-S_{10} ; L_1 — проходная и L_2 — разделительная индуктивности. Параметры

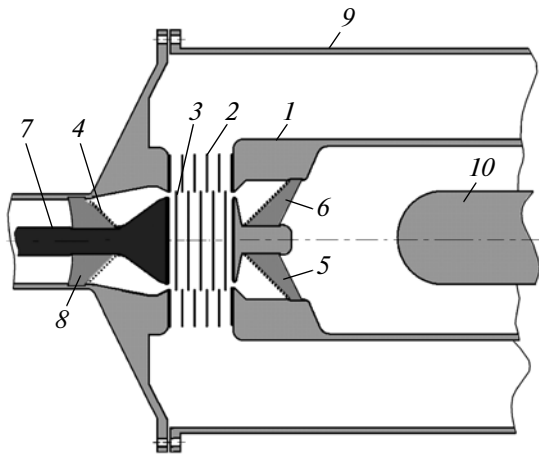


Рис. 1. Конструктивная схема разрядника. 1 – внутренний токовод коммутуемой формирующей линии генератора; 2 – внешняя электродная система разрядника (первая емкостная делительная цепочка); 3 – внутренняя электродная система разрядника (вторая емкостная делительная цепочка); 4 – проходная индуктивность; 5 – разделительная индуктивность; 6 – опорный изолятор; 7 – управляющий электрод; 8 – проходной изолятор; 9 – внешний токовод коммутуемой формирующей линии генератора; 10 – внутренний токовод некоммутируемой формирующей линии генератора.

элементов электрической схемы разрядника должны удовлетворять соотношениям

$$C_k = C, \quad k = \overline{1, n}; \quad C_k^* = C, \quad k = \overline{1, n-1}; \quad (1)$$

$$C_0^* = 2C; \quad C_5^* = 2C; \quad C_{Sk} \ll C, \quad k = \overline{1, 2n}$$

и

$$L_1 + L_2 \ll \frac{t_3 n}{4\pi^2 C}, \quad (2)$$

где n – количество электродов во внешней группе, t_3 – время заряда линии.

При этом соотношение (1) обеспечивает равномерность распределения напряжения по всем $2n$ коммутационным зазорам разрядника в исходном состоянии и механизм автокоммутиации (распространение перенапряжения по цепи коммута-

ционных зазоров), а (2) – равномерность распределения напряжения по коммутационным зазорам разрядника во время заряда линии. Удержание напряжения запускающего импульса во время формирования пробоя инициирующего зазора обеспечивает соотношение

$$\rho_{\text{упр}} \ll \frac{\tau_b L_1}{2\pi}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{упр}}$ – выходное сопротивление генератора запускающих импульсов либо импеданс передающей линии, используемой для удаленной подачи этих импульсов; τ_b – время формирования пробоя инициирующего зазора.

ПРИНЦИП РАБОТЫ РАЗРЯДНИКА

В исходном состоянии к разряднику приложено квазистатическое напряжение (E). При этом распределение напряжения по коммутационным зазорам разрядника (u_{Sk}), определяемое его распределением по емкостям делительных цепочек, осуществляется равномерно:

$$u_{Sk} = \frac{E}{2n}, \quad k = \overline{1, 2n}. \quad (4)$$

Запуск коммутационного процесса в разряднике осуществляется подачей на его управляющий вход (*Триггер*) запускающего импульса амплитудой u_T и длительностью $\tau_T > \tau_b$, приводящего к смещению потенциалов электродов, образующих внутреннюю емкостную делительную цепочку. При этом при подаче запускающего импульса той же полярности, что и коммутируемое напряжение, скачок напряжения возникает на всех нечетных коммутационных зазорах, а при подаче управляющего импульса обратной полярности – на всех четных.

Для того чтобы приложение запускающего импульса инициировало автокоммутиационный процесс, необходимо обеспечить как условие замыкания инициирующего зазора

$$|u_T| \geq |U_b| - |u_{S1}|, \quad (5)$$

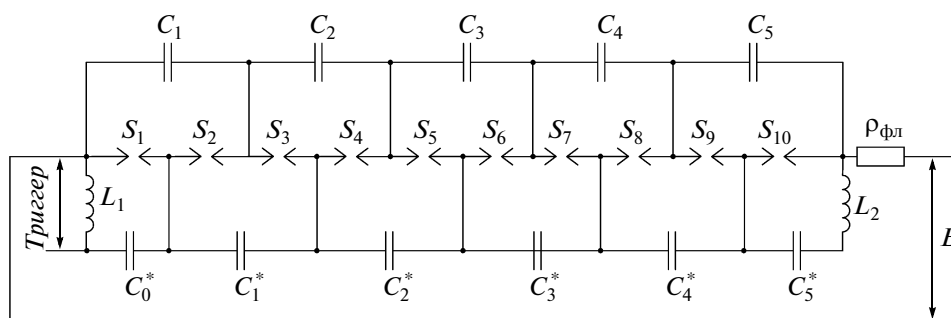


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема разрядника. *Триггер* – управляющий вход; E – зарядное напряжение коммутируемой линии; $\rho_{\text{фл}}$ – волновое сопротивление коммутируемой линии.

