

метрии, большого давления), либо следует учитывать разогрев внутренних степеней свободы молекул у катода.

Авторы выражают благодарность за постоянный интерес к работе и полезные обсуждения А. А. Веденову, А. П. Напартовичу и А. Н. Старостину.

Поступила 20 IX 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петер Г. Электронные лавины и пробой в газах. М., «Мир», 1968.
2. Лозанский Э. Д., Фирсов О. Б. Теория искры. М., Атомиздат, 1975.
3. Davies A. J., Evans G. J., Townsend P., Woodison P. M. The numerical simulation of axially symmetric discharges between plane parallel electrodes.— In: 4th International Conference on Gas Discharges, 1976.
4. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. М., Атомиздат, 1961.

УДК 621.374.2

#### УПРАВЛЯЕМЫЕ МНОГОКАНАЛЬНЫЕ РАЗРЯДНИКИ С ВОДЯНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

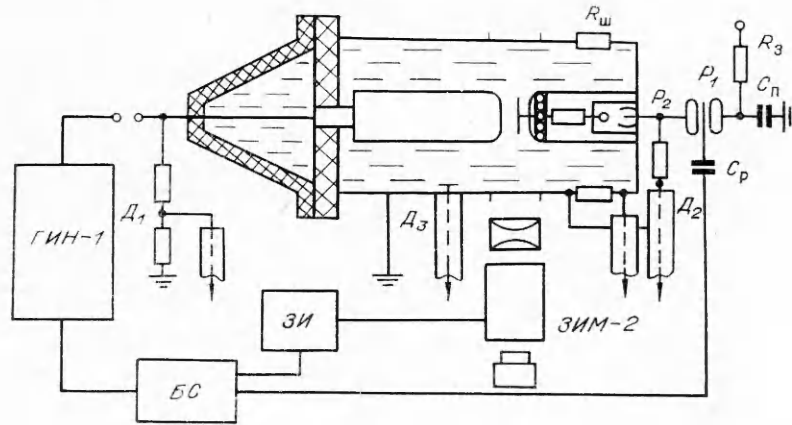
В. В. Балалаев, Н. К. Капишников, В. М. Муратов,  
В. Я. Ушаков

(Томск)

В большинстве известных наносекундных ускорителей (НСУ) и генераторов рентгеновского излучения в качестве коммутаторов используются управляемые газонаполненные или жидкостные разрядники [1-3]. Применение газовых разрядников считается целесообразным при напряжениях до 2-3 МВ, в то время как жидкостные разрядники могут быть использованы практически при любых напряжениях [1].

Одним из перспективных жидкостных разрядников, нашедших применение в разработанных НСУ [4, 5], является трехэлектродный разрядник, управляемый дополнительным газонаполненным коммутатором. Однако отсутствие в литературе достаточно полных данных о характеристиках и принципах конструирования подобных разрядников сдерживает их применение, а низкая стабильность срабатывания по сравнению с газонаполненными коммутаторами стимулирует дальнейший поиск оптимальных режимов, конструкций и способов запуска разрядников с жидкой изоляцией.

В данной работе использованы два типа различающихся по способу запуска управляемых разрядников, коммутирующих коаксиальную накопительную линию с волновым сопротивлением  $Z_{\text{в}} = 4,6$  Ом. Изоляция линии — вода с удельным объемным сопротивлением  $\rho = 2 \cdot 10^6$  Ом·см (фиг. 1). Двойная электрическая длина формирующей и передающей линий составляет соответственно 40 и 25 нс [6]; диаметр внутреннего цилиндра (корпус накопителя) 0,4 м. Формирующая линия заряжалась от генератора Аркадьева—Маркса до амплитуды 0,6-1,0 МВ за время  $\sim 0,75$  мкс.

