

Л.С. ЕВДОШЕНКО, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

К РАСЧЕТУ МНОГОКАНАЛЬНОГО РЕЖИМА КОММУТАЦИИ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДНИКОВ

Определена область применения уравнения для расчета количества параллельных разрядных каналов при многоканальном режиме коммутации искровых разрядников. Показано, что уравнение применимо только для воздушных разрядников. Доказано, что на увеличение количества каналов наибольшее влияние оказывают уменьшение сопротивления разрядного контура и относительного разброса напряжения образования отдельных каналов. Даны рекомендации относительно осуществления многоканального режима коммутации воздушных разрядников.

Ключевые слова: воздушный искровой разрядник, многоканальный разряд.

Введение. При разряде мощных емкостных накопителей энергии на нагрузку с помощью искровых разрядников часто используется многоканальный режим коммутации. Это позволяет увеличить амплитуду и скорость нарастания импульсов тока в нагрузке, снизить индуктивность разрядного контура и уменьшить эрозионный износ электродов разрядника. Определение количества параллельных разрядных важно как на стадии проектирования разрядника, так и в процессе его эксплуатации. Такая информация весьма полезна для определения фронта и амплитуды выходных импульсов генератора.

Анализ последних исследований и литературы. Получение неуправляемого многоканального разряда возможно лишь при скоростях нарастания напряжения U на основном разрядном промежутке $dU/dt \geq 10^{13}$ В/с [1]. Практическая реализация таких скоростей роста напряжения вызывает определенные технические сложности, особенно при субмегавольтных уровнях напряжения срабатывания разрядников. Поэтому на практике, как правило, используется управляемый многоканальный разряд. В этом случае напряжение между основными электродами разрядника прикладывается сравнительно медленно (по меньшей мере, порядка 10 мкс и более), а запуск разрядника осуществляется подачей управляющего импульса с коротким фронтом (несколько наносекунд и более) на управляющий электрод. Исследованию особенностей формирования такого разряда посвящены многие экспериментальные работы: [2-6] – в рельсовых газонаполненных разрядниках, [7, 8] – в тригатронах, [9] – в разрядниках с искажением поля. Однако, полученные в этих экспериментах результаты не позволяют заранее, например, в ходе проектирования разрядника иметь надежную достоверную информацию о возможности формирования многоканального разряда.

В [10] приведена исходная система уравнений для получения соотношения, в которое кроме неизвестного числа параллельных разрядных каналов N входят известные параметры, определяющие условия разряда. Авторы [10] предлагают использовать это соотношение для определения N . Можно предположить, что это сводится к подбору N с тем, чтобы уравнивать обе части соотношения, стоящие по разные стороны от знака равенства. Учитывая то, что в соотношении N имеет дробные степенные показатели, на практике такая методика определения N из указанного соотношения неудобна.

В работе [11] из этого соотношения получено уравнение непосредственно относительно N . Это позволяет в явном виде вычислить количество параллельных каналов N по заданным параметрам разряда, рабочего промежутка разрядника и воздействующего напряжения. Однако в этой работе не определены условия при которых правомерно применение уравнения, что ставит под сомнение результаты проведенных по нему расчетов. Кроме того, представляется интересным определить значимость влияния параметров, входящих в это уравнение, на увеличение N .

Целью работы является определение области возможного применения уравнения для расчета количества параллельных разрядных каналов и установление параметров, оказывающих наибольшее влияние на рост числа формируемых параллельных каналов.

