

## РАСЧЕТ МНОГОКАНАЛЬНОГО РЕЖИМА КОММУТАЦИИ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДНИКОВ И СРАВНЕНИЕ ЕГО РЕЗУЛЬТАТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

*Для багатоканального режиму комутації у керованому розряднику одержано співвідношення, що дозволяють розрахувати число паралельних каналів в залежності від параметрів розрядного контуру, самого розрядника і діючої на нього напруги. Результати експериментів щодо реалізації багатоканального режиму в 3-х електродному розряднику зі спотворенням поля, в рейковому тригатронному розряднику з лезовим керуючим електродом і в тригатроні погоджуються з результатами розрахунків, що виконані з використанням одержаних співвідношень.*

*Для многоканального режима коммутации в управляемом разряднике получены соотношения, позволяющие рассчитать число параллельных разрядных каналов в зависимости от параметров разрядного контура, самого разрядника и воздействующего на него напряжения. Результаты экспериментов по реализации многоканального режима в 3-х электродном разряднике с искажением поля, в рельсовом тригатронном разряднике с лезвийным управляющим электродом и в тригатроне согласуются с результатами расчетов, выполненных по полученным соотношениям.*

### ВВЕДЕНИЕ

Для уменьшения времени коммутации разрядника, уменьшения износа электродов и уменьшения индуктивности разрядного контура используется многоканальный режим работы искровых разрядников. Он может быть реализован в промежутках стержни – плоскость и лезвие – плоскость, в тригатронах, в разрядниках с искажением поля. Дж.К. Мартин [1] экспериментально показал, что в таких промежутках разброс во времени срабатывания каналов можно уменьшить до 1 %. Для многоканальной работы разрядника нужно обеспечить необходимые для этого условия в разрядном промежутке. Поэтому возникает задача расчета числа параллельных искровых каналов в промежутке по известным параметрам разрядного контура, самого разрядника и воздействующего на него напряжения.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дж.К. Мартин [1, 2] предложил суммарное характерное время  $\tau_{\Sigma}$  (нс) спада напряжения на промежутке для  $N$  параллельных каналов определять по формуле  $\tau_{\Sigma} = \tau_L + \tau_R$  или с использованием им же предложенных соотношений соответственно для  $\tau_L$  и  $\tau_R$  (получено эмпирическим путем)

$$\tau_{\Sigma} = L(Nz)^{-1} + 88d^{1/3}(Nz)^{-1/3}E^{-4/3}(\rho/\rho_0)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\tau_R$  – характерное время уменьшения напряжения на активном сопротивлении искры в  $e \approx 2,72$  раз, нс;  $\tau_L$  – характерное время уменьшения напряжения на индуктивностях искр в  $e \approx 2,72$  раз, нс;  $L$  – индуктивность канала разряда, нГн;  $N$  – число параллельных каналов;  $Z$  – сопротивление разрядного контура, Ом;  $d$  – длина разрядного промежутка, см;  $E$  – напряженность электрического поля вдоль канала разряда вблизи его в единицах 1 кВ/мм;  $\rho/\rho_0$  – отношение плотности газа к его плотности при нормальных температуре и давлении.

При многоканальной коммутации практически всегда каналы имеют запас во времени срабатывания  $\tau_p$ , в течение которого фронт спадающего напряжения распространяется от одного канала к соседнему [1, 2]:

$$\tau_p = l/cN, \quad (2)$$

где  $l$  – длина электродов, см;  $c$  – скорость света в диэлектрике, в котором осуществляется коммутация.

Время  $\tau_p$  прибавляется к времени, необходимому для замыкания всех последующих каналов, чтобы получить токи в них, изменяющиеся от максимального  $i_{\max}$  до минимального  $i_{\min}$ , который еще можно считать током в канале разряда. Дж.К. Мартином было при этом получено

$$\Delta T = f\tau_{\Sigma} + 0,8\tau_p, \quad (3)$$

где  $\Delta T$  – допустимое время, в течение которого срабатывают  $N$  каналов;  $f = 0,1$  в первом случае, когда  $i_{\min} = 0,45i_{\max}$ , или  $f = 0,15$  во втором случае, когда  $i_{\min} = 0,35i_{\max}$  (эти соотношения для токов достигаются к моменту, когда напряжение на каналах падает примерно в 2,72 раза по сравнению с первоначальным); коэффициент 0,8 в (3) вместо 1 учитывает запас во времени, связанный с неоднородным распределением каналов по электроду, и другие эффекты.