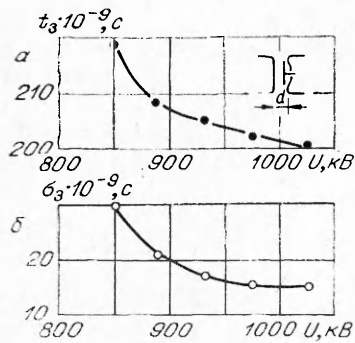


Фиг. 1

В экспериментах регистрировались: зарядное напряжение и время запаздывания срабатывания разрядника с активного  $D_1$  и емкостного  $D_3$  делителей, разрядный ток с шунта ( $R_{ш} = 0,022$  Ом), встроенного в рассечку внешнего цилиндра передающей линии, а также оптические явления в разрядном промежутке с помощью двух электронно-оптических затворов ЗИМ-2 (экспозиция 10 нс, время между кадрами 40 нс) с одновременным фотографированием разрядных каналов статической камерой. Делитель  $D_1$  изготовлен из нихромовой проволоки, бифилярно намотанной на винипластовую трубу диаметром 0,16 м, длиной 1,6 м ( $R_1 = 18$  кОм,  $R_2 = 20,5$  Ом). Делитель  $D_3$  состоит из низковольтной емкости  $C_2$ , представляющей цилиндрический конденсатор, встроенный в корпус накопителя, и высоковольтной емкости  $C_1$ , образованной внутренним электродом конденсатора  $C_2$  и внутренним цилиндром накопителя. Расчетные значения  $C_1$  и  $C_2$  составляют соответственно 10 пФ и 500 нФ, постоянная времени делителя  $< 5$  нс.

Исследованы основные характеристики разрядника: 1) время запаздывания срабатывания разрядника  $t_в$  отсчитывалось от начала действия иницирующего агента до момента пробоя основного промежутка; 2) стабильность срабатывания  $\sigma_3$  — среднеквадратичное отклонение величины  $t_в$ ; 3) время коммутации  $t_к$  или длительность фронта импульса тока, определяемая по стандартной методике; 4) эффективное значение коммутируемого тока  $I$  на уровне расчетной длительности импульса.

**Трехэлектродный разрядник.** Основные электроды коммутатора, являющиеся составными элементами формирующей и передающей линий (см. фиг. 1), изготовлены из нержавеющей стали в виде колец с внешним диаметром 12 см и толщиной 3 см. Управляющий электрод, представляющий собой диск с острой кромкой диаметром 10 см и толщиной 0,4 см, выполненный в форме круглого ножа из нержавеющей стали X18H10T, установлен вблизи передающей линии и закреплен на капролоновом изоляторе (корпус защитного сопротивления). Соотношение промежутков выдерживалось постоянным 7 : 1 [1] при общем межэлектродном расстоянии  $d = 5$  см. Управляющий электрод подключен к газонаполненному разряднику  $P_2$  через жидкостное защитное сопротивление ( $\sim 1$  кОм). Запуск разрядника  $P_2$  осуществлялся от генератора пусковых импульсов через 0,55 мкс от начала зарядки формирующей линии, т. е. в момент, когда амплитуда зарядного напряжения линии составляет  $0,8 U_{max}$ . Амплитуда пускового сигнала  $U_п + 35$  кВ, фронт 3 нс. Время запуска выбрано на



