

Отключающая способность и электрическая прочность последовательно и параллельно соединённых коммутационных вакуумных устройств

СИДОРОВ В.А., АХМЕТГАРЕЕВ М.Р.

Разработаны математические модели и методики, позволяющие предсказывать и оценивать электрическую прочность и отключающую способность коммутирующих устройств, состоящих из последовательно и параллельно соединённых вакуумных управляемых разрядников, используя измеренные характеристики отдельного разрядника. Одной из возможных областей применения быстродействующего коммутатора может быть использование его в качестве короткозамыкателя–отключателя для защиты оборудования от воздействия сверхтоков короткого замыкания. Необходимость в таких устройствах связана с тем, что из-за роста мощностей энергосистем максимальные токи КЗ становятся больше отключающей способности стоящих в линиях выключателей. Применение короткозамыкателя–отключателя позволит продолжить эксплуатацию этих выключателей. Разработанные модели и методики применяются для оценки электрической прочности и отключающей способности перспективного высоковольтного быстродействующего коммутатора ВБК-110/80, выполняющего функцию короткозамыкателя–отключателя с номинальным током отключения 80 кА (эфф.), предназначенного для сети переменного тока напряжением 110 кВ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: высокое напряжение, быстродействующий коммутатор, управляемый разрядник, вероятность отключения, отключающая способность, ток отключения, электрическая прочность, вероятность пробоя, напряжение пробоя, распределение пробивных напряжений

В последнее время активно изучается возможность применения в электроэнергетике быстродействующих коммутационных устройств, созданных на основе последовательного и параллельного соединения вакуумных управляемых разрядников [1, 2]. Это объясняется особыми свойствами вакуумных управляемых разрядников:

низкий порог напряжения включения 200 В; широкий диапазон рабочих напряжений $(0,05-1)U_{\max}$;

малое время включения $(1\pm 0,1)$ мкс, практически не изменяющееся в диапазоне рабочих напряжений;

вентильные свойства – способность отключать переменный ток при его переходе через нулевое значение.

Перечисленные свойства вакуумных разрядников позволяют создавать быстродействующие коммутационные устройства различного назначения: для защиты дорогостоящего электрооборудования от воздействия тока короткого замыкания (КЗ), защиты от перенапряжений, управляемого включения и отключения цепей [1].

К высоковольтным коммутирующим устройствам в электроэнергетике предъявляются очень высокие требования по надёжности в эксплуатации.

Одна из основных составляющих надёжности работы – это высокая электрическая прочность, характеризующаяся низкой вероятностью электрического пробоя. Высокая отключающая способность – ещё одна необходимая составляющая надёжной работы коммутирующего устройства.

Для того чтобы получить достоверные статистические данные о том, каким напряжениям соответствуют малые вероятности пробоя высоковольтного коммутирующего устройства, состоящего из последовательно и параллельно соединённых вакуумных разрядников, необходимо провести большое число технически сложных, трудоёмких и дорогостоящих испытаний. Значительно проще получить такие данные для одного разрядника. Поэтому разработки математических моделей и методик, позволяющих предсказывать и оценивать электрическую прочность и отключающую способность коммутирующих устройств, состоящих из последовательно и параллельно соединённых элементов при использовании измеренных характеристик отдельного элемента, являются, безусловно, актуальной задачей.

Разработанные математические модели используются для расчёта электрической прочности и отключающей способности перспективного высоко-

вольтного быстродействующего коммутатора ВБК-110/80, выполняющего функцию короткозамыкателя–отключателя с номинальным током отключения 80 кА (эфф.), предназначенного для сети переменного тока напряжением 110 кВ.

Учитывая, что ВБК-110/80 по условиям работы находится постоянно под напряжением сети, последовательное соединение разрядников является необходимым условием надёжной работы ВБК. Для отключения тока 80 кА (эфф.) необходимо использовать параллельное соединение разрядников, поэтому коммутатор состоит из четырех параллельно соединённых ветвей, в каждой из которых три последовательно соединённых разрядника. Две ветви предназначены для коммутации тока при положительной полярности напряжения, две другие ветви – для коммутации тока при отрицательной полярности напряжения, т.е. используется встречно-параллельное соединение пар ветвей. В проектируемом коммутаторе используется вакуумный управляемый разрядник РВУ-43-1, имеющий высокую отключающую способность и высокую электрическую прочность [4, 5].

Следует отметить, что вакуумный управляемый разрядник является удобным объектом для экспериментального изучения стохастической природы электрической прочности вакуумных промежутков, электроды которых подвергаются сильноточному дуговому воздействию. К таким вакуумным промежуткам относятся кроме самих вакуумных разрядников ещё и вакуумные дугогасительные камеры. Вакуумный управляемый разрядник удобен потому, что, во-первых, после пробоя он быстро восстанавливает свои изоляционные свойства; во-вторых, легко управляется: для его включения и отключения не требуется механический привод как для вакуумных дугогасительных камер, и, в-третьих, имеет, как уже упоминалось, очень низкий порог включения по напряжению (200 В). Это значительно удешевляет экспериментальные исследования. Распределение напряжений пробоя вакуумного разрядника можно получить, используя два относительно простых электрических контура: один высоковольтный, слаботочный для измерения напряжений пробоя, а другой сильноточный, но низковольтный. Последний контур необходим для снятия тренировочного эффекта электродов, происходящего после каждого измерения напряжения пробоя, способом обработки поверхности электродов сильноточным дуговым разрядом.

