

Отключающая способность вакуумных дугогасительных устройств высокого напряжения при большом времени горения дуги¹

БЕЛКИН Г.С., ВЕТЧИНОВ Д.В., РОМОЧКИН Ю.Г.

Рассмотрены перспективы применения быстродействующих вакуумных управляемых разрядников (ВУР) в качестве короткозамыкателя-отключателя. Рассмотрены особенности отключения тока короткого замыкания как при наличии апериодической составляющей в токе, так и при ее отсутствии. Рассчитаны варианты режимов параллельной работы ВУР. Проведены исследования относительной отключающей способности для различных режимов работы ВУР.

Ключевые слова: вакуумный управляемый разрядник, вакуумная дугогасительная камера, короткозамыкатель, составляющие тока, отключающая способность

В последнее время активно изучается возможность применения в электроэнергетике быстродействующих коммутационных устройств на базе вакуумных управляемых разрядников (ВУР) [1, 2]. Такие устройства могут быть использованы для защиты оборудования от воздействия тока короткого замыкания (КЗ), защиты от перенапряжений, управляемого включения и отключения цепей и др.

Одним из возможных способов применения быстродействующих устройств является применение их в качестве короткозамыкателя-отключателя. Необходимость в таких аппаратах связана с тем, что из-за быстрого роста токов КЗ в энергосистемах (особенно в мегаполисах) отключающая способность установленных выключателей со временем становится недостаточной. Чтобы не заменять выключатели, на шинах может быть установлено быстродействующее устройство, которое при КЗ на присоединении замкнет шины на землю и возьмет на себя большую часть тока КЗ. После отключения выключателем тока КЗ на присоединении быстродействующее устройство отключает созданное им КЗ.

Используемые в таком короткозамыкателе-отключателе ВУР должны длительно (до 0,1 с) пропускать ток КЗ, а затем отключить этот ток. Таким образом дуга в ВУР будет гореть во много раз дольше, чем в общепромышленных выключателях, после чего ВУР должен отключить ток.

Prospects for using fast-acting triggered vacuum switches (TVSs) as a short-circuiting and disconnecting switch are discussed. The specific features concerned with breaking a short-circuit current with and without an aperiodic component in it are considered. Operating modes of a parallel-connected TVS are calculated. Relative breaking capacities are investigated for different TVS operating modes.

Key words: triggered vacuum switch, vacuum arc-quenching chamber, short-circuiting switch, current components, breaking capacity

Закономерности отключения цепи с помощью вакуумной дугогасительной камеры (ВДК) в общепромышленных вакуумных выключателях описаны ранее [3]. В статье анализируются закономерности отключения тока КЗ быстродействующим коммутирующим устройством на базе ВУР при большом времени горения дуги. Подобный анализ даст возможность обоснованно выбирать число параллельно включенных ВУР по заданной отключающей способности устройства.

Условия успешного отключения тока дугогасительным устройством быстродействующего короткозамыкателя-отключателя. Вакуумные управляемые разрядники характеризуются очень малым временем срабатывания (единицы микросекунд). После начала КЗ на ВУР подается управляющий импульс, и через малое время между электродами ВУР загорается дуга. От полупериода к полупериоду тока меняются полярность электродов и апериодическая составляющая тока.

Условие успешного отключения цепи выключателем, сформулированное в [3], для температуры поверхности анода $T_{\text{п}}$ в момент перехода тока через нуль можно записать как $T_{\text{п}} < T_{\text{доп}}$, где $T_{\text{доп}}$ – допустимая температура поверхности анода, соответствующая допустимой концентрации атомов металлических паров в промежутке.

Будем считать, что допустимая температура поверхности анода в момент перехода тока через нуль не зависит от длительности (числа полупериодов) горения дуги.

¹ Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Госконтракт № 16.526.12.6009).

Известны выражения, описывающие предельную отключающую способность ВДК при горении дуги отключения в течение одного полупериода тока [3]. Обозначим через I_{o1} отключающую способность ВУР при горении дуги в течение одного полупериода без аperiodической составляющей в токе. Определим, как изменяется отключающая способность вакуумного дугогасительного устройства I_o быстродействующего коммутатора (ВУР) относительно I_{o1} (отношение I_o / I_{o1}), если дуга горит в течение нескольких полупериодов тока КЗ с аperiodической и без аperiodической составляющей в токе. Если дуга горит в течение нескольких полупериодов, то плотность теплового потока на поверхности электродов ВУР определяется выражением

$$q_B = (k_H / F_k) U_{\mathcal{E}} |i|, \tag{1}$$

где i – отключаемый ток; $U_{\mathcal{E}}$ – эквивалентное приэлектродное падение напряжения (прианодное $U_{\mathcal{E}}$ или прикатодное $U_{\mathcal{E}}$ в зависимости от полярности электрода в том или ином полупериоде тока); F_k – площадь рабочей поверхности электродов; $k_H = F_k / F_d$ – коэффициент неоднородности; F_d – площадь поверхности электродов, занимаемая дугой.

