

2. Олейников, В. К. Анализ и управление электропотреблением на металлургических предприятиях: учеб. пособие / В. К. Олейников, Г. В. Никифоров. – Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 1999. – 219 с.

3. Колесник, Ю. Н. Адаптация моделей электропотребления к задачам контроля энергоэффективности нестабильно работающих потребителей / Ю. Н. Колесник, К. А. Веньгин // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2006. – № 2. – С. 88–94.

4. Колесник, Ю. Н. Использование математического моделирования для повышения эффективности работы участков нефтепровода / Ю. Н. Колесник, Н. В. Токочакова, С. И. Половинко // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2005. – № 2. – С. 32–36.

5. Веньгин, К. А. Анализ методов и разработка алгоритмов контроля эффективности электропотребления предприятий с собственными генераторами электроэнергии: дис. ... магистр. техн. наук: 43.01.03 / К. А. Веньгин. – Гомель, 2007. – 103 с.

6. Кузнецов, А. В. Руководство к решению задач по математическому программированию / А. В. Кузнецов, Н. И. Холод, Л. С. Костевич. – Минск: Вышэйш. шк., 2001. – 448 с.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 22.02.2008

УДК 621.315

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО СБЛИЖЕНИЯ ГИБКИХ СБОРНЫХ ШИН СО СПУСКАМИ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Инж. ПОНОМАРЕНКО Е. Г.

Белорусский национальный технический университет

Проведенные в различных странах исследования показали, что при существующих уровнях токов короткого замыкания в энергосистемах возможно недопустимое сближение и даже схлестывание проводов разных фаз в результате электродинамического действия токов КЗ [1]. Особую опасность представляют недопустимые сближения проводов сборных шин распределительных устройств. В этом случае релейная защита отключает систему сборных шин со всеми присоединениями. Однако расчет движения сборных шин со спусками является сложной задачей. Необходимо оценить движение системы взаимосвязанных проводов под воздействием электродинамических усилий. Численное решение указанной задачи получено несколькими авторами [2–4]. Разработаны компьютерные программы, пригодные для постановки вычислительного эксперимента, так как они учитывают различные влияющие факторы и конструктивные элементы распределительных устройств. В то же время в проектной практике востребованы упрощенные методы расчета сближения сборных шин со спусками при коротком замыкании, не требующие обращения к ЭВМ.

Цель статьи – разработка упрощенного алгоритма расчета максимально возможных сближений соседних фаз сборных шин со спусками, исходя только из их геометрических размеров.

Спуски в пролете, действуя как дополнительные сосредоточенные нагрузки и как механические связи, существенно ограничивают размах колебаний гибких шин при коротком замыкании. Чем ближе спуски расположены к середине пролета, тем заметнее их влияние. Это объясняется тем, что участки сборных шин с обеих сторон спуска будут иметь меньшую длину, чем в случае расположения спуска ближе к одному из краев пролета, и следовательно, размах их колебаний будет меньше. Как показывают компьютерные расчеты, в ряде пролетов сборных шин со спусками недопустимых сближений проводов не происходит даже при больших токах КЗ (≥ 50 кА). При определенном токе КЗ (табл. 1), достаточном для отклонения провода на угол 180° и более [1], шины РУ начинают вращаться по своей предельной круговой траектории, которая зависит от геометрических размеров пролета и практически не меняется с увеличением токов КЗ. Поэтому можно оценивать предельное положение проводов шин и спусков, исходя только из известных геометрических размеров пролета, без привязки к конкретной величине тока короткого замыкания, не прибегая к численным методам расчета. Для такой оценки достаточно знать длины спуска l_c , пролета l , провода L и стрелу провеса f_0 сборной шины.