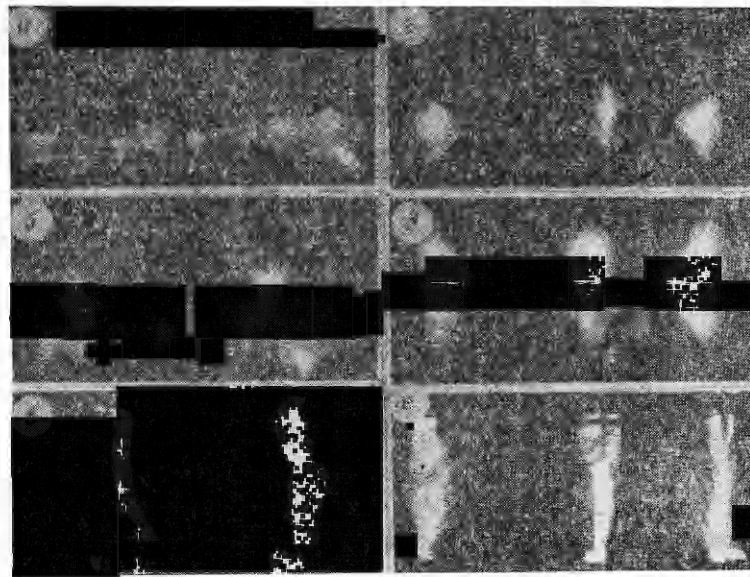
Фиг. 2

увеличивается на 10 — 20% вследствие самопроизвольных срабатываний. Диапазон напряжений, в котором благодаря управляемому иницированию с вероятностью 0,9 осуществлена многоканальная коммутация (разряд по двум и более каналам), составляет  $(0,85-0,95) U_{сп}$ . Факт коммутации по нескольким каналам следует из данных покадровой съемки (фиг. 3, а, б) и статических фотографий разряда (фиг. 3, в), а также из сравнения осциллограмм тока, характерных для одноканальной и многоканальной коммутации (фиг. 4, а, б соответственно,  $U = 860$  кВ, калибровочная частота  $10^8$  Гц). Колебания за фронтом импульса обусловлены переходными процессами в линии.

С помощью покадровой съемки прослежено развитие разрядных каналов в различные моменты времени. Например, при  $U = 880$  кВ через 50 нс после срабатывания газового разрядника  $P_2$  в области острой кромки управляющего электрода образуются многочисленные каналы (20—30), распространяющиеся в направлении потенциального электрода со средней скоростью  $(2-4)10^6$  см/с (фиг. 3, а). Через 100 нс от момента срабатывания разрядника  $P_2$  наблюдается преимущественное развитие 3—6 каналов (фиг. 3, б), скорость которых на участке  $(0,2-0,3)d$  превосходит

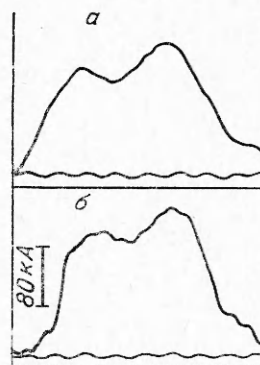
основании экспериментальных данных по скорости развития разряда.

На фиг. 2 приведены зависимости  $t_3$  и  $\sigma_3$  от амплитуды рабочего напряжения. Время  $t_3$  определялось совместным осциллографированием сигналов, поступающих с датчиков  $D_3$  и  $D_2$ . Минимальные  $t_3 = 200$  нс и  $\sigma_3 = 15$  нс получены при  $U = 1000$  кВ ( $0,9 U_{сп}$  — иницирование с анода). Снижение рабочего напряжения на 15% приводит к увеличению  $\sigma_3$  в два раза. При напряжениях, близких к напряжению самопрооя  $(0,95-1,0) U_{сп}$ ,  $\sigma_3$



Фиг. 3

скорость развития большинства каналов примерно на порядок. По мере их дальнейшего прорастания (участок  $(0,8-1)d$ ) средняя скорость увеличивается до  $(6-8)10^7$  см/с. После пробоя первого промежутка полное напряжение оказывается приложенным ко второму промежутку, что обеспечивает малые времена зажигания и развития разрядных каналов во втором промежутке. Вне зависимости от числа каналов в первом промежутке коммутация второго промежутка осуществляется по четырем—шести каналам. В случае одновременного переключения промежутка несколькими каналами яркость и диаметр свечения разрядных каналов примерно одинаковы; при этом уменьшение амплитуды тока по сравнению с расчетной не превышает 20—25%, в то время как при коммутации по одному каналу оно достигает 30—40%.



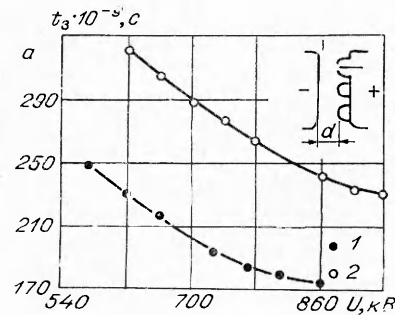
Фиг. 4

Повреждение электродов эрозией и ударными волнами, формируемыми искрой, заметно увеличивает разброс в зажигании разряда и уменьшает вероятность коммутации по нескольким каналам лишь после  $\sim 800-1000$  «выстрелов». После  $\sim 1000$  срабатываний разрядника при зарядном напряжении, равном  $(0,85-0,95) U_{сп}$ , среднеквадратичное отклонение  $\sigma_3$  увеличивается на 30—40%, а вероятность одновременной коммутации по двум—трем каналам становится равной 50%. Ресурс работы разрядников в многоканальном режиме можно повышать дальнейшим увеличением числа эффективных каналов и длины рабочей кромки управляющего электрода.