При высоком быстродействии короткозамыкателя (время включения единицы микросекунд) в выражении для плотности теплового потока (1) следует учитывать как периодическую, так и аperiodическую составляющие тока КЗ, т.е.

$$|i| = I_m \sin(\omega t + \gamma - j) - \sin(\gamma - j) e^{-\frac{t}{t_B}} = I_m |f(t)| \tag{2}$$

где I_m – амплитуда периодической составляющей тока; ω – круговая частота; t – время; γ – начальная фаза напряжения источника; $j = \arctg \omega L / R$ – угол сдвига по фазе между напряжением и током; L – индуктивность цепи; R – активное сопротивление цепи; $t_B = L / R$ – постоянная времени.

Предельная отключающая способность ВУР при отключении в заранее выбранный переход тока через нуль соответствует режиму, когда в этот момент перехода тока через нуль температура поверхности электродов равна предельно допустимой $T_{доп}$. Температуру поверхности электродов при произвольной форме зависимости плотности теплового потока от времени можно определить с помощью интеграла Дюамеля [5]:

$$T_{II}(t) = \frac{2q_B(0)\sqrt{t}}{\sqrt{\rho}\sqrt{1cg}} + \frac{2\sqrt{t}}{\sqrt{\rho}\sqrt{1cg}} \int_0^t \dot{q}_{\mathcal{E}}(t) \sqrt{1 - \frac{t}{t'}} dt, \tag{3}$$

где l – коэффициент теплопроводности; c – удельная теплоемкость; g – плотность материала электродов; $q_B(0)$ – плотность теплового потока в начальный момент времени; t – текущее время.

Отключающая способность дугогасительного устройства при горении дуги в течение одного полупериода тока без аperiodической составляющей определяется выражением [3]:

$$I_{o1} = \frac{T_{доп} F_k \sqrt{1cgw}}{1,4k_H U_{\mathcal{E}}}. \tag{4}$$

Используя выражения (3) и (4), а также условие успешного отключения, $T_{II} < T_{доп}$, получим

$$\frac{I_o}{I_{o1}} = \frac{0,07}{\sqrt{2} \sqrt{t} \int_0^t \frac{U_{\mathcal{E}}}{U_{\mathcal{E}}} |f(\alpha t)| \sqrt{1 - \frac{t}{t'}} dt}. \tag{5}$$

При выводе уравнения (5) предполагалось, что для обоих режимов (с длительностью дуги один и несколько полупериодов) одинаковы $T_{доп}$ и k_H . Считалось, что горение дуги после каждого перехода тока через нуль происходит не в результате отказа из-за перегрева электродов, а в результате подачи поджигающего импульса для инициирования дуги. В последний переход тока через нуль поджигающий импульс не подается, и ВУР должен отключить ток.

С помощью выражения (5) можно определить относительную отключающую способность короткозамыкателя при различной длительности горения дуги, выбрать число параллельно включенных ВУР, необходимых для отключения требуемого тока короткого замыкания.

Закономерности процесса отключения тока при длительном горении дуги. Короткозамыкатель должен коммутировать большие токи КЗ. Поэтому при необходимости он содержит параллельно включенные ВУР, каждый из которых должен пропускать ток в течение либо всего времени, когда коммутатор находится во включенном состоянии, либо только части этого времени. По завершении операции включения все проводящие ВУР должны отключить ток КЗ.

Рассмотрим несколько режимов отключения тока короткозамыкателем, которые представляют практический интерес. Далее показаны (рис. 1–4) некоторые диаграммы плотности теплового потока на поверхности электродов ВУР, соответствующие току, который может протекать через отдельный ВУР. Рис. 1, а–д соответствуют режиму с аperiodической составляющей и непрерывным протеканием тока через каждый ВУР.