Таблица 1
**Ток перехода сборной шины
на круговую траекторию
(шинный пролет ОРУ-110 кВ, 27 м)**

Марка провода	Ток КЗ, кА
АС-185/29	20–25
АС-300/39	26–30
АС-500/27	32–35

В общем случае существует несколько характерных видов движения сборных шин при коротком замыкании и наличии в пролете отпаяк. При первом виде спуск свободно движется вслед за сборной шиной и практически не препятствует ее движению (поз. 2, рис. 1а). Дополнительную нагрузку на шину создает вес спуска, но при больших токах КЗ кинетическая энергия движущегося провода велика и влияние веса спуска минимально. Максимальное горизонтальное отклонение сборной шины u_{\max} достигается в середине пролета (поясняющая схема, рис. 1б). При втором виде движения сборная шина удерживается спуском (поз. 1, рис. 1а). При этом пролет разбивается на два участка с разных сторон от спуска и u_{\max} достигается в средней точке более длинного участка (поясняющая схема, рис. 1в). Можно выделить также третий вид движения, когда при коротком замыкании в цепи присоединения по отпайкам протекает значительный ток, и они начинают двигаться с большой скоростью, увлекая за собой сборную шину (поясняющая схема, рис. 1г). Однако вскоре импульс легкой отпайки поглощается более тяжелой шиной, и характер ее движения в дальнейшем будет соответствовать первому или второму виду.

Очевидно, что в зависимости от расположения спусков в процессе колебаний шина может принимать разные формы. К примеру, шина 1 (рис. 1а) при отклонении от средней шины 2 будет двигаться, как показано

на (рис. 1в), а при сближении ее движение будет иметь первый вид (рис. 1б). Это следует учитывать при оценке предельных отклонений шин. Приведенные выше рассуждения справедливы также и для пролетов с большим числом отпаек. Колебания сборных шин в таком пролете будут еще более ограничены.

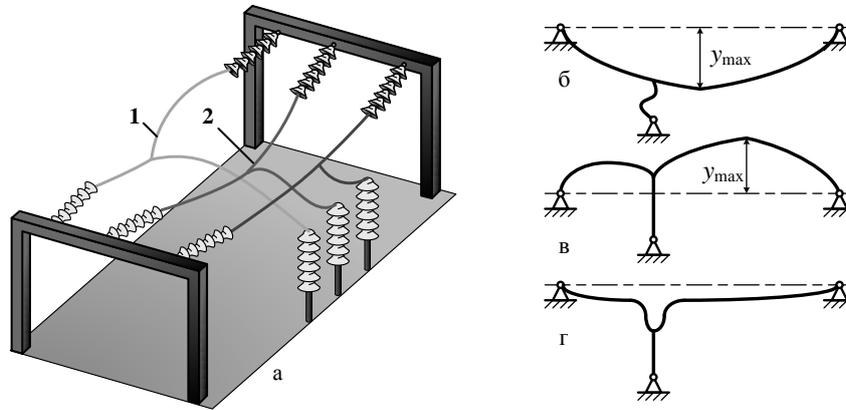


Рис. 1. Характерные виды движения сборных шин

Для определения максимально возможных отклонений сборной шины с учетом влияния спуска вначале рассмотрим движение шины и спуска по отдельности. Возможной областью перемещения спуска, жестко прикрепленного к аппарату и освобожденного от провода, будет сфера радиусом $r = l_c$. При этом удлинение спуска при КЗ вследствие механических деформаций и нагрева незначительно по отношению к длине спуска и его можно не учитывать.

При протекании тока КЗ шина начинает совершать вращательные движения относительно оси, проходящей через точки ее закрепления. Перемещения провода вдоль оси пролета определяются колебаниями порталов, которые достаточно малы по отношению к длине пролета и их влияние при рассмотрении движения спуска не учитывается. Следовательно, конец спуска, закрепленный на проводе, может перемещаться только в плоскости перпендикулярной плоскости пролета. Эта плоскость рассекает сферу возможного перемещения спуска. В сечении получается окружность, которая определяет максимальный размах колебаний свободного конца спуска. Радиус окружности (рис. 2)

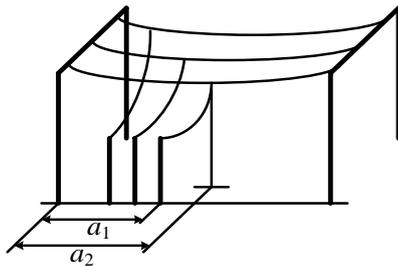


Рис. 2. Схема пролета

$$r_c = \sqrt{l_c^2 - (a_2 - a_1)^2}. \quad (1)$$

Таким образом, если спуск располагается не перпендикулярно пролету, то его можно заменить эквивалентным по действию на движение шин перпендикулярным спуском длиной r_c . Такая замена не противоречит реальной физике процесса, так как тяжение шины значительно больше тяжения

спуска, и он не может оказать заметного влияния на продольные перемещения шины.

