

## Вероятность повторных пробоев в выключателях разных типов при коммутации батарей статических конденсаторов 110 кВ

Тихончук Д. А., инж.

ООО “Башкирэнерго”, Уфа

Рассмотрены вопросы, связанные с возникновением повторных пробоев или зажигания дуги в высоковольтных выключателях 110 кВ при коммутации батарей статических конденсаторов (БСК) 110 кВ. Описаны протекающие при этом процессы. Проведена оценка вероятности повторного зажигания дуги или пробоя в различных выключателях (масляных, воздушных, элегазовых). Проанализированы данные о повторных зажиганиях и пробоях в выключателях 110 кВ присоединений БСК на подстанциях ООО “Башкирэнерго”.

**Ключевые слова:** повторные пробои или зажигания, коммутация БСК, выключатели, подстанция.

В настоящее время для эффективного управления потоками реактивной мощности и нормализации уровней напряжения используются БСК на напряжения 6, 10, 35, 110 и 220 кВ мощностью от 5 до 200 Мвар. Они выполняются на базе косинусных однофазных конденсаторов путем параллельно-последовательного соединения их в звезду или треугольник в зависимости от режима работы нейтрали. Основным коммутирующим аппаратом для БСК является выключатель, способный коммутировать емкостную нагрузку. При коммутации БСК возникают броски тока, переходные процессы и, как следствие, перенапряжения, которые очень опасны для оборудования из-за возможного пробоя его межфазной и фазной изоляции. Коммутации при включении единичной конденсаторной батареи на шины системы и подключении параллельно работающей дополнительной батареи вызывают опасные переходные сверхтоки, превышающие номинальные в 5 – 100 раз.

Поэтому актуальны вопросы возникновения повторных пробоев или зажигания дуги, описания процессов, протекающих при коммутации батарей статических конденсаторов 110 кВ, оценки вероятности повторного зажигания или пробоя в выключателях различных типов (масляных, воздушных, элегазовых). Эти вопросы рассмотрены на примере выключателей присоединений БСК на подстанциях ООО “Башкирэнерго”.

### Описание процессов, протекающих при коммутации БСК 110 кВ

При эксплуатации выключателей в цепях БСК 110 кВ утверждать, возникают ли повторные пробои или повторные зажигания

дуги в выключателе и какова их вероятность, невозможно без дополнительных расчетов и исследований. Следует отметить, что условия работы выключателей при коммутации БСК и ненагруженных линий различны. Выключатель в цепи БСК включает и отключает большие токи, осуществляет их коммутацию значительно чаще, чем выключатель воздушной линии. Кроме того, броски переходного тока при включении БСК больше, чем при включении линии [1].

Согласно ГОСТ 52565–2006 [2] следует разделять два понятия:

повторный пробой — это возобновление тока между контактами выключателя в процессе операции отключения емкостного тока после того, как ток оставался равным нулю в течение промежутка времени, равного или большего 1/4 периода промышленной частоты;

повторное зажигание — это возобновление тока между контактами выключателя в процессе операции отключения емкостного тока или тока реактора после того, как ток оставался равным нулю в течение промежутка времени, меньшего 1/4 периода промышленной частоты.

Рассмотрим простейший случай отключения сосредоточенной емкости, например батареи конденсаторов  $C$ , от источника, имеющего индуктивность  $L$  (рис. 1, а). До отключения напряжение на емкости

$$U_C = E \frac{-jx_C}{-jx_C + jx_L} = U_\Phi \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2}, \quad (1)$$

где  $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$  — собственная частота схемы (обычно  $\omega_1$  намного больше частоты источника  $\omega$ , т. е.  $U_C$  равно фазному напряжению  $U_\Phi$ ).

Допустим, что емкостный ток достаточно велик, так что среза тока в выключателе не происходит и дуга гаснет в момент естественного перехода тока через нуль. Любой выключатель отключает ток при протекании его через нуль (со сдвигом по времени в разных фазах), когда подвод энергии к дуге со стороны сети уменьшается. Кривая напряжения при этом проходит через свое максимальное значение. На рис. 1, б мгновенное значение напряжения принято отрицательным. После обрыва тока напряжение на емкости сохраняет значение  $U_C = -U_\phi$ , а ЭДС источника изменяется по косинусоидальному закону.