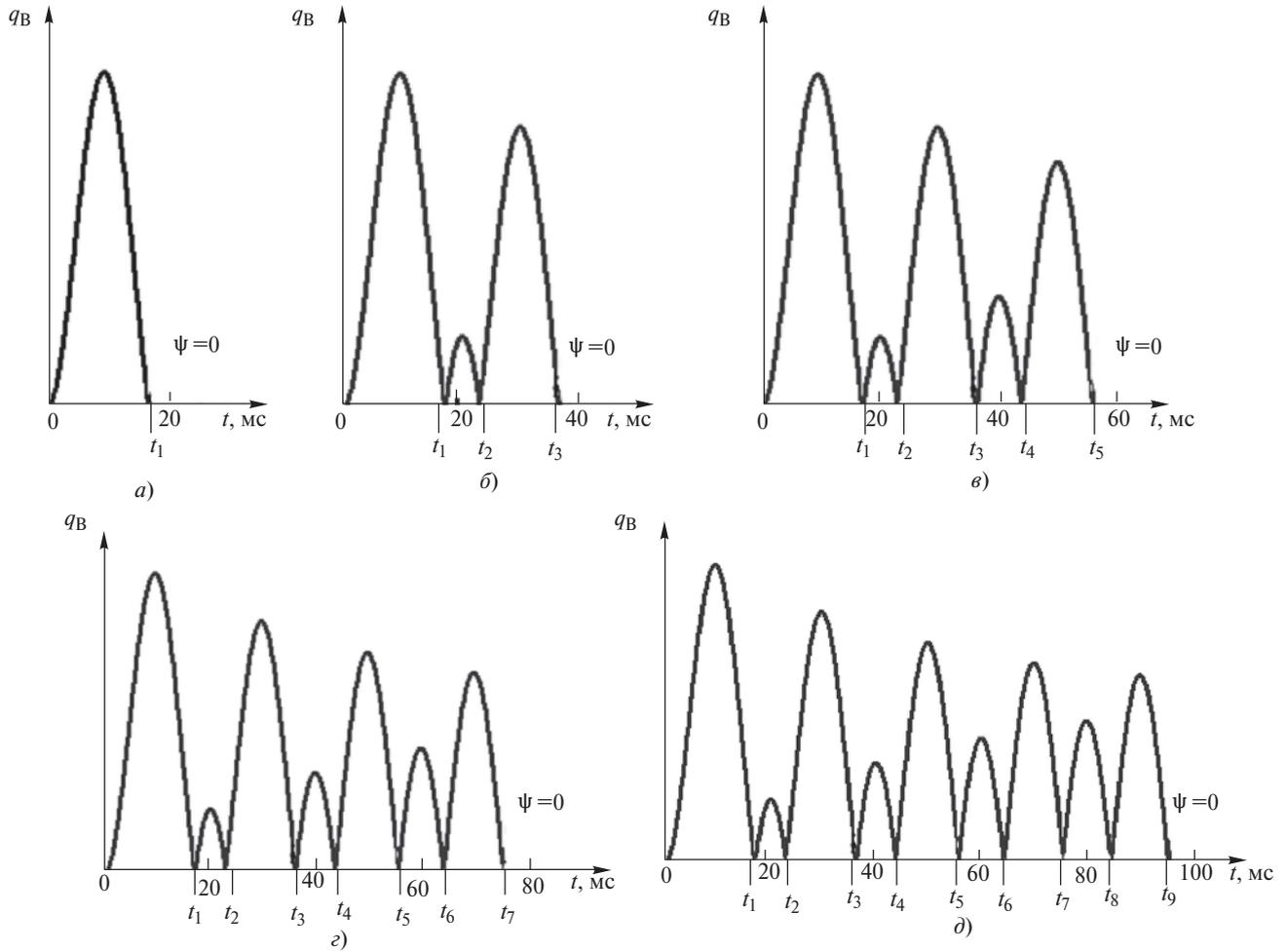


Рис. 1. Диаграммы плотности теплового потока на поверхности электродов ВУР (режим с аperiodической составляющей)