Вероятностная оценка отключающей способности коммутатора, состоящего из последовательно и параллельно соединённых разрядников. 1. Параллельное соединение. Рассмотрим отключающую способность n параллельно соединённых одинаковых разрядни-

ков. Пусть p_i – вероятность отключения разрядником тока $I_{эфф}$ при напряжении $U_{эфф}$. Предположим, что ток по параллельным разрядникам делится равномерно и отключение синусоидального тока в каждом разряднике происходит в момент времени, когда ток переходит через нулевое значение, т.е. одновременно. Поэтому можно предположить, что отключение тока $I_{эфф}$ в любом из n разрядников не повлияет на условия отключения тока в остальных разрядниках, т.е. отключения тока в разрядниках являются независимыми событиями. Исходя из этих предположений согласно теории вероятности, вероятность совместного наступления независимых событий равна произведению их вероятностей. Вероятность отключения коммутатором, состоящим из n параллельно соединённых разрядников, тока $nI_{эфф}$ при напряжении $U_{эфф}$ будет равна произведению вероятностей отключения тока $I_{эфф}$ всех разрядников:

$$P_n = p_i^n. \quad (1)$$

Оценим численно вероятности отключения коммутатором тока, кратного $I_{эфф}$, состоящего из параллельно соединённых одинаковых разрядников, вероятность отключения заданного тока $I_{эфф}$ каждого из которых достаточно высока и равна 0,99:

Число параллельно соединённых разрядников n	Отключаемый ток	Вероятность отключения тока P_n
2	$2I_{эфф}$	0,9801
3	$3I_{эфф}$	0,9703
4	$4I_{эфф}$	0,9606

Из этих данных видно, что вероятность отключения при увеличении числа параллельно включённых разрядников уменьшается, что неприемлемо.

Далее рассматривается влияние последовательного соединения разрядников на отключающую способность устройств.

2. Последовательное соединение. Оценим отключающую способность коммутатора, состоящего из n параллельно соединённых ветвей, каждая из которых содержит m последовательно соединённых одинаковых разрядников (рис. 1).

Сначала определим отключающую способность одной ветви, состоящей из m последовательно соединённых разрядников.

Мы уже приняли, что p_i – вероятность отключения разрядником тока $I_{эфф}$ при напряжении $U_{эфф}$. Отключение тока каждым из последовательно соединённых разрядников является зависимым событием. Противоположное событие – неотключение тока – является независимым событием. Ве-

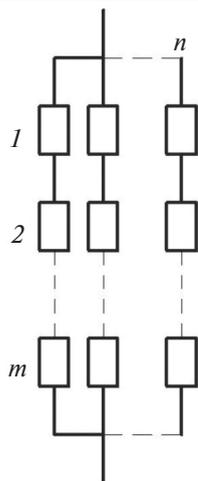


Рис. 1. Блок-схема коммутатора

роятность неотключения разрядником тока I равна $(1-p_i)$. Неотключение устройством, состоящим из m последовательно соединённых разрядников, тока I может быть только при одновременном неотключении тока I каждым из разрядников. Вероятность совместного наступления независимых событий равна произведению их вероятностей, т.е. вероятность неотключения тока $I_{\text{эфф}}$ равна произведению вероятностей неотключения всех m разрядников:

$$(1 - P_m) = (1 - p_i)^m, \quad (2)$$

отсюда вероятность отключения тока $I_{\text{эфф}}$ при напряжении $U_{\text{эфф}}$ устройством, состоящим из m последовательно соединённых разрядников, будет равна

$$P_m = 1 - (1 - p_i)^m. \quad (3)$$

Проведём сравнительную количественную оценку вероятности P_m отключения коммутатором тока $I_{\text{эфф}}$:

Вероятность отключения p	Число разрядников m	Вероятность отключения $I_{\text{эфф}}$
0,9	2	0,999
0,9	3	0,999
0,8	2	0,960
0,8	3	0,992
0,7	2	0,910
0,7	3	0,973
0,7	4	0,9919

На рис. 2 построены зависимости вероятности отключения тока коммутатором от числа последовательно соединённых разрядников при различных значениях вероятности отключения одного разрядника. Коммутатор должен надёжно отключать ток, поэтому вероятность отключения должна быть выше 0,99. Поэтому при вероятности отключения разрядником $p_i = 0,9$ необходимо последовательное

соединение двух разрядников, а при $p_i = 0,7$ – не менее четырех.

3. *Параллельное и последовательное соединение.* Далее воспользуемся формулой (1) для параллельно соединённых разрядников. Подставляя (3) в (1), получим вероятность отключения коммутатором, состоящим из n параллельно соединённых ветвей, каждая из которых содержит m последовательно соединённых одинаковых разрядников (рис. 3), тока $nI_{\text{эфф}}$ при напряжении $U_{\text{эфф}}$:

$$P = (1 - (1 - p_i)^m)^n. \quad (4)$$

Оценим численно вероятности отключения коммутатором тока, кратного $I_{\text{эфф}}$. Примем вероятность p_i отключения тока $I_{\text{эфф}}$ разрядником равной 0,99, тогда:

1) при двух последовательно соединённых РВУ ($m=2$) и одной ветви ($n=1$) вероятность отключения коммутатором тока $I_{\text{эфф}}$ $P=0,9999$;

2) при $m=2$ и двух параллельных ветвях ($n=2$) вероятность отключения тока $2I_{\text{эфф}}$ $P=0,9998$;

3) при $m=2$ и $n=3$ вероятность отключения тока $3I_{\text{эфф}}$ $P=0,9997$;

4) при $m=2$ и $n=4$ вероятность отключения тока $4I_{\text{эфф}}$ $P=0,9996$.

Из этих оценок видно, что, применив в каждой из параллельно соединённых ветвей по два последовательно соединённых разрядника, теоретически можно кратно повышать отключаемый ток, при этом уменьшение вероятности отключения этого тока пренебрежимо мало.