Материалы исследований. Исследуемое уравнение имеет вид

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

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

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

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

В соотношениях (2): L – индуктивность канала разряда, нГн; Z – сопротивление разрядного контура, Ом; d – длина разрядного промежутка, см; E – напряженность электрического поля вдоль канала разряда вблизи его в единицах 1 кВ/мм); ρ/ρ_0 – отношение плотности газа, в котором происходит разряд, к его плотности при нормальных температуре и давлении; $f=0,1$ 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 спадает примерно в 2,72 раза по сравнению с первоначальным), i_{\max} – максимальная амплитуда тока в канале, сработавшем первым, i_{\min} – минимальный ток, который еще можно считать током в канале

разряда; U – среднее напряжение срабатывания, кВ; $\delta(U)$ – относительный разброс напряжения пробоя различных каналов, выраженный в долях от U ; $dU/dt = U'$ – скорость нарастания напряжения на поджигающей промежутке, кВ/нс; l – длина электродов, см; c – скорость света в диэлектрике, в котором осуществляется коммутация, м/нс.

Результаты исследований по определению области применимости формулы для расчета числа параллельных каналов. Для условий экспериментов с разрядниками, описанными в [2-9], по (1)–(2) было рассчитано число параллельных каналов при $f = 0,1$ и $\delta(U) = 0,01$. Условия проведения экспериментов и данные расчета числа параллельных каналов приведены в таблице.

Соотношения (1)–(2) не позволяют учесть состав газовой смеси, заполняющей разрядную камеру разрядника. Однако, как видно из таблицы, для воздушных разрядников под давлением (см. строки 1-3, 14) расхождение расчетных и экспериментальных величин составляет $\leq 30\%$. Неплохое совпадение расчета и эксперимента получено для смеси $6\%SF_6 + 49\%N_2 + 30\%Kr + 15\%Ag$. Наибольшее расхождение расчетных и экспериментальных величин получено для элегаза – в несколько раз.

Таким образом, результаты расчетов по полученным соотношениям (1)–(2) хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными в известных исследованиях, только для разрядников, заполненных воздухом.

Расхождение расчетных и экспериментальных значений числа параллельных каналов, вероятно, объясняется отличием значений времен коммутации, вычисляемых по исходным уравнениям [10], от экспериментальных. Как отмечается в [10], такое отличие может составлять 2-3 раза.

Анализ результатов расчетов для числа параллельных каналов на примере трехэлектродного разрядника с искажением поля. Согласно соотношениям (1)–(2) при существующей конструкции разрядника (при неизменной длине разрядного промежутка d) на число каналов влияют следующие параметры: сопротивление разрядного контура Z , отношение плотности газа к его плотности при нормальных температуре и давлении ρ/ρ_0 , среднее напряжение срабатывания U и определяемая им пробивная напряженность электрического поля E , скорость нарастания напряжения на поджигающей промежутке $dU/dt = U'$ и относительный разброс напряжения $\delta(U)$ пробоя различных каналов.

На примере описанного в [11] трехэлектродного разрядника с искажением поля расчетным путем выясним влияние перечисленных параметров на число каналов в предположении, что время коммутации остается неизменным, поскольку при этом условии был проведен вывод формул (1)–(2).

Графики на рис. 1 иллюстрируют рост числа каналов с уменьшением сопротивления разрядного контура. Отметим, что при прочих равных усло-

виях число каналов возрастает с увеличением скорости нарастания амплитуды управляющего импульса. Особенно резкое возрастание числа каналов наблюдается при $Z < 0,5 \text{ Ом}$, что подтверждается другими исследователями [2].

Условия проведения экспериментов с известными ИР и данные расчета числа параллельных каналов в них по (1) – (2)