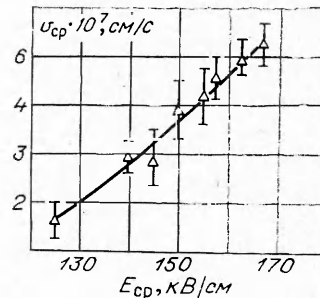
**Разрядники тригatronного типа.** Высокая стабильность запуска водяного тригatronа достигается при иницировании разряда «усилением поля» в области анода, когда основной промежуток пробивается раньше, чем «поджигающий», а пусковой импульс имеет фронт наносекундной длительности [7].

**Трехканальный тригatron.** Разрядник состоит из двух плоских электродов диаметром 20 см и радиусом закругления 6 мм, в одном из которых симметрично на диаметре 12,5 см расположены три поджигающих узла. Каждый узел выполнен в виде полусферы  $\varnothing 6$  см (с толщиной стенки 0,4 см), выступающей над общей поверхностью на 3 см. В полусфере в отверстии  $\varnothing 1,4$  см расположен управляющий электрод  $\varnothing 0,5$  см. В такой конструкции разрядника напряжение самопробоя составляет 0,9 и 1,0 МВ при межэлектродных расстояниях соответственно 5 и 6 см. С учетом данных [7] амплитуда пускового импульса принята равной  $+160$  кВ. При этом скорость изменения потенциала на пусковых электродах составляет 10 кВ/нс. Пусковой импульс подавался одновременно на все управляющие электроды через 0,55 мкс от начала зарядки формирующей линии.

На фиг. 5 приведены зависимости времени запаздывания срабатывания разрядника от амплитуды напряжения при межэлектродных расстояниях 5 и 6 см (кривые 1, 2 соответственно). Из их сравнения следует, что при одних и тех же напряжениях время  $t_3$  уменьшается в среднем на 25—30% при изменении межэлектродного расстояния на 1 см, т. е. оно быстро увеличивается при уменьшении перенапряжения в основном промежутке разрядника. Увеличение  $d$  (уменьшение перенапряжения) приводит к возрастанию и  $\sigma_3$ : при  $d = 5$  см  $\sigma_3 = 8$  нс, а при  $d = 6$  см  $\sigma_3 = 10$  нс. Более выраженная зависимость  $t_3$  от перенапряжения для тригatronа по сравнению с трехэлектродным разрядником обусловлена большей неоднородностью поля, создаваемой в тригatronе поджигающим узлом.



Фиг. 5



Фиг. 6

Разрядник достаточно надежно запускается в интервале  $(0,6—0,95)U_{ср}$ . Однако удовлетворительные коммутационные характеристики получены только при  $U = (0,8—0,95)U_{ср}$ , когда с вероятностью 0,92 коммутация осуществляется по трем каналам (фиг. 3, *д*, свечение зарегистрировано с помощью ЭОП через 170 нс после подачи пускового импульса на управляющий электрод). Из эопограмм и статических фотографий следует, что в пропускании тока участвуют все каналы, развившиеся к началу коммутации (т. е. к моменту переключения промежутка хотя бы одним каналом) на расстояние  $\sim 0,6d$ . Ток в этих каналах к моменту завершения коммутации составляет  $\sim 5—10\%$  от тока в основном канале. В тех же каналах, длина которых к началу коммутации составляла  $0,8d$  и более, ток составляет  $\sim 80\%$  от тока в канале, первым перемкнувшем промежуток (оценка тока в каждом канале проведена по методике [8], основанной на том, что интегральный выход света (определялся по засветке фотографии) пропорционален энергии, выделяющейся в канале (или протекающему в канале току), при постоянной длительности импульса). При оптимальных значениях зарядного напряжения, равных  $(0,8—0,95)U_{ср}$ , длительность фронта импульса тока в режиме трехканальной коммутации составляет  $\sim 16$  нс ( $I = 160$  кА). Благодаря распределению тока по отдельным каналам ( $50—55$  кА на канал) заметно снижается эрозия электродов, что обеспечивает более чем тысячекратное срабатывание разрядника без заметного ухудшения коммутационных характеристик.