Разность

$$e(t) - u_C = -U_\phi \cos \omega t - (-U_\phi) = U_\phi(1 - \cos \omega t) \quad (2)$$

представляет собой восстанавливающееся напряжение на выключателе, которое через полпериода достигает значения, равного  $2U_\phi$ . Если оно окажется выше, чем электрическая прочность промежутка между расходящимися контактами выключателя, произойдет повторное зажигание или пробой в этом промежутке.

Рассмотрим идеализированный случай, когда повторное зажигание дуги или пробой происходит при максимуме напряжения промышленной частоты. Колебательный контур  $LC$ , емкость которого заряжена до  $-U_\phi$ , подключается к источнику ЭДС

$$e(t) = U_\phi \cos \omega t = U_\phi \sin(\omega t + \pi/2). \quad (3)$$

В схеме возникают высокочастотные колебания с частотой  $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$ , которые накладываются на напряжение промышленной частоты. Этот процесс описывается формулой

$$u(C) = E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \sin(\omega t + \varphi) - U_0^{-\delta t} \cos \omega_1 t - E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} e^{-\delta t} \left[ \sin \varphi \cos \omega_1 t + \frac{\omega}{\omega_1} \cos \varphi \sin \omega_1 t \right] = E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \left[ \sin(\omega t + \varphi) - e^{-\delta t} \times \sqrt{\left( \sin \varphi + \frac{U_0}{E} \frac{\omega_1^2 - \omega^2}{\omega_1^2} \right)^2 + \left( \frac{\omega}{\omega_1} \cos \varphi \right)^2} \times \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \right]. \quad (4)$$

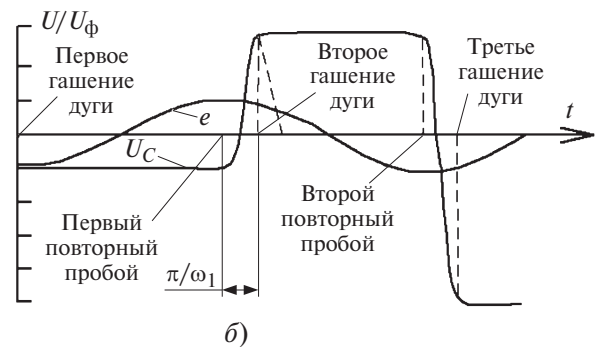
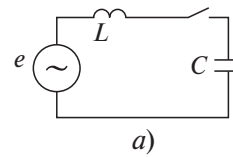


Рис. 1. Схема для определения напряжения при отключении конденсатора  $C$  (а) и напряжение при наличии повторных пробоев в выключателе в момент максимума ЭДС (б)

Принимая  $f = \pi/2$  и учитывая, что  $\frac{\omega_1^2 - \omega^2}{\omega_1^2} \approx 0$ , получаем без учета затухания:

$$e(t) - u_C = U_\phi \cos \omega t - 2U_\phi \cos \omega_1 t. \quad (5)$$

Ток, протекающий через выключатель, находим из выражения

$$i_b = C \frac{du_C}{dt} = -U_\phi \omega C \sin \omega t + 2U_\phi \omega_1 C \sin \omega_1 t. \quad (6)$$

Так как  $\omega_1 > \omega$ , амплитуда свободной составляющей тока  $2U_\phi \omega_1 C$  значительно превосходит амплитуду вынужденной составляющей.

Через полпериода собственных колебаний, т. е. при  $t = T_1/2 = \pi/\omega_1$ , напряжение достигает максимума (см. рис. 1, б). За это время напряжение промышленной частоты не успевает существенно измениться, следовательно, без учета затухания, которое присутствует в реальном процессе за счет разрядных резисторов,

$$U_{max} \approx U_\phi + 2U_\phi = 3U_\phi. \quad (7)$$

Приблизительно в этот же момент суммарный ток, который в основном определяется свободной составляющей, протекает через нуль, и дуга гаснет, а напряжение на емкости остается равным  $+3U_\phi$ .