Точка в месте крепления спуска, принадлежащая сборной шине, как было сказано выше, также движется по круговой траектории. Область на пересечении двух окружностей определяет возможную зону перемещения точки крепления спуска.

При построении траектории движения сборной шины пролета необходимо учитывать изменение формы провода при КЗ. Под воздействием центробежных сил и тяжения спуска провод вытягивается и принимает практически треугольную форму (рис. 3). Указанная вытяжка провода учитывается при расчете максимального горизонтального отклонения шины y_{\max} без учета влияния спуска.

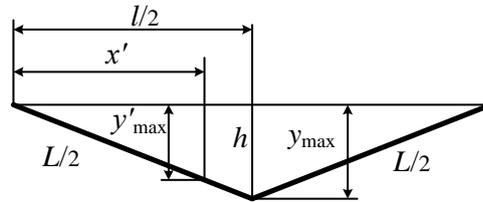


Рис. 3. К определению y_{\max}

Вначале определим область перемещения точки крепления спуска. Наибольшее отклонение y_{\max} наблюдается в середине пролета и равно высоте h равнобедренного треугольника (рис. 3)

$$y_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{L^2 - l^2}, \quad (2)$$

Длину провода L можно определить по методу балочных эпюр [5].

Отклонение провода y'_{\max} в других точках пролета (рис. 3)

$$y'_{\max} = y_{\max} \frac{2x'}{l}, \quad (3)$$

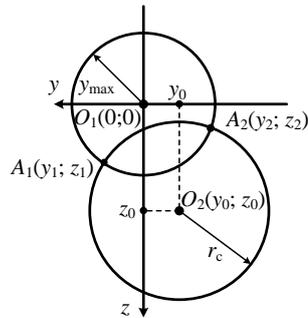


Рис. 4. Траектории движения

где x' – расстояние до искомой точки вдоль пролета от ближайшей точки закрепления.

Построим окружности возможного перемещения конца спуска и точки крепления спуска на сборной шине (рис. 4). За начало координат принимаем точку на пересечении оси пролета и плоскости вращения точки крепления спуска на шине. Ось y направим в сторону, где будет рассчитываться y_{\max} . Если спуск находится в середине пролета, то построенные окружности описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} y_{\max}^2 &= y^2 + z^2; \\ r_c^2 &= (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где y_0 и z_0 – координаты точки крепления спуска к аппарату в системе yO_1z .

Если спуск расположен в произвольной точке пролета, то вместо y_{\max} в (4) подставляется y'_{\max} .

Определим координаты точек A_1 и A_2 пересечения окружностей (рис. 4). Для этого нужно решить систему уравнений (4). После ряда преобразований она принимает вид:

$$\begin{aligned} y^2 + z^2 &= y_{\max}^2; \\ y_0 y + z_0 z &= d, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$d = \frac{y_{\max}^2 - r_c^2 + y_0^2 + z_0^2}{2}.$$

После замены и подстановки получаем обычное квадратное уравнение относительно y

$$ay^2 + by + c = 0, \quad (6)$$

где

$$a = y_0^2 + z_0^2; \quad b = -2dy_0; \quad c = d^2 - z_0^2 y_{\max}^2.$$

Решением уравнения являются координаты y точек пересечения

$$y_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (7)$$

Так как шина и спуск, определяющие радиусы окружностей (рис. 4), крепятся друг к другу, должны иметься точки пересечения данных окружностей и $b^2 - 4ac \geq 0$. Следует также заметить, что спуск нормальной длины (длина спуска примерно на 6 % больше, чем расстояние между точками крепления спуска на шине и аппарате [6]), не может не препятствовать движению шины.

Координаты z

$$z_{1,2} = \frac{d}{z_0} - \frac{y_0}{z_0} y_{1,2}. \quad (8)$$

Рисунки, подобные рис. 4, удобно строить на миллиметровой бумаге или с помощью программ-графопостроителей на ЭВМ. В этом случае можно, не прибегая к трудоемким вычислениям по приведенным формулам, определить точки пересечения окружностей и область возможных перемещений точки крепления спуска на шине.