С помощью ЭОП определена средняя скорость  $v_{ср}$  прорастания разрядных каналов на различных участках межэлектродного промежутка. В случае одновременного зажигания нескольких разрядных каналов все они распространяются с одинаковой скоростью, непрерывно увеличивающейся по мере их прорастания в глубь промежутка. На участке  $(0,1—0,3)d$  средняя скорость прорастания каналов составляет  $(0,8—3)10^7$  см/с. Этот участок отличается строгой направленностью каналов и незначительной их разветвленностью. На следующем отрезке пути  $(0,3—0,7)d$  наблюдается разветвление каналов и разделение их по скорости прорастания (фиг. 3, *г*,  $U = 800$  кВ, свечение зарегистрировано с помощью ЭОП через 120 нс после подачи пускового импульса на управляющий электрод). Преимущественное развитие со скоростью  $(3—5)10^7$  см/с получают каналы, распространяющиеся по кратчайшему пути. На оставшемся участке межэлектродного промежутка  $v_{ср}$  увеличивается до  $(5—8)10^7$  см/с. Приведенные данные получены при  $d = 5—6$  см и средней напряженности поля  $E_{ср} \approx 160$  кВ/см.

Измерены также средние скорости прорастания разрядных каналов при различных напряженностях и одном значении  $d = 5$  см, на фиг. 6

приведена зависимость, отражающая связь  $v_{\text{ср}}$  и  $E_{\text{ср}}$ , которая может быть представлена в виде эмпирического уравнения

$$v_{\text{ср}} = 110E_{\text{ср}}^{2,6}$$

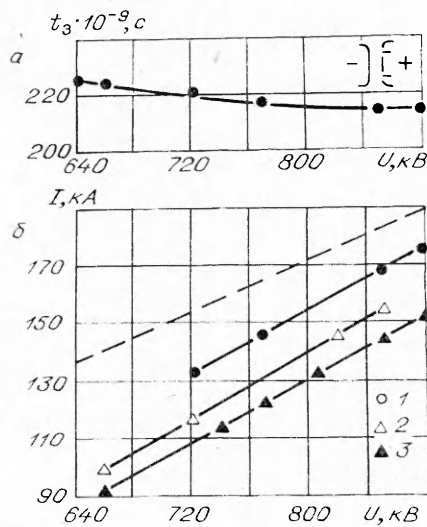
( $v_{\text{ср}}$ , см/с;  $E_{\text{ср}}$ , кВ/см).

Результаты исследований показывают, что в коммутаторах с более однородным полем могут быть созданы лучшие условия, обеспечивающие высокую скорость развития разрядных процессов и, следовательно, может быть расширен диапазон запуска разрядника с минимальным изменением величины  $t_3$  и  $\sigma_3$ . В некоторой степени это удалось достичь в тригатроне с кольцевым поджигающим электродом.

«Кольцевой» тригатрон. Основные электроды разрядника обеспечивают поле, близкое к однородному. Катод (плоский диск диаметром 20 см и радиусом скругления 0,6 см) является конструктивным элементом формирующей линии. На торцевой поверхности передающей линии закреплены основной (анод) и управляющий электроды. Основной электрод состоит из корпуса, изготовленного в виде полого диска (толщина стенки 0,8 см) с внутренним диаметром 13 и внешним 20 см (радиус скругления 3 см), и внутреннего диска  $\varnothing 11$  см, установленного на одном уровне с поверхностью корпуса. Управляющий электрод, изготовленный в виде кольца с острой кромкой (радиус скругления 0,01 см) диаметром 12 см, закреплен на полиэтиленовых изоляторах во внутренней полости между корпусом и внутренним диском и выступает над поверхностью основного электрода на 0,2 см. Таким образом, между управляющим и основным электродами образуется два зазора шириной по 0,5 см. Расстояние между основными электродами 5 см. Такая конструкция разрядника позволяет, во-первых, осуществить многоканальную коммутацию при высокой стабильности запуска и, во-вторых, увеличить число включений разрядника благодаря протяженной кромке управляющего электрода.