Дж.К. Мартин делает такое заключение, что по определяемым экспериментально относительному разбросу  $\delta(U)$  напряжения пробоя различных каналов, выраженному в долях от среднего напряжения срабатывания  $U$  (кВ), скорости нарастания напряжения на поджигающем промежутке  $dU/dt = U'$  (кВ/нс) и среднему напряжению срабатывания  $U$  можно определить расчетным путем абсолютный разброс  $\Delta t_{Br}$  по времени моментов пробоя для различных каналов посредством следующей формулы:

$$\Delta t_{Br} = \delta(U)U/U'. \quad (4)$$

Откуда следует вывод, что с достаточной степенью точности  $\Delta T = 2\Delta t_{Br}$ . После приравнивания правой части (3) и удвоенной правой части (4), получено [1]

$$f\tau_{\Sigma} + 0,8\tau_p = 2\delta(U)U/U'. \quad (5)$$

Это соотношение (5) служит для расчета числа каналов  $N$ . Однако не приводится методика расчета числа каналов  $N$  на основании выражения (5). Целью данной работы является получение расчетной зависимости числа каналов  $N$  в удобном для инженерных расчетов виде с использованием параметров разрядника и воздействующего на него напряжения, которые входят в (5), и сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

## ВЫВОД СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ЧИСЛА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Проведя в (5) подстановки с учетом (1), (2) и приняв обозначение  $\delta(U) = \delta$  имеем:

$$f[L(NZ)^{-1} + 88d^{1/3}(NZ)^{-1/3}E^{-4/3}(\rho/\rho_0)^{1/2}] + 0,8l(Nc)^{-1} = 2\delta U/U'.$$

Проведем преобразования:

$$N^{-1}(fLZ^{-1} + 0,8lc^{-1}) + N^{-1/3}[88fd^{1/3}Z^{-1/3}E^{-4/3}(\rho/\rho_0)^{1/2}] - 2\delta U/U' = 0. \quad (6)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} x &= N^{-1/3}; \\ A &= 88fd^{1/3}Z^{-1/3}E^{-4/3}(\rho/\rho_0)^{1/2}; \\ B &= -2\delta U/U'; \\ F &= fLZ^{-1} + 0,8lc^{-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Проведя замены (7) в (6), получим

$$Fx^3 + Ax + B = 0. \quad (8)$$

Введя новые обозначения

$$p = A/F \text{ и } g = B/F, \quad (9)$$

преобразуем (8) к виду  $x^3 + px + g = 0$ .

Уравнение такого вида имеет один действительный корень [3], который можно представить в виде

$$x = u + v, \quad (10)$$

$$\text{где } \left. \begin{aligned} u &= \sqrt[3]{-g/2 + \sqrt{D}} \\ v &= \sqrt[3]{-g/2 - \sqrt{D}} \\ D &= (p/3)^3 + (g/2)^2 \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Согласно введенному в (7) обозначению имеем, что  $N = x^{-3}$ . Выразим  $x^3$  согласно (10) и (11)

$$x^3 = (u + v)^3 = (\sqrt[3]{-g/2 + \sqrt{D}} + \sqrt[3]{-g/2 - \sqrt{D}})^3.$$

После преобразований получим

$$x^3 = p(\sqrt[3]{g/2 - \sqrt{D}} + \sqrt[3]{g/2 + \sqrt{D}}) - g.$$

Окончательно получим для числа каналов

$$N = [p(\sqrt[3]{g/2 - \sqrt{D}} + \sqrt[3]{g/2 + \sqrt{D}}) - g]^{-1}, \quad (12)$$

где с учетом (7), (9) и (11):

$$p = \frac{88d^{1/3}Z^{-1/3}E^{-4/3}(\rho/\rho_0)^{1/2}}{lZ^{-1} + 0,8l(cf)^{-1}}; \quad (13)$$

$$g = -\frac{2\delta U/U'}{fLZ^{-1} + 0,8lc^{-1}}; \quad (14)$$

$$D = (p/3)^3 + (g/2)^2. \quad (15)$$

Полученная формула (12) с учетом (13) – (15) позволяет рассчитать число параллельных каналов по известным параметрам разрядного промежутка, воздействующего напряжения и разрядного контура.

## АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННОГО РАСЧЕТНОГО СООТНОШЕНИЯ

Проанализируем полученные соотношения на примере трехэлектродного разрядника, управляемого

искажением поля [4] (см. рис. 1). Разрядник коммутирует накопитель  $C_{cm}$  емкостью 25 мкФ, заряжаемый до 10 кВ. Непосредственно к фланцу корпуса  $C_{cm}$  с помощью шпилек М8 крепится корпус разрядника  $P_{cm}$ . Основные электроды воздушного разрядника  $P_{cm}$  выполнены в виде стальных колец с наружным диаметром 100 мм и внутренним – 80 мм со скругленными торцами в рабочей зоне. Управляющий электрод выполнен в виде плоского кольца с внутренним диаметром 90 мм, наружным – 130 мм и толщиной 0,3 мм из нержавеющей стали. На внутренней кромке управляющего электрода в восьми местах, равноотстоящих друг от друга по окружности кромки, выполнены треугольные зубцы высотой ~2 мм для фиксации точек иницирования пробоя. Управляющий электрод размещен точно в середине рабочего промежутка длиной 5 мм. Корпус  $P_{cm}$  изготовлен из оргстекла и состоит из двух одинаковых половин.

Накопитель  $C_{cm}$  с разрядником  $P_{cm}$  образуют стартовую ступень генератора наносекундных импульсов мегавольтного диапазона. Выводы ступени подключались к первичной обмотке импульсного трансформатора следующей ступени повышения напряжения в генераторе мегавольтных импульсов.

Экспериментально определенное напряжение самопробоя разрядника равнялось  $U_{сп} = 13$  кВ и имело положительную полярность. Управляющий импульс отрицательной полярности достигал амплитуды 45 кВ, длительность его фронта составляла ~40 нс. Средняя скорость нарастания напряжения на поджигающем промежутке равнялась  $U' = 45 \text{ кВ} / 40 \text{ нс} = 1,12 \text{ кВ/нс}$ .

Приняв на основании рекомендаций [2], что коэффициент импульса для промежутка разрядника равняется  $\kappa_u = 1,5$ , получим величину напряжения срабатывания разрядника в управляемом режиме  $U = \kappa_u \cdot U_{сп} = 1,5 \cdot 13 = 19,5 \text{ кВ}$ .

При длине рабочего зазора разрядника  $d = 0,5$  см напряженность электрического поля в момент пробоя будет  $E = 19,5 \text{ кВ} / 0,5 \text{ см} = 39 \text{ кВ/см} = 3,9 \text{ кВ/мм}$ .

Разрядник работает в воздухе при нормальных условиях, т.е.  $\rho/\rho_0 = 1$ . Диаметр внутренней иницирующей кромки управляющего электрода равняется 90 мм, тогда длина рабочей зоны электродов  $l = \pi \cdot 90 \text{ мм} = 282 \text{ мм} \approx 28 \text{ см}$ .

Индуктивность канала разряда примем  $L \approx 5 \text{ нГн}$ . Приемлемый разброс напряжения срабатывания каналов не превышает 5 %, т.е.  $\delta = 0,05$ . Оценочные расчеты по определению сопротивления разрядного контура дают величину  $Z \approx 0,22 \text{ Ом}$ .

Задавшись величиной  $f = 0,1$  (при  $c = 30 \text{ см/нс}$ ) с учетом выше приведенных параметров по формулам (12) – (15) получим  $N = 4,82$ . Таким образом, в данных условиях в разрядном промежутке разрядника может быть сформировано 4 параллельных канала, в трех из которых ток составляет не менее 0,45 от максимального тока в канале, который образовался первым.