Были проведены оценки вероятности отключения тока $nI_{\text{эфф}}$ при напряжении $U_{\text{эфф}}$. Но, применив последовательное соединение разрядников, можно рассчитывать и на увеличение напряжения,

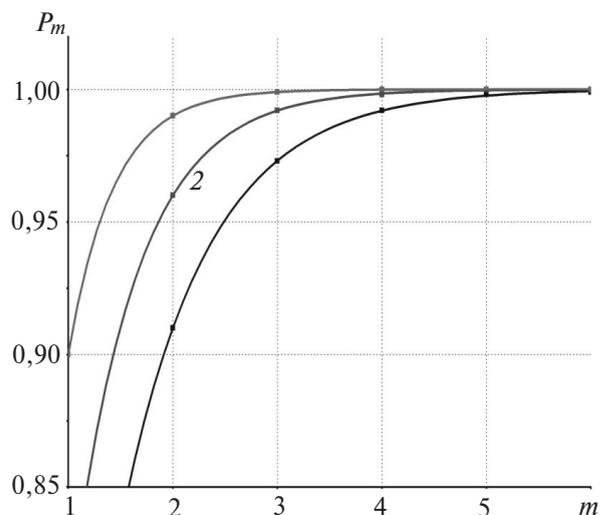


Рис. 2. Зависимости вероятности отключения тока коммутатором от числа последовательно соединённых разрядников при различных значениях вероятности отключения тока одним разрядником: 1 – $p_i = 0,9$; 2 – $0,8$; 3 – $0,7$

при котором устройство будет надёжно отключать токи, кратные $I_{эфф}$.

Применив последовательное соединение нескольких разрядников, можно ли увеличить напряжение во столько же раз, во сколько увеличено число последовательно соединённых разрядников? Как влияет последовательное и параллельное соединение на электрическую прочность устройства?

Оценка электрической прочности коммутатора, состоящего из последовательно и параллельно соединённых вакуумных управляемых разрядников. Параллельное соединение вакуумных разрядников. Вероятность пробоя P устройства, состоящего из n параллельно соединённых одинаковых разрядников, можно оценить по формуле [6]:

$$P_b = 1 - (1 - p_b)^n, \quad (5)$$

где p_b – вероятность пробоя одного разрядника.

Разрядник при рабочем напряжении должен иметь малую вероятность пробоя, тогда при $p \ll 1$ формула (5) примет следующий вид:

$$P_b = np_b. \quad (6)$$

Например, при $p_b = 0,01$ и двух параллельно соединённых разрядниках вероятность пробоя коммутатора $P_b = 0,02$, при трёх – $P_b = 0,03$ и так далее.

Таким образом, вероятность пробоя устройства увеличивается кратно числу параллельно соединённых ветвей. Поэтому при параллельном соединении разрядников для сохранения электрической прочности коммутатора на необходимом высоком уровне следует применять ещё и последовательное соединение разрядников.

Последовательное соединение вакуумных разрядников. 1. Электрическая прочность. Как показано в [7, 8], функция распределения напряжений пробоя коммутатора, состоящего из последовательно соединённых разрядников, имеет точку инверсии (F_i, U_i) , в которой напряжение пробоя коммутатора равно арифметической сумме напряжений пробоя разрядников. При значении меньше U_i напряжение пробоя коммутатора больше арифметической суммы напряжений пробоя разрядников, а при напряжении больше U_i – меньше арифметической суммы напряжений пробоя разрядников.

Поясним приведенное на примере расчёта электрической прочности коммутатора, состоящего из последовательно соединённых вакуумных управляемых разрядников РВУ-43-1.

Предварительно были проведены измерения напряжения пробоя РВУ-43-1 по методике [9]. По этой методике электрическая прочность измеряется при приложении переменного напряжения про-

мышленной частоты (50 Гц). В дальнейшем в статье значения напряжения приводятся в действующих значениях.

Полученная эмпирическая функция распределения напряжений пробоя РВУ-43-1 хорошо аппроксимируется распределением Вейбулла:

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{a}\right)^b\right], \quad (7)$$

где $a = 87,8$ кВ (эфф.) – параметр масштаба, определяющий напряжение пробоя, соответствующее вероятности $F = 0,63$; $b = 6,1$ – параметр формы определяет форму распределения.

Электрическую прочность коммутатора, содержащего последовательно соединённые разрядники, можно рассчитать по [7], где представлена методика расчёта электрической прочности устройства с последовательно соединёнными вакуумными промежутками, хорошо согласующаяся с результатами измерений.

Используем формулу для расчёта вероятности пробоя устройства, состоящего из m последовательно соединённых одинаковых промежутков при условии равномерного деления напряжения по элементам, полученной в [7]:

$$Q(U) = N! \det \begin{vmatrix} F_0 & \frac{F_0^2}{2!} & \frac{F_0^3}{3!} & \dots & \frac{F_0^N}{N!} \\ 1 & F_1 & \frac{F_1^2}{2!} & \dots & \frac{F_1^{N-1}}{(N-1)!} \\ 0 & 1 & F_2 & \dots & \frac{F_2^{N-2}}{(N-2)!} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & F_{N-1} \end{vmatrix}, \quad (8)$$

где F_m – вероятность пробоя коммутатора, состоящего из m последовательно соединённых одинаковых разрядников; U – напряжение, приложенное к коммутатору; F_0 – вероятность пробоя разрядника при напряжении U/m ; F_1 – вероятность пробоя разрядника при напряжении $U/m-1$; F_{m-1} – вероятность пробоя разрядника при напряжении U .

На рис. 3 на вейбулловской координатной сетке построены функции распределения напряжений пробоя одного разрядника РВУ-43-1 (1) и коммутаторов, состоящих из двух–пяти последовательно соединённых этих разрядников, рассчитанные по (8) и с использованием функции распределения напряжений пробоя разрядника РВУ-43-1 (7).