На рис. 5 приведены траектория движения средней сборной шины 2 (рис. 1а), вычисленная по компьютерной программе, и границы максимально возможных перемещений для точки крепления спуска, находящегося в середине пролета. Построения и расчеты производились для шинного пролета 110 кВ длиной 27 м с одной отпайкой при токе двухфазного КЗ 60 кА. Из рис. 5 видно, что траектория, полученная в результате численного эксперимента, четко укладывается в ограниченную окружностями область.

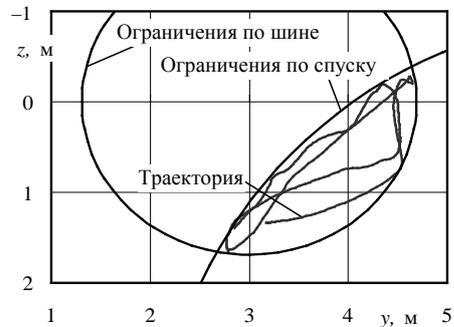


Рис. 5. Траектория движения в точке крепления спуска

Как видно из рис. 4 и 5, если $z_{1,2} \leq 0$, то спуск не будет препятствовать горизонтальному перемещению шины. Если $z_{1,2} > 0$, то шина свободно движется по своей траектории до тех пор, пока спуск не начнет препятствовать ее движению. Участки шины по обе стороны от точки крепления спуска продолжают свое вращение, достигают максимального горизонтального отклонения и затем увлекают за собой спуск. За счет центробежной силы участки шины также принимают треугольную форму (рис. 1в). Максимальное горизонтальное отклонение шины y_{\max} достигается в центре наиболее длинного участка. Траектория движения средней точки этого участка повторяет траекторию движения крайней точки спуска, только с большим радиусом. Можно считать, что все точки провода в момент наибольшего отклонения лежат в одной горизонтальной плоскости (так как стрела провеса не превышает 5–6 %). Тогда для нахождения y_{\max} можно воспользоваться схемой, изображенной на рис. 6:

$$y_{\max} = \frac{y_1}{2} + y_h \cos \varphi_1 \approx \frac{y_1}{2} + y_h, \quad (9)$$

где $\cos \varphi_1 \approx 1$, так как для пролетов со стрелой провеса 5–6 % угол $\varphi_1 \leq 8^\circ$; y_1 – координата точки A_1 (рис. 4);

$$y_h = 0,5\sqrt{L_2^2 - l_2'^2} \approx 0,5\sqrt{L_2^2 - l_2^2}.$$

Координата по оси x , соответствующая y_{\max} :

$$x_0 = \frac{L_2}{2} \cos \varphi \approx \frac{l_2}{2}. \quad (10)$$

При определении отклонения y'_{\max} в произвольной точке пролета расчетной схемы (рис. 6) возможны два варианта:

1) x' находится ближе к точке крепления, чем x_0 . Тогда

$$y'_{\max} \approx \frac{x'}{l_2} (y_1 + 2y_h); \quad (11)$$

2) x' ближе к центру пролета

$$y'_{\max} \approx \frac{x'}{l_2} (y_1 + 2y_h) - 1. \quad (12)$$

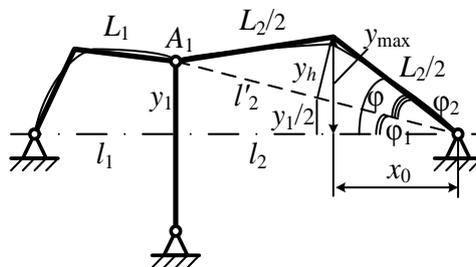


Рис. 6. Схема для определения максимальных отклонений

Аналогичные выражения можно записать и для короткого участка сборной шины. Таким образом, радиус окружности точки с координатой x_0 при ограничении ее движения спуском

$$r'_c = r_c - (y_1 - y_{\max}). \quad (13)$$

Чтобы подтвердить справедливость приведенных выражений, построим границы перемещения шины 1 (рис. 1а) в точке с координатой x_0 (рис. 6) и сравним построения с траекторией, полученной в результате численного компьютерного расчета для этого пролета (рис. 7). На стадии отклонения шина имеет второй вид движения, на стадии сближения – первый.