	d , см	Z , Ом	E , кВ/м м	ρ/ρ_0	l , м	U , кВ	U' , кВ/нс	Состав газовой смеси	$N_{\text{эксп}}$	$N_{\text{расч}}$	Ис- точ- ник
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,65	1	5,58	3	0,125	36,3	1	воздух	4	3,97	[2]
2	0,65	1	7,22	5	0,125	46,6	1	воздух	2	2,16	-/-
3	0,65	1	9,13	8	0,125	59,4	1	воздух	1	1,31	-/-
4	0,65	1	6,61	5	0,125	43	1,5	20%N ₂ +Ar	4	6,96	-/-
5	0,65	1	6,61	5	0,125	43	1,5	20%N ₂ +Kr	2	6,96	-/-
6	0,65	1	10,75	5	0,125	69,9	3	N ₂ ,Ar,Kr,SF ₆	2÷7	8,57	-/-
7	0,65	1	13,38	7,5	0,125	87	3	N ₂ ,Ar,Kr,SF ₆	2÷9	5,02	-/-
8	0,7	1,2	18,57	8	0,022	130	3,85	40%SF ₆ + 60%N ₂	4÷6	3,44	[7]
9	0,7	1,2	21,4	10	0,022	150	4	40%SF ₆ + 60%N ₂	4÷6	2,69	-/-
10	0,65	1	8,6	5	0,44	55,9	1,3	6%SF ₆ + 49%N ₂ + 30%Kr+ 15%Ar	6÷12	5,71	[3]
11	0,65	1	10,6	7,5	0,44	69	2,5	6%SF ₆ + 49%N ₂ + 30%Kr+ 15%Ar	6÷12	11,6	-/-
12	1	2	58,8	10	0,094	588	12	SF ₆	6	1,18	[4]
13	5,5	35	16,36	6	0,05	900	28	8%SF ₆ + 92%N ₂	2÷3	1,38	[5]
14	2	50	7	4	0,23	140	4	воздух	3	2,94	[6]
15	1,2	2,4	33,3	10	0,0628	360	1,75	SF ₆	4	0,56	[8]

Согласно графикам на рис. 2, 3 с ростом скорости нарастания амплитуды управляющего напряжения наблюдается и рост числа каналов, особенно резкий рост происходит при $U' > (1,7 \div 1,8) \text{ кВ/нс}$. При этом большее число каналов наблюдается при меньшем сопротивлении разрядного контура.

Графики на рис. 4, 5 иллюстрируют рост числа каналов с уменьшением величины относительного разброса $\delta(U)$ напряжения срабатывания каналов.

Причем очень резкий рост числа каналов наблюдается при $\delta(U) < 0,01$, что достигается в разрядных промежутках с очень высокой степенью неоднородности поля.

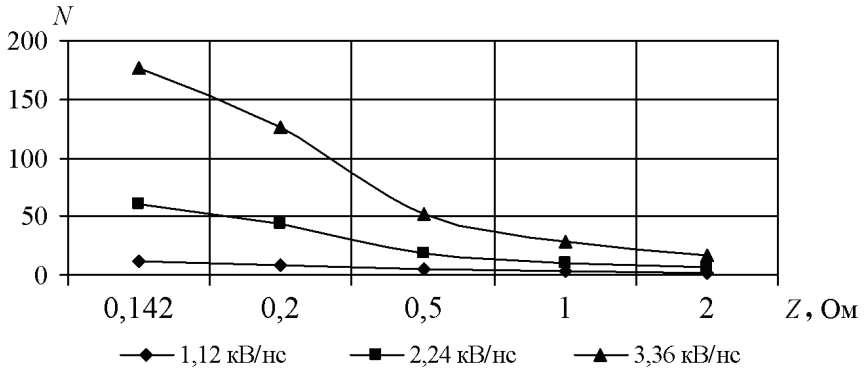


Рисунок 1 – Зависимость числа параллельных каналов N от сопротивления разрядного контура Z для различных значений скорости нарастания амплитуды управляющего импульса ($E=3,354$ кВ/мм)

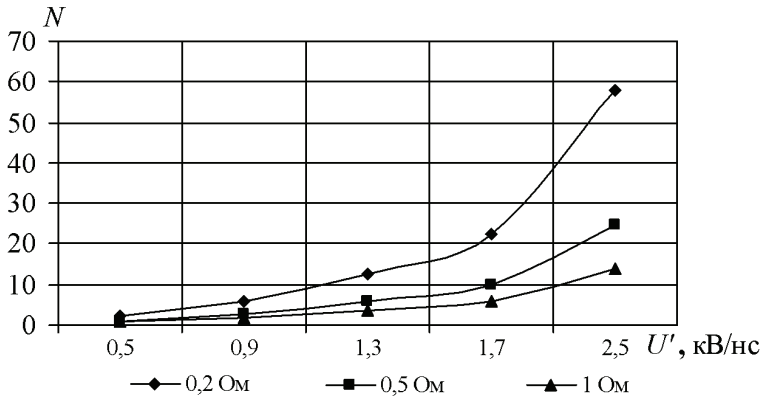


Рисунок 2 – Зависимость числа параллельных каналов N от скорости нарастания амплитуды управляющего импульса U' для различных сопротивлений разрядного контура Z ($E = 3,354$ кВ/мм)