С точки зрения практического применения интересно сравнить электрическую прочность коммутатора, состоящего из m последовательно соединённых одинаковых разрядников, с воображае-

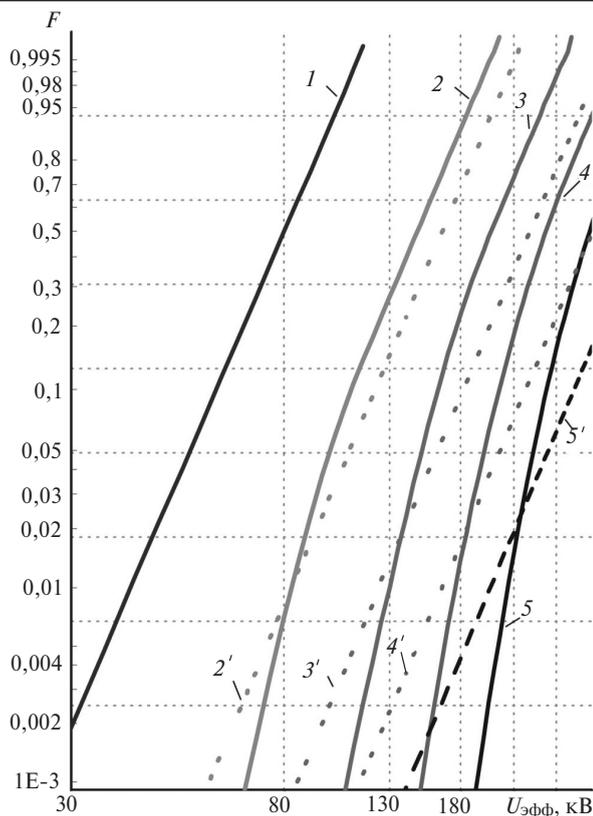


Рис. 3. Функции распределения напряжений пробоя одного разрядника РВУ-43-1 (1) и коммутаторов, состоящих из двух–пяти последовательно соединенных разрядников (5) соответственно; 2–5 – функции распределения напряжений пробоя воображаемых вакуумных промежутков значения напряжения пробоя которых равно сумме значения соответственно двух–пяти разрядников РВУ-43-1

мым вакуумным промежутком, напряжение пробоя которого равно сумме напряжений m разрядников. Электрическая прочность такого воображаемого вакуумного промежутка будет описываться также вейбулловским распределением с параметрами $a_m = ma$; $b_m = b$.

На рис. 3 – функции распределения таких воображаемых вакуумных промежутков, электрическая прочность которых описывается вейбулловским распределением (7), но с параметрами $a_m = ma$, $b_m = b$, где $m = 2 \div 5$. Функции распределения напряжений пробоя коммутаторов, состоящих из двух – пяти последовательно соединённых разрядников (кривые 2 – 5, соответственно), пересекаются с прямыми 2'–5' в точках инверсии F_i , U_i . В точке инверсии (вероятность инверсии F_i) напряжение пробоя коммутатора, состоящего из последовательно соединённых разрядников, равно арифметической сумме напряжений пробоя разрядников.

Проанализируем графики рис. 3. С точки зрения практического применения интересна область вероятностей ниже F_i (точки инверсии), потому что в этой области, как это видно из рис. 3, напряжение пробоя коммутатора выше арифметической

суммы напряжений пробоя разрядников, из которых состоит коммутатор. В этой области за счёт вероятностных связей происходит как бы увеличение электрической прочности каждого разрядника. С ростом прикладываемого напряжения в области выше точки инверсии это вероятностное взаимодействие приводит, наоборот, к снижению электрической прочности каждого разрядника и в этой области напряжение пробоя коммутатора меньше арифметической суммы напряжений пробоя разрядников, из которых состоит коммутатор.

Если анализировать рис. 3 сравнивая вероятности пробоя коммутатора (при напряжении U) и вероятности пробоя разрядника (при напряжении U/m), то можно заключить, что при значениях напряжения, соответствующих малым значениям вероятности, вероятность пробоя коммутатора меньше, чем вероятность пробоя одного разрядника, потому что пробоем одного разрядника совсем не обязательно приведёт к пробоем других.

При больших значениях напряжения, соответствующих значениям вероятности пробоя, близким к единице, пробоем одного разрядника приводит к неизбежному пробоем других, т.е. разрядники работают в условиях «чрезвычайной параллельности», а так как разрядников несколько и пробоем любого из них приводит к пробоем коммутатора, то вероятность пробоя коммутатора при напряжении U больше, чем вероятность пробоя одного разрядника при напряжении U/m .

На рис. 4 построены зависимости F_i от числа последовательно соединённых разрядников m . С увеличением m значение вероятности инверсии возрастает, т.е. диапазон вероятностей с повышенной электрической прочностью каждого разрядника увеличивается. Также из рис. 4 видно, что при уменьшении разброса пробивных напряжений (увеличении коэффициента формы b) уровень значений вероятности инверсии понижается.

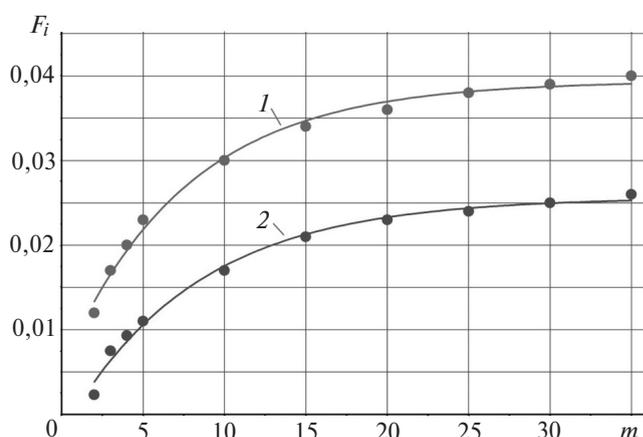


Рис. 4. Вероятность инверсии F_i от числа последовательно соединенных разрядников m , $a=87,8$ кВ (эфф.): 1 – $b=6,1$; 2 – $b=8,2$

Сравним при одной и той же вероятности F напряжение пробоя одного отдельного разрядника с напряжением пробоя разрядника в коммутаторе, состоящем из m разрядников. Зависимости на рис. 3 позволяют проанализировать характер изменения напряжения пробоя одного разрядника в коммутаторе при увеличении числа последовательно соединённых разрядников. Назовём такое напряжение пробоя разрядника в коммутаторе (в сборке из последовательно соединённых разрядников) сборочным напряжением пробоя U_c , которое запишем в нормированном виде: $U_c = U_k / m U_p$, где U_k – напряжение пробоя коммутатора, состоящего из m последовательно соединённых разрядников, при вероятности пробоя F ; U_p – напряжение пробоя отдельного разрядника при вероятности F .