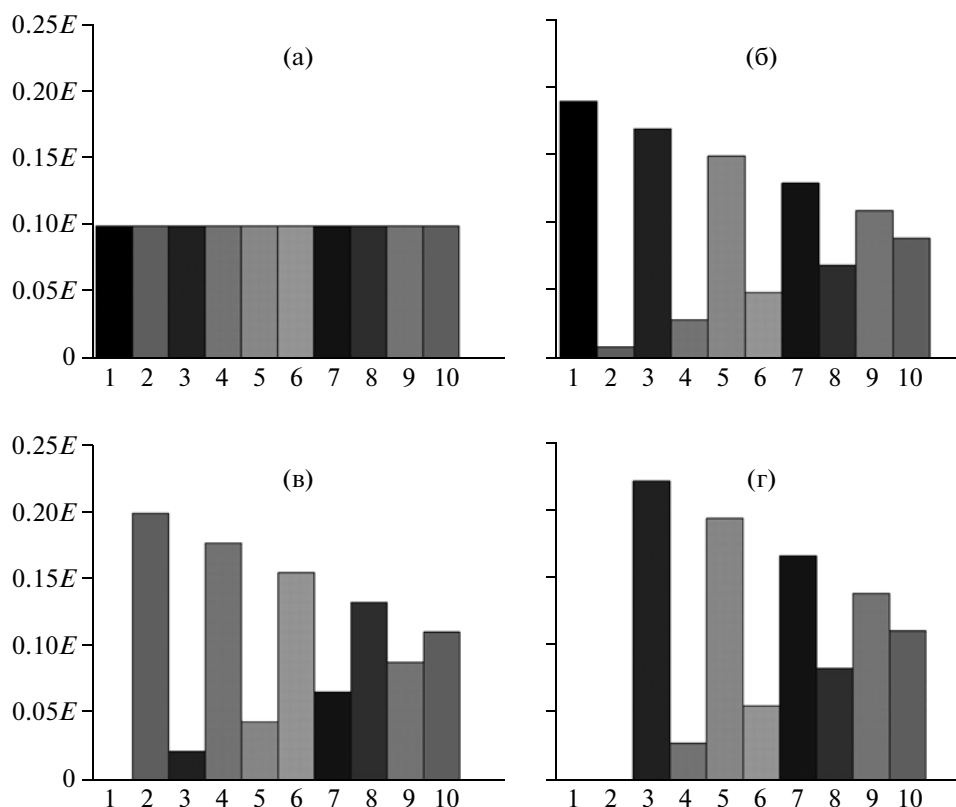


Рис. 3. Характер распределения напряженности по зазорам разрядника: **а** – исходное состояние; **б** – состояние при подаче запускающего импульса $u_T = U_{\text{фл}}/10$; **в** – состояние после пробоя 1-го зазора; **г** – состояние после пробоя 2-го зазора.

где U_b – напряжение самостоятельного пробоя коммутационного зазора, так и условия развития процесса автокоммутации

$$nU_b < E < 2nU_b. \quad (6)$$

Несмотря на то, что в этом случае перенапряжение возникает на половине коммутационных зазоров, наиболее вероятной следует считать ситуацию замыкания одного или нескольких наиболее перенапряженных зазоров, так как время замыкания зазора обратно пропорционально величине перенапряжения.

В результате замыкания зазора (зазоров) разрядника конфигурация связей между его элементами изменяется и в связи с этим нарушается равномерность распределения зарядов по емкостным цепочкам, т.е. возникает процесс перехода в новое равновесное состояние, в котором участвуют как перетоки зарядов между емкостями делительных цепочек, так и приток зарядов из внешней цепи, связанный с увеличением емкости разрядника. Однако новое равновесное состояние является неустойчивым из-за того, что на значительной части зазоров разрядника, особенно на зазорах, смежных с замкнутым, возникнут перенапряжения, т.е. произойдет многошаговый са-

моподдерживающийся процесс замыкания коммутационных зазоров разрядника.

Результаты моделирования, иллюстрирующие распределения напряженности в равновесных состояниях, возникающих при подаче на разрядник запускающего импульса той же полярности, что и коммутируемое напряжение, приведены на рис. 3.