При управляемом срабатывании разрядника визуально наблюдаемое свечение разрядной зоны (через прозрачный оргстеклянный корпус разрядника) занимает больший объем, чем при самопробое, косвенно

подтверждая факт многоканального разряда. Специальных исследований по определению числа образующихся каналов не проводилось. Однако периодическая разборка разрядника после 5-8 срабатываний показала, что количество следов разрядов на основных электродах в 3,5-5 раз превышало количество

управляемых срабатываний. Кроме того, были выявлены следы разрядов на всей длине рабочей кромки управляющего электрода, что свидетельствует о практически одинаковой вероятности образования разрядных каналов по всей рабочей длине электродов.

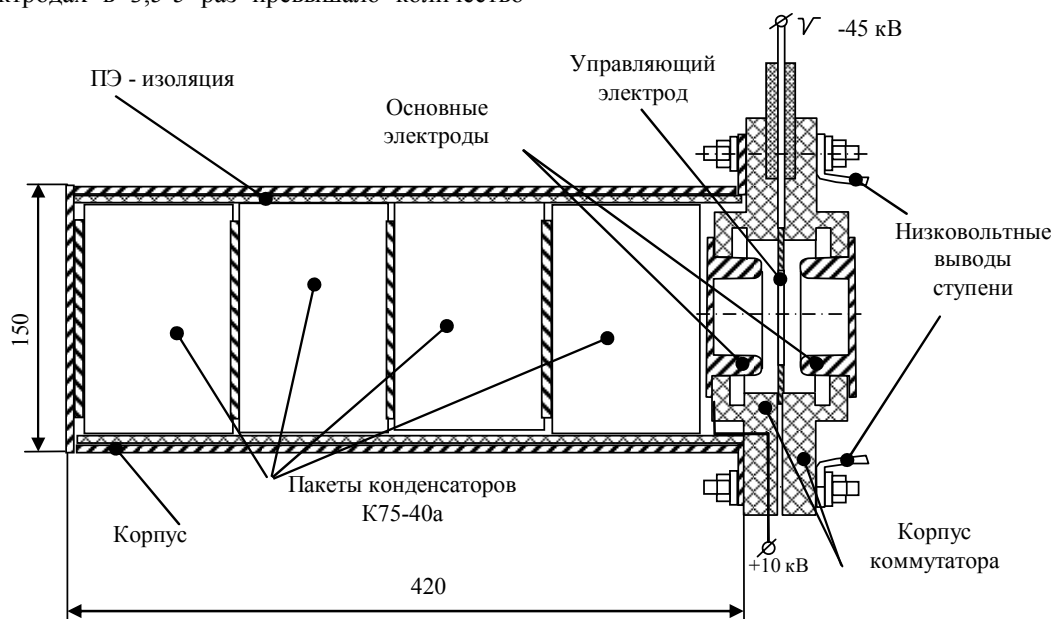


Рис. 1. Конструкция стартовой ступени генератора

Определенная по осциллограмме выходного импульса напряжения ступени индуктивность разрядного контура, в который входит 3-х витковая первичная обмотка импульсного трансформатора, равняется  $L_{\text{разр}} = 190 \text{ нГн}$ , благодаря многоканальности разряда.

Пересчитанное характеристическое сопротивление составило  $Z = 0,142 \text{ Ом}$ . Меньшая величина его по сравнению с расчетной ( $\approx 0,22 \text{ Ом}$ ), вероятно, объясняется многоканальностью разряда, поскольку при расчете предполагался одноканальный вариант разряда. При уточненном значении  $Z$  рассчитанное по формулам (12) – (15) число каналов  $N = 7,05$ . Наиболее сильное влияние на увеличение  $N$  согласно полученным соотношениям оказывает скорость нарастания управляющего напряжения  $U'$ . Так увеличение  $U'$  в 3 раза (с 1,12 до до 3,36 кВ/нс) приводит к увеличению  $N$  более, чем в 10 раз (с  $\sim 7$  до  $\sim 72$ ) при прочих равных условиях.

Благодаря многоканальному режиму разряда и вследствие этого малоиндуктивному разрядному контуру максимальная расчетная амплитуда разрядного тока через  $P_{cm}$  в экспериментах составила:  $I_{\text{max}} = U_{\text{зар}} / Z = 9,6 \text{ кВ} / 0,142 \text{ Ом} = 67,6 \text{ кА}$  при максимальной скорости нарастания  $U_{\text{зар}} / L_{\text{разр}} = 5 \cdot 10^{10} \text{ А/с}$ .