На рис. 5 построены зависимости напряжения пробоя разрядника в коммутаторе от числа последовательно соединённых разрядников m при различных значениях вероятности F . Из рис. 5 следует, что при вероятности пробоя меньше вероятности инверсии (кривые 1 и 2, F 0,001 и 0,01 – соответственно) с увеличением числа последовательно соединённых разрядников увеличивается сборочное напряжение пробоя разрядника, и чем меньше вероятность пробоя, тем больше увеличение сборочного напряжения пробоя разрядника. При значениях вероятности больше значений вероятности инверсии (кривые 3 и 4, F соответственно 0,1 и 0,5) сборочное напряжение пробоя разрядника, наоборот, уменьшается, и чем больше вероятность пробоя, тем больше снижение сборочного напряжения пробоя разрядника. Анализируя ход зависимостей сборочного напряжения пробоя разрядника от чис-

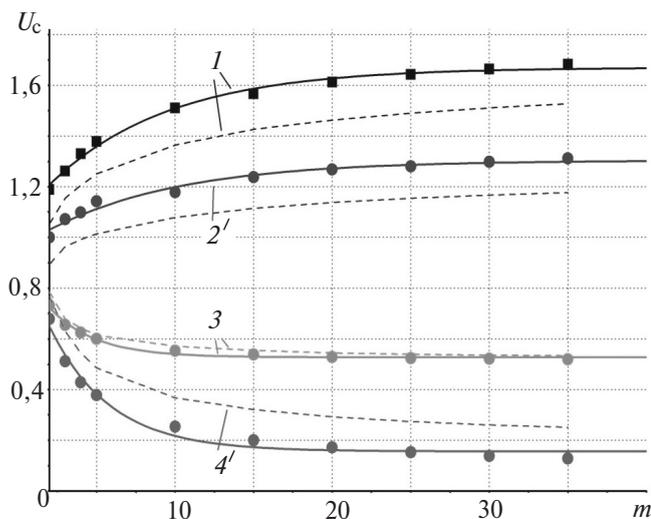


Рис. 5. Зависимость сборочного напряжения пробоя разрядника U_c (напряжения пробоя разрядника в составе коммутатора, состоящего из m последовательно соединённых одинаковых разрядников), от числа последовательно соединённых разрядников m при различных значениях вероятности: 1 – $F=0,0014$; 2 – 0,01; 3 – 0,2; 4 – 0,5; — — $b=6,1$; - - - - $b=8,2$

ла последовательно соединённых разрядников при значениях вероятности пробоя ниже вероятности инверсии (кривые 1 и 2), можно отметить, что наибольшая скорость роста сборочного напряжения пробоя разрядника – на начальных участках зависимостей при $m=2 \div 3$, и дальше с увеличением m скорость роста уменьшается. При значениях вероятности пробоя выше вероятности инверсии (кривые 3 и 4) вначале с увеличением m наблюдается наибольшая скорость снижения сборочного напряжения пробоя разрядника, затем скорость уменьшается.

Рассмотрим, как изменяется сборочное напряжение пробоя разрядника в коммутаторе в зависимости от приложенного напряжения. Из рис. 5 следует, что, например, у коммутатора из 10 последовательно соединённых разрядников при низком напряжении (вероятность пробоя равна 0,001 – сплошная кривая 1 на рис. 5), сборочное напряжение пробоя разрядника на 50% больше напряжения пробоя одного отдельного разрядника, а при больших напряжениях, соответствующих большому вероятностям пробоя (вероятность 0,5 сплошная кривая 4 на рис. 5), сборочное напряжение пробоя разрядника на 75% ниже напряжения пробоя одного отдельного разрядника. Отсюда можно сделать заключение, что коммутатор, состоящий из последовательно соединённых разрядников, наиболее эффективен в области напряжений около или ниже напряжения инверсии.

Рассмотрим, анализируя зависимости на рис. 5, влияние разброса напряжений пробоя разрядника (коэффициента формы b) на изменение сборочного напряжения разрядника. Можем отметить, что при значениях вероятности пробоя ниже вероятности инверсии с увеличением коэффициента формы b (уменьшением разброса пробивных напряжений) сборочное напряжение пробоя разрядника уменьшается (штриховые кривые 1 и 2 на рис. 5), а при значениях вероятности пробоя выше вероятности инверсии, наоборот, с увеличением коэффициента формы b сборочное напряжение пробоя разрядника увеличивается (штриховые кривые 3 и 4 на рис. 5). То есть – у коммутатора, состоящего из разрядников с меньшим разбросом напряжений пробоя, при увеличении приложенного напряжения (в области напряжений выше напряжения инверсии) электрическая прочность уменьшается в меньшей степени, чем у коммутатора, состоящего из разрядников с большим разбросом напряжений пробоя.