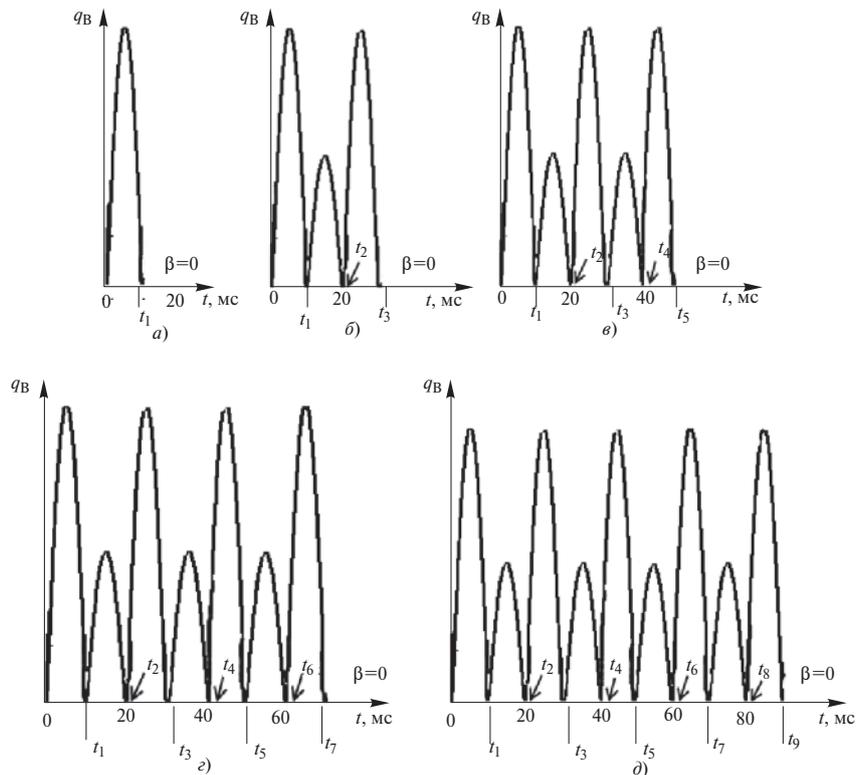


Рис. 2. Диаграммы плотности теплового потока на поверхности электродов ВУР (режим без аperiodической составляющей)

Рис. 2, а–д отражают режим без аperiodической составляющей ($b=0$, $j = p/2$) при равномерном делении тока по разрядникам. В этом случае диаграмма плотности теплового потока при росте числа полупериодов тока не изменяется в зависимости от полярности электрода (анод или катод) в соответствующий полупериод тока. Это связано с отсутствием экспоненциальной составляющей в токе.

На рис. 3 и 4 изображены диаграммы плотности теплового потока, когда ток в отдельных ВУР прекращается и затем появляется после некоторой паузы. Сначала ток проходит через один разрядник (рис. 3, а, б и 4, а, б, д). После нескольких полупериодов тока этот разрядник отключается, а ток начинает протекать через другой разрядник, подключенный параллельно (рис. 3, в, г и 4, в, г, е).

Для всех этих режимов определялся по выражению (5) предельный ток отключения (в отн. ед.), т.е. I_0 / I_{01} .

Предполагается, что размеры электродной системы и материал электродов для всех рассматриваемых режимов неизменны, а отношение составляет примерно 0,5. Отношение U_{ϕ} / U_{ϕ} для диффузной дуги при разных материалах электродов по экспериментальным данным [4] может быть также принято равным 0,5.

Результаты расчета предельной отключающей способности ВУР в различных режимах представлены на рис. 5.

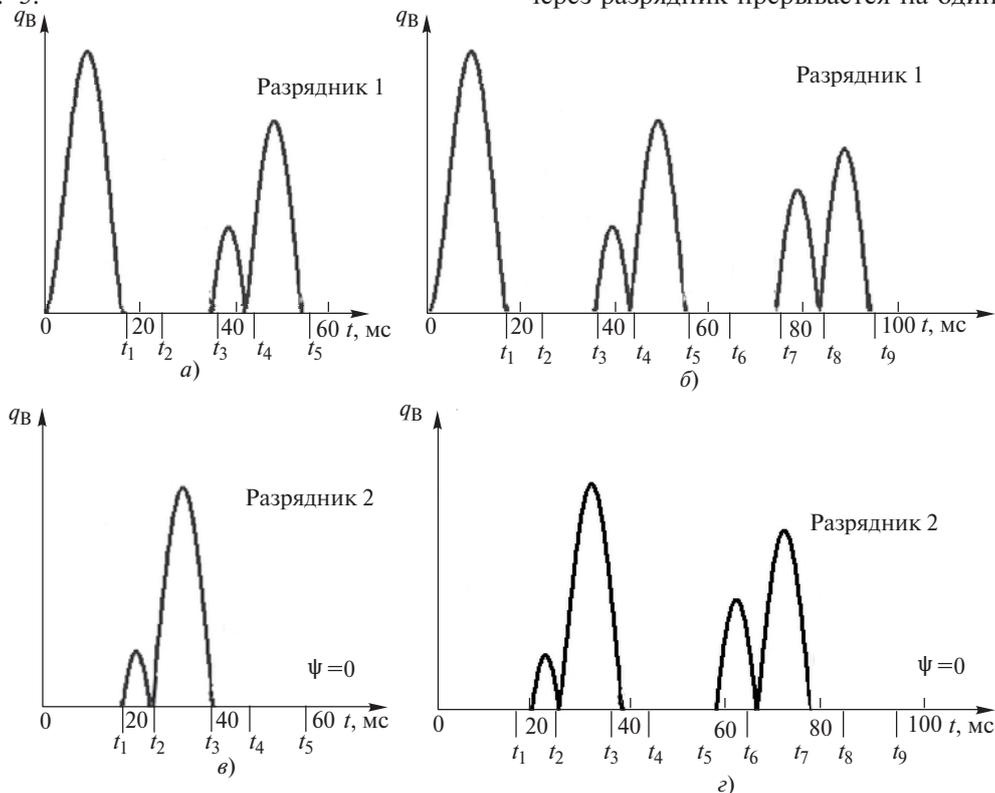


Рис. 3. Диаграммы плотности теплового потока на поверхности электродов ВУР при параллельной работе (режим с аperiodической составляющей)