Как видно из фиг. 7, в отличие от трехканального тригатрона (см. фиг. 5) в «кольцевом» тригатроне ( $d = 5$  см) зависимость  $t_3(U)$  менее выражена, что свидетельствует о высокой эффективности инициирования разряда «усилением поля» в коммутаторах с подобной геометрией электродов. Так, в интервале (0,75—0,95)  $U_{\text{сп}}$  ( $U_{\text{сп}} = 950$  кВ) изменение величины  $t_3$  составило 3%, а вероятность коммутации по трем и более каналам (фиг. 7, б, 3—1 — коммутация по одному, двум и трем каналам соответственно) составляет 0,95 (пусковой импульс амплитудой +160 кВ подавался на управляющий электрод через 0,55 мкс от начала зарядки линии). В этом случае так же, как и в предыдущих разрядниках, наблюдается увеличение амплитуды коммутируемого тока на 10—15% (фиг. 7, б, 1) по сравнению с режимом одноканальной коммутации 3. Нестабильность в амплитуде тока составляет 3—5%.

Результаты исследований показывают, что рационально выбранные конструкция и режим запуска позволяют создавать водяные разрядники



Фиг. 7

с наносекундной стабильностью срабатывания, благодаря чему осуществляется многоканальный режим их работы, способствующий уменьшению времени коммутации, снижению эрозии электродов (увеличению срока службы разрядников) и повышению КПД схемы.

Поступила 3 XII 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Martin J. C.— In: Nanosecond Pulse Techniques. Aldermaston. Berks, 1970.
2. Ковальчук Б. М., Поталицын Ю. Ф. Коммутаторы генераторов релятивистских электронных пучков.— В кн.: Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков. Новосибирск, «Наука», 1976.
3. Смирнов В. П. Получение сильноточных пучков электронов.— ПТЭ, 1977, № 2, с. 7—31.
4. Bernstein B., Smith I. «Aurora». An electron accelerator.— «IEEE Trans. Nucl. Sci.», 1973, vol. NS-20, N 3, p. 294—300.
5. Fraizer G. B. «OWL — II» pulsed electron beam generator.— «J. Vac. Sci. Technol.», 1975, vol. 12, N 6, p. 1183.
6. Бабинцев В. С., Коротков М. Г., Муратов В. М., Ушаков В. Я. Установка для исследования разрядников с водяной изоляцией на 1 МВ.— В кн.: Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков. Новосибирск, «Наука», 1976.
7. Uschakov W. J., Muratov W. M., Korotkov M. G. Triggereinrichtung mit flussigen Dielektrikum für Impulsschaltungen hoher Leistung.— In: XIX Intern. Wissenschaft. Kolloq., Ilmenau. 1974. N. 5, S. 25—30.
8. Martin J. C.— In: Multichannel Gaps. SSWA (ICM), 703/27, AWRE, Aldermaston, 1970.

УДК 535.343

### К РАСЧЕТУ КИНЕТИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МОЩНОГО СВЕТОВОГО ПОТОКА В ПРОЗРАЧНОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ С ПРИМЕСЯМИ

Ю. И. Лысков

(Ворошиловград)

Вопросу взаимодействия мощного оптического излучения с прозрачными диэлектриками в допробойном или пробойном режимах посвящено большое число работ. Однако механизм разрушения материала еще не выяснен окончательно, о чем свидетельствуют все новые и новые публикации по данной теме. Попытки объяснить разрушение как результат развития электронной лавины [1] дают значения пороговых мощностей на порядки выше, чем в эксперименте [2]. В связи с этим в последние годы акцент при обсуждении механизма пробоя делается на идею о поглощающих микропримесях инородных частиц или неоднородностях среды, имеющих настолько малые размеры, что наличие их и концентрацию трудно контролировать. Поглощая оптическое излучение, микропримесь (неоднородность) нагревается и разогревает прилегающие к ней участки среды, которые при этом начинают поглощать свет значительно интенсивней, чем это было вначале [3]. В результате в среде начинается процесс роста поглощения, который завершается пробоем или разрушением материала вокруг неоднородности. В работах [4, 5] отмечается, что важную роль при таком пути разрушения материала могут играть термоупругие напряжения среды, что, однако, не учтено в подходе [3]. В [4, 5] предполагается, что основное влияние