2. Отключающая способность. Вернёмся к отключающей способности последовательно соединённых вакуумных разрядников. В общем случае отключение переменного тока вакуумным про-

межутком происходит после нуля тока, если промежуток выдерживает восстанавливающееся напряжение сети, т.е. отключающая способность определяется электрической прочностью промежутка в «горячем» состоянии после нуля тока и может быть описана также функцией распределения напряжений пробоя, как и при «холодной» электрической прочности. Электрическая прочность последовательно соединённых одинаковых вакуумных промежутков в «горячем» состоянии описывается также выражением (8), и рассуждения об эффекте инверсии, верные для электрической прочности в «холодном» состоянии, верны и для электрической прочности в «горячем» состоянии. Тогда можно сделать следующее заключение: если вероятность отключения вакуумным разрядником тока $I_{эфф}$ при напряжении $U_{эфф}$ больше 0,99, т.е. вероятность не отключения низкая (меньше 0,01), то надёжность отключения тока $I_{эфф}$ коммутатором, состоящим из m одинаковых разрядников при напряжении $mU_{эфф}$ будет выше, чем одним разрядником при напряжении $U_{эфф}$. Другими словами, при малых вероятностях неотключения разрядником тока $I_{эфф}$ отключающая способность коммутатора, состоящего из m последовательно соединённых разрядников при напряжении $mU_{эфф}$ будет выше, чем одного разрядника при напряжении $U_{эфф}$.

Этот вывод важен практически — последовательное соединение разрядников позволяет кратно увеличивать выдерживаемое напряжение коммутатора, и при этом увеличивается и его отключающая способность по току.

Последовательно-параллельное соединение вакуумных управляемых разрядников. Рассчитаем электрическую прочность коммутатора ВБК-110/80, состоящего из четырёх параллельных ветвей, каждая из которых содержит три последовательно соединённых вакуумных управляемых разрядника РВУ-43-1. Для выравнивания напряжения по разрывам используются ёмкостно-омические делители напряжения. Эти же делители используются для питания блоков запуска разрядников. Если использовать индивидуальный делитель для каждой ветви, то коммутатор не будет иметь поперечных соединений, как показано на рис. 6,а. Для снижения стоимости коммутатора можно использовать по одному делителю на каждую пару ветвей, пропускающих ток в одном направлении, тогда коммутатор будет иметь четыре поперечных соединения, как показано на рис. 6,б. Если использовать только один делитель напряжения на весь коммутатор, тогда будет шесть поперечных соединений и электрическая схема примет вид, показанный на рис. 6,в.

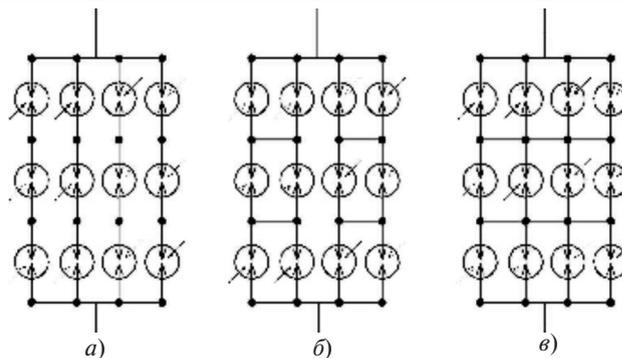


Рис. 6. Блок-схемы коммутаторов

Для расчета электрической прочности коммутаторов, состоящих из последовательно-параллельно соединённых разрядников используем следующую методику:

1) определяется функция распределения напряжений пробоя одного разрядника;

2) в случае электрической схемы без поперечных соединений (рис. 6,а) рассчитывается электрическая прочность одной ветви, состоящей из последовательно соединённых разрядников, а затем рассчитывается электрическая прочность параллельно соединённых ветвей;

3) в случае электрических схем с поперечными соединениями (рис. 6,б и 6,в) рассчитывается электрическая прочность одной ветви, состоящей из последовательно соединённых разрядников, затем с помощью «полного перебора» определяется число возможных путей пробоя в каждой из схем и замещаются схемы рис. 6,б и 6,в схемами с числом параллельно соединённых ветвей, равным числу возможных путей пробоя, и рассчитывается электрическая прочность полученных параллельно соединённых ветвей.

1. *Расчёт электрической прочности коммутатора, имеющего параллельно соединённые ветви без поперечных соединений разрядников* (рис. 6,а). Рассчитаем электрическую прочность устройства, состоящего из трёх последовательно соединённых разрядников при условии равномерного деления напряжения по разрядникам, воспользовавшись формулой (8):

$$F_3(U) = 6F_0F_1F_2 - 3F_0F_1^2 - 3F_0^2F_2 + F_0^3, \quad (9)$$

где F_3 — вероятность пробоя коммутатора, состоящего из трёх последовательно соединённых одинаковых разрядников; U — напряжение, приложенное к коммутатору; F_0 — вероятность пробоя разрядника при напряжении $U/3$; F_1 — вероятность пробоя разрядника при напряжении $U/2$; F_2 — вероятность пробоя разрядника при напряжении U .

На рис. 7 на вейбулловской координатной сетке построена функция распределения напряжений

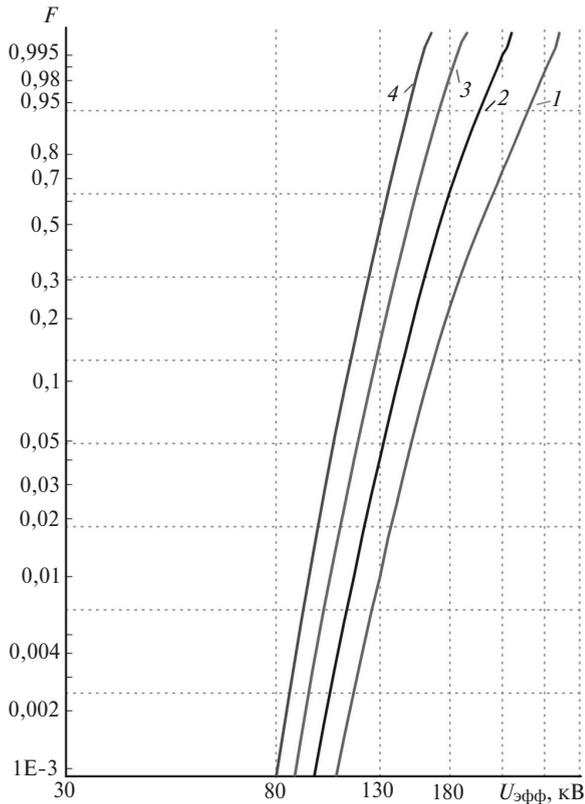


Рис. 7. Функции распределения напряжений пробоя коммутаторов: 1 – одна ветвь коммутатора; 2 – коммутатор, соответствующий блок-схеме на рис. 6,а; 4 – рис. 6,в

пробоя одной ветки коммутатора (кривая 1), рассчитанная по формуле (7) и с использованием функции распределения напряжений пробоя РВУ-43-1 (5).