В [10] указывается, что одним из путей увеличения числа каналов N в разряднике является увеличение L – индуктивности разрядного канала. Расчеты по (1)–(2) показывают следующее. Приняв для разрядника [11] $Z = 0,142$ Ом; $\rho/\rho_0 = 1$; $f = 0,1$; $l = 0,28$ м; $U' = 1$ кВ/нс; $c = 0,3$ м/нс; $\delta(U) = 0,05$ при неизменной пробивной напряженности поля $E = 2,6$ кВ/мм и изменяя $L = (5 \div 20)$ нГн и соответственно $d = (0,5 \div 2)$ см; $U = (13 \div 52)$ кВ, были вычис-

лены значения N по (1)–(2). Результаты расчетов иллюстрируются графиком (рис. 6). Видно, что увеличение межэлектродного расстояния d или соответственно L в 4 раза приводит не к увеличению, а, наоборот, к уменьшению числа каналов более, чем в 2 раза.

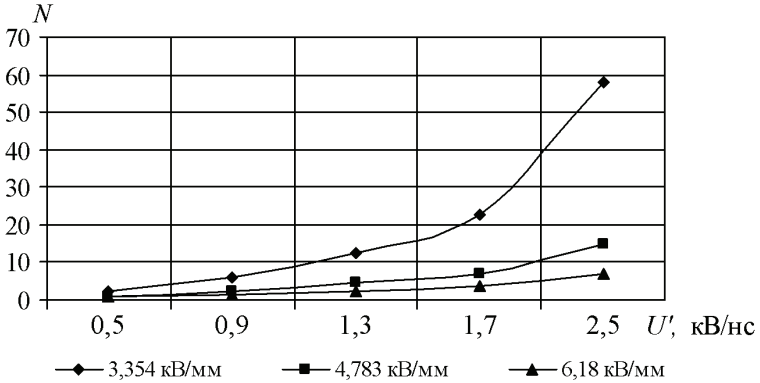


Рисунок 3 – Зависимость числа параллельных каналов N от скорости нарастания амплитуды управляющего импульса U' для различных значений пробивной напряженности E ($Z = 0,2$ Ом)

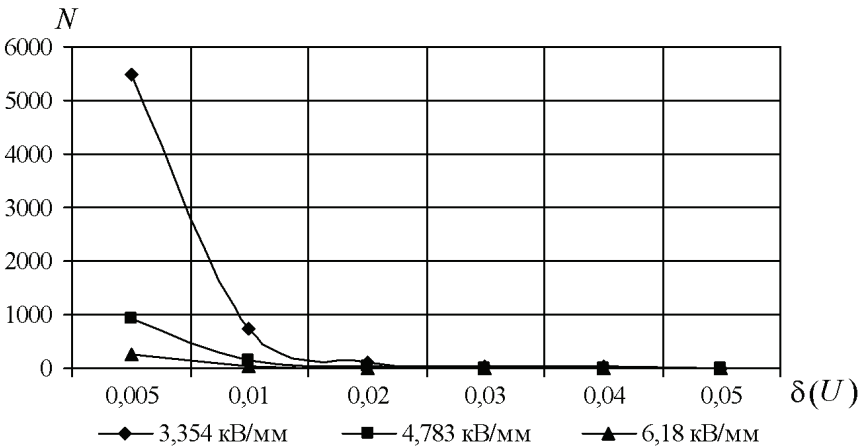


Рисунок 4 – Зависимость числа параллельных каналов N от величины относительного разброса $\delta(U)$ напряжения срабатывания каналов для различных значений пробивной напряженности E ($U = 1,12$ кВ/нс)

Анализируя графики на рис. 1-6, можно сделать следующее заключение. В технологических электроустановках, когда рабочей средой искровых разрядников служит воздух при атмосферном давлении (что удешевляет установку), обеспечить многоканальный режим коммутации можно при выпол-

нении следующих условий.