В [5] приведены результаты испытаний рельсового тригatronного разрядника с рабочим напряжением до 50 кВ и амплитудой коммутлируемого тока до 50 кА. Исследовано влияние конфигурации острой кромки управляющего лезвийного электрода на число разрядных каналов, участвующих в коммутации, и распределение тока по каналам. В разряднике плоские основные электроды длиной 50 и шириной 5 см изготовлены из меди. Зазор между ними равен 6,5 мм. В низковольтном электроде разрядника в щелевом пазу

длиной 46 и шириной 1 см установлен лезвийный управляющий электрод из стали. Длина лезвия 44 см, толщина – 1 мм. Емкость и индуктивность разрядного контура соответственно составляли 1 мкФ и  $\sim 1 \text{ мкГн}$ . Давление газа в разряднике – 0,5-1 МПа. Разрядник запускался импульсом напряжения амплитудой 10-25 кВ с длительностью фронта 4-5 нс.

Применим полученные соотношения для расчета числа каналов в данном разряднике. Характеристическое сопротивление контура  $Z = 1 \text{ Ом}$ . При длине основного зазора  $d = 0,65 \text{ см}$  оптимальное давление составило 0,5 МПа (примем  $\rho / \rho_0 = 5$ ), а амплитуда управляющего импульса составила 14 кВ при длительности фронта 5 нс. Тогда скорость нарастания управляющего напряжения  $U' = 14 \text{ кВ} / 5 \text{ нс} = 2,8 \text{ кВ/нс}$ .

Приняв коэффициент импульса  $k_u = 1,5$ , при напряжении самопробоя  $U_{\text{сп}} = 27 \text{ кВ}$  получим напряжение срабатывания  $U = 40,5 \text{ кВ}$ . Пробивная напряженность составит при этом  $E = 40,5 \text{ кВ} / 6,5 \text{ мм} = 6,23 \text{ кВ/мм}$ .

Задав  $f = 0,1$  и  $\delta = 0,04$  и подставив вышеприведенные значения параметров в (12) – (15), получим  $N = 5,65$ . Если принять  $f = 0,15$ , тогда  $N = 11,89$ . Это согласуется с экспериментальными результатами [4], где выполнена оценка распределения разрядного тока по каналам по результатам измерения интегрального выхода света от разрядных каналов. Оценка показывает, что при выборе в качестве критерия эффективности разрядных каналов уровня тока  $\geq 0,45$  (т.е.  $f = 0,1$ ) от амплитуды тока в канале, первым перемкнувшем разрядный промежуток, эффективными для большинства испытанных вариантов рельсового разрядника являются 60-65 % от общего числа разрядных каналов.

Вычисленное значение  $N = 5,65$  принадлежит

кривой 1 на рис. 2 в [5] при  $U_{\text{сп}} = 27$  кВ,  $U_{\text{зар}} / U_{\text{сп}} \approx 0,65$  ( $U_{\text{зар}}$  – зарядное напряжение) и при положительной полярности управляющего импульса и отрицательной – зарядного напряжения. Однако, если в [5] фиксировались все разрядные каналы (в том числе и те, в которых амплитуда тока не достигала 0,35 от амплитуды тока в канале, первым переключившем разрядный промежуток – из текста статьи это не совсем ясно), т.е.  $N = 5,65$  – это количество эффективных каналов, тогда всего каналов  $N_{\text{макс}} = N / (0,6-0,65) = 8,69-9,41$ . Эти значения  $N$  располагаются на кривой 1 на рис. 2 [5] при  $U_{\text{зар}} / U_{\text{сп}} \approx 0,9$ .