Как видно из рис. 7, компьютерная траектория практически совпадает с ограниченной областью. Погрешность обусловлена тем, что форма провода на самом деле отличается от треугольной, а также тем, что траектория движения шины не является абсолютно круговой. Вылет траектории на участке а–б (рис. 7), где и достигается максимальное отклонение y_{\max} , объясняется тем, что при резкой остановке шины спуском происходит горизонтальный выброс участков провода по обе стороны от точки крепления спуска. Как раз для этого случая приведена поясняющая схема на рис. 6.

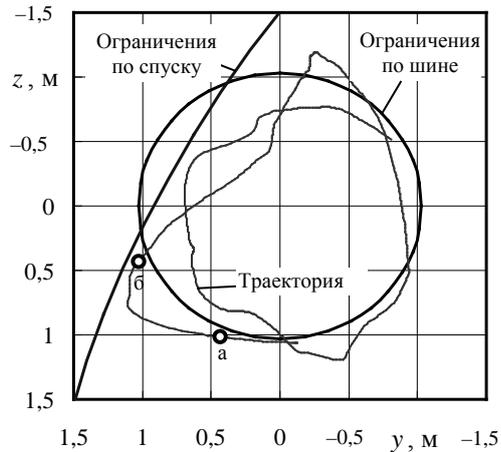


Рис. 7. Траектория движения шины в точке x_0

Очевидно, что в общем случае максимальные сближения проводов могут наблюдаться в нескольких точках пролета. Эти точки определяются видом движения проводов при их сближении. Например, в пролете, представленном на рис. 1а, при двухфазном КЗ может быть две таких точки (в сечениях 1 и 2), которые соответствуют максимальным отклонениям y_{\max} двух шин (рис. 8). Нахождение минимальных междуфазных расстояний $A_{\phi-\phi.\min}$ производится в следующем порядке: 1) определяется вид движения шин на стадии их сближения (рис. 1б или в); 2) определяются координаты x точек максимального отклонения сборных шин в соответствии с

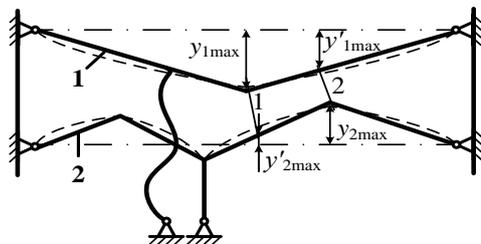


Рис. 8. К определению точек максимального сближения (вид пролета сверху)

рис. 3 и выражением (10); 3) если шина имеет второй вид движения, то решается система уравнений вида (4), корни которой определяются по выражениям (7), (8); 4) по выражениям (2) и (9) определяются максимальные отклонения шин y_{\max} и по (3), (11), (12) – отклонения y'_{\max} соседней шины в соответствующих y_{\max} сечениях

(рис. 8). Для упрощения расчетов можно принимать, что y_{\max} и соответствующее ему y'_{\max} соседней шины лежат на одной перпендикулярной пролету прямой. Если на стадии сближения обе шины будут иметь первый вид движения, то для обеих шин определяется y_{\max} в центре пролета; 5) находится $A_{\phi-\phi.\min}$ в соответствующем сечении

$$A_{\phi-\phi.\min} \approx A_{\phi-\phi} - Y_1 - Y_2, \quad (13)$$

где $A_{\phi-\phi}$ – междуфазное расстояние; Y_1 и Y_2 – максимальные горизонтальные отклонения соседних фаз (y_{\max} или y'_{\max}) в соответствующем сечении.

Для примера произведем расчет по описанной выше методике для пролета типового ОРУ 220 кВ длиной 30,8 м [7]. План пролета представлен на рис. 9. Исходные данные для расчета: провод – АС-300/39; гирлянда изоляторов – 16×ПС6-А; стрела провеса – 1,54 м (тяжения при данной стреле – 155, 165 и 163 ДаН соответственно в шинах 1, 2 и 3); высота подвеса шин – 11 м; высота аппаратов – 4,8 м. Расчет производится для двухфазного короткого замыкания, в котором участвуют шины 1 и 2. Расчетная схема пролета для определения максимальных отклонений шин на стадии их сближения представлена на рис. 10.