1. Малая величина сопротивления разрядного контура Z – уменьшение индуктивности основного разрядного контура и увеличение емкости накопителя. При этом Z не должно превышать нескольких Ом.

2. Использование управляющих импульсов с наносекундными и субна наносекундными фронтами, при этом должно выполняться условие $U' > (2\div 3) \cdot 10^{12}$ В/с.

3. Высокая степень неоднородности электрического поля в разрядном промежутке в момент прихода управляющего импульса, чтобы уменьшить величину разброса напряжения срабатывания для каналов $\delta(U)$. Для этого острые кромки управляющего электрода должны выполняться с радиусами скругления $0,1\div 0,2$ мм.

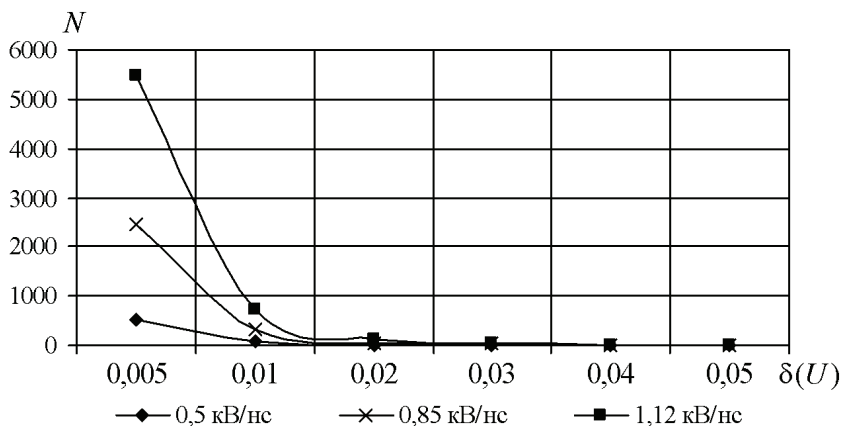


Рисунок 5 – Зависимость числа параллельных каналов N от величины относительного разброса $\delta(U)$ напряжения срабатывания каналов для различных значений скорости нарастания амплитуды управляющего импульса U' ($E=3,354$ кВ/мм)

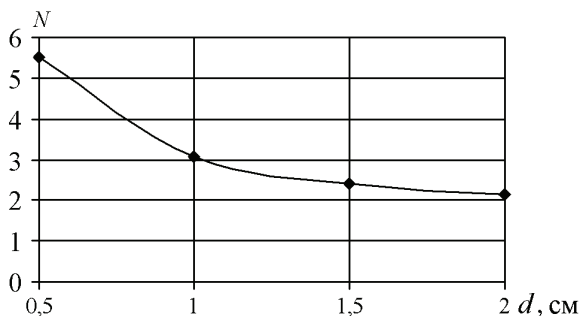


Рисунок 6 – Зависимость числа параллельных каналов N от длины разрядного промежутка d

Выводы

1. Путем анализа известных экспериментальных данных установлена область применимости уравнения для расчета числа параллельных разрядных каналов разрядника при многоканальном режиме коммутации. Область применимости ограничена разрядниками, изоляцией разрядного промежутка которых служит воздух.

2. На примере 3-х-электродного разрядника с искажением поля с помощью полученных соотношений для расчета числа параллельных каналов показано:

- подтверждение рекомендаций [10] – для увеличения числа каналов необходимо уменьшать сопротивление разрядного контура и относительный разброс напряжения срабатывания отдельных каналов;
- в отличие от [10] с увеличением индуктивности разрядного канала число параллельных каналов уменьшается.