Моменты времени t_k , при которых ток КЗ с учетом аperiodической составляющей переходит через нуль, определялись по соотношению

$$\cos(\omega t_k) = e^{-\frac{t_k}{t_B}}. \quad (6)$$

Рассматривалась сеть высокого напряжения, и постоянная времени затухания аperiodической составляющей t_B принималась равной 45 мс. Как видно из рис. 5, на относительную отключающую способность существенно влияют аperiodическая составляющая тока, а также наличие второго и третьего полупериодов тока, протекающего через ВУР. Дальнейшее увеличение числа полупериодов тока (более трех), протекающего через ВУР, незначительно снижает относительную отключающую способность I_0 / I_{01} как при наличии аperiodической составляющей, так и без нее.

При числе полупериодов тока, равном пяти и более, присутствие аperiodической составляющей в токе не столь сильно снижает отключающую способность, как при меньшем числе полупериодов.

Из анализа рис. 5 следует, что при большом числе полупериодов тока тепловой режим у поверхности электродов устанавливается. Это приводит к стабилизации отключаемого тока при различном числе полупериодов.

Стоит отдельно рассмотреть случаи, когда ток через разрядник прерывается на один или несколь-

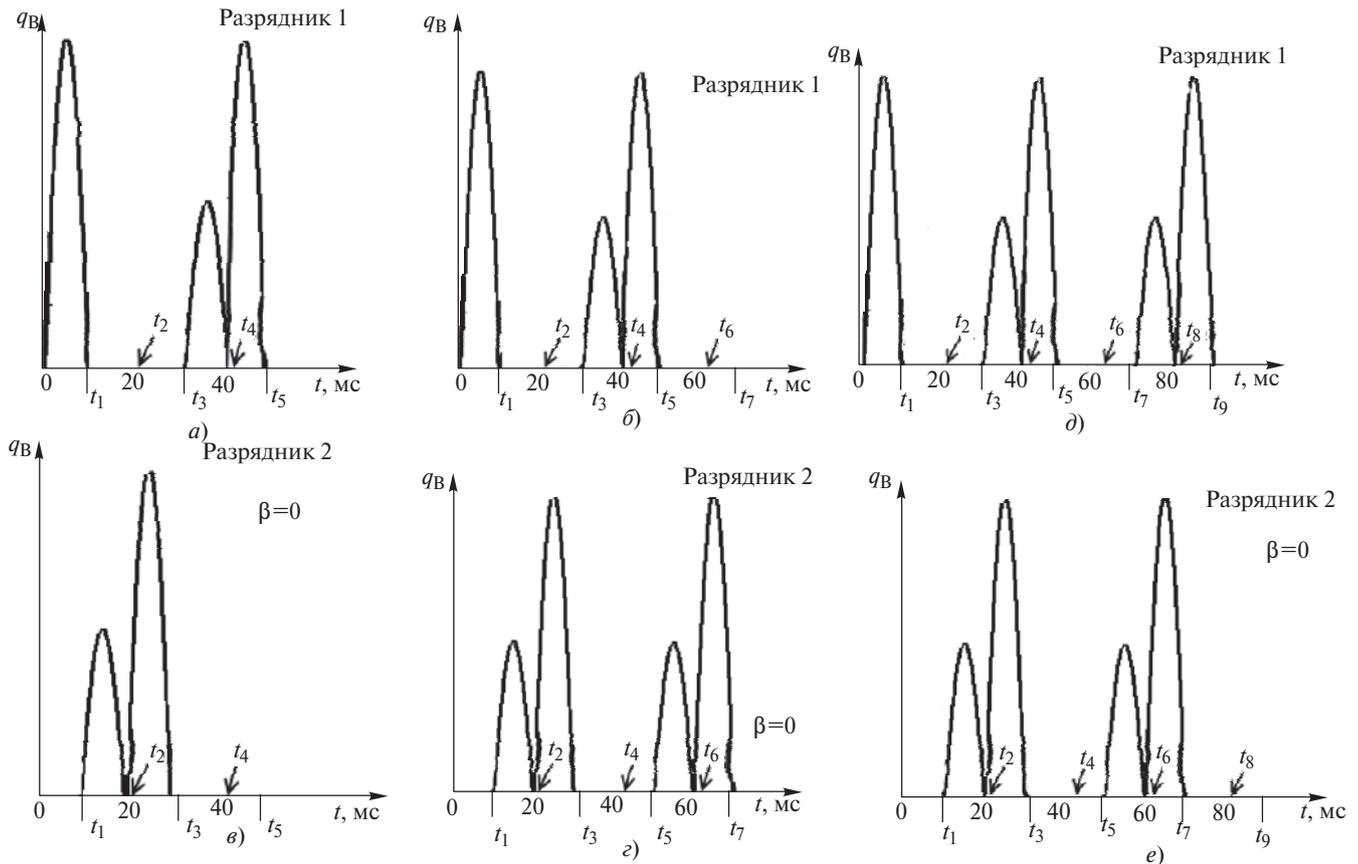


Рис. 4. Диаграммы плотности теплового потока на поверхности электродов ВУР при параллельной работе (режим без аperiodической составляющей)

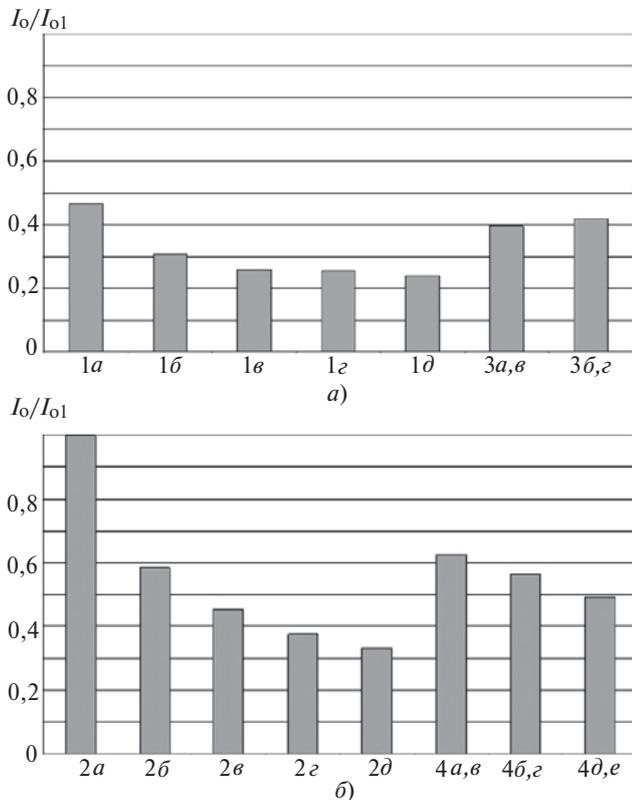


Рис. 5. Результаты расчета предельной отключающей способности ВУР: а – в режимах с аperiodической составляющей; б – без аperiodической составляющей

ко полупериодов (рис. 3,а–г, рис. 4,а–е). В это время разрядник отключен, ток пропускается через такой же аппарат, подключенный параллельно. Как видно из рис. 5, при параллельной работе ВУР поверхность электродов разрядников подвергается меньшему нагреву. В результате относительная отключающая способность I_0 / I_{01} заметно повышается как при наличии аperiodической составляющей, так и при ее отсутствии.