Еще через полпериода промышленной частоты напряжение источника станет равным  $-U_\phi$ , напряжение между контактами выключателя возрастет до  $4U_\phi$  и может произойти еще один повторный пробой, во вре-

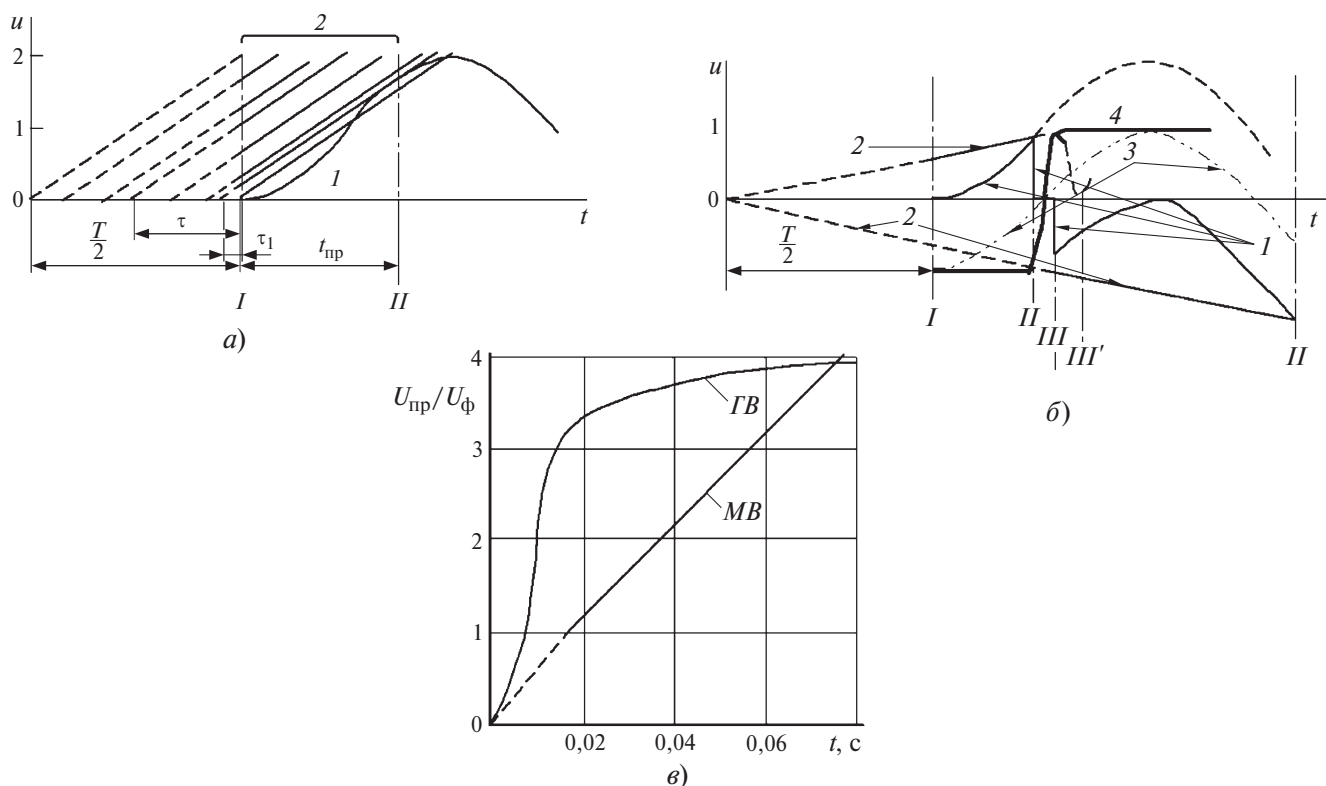


Рис. 2. Оценка вероятности повторных зажиганий и пробоев при различных характеристиках выключателей:

$a$  и  $б$  — воздушные и масляные выключатели; 1 и 2 — восстанавливающееся и пробивное напряжения между контактами; 3 — ЭДС источника; 4 — напряжение на БСК; I, III (или III') — моменты обрыва тока; II — момент повторного зажигания; в — изменение электрической прочности между контактами газовых (ГВ) и масляных (МВ) выключателей

мя которого в контуре будут происходить колебания с амплитудой  $4U_{ф}$ . При этом максимальное напряжение на емкости достигнет  $-5U_{ф}$ .

Если бы повторные зажигания дуги или пробой в выключателе продолжались неограниченно долго, перенапряжения на отключаемом конденсаторе непрерывно возрастали бы в соответствии с рис. 1, б.