Для расчёта электрической прочности коммутатора, состоящего из четырех параллельно соединённых одинаковых ветвей (схема соединения, соответствующая рис. 8,а), можно воспользоваться формулой вероятностей для параллельно соединённых элементов:

$$P_n(U) = 1 - (1 - p_1(U))^n, \quad (10)$$

где $P_n(U)$ – вероятность пробоя коммутатора; $p_n(U)$ – вероятность пробоя одной ветви коммутатора.

В рассматриваемом случае $n=4$ и $p_1(U) = F_m(U)$.

На рис. 7 приведена функция распределения напряжений пробоя коммутатора (кривая 2), состоящего из четырех параллельных ветвей, блок-схема которого соответствует рис. 6,а.

2. *Расчёт электрической прочности коммутатора, имеющего попарное поперечное соединение разрядников, соответствующее блок-схеме на рис. 6,б.* При этой схеме соединения возможно 16 путей пробоя коммутатора. Эквивалентная схема замещения будет содержать 16 параллельных ветвей, каждая из которых содержит три последовательно соединённых разрядника. Для расчёта электрической

прочности коммутатора в этом случае используем формулы (9) и (10) при $n=16$.

На рис. 7 приведена функция распределения напряжений пробоя коммутатора, схема соединения разрядников которого соответствует рис. 6,б (кривая 3).

3. *Расчёт электрической прочности коммутатора, когда разрядники поперечно соединены в соответствии с блок-схемой на рис. 6,в.* Для расчёта числа возможных путей пробоя N в этом случае соединения разрядников воспользуемся формулой из комбинаторики $N = nt$, где n – число параллельно соединённых элементов, t – число последовательно соединённых элементов.

При этой схеме соединения уже будет 64 пути пробоя коммутатора. Эквивалентная схема замещения будет содержать 64 параллельные ветви, каждая из которых содержит три последовательно соединённых разрядника. Электрическую прочность коммутатора в данном случае рассчитаем используя формулы (9) и (10) при $n=64$.

На рис. 7 приведена функция распределения напряжений пробоя коммутатора, схема соединения разрядников которого соответствует рис. 6,в (кривая 4). Из анализа рис. 7 видно, что электрическая прочность коммутатора заметно уменьшается по мере увеличения поперечных соединений в коммутаторе. Рассмотрим напряжения пробоя коммутаторов при вероятности $F=0,005$. Напряжение пробоя одной ветки коммутатора 122 кВ (эфф.). Напряжение пробоя коммутатора, состоящего из четырех параллельных ветвей (рис. 6,а), равно 108 кВ (эфф.), напряжение пробоя коммутатора при применении четырех поперечных соединений (рис. 6,в) уменьшилось на 9,2% до 98 кВ (эфф.), а при шести поперечных соединениях (рис. 6,б) уменьшилось на 17,6% – до 89 кВ (эфф.). В таких же пропорциях уменьшится отключающая способность коммутаторов по напряжению. Отключающая способность по току коммутаторов с поперечными соединениями, по крайней мере, не ухудшится.

По условию работы коммутатор находится постоянно под фазным напряжением сети. Максимальное рабочее фазное напряжение сети класса напряжения 110 кВ не более 73 кВ (эфф.). При этом напряжении даже для коммутатора с шестью поперечными соединениями вероятность пробоя очень низкая, равная ЗЧ10-4 (на рис. 7 не показана).

Выводы. 1. Функция распределения напряжений пробоя коммутатора, состоящего из последовательно соединённых разрядников, имеет точку инверсии (F_i, U_i) , в которой напряжение пробоя

коммутатора равно арифметической сумме напряжений пробоя разрядников. При напряжениях меньше U_i напряжение пробоя коммутатора больше арифметической суммы напряжений пробоя разрядников, а при напряжениях больше U_i — меньше арифметической суммы напряжений пробоя разрядников.

2. При вероятности пробоя меньше вероятности инверсии с увеличением числа последовательно соединённых разрядников увеличивается сборочное напряжение пробоя каждого разрядника, и чем меньше вероятность пробоя, тем больше увеличение сборочного напряжения пробоя разрядника. При вероятности выше вероятности инверсии сборочное напряжение пробоя каждого разрядника, наоборот, уменьшается, и чем больше вероятность пробоя, тем больше снижение сборочного напряжения пробоя каждого разрядника.

3. Рабочее напряжение коммутатора, состоящего из последовательно соединённых разрядников, целесообразно выбирать в области напряжений около или ниже напряжения инверсии.

4. Если вероятность отключения вакуумным разрядником тока $I_{эфф}$ при напряжении $U_{эфф}$ больше 0,99, т.е. вероятность неотключения низкая (меньше 0,01), то отключающая способность коммутатора, состоящего из m последовательно соединённых разрядников при напряжении $mU_{эфф}$ будет выше, чем одного разрядника при напряжении $U_{эфф}$.