ТЕСТИРОВАНИЕ РАЗРЯДНИКА

Разрядник рассматриваемой конструкции был использован при создании генератора мультигигаваттных прямоугольных наносекундных импульсов длительностью 30 нс на основе двойной формирующей линии (по схеме Блюмляйна). Внешний и внутренний диаметры коммутируемой формирующей линии составляли соответственно 350 и 200 мм. В качестве рабочей среды разрядника использовался газ SF_6 при давлении от 5 до 10 бар. В разряднике имелось 14 коммутационных зазоров, диаметры электродов внешней электродной системы составляли 160 мм, внутренней – 100 мм, длина разрядника 50 мм, длина коммутационных зазоров 1 мм. Межэлектродные емкости (C) составляли ~ 30 пФ, а емкости коммута-

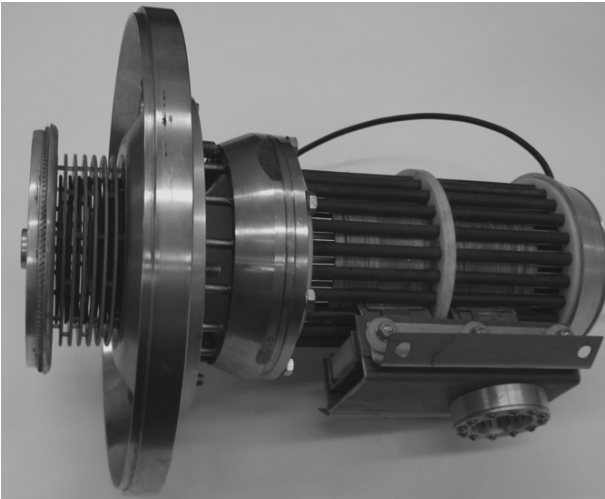


Рис. 4. Внешний вид разрядника со встроенным генератором запускающих импульсов.

ционных зазоров — ~ 3 пФ. Проходная (L_1) и разделительная (L_2) индуктивности составляли 10 мкГн.

Заряд линий генератора выполнялся с помощью трансформатора Тесла, встроенного в коммутируемую линию, при этом время нарастания напряжения на коммутируемой линии (разряднике) составляло около 30 мкс. Радиальная продувка газа через межэлектродные зазоры обеспе-

чивала удаление продуктов искрообразования и охлаждение электродов разрядника. Внешний вид разрядника с генератором запускающих импульсов показан на рис. 4.

Выбор амплитуды и длительности запускающих импульсов был выполнен с учетом экспериментальных данных [4], согласно которым при давлении >10 бар и двукратном перенапряжении пробой миллиметровых газовых зазоров происходит с задержкой <2 нс.

В режиме формирования коротких серий импульсов (до 5 с) разрядник обеспечивал следующие коммутационные характеристики: коммутируемое напряжение 300–600 кВ, коммутируемый ток 10–25 кА, время нарастания тока 5 нс, амплитуда импульсов запуска 25–50 кВ, длительность импульсов запуска 10 нс, джиттер запуска ± 1 нс, частота коммутации до 500 Гц.

Контроль за работой разрядника выполнялся измерением напряжений на коммутируемой формирующей линии (разряднике), управляющем электроде разрядника и нагрузке генератора, которое проводилось с помощью емкостных делителей. На рис. 5 приведена осциллограмма напряжений на формирующей линии $U_{\text{фл}}$ и управляющем электроде u_T , демонстрирующая диапазон управляемости разрядника при давлении газа 7 бар, где верхняя граница I управляемой коммутации (ограниченная режимом самопробоя разрядника) соответ-