Результаты моделирования процесса отключения при длительном горении дуги. Как показывают расчеты, с увеличением длительности горения дуги более трех полупериодов отключающая способность ВУР перестает заметно снижаться, если режим горения дуги остается диффузным. Это связано с тем, что вклад первых полупериодов тока в значения температуры поверхности анода к последнему переходу тока через нуль становится малым при большом числе полупериодов. Значения температуры поверхности анода в момент отключения в большей степени определяются несколькими полупериодами тока, предшествующими последнему переходу тока через нуль.

Температура поверхности анода в моменты перехода тока через нуль стабилизируется после серии полупериодов тока, так как теплота, подводи-

мая к электроду из приэлектродных областей в первые полупериоды, распространяется далеко за пределы приповерхностного слоя. В результате слабо меняется и отключающая способность ВУР при увеличении числа полупериодов тока более трех (рис. 5).

Для объяснения этого явления можно привлечь метод приближенного определения температуры поверхности электрода при произвольной форме зависимости плотности теплового потока q_B от времени, изложенный в [5]. Согласно этому методу множитель $\sqrt{1 - \frac{t}{t}}$ в выражении (3) заменяется линейной или кусочно-линейной функцией, после чего выражение (3) существенно упрощается:

$$T_{\Pi}(t) = \frac{2q_B(0)\sqrt{t}}{\sqrt{\rho}\sqrt{1cg}} + \frac{2\sqrt{t}}{\sqrt{\rho}\sqrt{1cg}} \bar{q}_B(t), \quad (7)$$

где

$$\bar{q}_B(t) = \frac{0,65\dot{e}}{t} \int_0^t \dot{q}(t)dt + 1,6 \frac{t}{0,77t} \dot{q}(t) + 5,5 \frac{t}{0,97t} \dot{q}(t) \dot{u}$$

– среднее значение q_B к моменту времени t .