3. Даны рекомендации для обеспечения многоканального режима коммутации воздушных разрядников атмосферного давления для технологических электроустановок.

Список литературы: 1. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника / *Г.А. Месяц.* – М.: Наука, 2004. – 704 с. 2. *Капишиников Н.К.* Высоковольтный рельсовый разрядник тригatronного типа / *Н.К. Капишиников* // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – № 2. – С. 127-133. 3. *Капишиников Н.К.* Рельсовый тригatronный разрядник с лезвийным управляющим электродом / *Н.К. Капишиников, И.А. Кузнецов* // Приборы и техника эксперимента. – 1989. – № 4. – С. 127-131. 4. *Афанасьев Б.А.* Многоканальный кольцевой управляемый разрядник на 500 кВ / *Б.А. Афанасьев, А.И. Герасимов, Г.Д. Кулешов* и др. // Приборы и техника эксперимента. – 1976. – № 3. – С. 136-137. 5. *Ельчанинов А.С.* Многоискровая работа мегавольтного тригatronа / *А.С. Ельчанинов, В.Г. Емельянов, Б.М. Ковальчук, Г.А. Месяц, Ю.Ф. Поталицын* // Приборы и техника эксперимента. – 1974. – № 2. – С. 103-105. 6. *Колесник В.Т.* Высоковольтный газовый рельсовый разрядник на 150 кВ / *В.Т. Колесник, А.Ю. Кропотов, С.Н. Курочкин* и др. // Приборы и техника эксперимента. – 1986. – № 1. – С. 108-111. 7. *Босамыкин В.С.* Надежный точно синхронизируемый разрядник на 100 кВ / *В.С. Босамыкин, А.И. Герасимов, Д.И. Зенков* и др. // Приборы и техника эксперимента. – 1987. – № 2. – С. 94-97. 8. *Бойко Н.И.* Тригatronны на 400 кВ для мощных низкоиндуктивных генераторов импульсов / *Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов* и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 1. – С. 78-86. 9. *Герасимов А.И.* Многоканальные разрядники с ламельными управляющими электродами, их развитие и применение / *А.И. Герасимов* // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 1. – С. 5-38. 10. *Ковальчук Б.М.* Сильноточные наносекундные коммутаторы / *Б.М. Ковальчук, В.В. Кремнев, Ю.Ф. Поталицын.* – Новосибирск: Наука, 1979. – 176 с. 11. *Евдошенко Л.С.* Расчет многоканального режима коммутации искровых разрядников и сравнение его результатов с экспериментом / *Л.С. Евдошенко* // Электротехника и электромеханика. – Х.: НТУ «ХП», 2010. – № 3. – С. 46-49.

Поступила в редколлегию 22.04.2013.

УДК 621.387

К расчету многоканального режима коммутации искровых разрядников / Л.С. Евдошенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 27 (1000). – С. 50-58. – Бібліогр.: 11 назв.

Визначена область застосування рівняння для розрахунку кількості паралельних розрядних каналів при багатоканальному режимі комутації іскрових розрядників. Показано, що область за-

стосування обмежена повітряними розрядниками. Доведено, що на збільшення кількості каналів найбільший вплив мають зменшення опору розрядного кола і відносного розкиду напруги утворення окремих каналів. Надані рекомендації щодо здійснення багатоканального режиму комутації повітряних розрядників.

Ключові слова: повітряний іскровий розрядник, багатоканальний розряд.

The field of application of the equation for calculation of the number of parallel discharging channels under multichannel switching mode of spark dischargers was determined. It was shown that the equation is applicable only for air dischargers. It was proved that a decrease of the resistance of discharging circuit and the relative spread in the voltage of formation of individual channels has the most influence on increase of the number of the channels. The recommendations on realization of the multichannel switching mode of air dischargers have been given.

Keywords: air spark discharger, multichannel discharger.