В [6] описан наполненный смесью азота и элегаза под давлением  $\sim 1$  МПа тригатрон на 100 кВ. Импульс управляющего напряжения имел фронт 13 нс и амплитуду 50 кВ. Длина основного разрядного промежутка равнялась 7 мм, диаметр управляющего электрода 7 мм. Т.е., имеем  $\rho / \rho_0 = 10$ ,  $U = 100$  кВ,  $E \approx 13$  кВ/мм,  $U' \approx 4$  кВ/нс,  $d = 0,7$  см,  $l = 2,2$  см,  $Z = 0,2$  Ом,  $\delta = 0,04$ . Подстановка этих значений в формулы (12) – (15) дает  $N = 3,31$  при  $f = 0,1$  и  $N = 6,12$  при  $f = 0,15$ . В статье указывается, что после разовых включений тригатрона на предварительно полированном основном электроде (без управляющего электрода) обнаруживалось 4-6 следов разрядных каналов.

Таким образом, результаты расчетов по полученным соотношениям (12) – (15) согласуются с экспериментальными данными, полученными автором и другими исследователями.

При существующей конструкции разрядника (при неизменной длине разрядного промежутка  $d$ ) на число каналов согласно формулам (12) – (15) влияют следующие параметры: сопротивление разрядного контура  $Z$ , отношение плотности газа к плотности при нормальных температуре и давлении  $\rho / \rho_0$ , среднее напряжение срабатывания  $U$  и определяемая им пробивная напряженность электрического поля  $E$ , скорость нарастания напряжения на поджигающем промежутке  $dU / dt = U'$  и относительный разброс напряжения  $\delta(U)$  пробоя различных каналов.

В [2] указывается, что одним из путей получения большего числа каналов  $N$  является увеличение  $L$ . Следует отметить, что согласно расчетам по (12) – (15) с увеличением  $L$  при прочих равных условиях наблюдается некоторое уменьшение  $N$ .

Безусловно, полученные соотношения не претендуют на универсальность, поскольку они не учитывают род газа в разрядном промежутке, соотношение полярностей основного и управляющего напряжений, а величина  $\delta(U)$  должна определяться экспериментально.

#### ВЫВОДЫ

1. Получены выражения, удобные для инженерного расчета числа параллельных разрядных каналов в разрядниках (например, с управляемым электродом в виде лезвия, в тригatronах) по известным параметрам разрядного промежутка, воздействующего на напряжения и разрядного контура.

2. Результаты экспериментов по реализации многоканального режима в 3-х электродном разряднике с искажением поля, рельсовом тригатронном разряднике с лезвийным управляющим электродом и тригатроне согласуются с результатами расчетов, проведенных по полученным соотношениям.

3. Полученные соотношения могут быть полезны при проектировании разрядников для оценки возможности реализации многоканального режима коммутации в них.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Martin J.C. Multichannel gaps. Aldermaston, Berks, 1970, SSWA(JCM).
2. Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Поталицын Ю.Ф. Сильноточные наносекундные коммутаторы. – Новосибирск: Наука. – 1979. – 175 с.
3. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. – М.: Наука. Гл. редакция физ.-матем. лит.-ры. – 1981. – 720 с.
4. Евдошенко Л.С. Стартовая ступень генератора высоковольтных импульсов // Вісник НТУ "ХПИ". Зб. наук. праць. Темат. вип.: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2007. – № 34 – С. 57-66.
5. Капишников И.К., Кузнецов И.А. Рельсовый тригатронный разрядник с лезвийным управляющим электродом // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – № 4. – С. 127-131.
6. Босамыкин В.С., Герасимов А.И., Зенков Д.И. и др. Надежный точно синхронизируемый разрядник на 100 кВ // Приборы и техника эксперимента. – 1987. – № 2. – С. 94-97.

Поступила 24.12.2009

*Евдошенко Леонид Свиридович, с.н.с.*

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния"

Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"  
ул. Шевченко, 47, Харьков, 61013, Украина  
тел/факс (057) 7076183, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

*Evdoshenko L.S.*

#### **Calculation of multichannel mode of spark dischargers commutation and comparison of analytical and experimental results.**

For a multichannel mode of commutation in a controlled discharger, relations allowing calculating the number of parallel discharging channels as function of parameters of the discharging loop, the discharger itself and actuating voltage are obtained. Results of experiments on implementation of multichannel mode in a three electrode discharger with field distortion, in a rail trigatron discharger with a blade-shape control electrode, and in a trigatron are in agreement with analytical results obtained with the relations derived.

**Key words – multichannel commutation, calculation of the number of channels, breakdown voltage, three-electrode discharger, blade-shape electrode.**