5. Параллельное соединение разрядников позволяет кратно увеличить отключаемый ток, но при этом снижается выдерживаемое напряжение. Последовательное соединение разрядников позволяет кратно увеличивать рабочее напряжение коммутатора, и при этом увеличивается и его отключающая способность по току. Параллельное и последовательное соединение разрядников позволяет кратно увеличить отключаемый ток и рабочее напряжение. Электрическая прочность коммутатора уменьшается при увеличении поперечных соединений в коммутаторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов Д.Ф., Белкин Г.С., Иванов В.П. и др. Применение быстродействующих управляемых коммутирующих устройств в электроэнергетике. — Электричество, 1998, № 7, с. 2–8.
2. Алферов Д.Ф., Белкин Г.С., Иванов В.П. и др. Быстродействующие вакуумные аппараты с управляемой коммутацией. — Электро, 2006, № 1, с. 9.
3. Сидоров В.А., Домашенко Г.Д., Ахметгареев М.Р., Щербаков Ю.В. Высоковольтный быстродействующий коммутатор на основе вакуумных управляемых разрядников для коммутации переменного тока. — Электричество, 2018, № 4, с. 4–14.
4. ООО «ВЭИ-АВИС» [Официальный сайт]: <http://www.vei-avis.ru>
5. Ахметгареев М.Р., Иванов В.П., Менахин Л.П., Сидоров В.А. Высоковольтный высокоточный коммутатор на основе вакуумных управляемых разрядников. — Приборы и техника эксперимента, 2016, № 3, с. 43–48.
6. Хаушильд В., Мош В. Статистика для электротехников в приложении к технике высоких напряжений. — Л.: Энергоиздат, 1989.
7. Сидоров В.А., Алферов Д.Ф., Алферова Е.Д. Статистическое описание электрической прочности последовательно соединённых одинаковых изоляционных элементов. — Электричество, 2005, № 2, с. 10–17.
8. Sidorov V.A., Alferov D.F., Alferova E.D. Dielectric Strength of Connected In Series Vacuum Gaps. — IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, vol. 13, pp. 18–25.
9. Сидоров В.А., Алферов Д.Ф. Электрическая прочность высокоточных вакуумных управляемых разрядников. — Приборы и техника эксперимента, 2001, № 1, с. 92–100.

[06.06.2018]

А в т о р ы: Сидоров Владимир Алексеевич окончил Московский энергетический институт в 1975 г. В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка вакуумных управляемых разрядников отпаянной конструкции для импульсных источников энергии» во Всероссийском электротехническом институте В.И. Ленина (ВЭИ ныне филиал Российского Федерального ядерного центра — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики РФЯЦ ВНИИТФ). Ведущий научный сотрудник ВЭИ.

Ахметгареев Марат Рифатович окончил Московский инженерно-физический институт в 2008 г. Начальник группы разработки вакуумной коммутационной аппаратуры ВЭИ.

Elektrichestvo, 2018, No. 12, pp. 4–13

DOI:10.24160/0013-5380-2018-12-4-13

Interrupting Capacity and Electrical Strength of Series- and Parallel-Connected Vacuum Gaps

SIDOROV Vladimir A. (All-Russian Institute of Electrical Engineering ARIEE), Moscow, Russia) — Leading scientific researcher, Cand. Sci. (Eng.)

ARHMETGAREYEV Marat R. (ARIIEE, Moscow, Russia) — Chief of group

The article describes newly developed mathematical models and procedures for predicting and estimating the electrical strength and breaking capacity of switching devices consisting of series- and parallel-connected triggered vacuum switches by using the measured characteristics of an individual triggered vacuum switch. One of possible application fields of the high-speed switching device may be its use as a combined short-circuiting and disconnecting device for protecting equipment from the effect of excessive short-circuit currents. The need for using such devices is stemming from the fact that the growth of power system capacities results in that the maximal short-circuit currents tend to exceed the breaking capacity of the power line circuit breakers. The use of a combined short-circuiting and disconnecting device will make it possible to continue the operation of these circuit breakers. The developed models and procedures are applied for estimating the electric strength and breaking capacity of a prospective high-voltage high-speed switching device VBK-110/80, which performs the function of a combined short-circuiting and disconnecting device with the rated breaking current equal to 80 kA (the effective value) intended for use in a 110 kV AC network.

Key words: high voltage, high-speed switching device, triggered vacuum switch, disconnection probability, interrupting capacity, breaking current, electric strength, breakdown probability, breakdown voltage, breakdown voltage distribution

REFERENCES

1. Alferov D.F., Belkin G.S., Ivanov V.P. i dr. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1998, No. 7, pp. 2–8.
2. Alferov D.F., Belkin G.S., Ivanov V.P. i dr. *Elektro – in Russ. (Electro)*, 2006, No. 1, 9 p.
3. Sidorov V.A., Domashenko G.D., Akhmetgareyev M.R., Shcherbakov Yu.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2018, No. 4, pp. 4–14.
4. ООО «ВЕИ-АВИС» [Ofits. Sait]: <http://www.vei-avis.ru>
5. Akhmetgareyev M.R., Ivanov V.P., Menakhin L.P., Sidorov V.A. *Pribory i tekhnika eksperimenta – in Russ. (Instruments and Experimental Technique)*, 2016, No. 3. pp. 43–48.
6. Khaushil'd V., Mosh V. *Statistika dlya elektrotehnikov v prilozhenii k tekhnike vysokikh napryazhenii* (Statistics for electrical engineers and high voltage applications). Leningrad, Energoizdat, 1989.
7. Sidorov V.A., Alferov D.F., Alferova Ye.D. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2005, No. 2, pp. 10–17.
8. Sidorov V.A., Alferov D.F., Alferova E.D. Dielectric Strength of Connected In Series Vacuum Gaps. – *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2006, vol. 13, pp. 18–25.
9. Sidorov V.A., Alferov D.F. *Pribory i tekhnika eksperimenta – in Russ. (Instruments and Experimental Technique)*, 2001, No. 1, pp. 92–100.

[06.06.2018]