Плотность теплового потока в начальный момент $q_B(0)$ полагается равной нулю.

Для интересующей нас температуры поверхности только в моменты перехода тока через нуль ($q_B = 0$) уравнение (7) приобретает вид

$$T_{\Pi}(t) \Big|_{q_B=0} = \frac{2\sqrt{t}}{\sqrt{\rho}\sqrt{1cg}} \bar{q}_B(t). \quad (8)$$

Используя выражения (4) и (8), а также условие успешного отключения $T_{\Pi} < T_{доп}$, получим для приближенной оценки отношения I_0 / I_{01} следующее выражение:

$$\frac{I_0}{I_{01}} = \frac{0,0495}{\sqrt{t} \frac{U_{\phi}}{U_{\phi}} |f(t)|_{cp}}, \quad (9)$$

$$\text{где } |f(t)|_{cp} = \frac{0,65\dot{e}}{t} \int_0^t \dot{f}(t)dt + 1,6 \frac{t}{0,77t} \dot{f}(t) + 5,5 \frac{t}{0,97t} \dot{f}(t) \dot{u}$$

– среднее значение функции $f(t)$ к моменту времени t .

Выражение (9) показывает, что относительная отключающая способность в большей степени зависит от среднего значения отключаемого тока (обратно пропорциональна $|f(t)|_{cp}$) и в меньшей степени от длительности тока (обратно пропорциональна \sqrt{t}). Этим объясняется слабое изменение отношения I_0 / I_{01} при достаточно большом числе полупериодов отключаемого тока, когда среднее

значение тока изменяется незначительно (рис. 5). На рис. 6 для сравнения нанесены значения I_0 / I_{01} , полученные с помощью приближенного выражения (9).

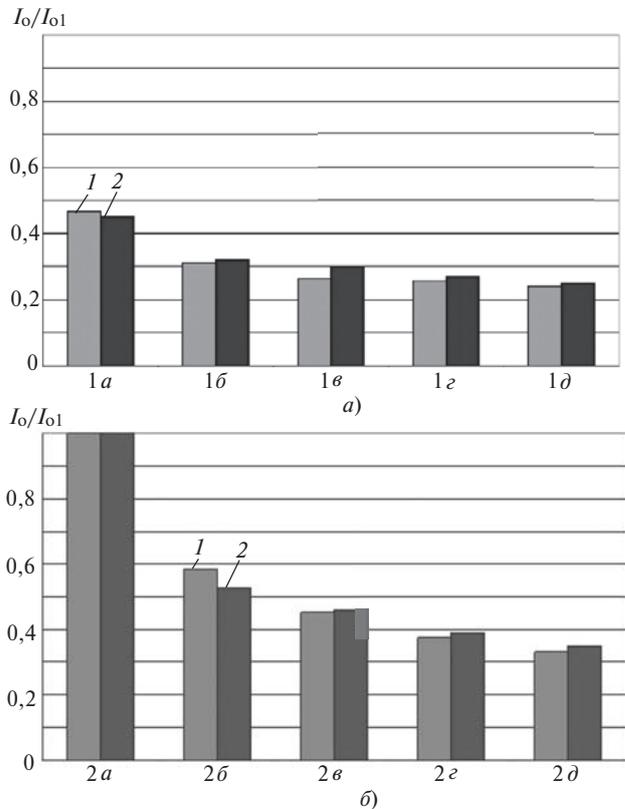


Рис. 6. Сравнение расчетов предельной отключающей способности ВУР: а – в режимах с аperiodической составляющей; б – без аperiodической составляющей; 1 – расчет по точной формуле (5); 2 – по приближенной формуле (9)

Аperiodическая составляющая тока может значительно изменять среднее значение тока (плотности теплового потока) в первые полупериоды, что и отражается на результатах, представленных на рис. 6. При пяти и более полупериодах тока аperiodическая составляющая тока не столь сильно снижает среднее значение функции $|f(t)|$ и соответственно не столь сильно уменьшает отношение I_0 / I_{01} , как при меньшем числе полупериодов (рис. 6,а). Заметно снизить среднее значение функции $|f(t)|$ и соответственно увеличивать отношение I_0 / I_{01} может использование параллельно включенных ВУР, когда время протекания тока в параллельных ветвях ограничено. Рассмотрим также случай параллельной работы, когда ток КЗ равномерно распределяется между несколькими ВУР. При этом ток проходит непрерывно через все разрядники до заданного момента времени отключения. На рис. 7 представлены результаты расчета отношения I_0 / I_{01} для различных режимов работы параллельных ВУР (по рис. 1–4). Цифра «2» в скобках относится к режимам совместной непре-