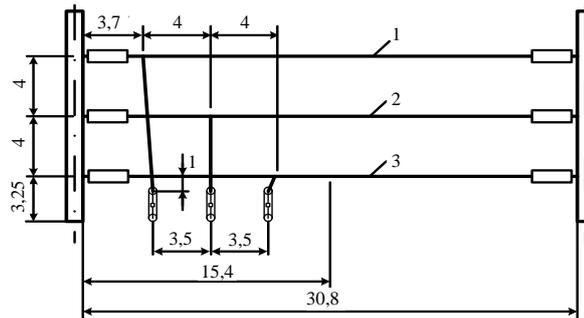


Рис. 9. План пролета типового ОРУ 220 кВ

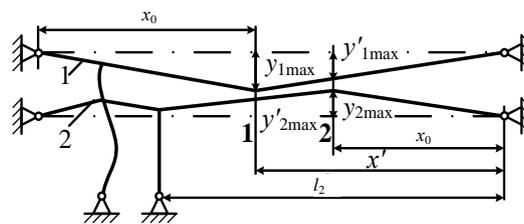


Рис. 10. Расчетная схема пролета

Рассчитаем $A_{\phi-\phi.\min}$ в сечении 1 (рис. 10). Для шины 1 по (2) $y_{1\max} \approx 0,5\sqrt{31,14^2 - 30,8^2} = 2,3$ м, эквивалентная длина спуска по (1) $r_c = 7,22$ м. Для шины 2 составляем систему уравнений вида (4):

$$\begin{aligned} 2,3^2 &= y^2 + z^2; \\ 7,22^2 &= (y + 5)^2 + (z - 6,2)^2. \end{aligned}$$

В результате решения системы получаем: $y_1 = 0,15$; $L_2 = Ll_2/l = 31,14 \cdot 23,1/30,8 = 23,36$ м; $y_h = 0,5\sqrt{23,36^2 - 23,1^2} = 1,73$ м. По (9) $y_{2\max} = 0,15/2 + 1,73 = 1,80$ м. При $x' = 15,4$ м по (12) имеем:

$$y'_{2\max} = \frac{15,4}{23,1} \cdot (0,15 + 2 \cdot 1,73) - 1 = 1,41 \text{ м;}$$

$$A_{\text{ф-ф.min}} \approx A_{\text{ф-ф}} - y_{1\max} - y'_{2\max} = 4 - 2,31 - 1,41 = 0,28 \text{ м.}$$

$A_{\text{ф-ф.min}} < A_{\text{ф-ф.доп}} = 0,9$ м – значит, при больших токах КЗ может произойти недопустимое сближение проводов.

Для проверки результатов был проведен расчет по компьютерной программе FLEBUS. Из расчета получено: $y_{1\max\text{КП}} = 2,19$ м; $y'_{2\max\text{КП}} = 1,39$ м; $A_{\text{ф-ф.min КП}} = 4 - 2,19 - 1,39 = 0,42$ м. Расчет по компьютерной программе также указывает на возможность нарушения электродинамической стойкости пролета.

Кроме сближения непосредственно самих сборных шин в пролете при КЗ, существует также опасность сближения шин со спусками соседних фаз. Расчеты показывают, что в пролетах с длинными спусками, к которым относится

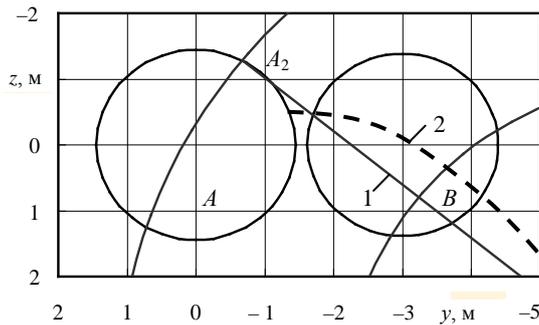


Рис. 11. Сближение сборной шины и спуска соседней фазы

большой ряд пролетов типовых ОРУ 110–220 кВ [7], сближение шин и спусков при больших токах КЗ (табл. 1) практически неизбежно. На рис. 11 приведены области возможного перемещения сборных шин 1 и 2 пролета (рис. 1). Эти области построены в сечении точки крепления спуска шины 1 и обозначены как *A* и *B*. Когда шина 1 достигает