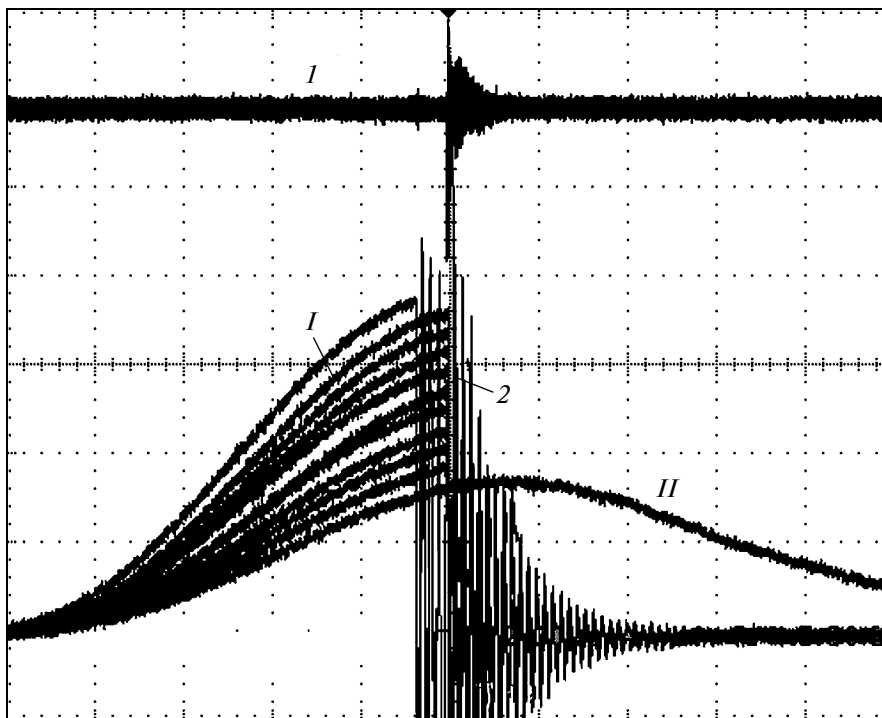


Рис. 5. Диапазон управляемости разрядника. I — напряжение на управляющем электроде разрядника (масштаб по вертикали 25 кВ/деление), 2 — напряжение на разряднике (180 кВ/деление); I и II — соответственно верхняя и нижняя граница управляемости. Масштаб по горизонтали 20 мкс/деление.

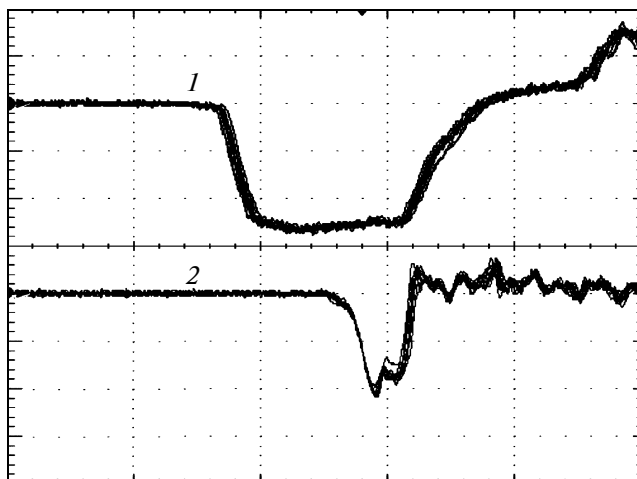


Рис. 6. Осциллограмма напряжений на нагрузке генератора (1) и на управляющем электроде разрядника (2). Масштаб по вертикали 200 кВ/деление (1), 20 кВ/деление (2), по горизонтали – 20 мкс/деление.

ствует $U_{\text{фл}} = 640$ кВ, а ее нижняя граница II (ограниченная режимом непрямого пробоя) соответствует $U_{\text{фл}} = 300$ кВ. Напряжение на запускаящем входе разрядника u_T варьировалось от 25 до 50 кВ. Напряжение на нагрузке генератора и на запускаящем входе разрядника измерялось осциллографом TDS 3052B, имеющим полосу пропускания 500 МГц.

Осциллограммы напряжений на нагрузке генератора и на управляющем электроде разрядника, приведенные на рис. 6, иллюстрируют стабильность запуска разрядника относительно запускаящего импульса и задержку срабатывания разрядника относительно фронта запускаящего импульса. Данные осциллограммы получены при коммутируемом напряжении около 500 кВ, амплитуде управляющего импульса около 40 кВ, длительности управляющего импульса 10 нс. При этом джиттер фронта выходного импульса отно-

сительно фронта запускаящего импульса составил около 1 нс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использованная модель распределенной коммутационной структуры позволяет создавать высоковольтные многоазорные управляемые разрядники с наносекундным временем нарастания тока, обеспечивающие частотные режимы коммутации потоков энергии мощностью до нескольких десятков гигаватт. Управляемый запуск таких разрядников может выполняться с помощью коротких импульсов, которые должны обеспечивать замыкание лишь одного крайнего зазора разрядника, т.е. в разрядниках, использующих более десяти коммутационных зазоров, напряжение запускаящего импульса составляет лишь единицы процентов от коммутируемого напряжения. Так как в процессе коммутации на зазорах формируется двукратное и более перенапряжение, то процесс коммутации характеризуется многоискровым режимом пробоя и незначительным джиттером. Понижение напряжений запускаящих импульсов может быть достигнуто путем уменьшения величины коммутационных зазоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kladukhin V.V., Kladukhin S.V., Khramtsov S.P., Kovalev N.F. // Proceedings of the 18th IEEE Pulse Power Conference. Albuquerque, NM, USA, 2007. P. 423.
2. Кладухин В.В., Кладухин С.В., Ковалев Н.Ф., Храмов С.П. Патент 2352039 РФ. 16.08.2007; <http://bd.patent.su/2352000-2352999/pat/servlet/servlet641b.html>
3. Blumlein A.D. US Pat. GB589127 (A). H03K3/55; H03K3/00. 1941; http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=worldwide.espacenet.com&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=19470612&CC=GB&NR=589127A&KC=A
4. Евлампиев С.Б., Коршунов Г.С. // ПТЭ. 1995. № 2. С. 126.