Отключение конденсаторных батарей наиболее опасно, так как может явиться причиной эскалации перенапряжений в том случае, если процесс отключения сопровождается повторными зажиганиями дуги или пробоями в выключателе. Каждый подобный процесс опасен не только возникающими перенапряжениями в сети, но и большими переходными токами.

#### Вероятность повторного зажигания и пробоя

Результат отключения определяют два процесса [3, 4]: первый — это изменение электрической прочности в дугогасительном промежутке при расхождении контактов выключателя (определяется характеристиками системы дугогашения — см. рис. 2, в), а второй — восстановление напряжения на

этом же дугогасительном промежутке (определяется только конфигурацией и параметрами электрической схемы, в которой происходит отключение, и не зависит от процессов в системе дугогашения — см. рис. 2, а, б) [5].

Оценим вероятность повторного зажигания дуги в выключателе. На рис. 2, а показаны кривая 1 восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя и упрощенные кривые 2 зависимости пробивного напряжения межконтактного промежутка от времени (они построены как начальная часть характеристики 2 на рис. 2, в, соответствующей газовому выключателю). Начала кривых 1 и 2 не совпадают, так как расхождение контактов может начаться в произвольный момент времени, а погашение дуги, после которого восстанавливается напряжение, происходит при переходе тока через нуль.

Таким образом, на рис. 2, а  $\tau$  представляет собой интервал между началом расхождения контактов и моментом обрыва тока. Можно принять, что наибольшее значение  $\tau$  равно полупериоду промышленной частоты, так как в большинстве случаев ток обрывает-

ся при первом переходе через нуль после начала расхождения контактов, т. е. в пределах полупериода. Из графика видно, что при  $\tau > \tau_1$  повторное зажигание и пробой не произойдут, так как к моменту обрыва тока контакты расходятся настолько, что пробивное напряжение межконтактного промежутка оказывается выше восстанавливающегося напряжения.

Если  $\tau < \tau_1$ , повторные зажигания возможны, но они происходят не при максимуме, а при меньших мгновенных значениях напряжения. Интервал  $\tau_1$  соответствует предельному случаю, когда прямая 2 является касательной к кривой 1. Очевидно, что вероятность повторных зажиганий и пробоев равна отношению  $\tau_1/(0,5T)$ . Значение  $\tau_1$  можно определить, если приравнять крутизны восстанавливающихся и пробивных напряжений, а также их мгновенные значения  $u_B$  и  $u_{пр}$ , используя следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} u_B &= U_\phi(1 - \cos\omega t); \\ \frac{du_B}{dt} &= \omega U_\phi \sin\omega t; \\ u_{пр} &= U'_{пр}(t + \tau_1); \\ \frac{du_{пр}}{dt} &= U'_{пр}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Приняв для газового выключателя  $U'_{пр} = 4U_\phi/T$  (по рис. 2, в), получим  $\omega\tau_1 = 0,32$ . Вероятность повторного зажигания для газового выключателя

$$P_{зак} = \omega\tau_1/\pi \approx 0,1. \quad (9)$$

Таким образом, в случае применения газовых выключателей теоретически существует небольшая вероятность одного повторного зажигания, в результате которого максимальное напряжение должно быть меньше  $3U_\phi$ . Многократные повторные зажигания или пробой теоретически очень редки.

Расчет показывает, что при использовании масляных выключателей  $\omega\tau_1 = 7,5 > 2\pi > \omega T/2$  [6]. Поскольку маловероятно, что интервал между началом расхождения контактов и моментом обрыва тока окажется больше полупериода, то вероятность повторного пробоя практически равна единице. На рис. 2, б представлена идеализированная картина процесса для  $\tau = T/2$  после первого и второго обрывов дуги (моменты I и III). Процесс имеет тот же характер, что и на рис. 1, б, но повторные пробой происходят не в момент максимума ЭДС. Картина осложняется тем,

что кривые 2 пробивного напряжения между контактами имеют статистический характер, т. е. для них типичен значительный разброс. Второе и последующие гашения дуги могут произойти не вблизи первого прохождения через нуль тока свободных колебаний, а позднее (например, в момент III' на рис. 2, б), что приводит к уменьшению восстанавливающегося напряжения и прекращению повторных пробоев. Это означает, что для оценки возможных перенапряжений существенное значение приобретают испытания и эксплуатационные измерения [6].