своего наивысшего положения (точка A_2), ее спуск вытягивается в струну (положение 1, рис. 11) и перекрывает область перемещения *B* соседней фазы. Далее, когда шина из наивысшего положения начинает падать вниз, спуск по инерции продолжает движение вверх (положение 2), захватывая таким образом еще большую часть области *B*, и опасность недопустимого сближения средней шины 2 и спуска значительно возрастает. Этой опасности можно избежать, например, при обязательной установке дополнительного опорного изолятора в пролете длинного спуска.

При проведении расчетов не учитывались колебания порталов под действием динамических нагрузок от движущихся сборных шин. Портал состоит из двух стоек и траверсы, которые могут выполняться из железобетона, профильного металла или сочетания этих материалов. Величина прогиба порталов вдоль оси пролета определяется не только динамическими нагрузками, но также жесткостью его конструкции и инерционными харак-

теристиками. Так как траверса и стойки состоят из множества металлических элементов различного профиля, скрепленных между собой болтовыми соединениями, расчет жесткости и момента инерции затруднителен. Кроме того, жесткость портала зависит от величины прогиба, а динамические тяжения, возникающие в проводах, в свою очередь, зависят от характера колебания порталов. Поэтому не представляется возможным аналитически рассчитать динамические прогибы порталов. Однако их учет вносит значительную погрешность в определение y_{\max} , так как величина прогибов составляет 0,05–0,2 % и более от длины пролета. Поэтому при встречном движении порталов значительно уменьшается длина пролета l и соответственно увеличивается y_{\max} , а при движении в разные стороны в направлении от центра пролета y_{\max} уменьшается. Максимальные прогибы порталов в первый период колебаний наблюдаются в моменты времени наступления максимальных горизонтальных отклонений сборных шин (или с небольшим запаздыванием) при их отталкивании и сближении. Этот факт указывает на то, что колебания порталов увеличивают y_{\max} . Значит, уменьшаются междуфазные расстояния и недопустимые сближения возникают при меньших токах. В первом приближении влияние гибкости порталов на сближение шин можно учесть с помощью поправочного коэффициента $k_{\pi} = 1,1$, величина которого определена вычислительным экспериментом. В дальнейших исследованиях эта величина подлежит уточнению.

ВЫВОДЫ

1. Разработан упрощенный алгоритм расчета предельного сближения соседних фаз сборных шин со спусками, основанный только на геометрических размерах пролета. Достоверность разработанного алгоритма подтверждена с помощью вычислительного эксперимента по компьютерной программе FLEBUS.
2. Выявлена возможность недопустимого сближения и схлестывания проводов одной фазы с проводами ответвлений соседней фазы, даны рекомендации по ее устранению.

ЛИТЕРАТУРА

1. The mechanical effects of short-circuit currents open-air substations (rigid or flexible bus-bars). Brochure from CIGRE. SC 23. – Paris, 1996.
2. Сергей, И. И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И. И. Сергей, М. И. Стрелюк. – Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. – 252 с.
3. Lehmann, W. The mechanical effects of short-circuit currents in substations with flexible conductors. Numerical method – computer approach / W. Lehmann, J. L. Lilien, I. Orkisz. – Paris, 1982. – 8 p. – (Preprint / CIGRE; 23 – 80 (WG – 02) 11 – IWD).
4. Dalle, B. Edute du pincement d'un faisceau de sous-conducteurs d'une portee de lighe lors d'un court circuit / B. Dalle. – Paris, 1982. – 21 p. – (Preprint / CIGRE; 23 – 80 (WG – 02) 06 – IWD).
5. Бошнякович, А. Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП / А. Д. Бошнякович. – Л.: Энергия, 1975. – 248 с.
6. Потопов, М. А. Монтаж гибких шин распределительных устройств / М. А. Потопов. – М.: Энергия, 1977.
7. Двоскин, Л. И. Схемы и конструкции распределительных устройств / Л. И. Двоскин. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 22.02.2008