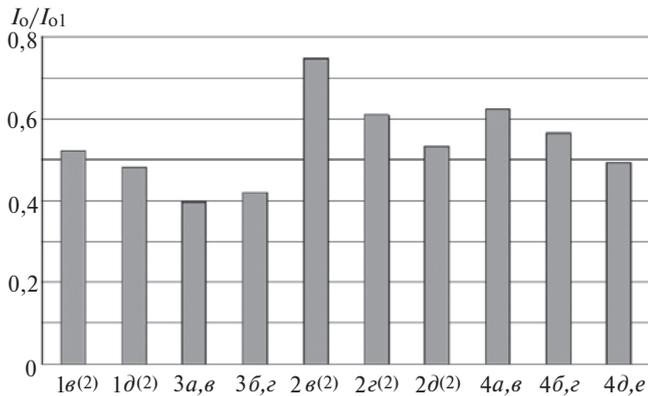


Рис. 7. Результаты расчета относительной отключающей способности ВУР при различных режимах параллельной работы

рывной работы разрядников, включенных параллельно. Из рис. 7 следует, что относительная отключающая способность ВУР выше при непрерывном протекании тока в параллельно включенных разрядниках, чем в режимах, когда ток в разрядниках прерывается на один или несколько полупериодов. Это справедливо как для режимов с аperiodической составляющей, так и для режимов без нее.

Сравнение результатов расчета относительной отключающей способности ВУР в различных режимах параллельной работы показывает, что при непрерывной работе разрядников отношение I_0/I_{01} в 1,2–1,3 раза выше. При заданных больших токах отключения и при известном номинальном токе каждого разрядника режим непрерывной параллельной работы ВУР позволит получить существенный экономический эффект. Режим непрерывной параллельной работы ВУР сокращает общее число разрядников на несколько штук, благодаря чему уменьшаются габаритные размеры коммутатора и снижается его стоимость.

Заключение. Проведенные расчеты различных режимов работы ВУР показали, что на относительную отключающую способность существенно влияет наличие аperiodической составляющей в токе. Относительная отключающая способность в режимах с аperiodической составляющей в 1,5–2 раза ниже, чем в режимах без нее. С увеличением длительности горения дуги более трех полупериодов отключающая способность ВУР перестает за-

метно снижаться. Это связано с уменьшением вклада первых полупериодов тока в значения температуры поверхности анода к последнему переходу тока через нуль.

Заметно увеличивать отключающую способность может использование параллельно включенных ВУР. Это справедливо как в случае, когда ток КЗ равномерно распределяется между несколькими ВУР, так и в случае, когда время протекания тока в параллельных ветвях ограничено. Сравнение результатов расчета относительной отключающей способности ВУР в различных режимах позволяет обоснованно выбирать число параллельно включенных ВУР для отключения заданного тока короткого замыкания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов Д.Ф., Белкин Г.С., Иванов В.П. и др. Быстродействующие вакуумные аппараты с управляемой коммутацией. — Электро, 2006, № 1.
2. Алферов Д.Ф., Белкин Г.С., Иванов В.П. и др. Применение быстродействующих управляемых коммутирующих устройств в электроэнергетике. — Электричество, № 7, 1998.
3. Белкин Г.С., Данилов М.Е., Клешнин Н.И. и др. К расчету отключающей способности вакуумных дугогасительных камер. — Электричество, 2001 № 9.
4. Foosnas J., Rondeel W. G. J. The energy balance of a vacuum arc in an axial magnetic field. — VII Inter. symposium on discharges and electrical insulation in vacuum, 1976.
5. Белкин Г.С. Тепловые процессы в электрических аппаратах. — М.: Знак, 2006.

[15.10.12]

Авторы: Белкин Герман Сергеевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1962 г. В 1981 г. защитил докторскую диссертацию по специальности «Электрические аппараты» во Всероссийском электротехническом институте (ВЭИ). Начальник отдела ФГУП ВЭИ.

Ветчинов Дмитрий Вячеславович окончил Институт электротехники МЭИ в 2011 г. Инженер отдела вакуумной коммутационной аппаратуры ФГУП ВЭИ.

Ромочкин Юрий Геннадьевич окончил энергомашиностроительный факультет МВТУ им. Баумана в 1979 г. В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию по вакуумной технике. Начальник сектора ФГУП ВЭИ.