Чтобы исключить повторный пробой дугового промежутка восстанавливающимся напряжением, необходимо как можно быстрее устранить из него заряженные частицы, т. е. деионизировать его. В стационарной дуге непрерывно протекают спонтанные процессы деионизации, уравнивающие ионизационные процессы. После первого обрыва дуги естественная деионизация в ее стволе усиливается из-за прекращения подвода энергии и спада температуры. Однако ионизация, существовавшая в стволе дуги до перехода тока через нуль, исчезает не сразу и задерживает восстановление электрической прочности дугового промежутка.

Представленный процесс идеализирован, но он правильно отражает характерную особенность — нарастание напряжения при каждом новом погашении и зажигании дуги за счет накопления заряда на емкости. Реальные характеристики выключателя вносят существенные изменения в количественную оценку процесса.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что даже для мощных конденсаторных установок максимальный ток включения меньше ударного тока КЗ, который выключатель выдерживает [7].

#### **Повторные зажигания и пробой в выключателях присоединений БСК на подстанциях ООО «Башкирэнерго»**

На трех подстанциях 110 кВ ООО «Башкирэнерго» установлены БСК 110 кВ. Данные, полученные от регистратора аварийных событий за период с начала 2010 по конец 2012 г., достоверно отображают наличие или отсутствие повторных зажиганий и пробоев в выключателях исследуемых объектов (см. таблицу). Согласно [2] на всех присоединениях нагрузка не превышает 300 А. При повторном зажигании значительных перенапряжений не выявлено.

Подстанция	Метод ограничения переходных процессов	Тип установленного выключателя	Среднее количество коммутаций	Отношение количества повторных пробоев или зажиганий к общему числу коммутаций, %
“Субханкулово”	Токоограничивающий реактор	МКП-110	8 – 10	30
“Языково”	Отсутствует	ВМТ-110	4 – 5	0
“СПП-110/6”	Управляемая коммутация	ЛТВ-145	5 – 7	0

Интерес представляет процесс включения БСК, при котором зажигание дуг между контактами выключателя происходит практически одновременно. При пробое контактного промежутка одной фазы выключателя ее потенциал мгновенно передается через разряженные емкости БСК на контакты еще не замкнувшихся двух других фаз. Пробои этих контактных промежутков облегчены появлением на них линейных напряжений. Учитывая малые периоды изменения тока высокой частоты, можно утверждать, что даже из-за небольшой разновременности замыкания контактов выключателя при включении второй или третьей фазы ток в ранее включившихся фазах может достигать больших значений и взаимное влияние становится существенным.

### Выводы

1. При отключении БСК-110 выключателем типа МКП-110 зафиксированы повторные зажигания дуги, в то время как в выключателях типов ВМТ-110 и ЛТВ-145 ни повторных пробоев, ни зажиганий дуг не выявлено.

2. Результаты представленного в статье теоретического расчета вероятности повторных пробоев и зажиганий дуги в выключателях разных типов отличаются от практических данных, свидетельствующих о значительно меньшем их количестве (у выключателей ВМТ-110 и ЛТВ-145 они вообще отсутствуют).

3. Возникающие в выключателе МКП-110 повторные зажигания не вызывают повышения амплитудного значения напряжения, а только приводят к появлению незначительной высокочастотной составляющей.

4. Из-за разновременности замыкания контактов выключателя при включении увеличивается ток в первом полюсе относительно двух других полюсов.

### Список литературы

1. Колядина Н. А., Толкачев А. И., Шлейфман И. Л. Коммутация конденсаторной батареи 110 кВ. — Электрические станции, 1982, № 12.
2. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 52565–2006 “Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия”.
3. Буткевич Г. В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. — М.: Энергия, 1973.
4. Славин Г. А. Восстанавливающееся напряжение на контактах высоковольтных выключателей при отключениях короткого замыкания. — М.: Энергия, 1974.
5. Шишкова И. Е. Исследование собственных восстанавливающихся напряжений на контактах линейных выключателей (методические указания к лабораторным работам). — Иваново: ГОУВПО “Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина”, 2004.
6. Техника высоких напряжений: Учеб. для студентов электротехнич. и электроэнергетич. специальностей вузов / Под общей ред. Д. В. Разевига. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1976.
7. Ильяшов В. П. Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок (библиока электромонтера). — М.: Энергия, 1977, вып. 45.

fchu@mail.ru