УДК 621.315

УЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГИБКИХ ТОКОПРОВОДОВ 6−10 кВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Докт. техн. наук СЕРГЕЙ И. И., канд. техн. наук БЛАДЫКО Ю. В., инж. ПОНОМАРЕНКО Е. Г.

Белорусский национальный технический университет

Инженеры ЦЕМЕХМАН Б. Д., ПЕНЬКО Л. А.

РУП «БелНИПИэнергопром»

Гибкие токопроводы 10 кВ применяются на электростанциях и в схемах электроснабжения крупных промышленных предприятий. Особенностью их конструкции является наличие нескольких проводов в фазе (по пропускной способности) и междуфазных изолирующих распорок, предотвращающих схлестывание фаз в результате электродинамического действия токов короткого замыкания (КЗ). По полученным из энергосистем сведениям, гибкие токопроводы 10 кВ наиболее подвержены электродинамическому действию токов КЗ. Случай нарушения их электродинамической стойкости наблюдался в России на подстанции 500 кВ «Тихорецкая» при схлестывании фаз гибкого токопровода на стороне 10 кВ автотрансформатора связи (предписание ПП-06-09 РАО ЕС России). Недопустимое сближение и схлестывание фаз гибкого токопровода 10 кВ имело место в схеме электроснабжения ОАО «Могилевхимволокно» (по данным службы энергетика завода и РУП «БелНИПИэнергопром»). Причем повреждение наступило при токе 13 кА и продолжительности КЗ t_k = 1,2 с.

Проблема электродинамического действия токов КЗ на гибкие провода электроустановок актуальна для многих стран. Известные международные энергетические организации МЭК и СИГРЭ изучают ее многие годы. Техническим комитетом 73 МЭК был издан международный стандарт, регламентирующий расчет электродинамического действия токов КЗ на гибкие провода [1]. Аналогичный ГОСТ Р 50254–92 был введен в действие и в России [2]. В Беларуси проблема электродинамического действия токов КЗ актуальна, в первую очередь, при $U_{\text{н}}$ = 110 кВ, так как уровни токов КЗ достигают здесь 45…50 кА (по данным РУП «БелНИПИэнергопром»). Поэтому в 1999 г. российский стандарт был введен в действие в Беларуси как Межгосударственный стандарт ГОСТ 30323–95 [3].

К сожалению, объяснить случаи схлестывания и недопустимого сближения фаз гибких токопроводов 10 кВ при небольших токах КЗ указанные ГОСТы в полной мере не могут. В качестве критерия электродинамического действия токов КЗ ПУЭ [4] вводит величину тока КЗ, равную 20 кА. Очевидно, что при этом не учитываются продолжительность и другие характеристики КЗ, расстояние между фазами и размеры пролета, влияющие на схлестывание фаз. В [5] в качестве критерия электродинамической стойкости применяется импульс электродинамических усилий (ЭДУ), ве-

личина которого для двухфазного КЗ в общем случае определяется по громоздкому выражению

$$S^{(2)} = 0{,}2\frac{l}{a}\left(I_{\text{п0}}^{(2)}\right)^2\left(\frac{1}{2}t_k + \frac{1}{4\omega}\sin 2\omega t_k - \frac{T_a}{2}\left(e^{-\frac{2t_k}{T_a}} - 1\right) - \right.$$
$$\left. - 2\frac{T_a}{1+T_a^2\omega^2}\left(1+e^{-\frac{t_k}{T_a}}\right)\left(\omega T_a \sin\omega t_k - \cos\omega t_k\right)\right), \quad (1)$$

где a − расстояние между фазами, м; l − длина пролета, м; $I_{\text{п0}}^{(2)}$ − величина тока двухфазного КЗ, кА; t_k − продолжительность КЗ, с.

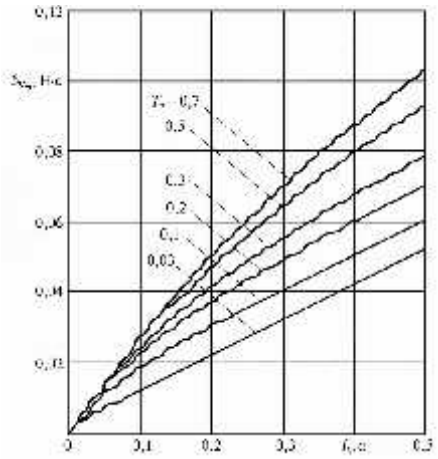

Рис. 1. Диаграмма для определения импульса ЭДУ двухфазного КЗ: $S_{\text{ед}}$ − импульс ЭДУ при a = 1 м; l = 1 м; I = 1 кА

Как видно, импульс ЭДУ является функцией основных параметров КЗ и геометрических размеров пролета. Из графика изменения единичного импульса ЭДУ двухфазного КЗ (рис. 1) видно, что выражение для вычисления импульса ЭДУ можно упростить

$$S^{(2)} = 0{,}2\frac{\left(I_{\text{п0}}^{(2)}\right)^2}{a} l\left(t_k + T_a\right). \quad (2)$$

Опираясь на закон динамики о равенстве количества движения механической системы приложенному импульсу силы, получим комбинированный параметр для оценки электродинамического действия тока КЗ

$$v_k = \frac{S^{(2)}}{M_{\text{ф}}}, \quad (3)$$

где v_k – скорость движения всего провода как механической системы в момент отключения КЗ, м/с; $M_{\text{ф}}$ – суммарная масса фазы гибкого токопровода, включая гирлянды и арматуру.

Оценим приблизительно величину параметра v_k на примере гибкого токопровода 10 кВ ОАО «Могилевхимволокно». РУП «БелНИПИэнергопром» был определен максимальный ток КЗ, равный 13,13 кА. Продолжительность КЗ, обусловленная действием МТЗ, изменяется в диапазоне 1,0…1,5 с. Длина промежуточного пролета составляет 80 м. Определим v_k для нескольких значений тока КЗ и t_k :

1) при $I = 13{,}1$ кА; $t_k = 1{,}2$ с

$$S = 0{,}2 \cdot \frac{13{,}1^2}{1{,}2} \cdot 80 \cdot (1{,}2 + 0{,}05) = 2860 \text{ Н·с};$$

суммарная масса фазы гибкого токопровода в пролете

$$M_{\text{ф}} = M_{\text{пров}} + M_{\text{гирл}} + M_{\text{мр}} + M_{\text{вр}} = 1{,}62 \cdot 2 \cdot 80 + 2 \cdot 73{,}4 + 31 +$$

$$+ 11 \cdot 0{,}93 = 452 \text{ кг};$$

$$v_k = \frac{2860}{452} = 6{,}3 \text{ м/с};$$

2) при $I = 13{,}1$ кА; $t_k = 0{,}5$ с

$$S = 0{,}2 \cdot \frac{13{,}1^2}{1{,}2} \cdot 80 \cdot (0{,}5 + 0{,}05) = 1260 \text{ Н·с}; \quad v_k = \frac{1260}{452} = 2{,}8 \text{ м/с};$$

3) при $I = 10$ кА; $t_k = 0{,}5$ с

$$S = 0{,}2 \frac{10^2}{1{,}2} \cdot 80 \cdot (0{,}5 + 0{,}05) = 733 \text{ Н·с}; \quad v_k = \frac{733}{452} = 1{,}6 \text{ м/с};$$

$$f_0 = \frac{P_{\text{пров}} l^2}{8T_0} = \frac{3{,}24 \cdot 80^2}{8 \cdot 1300} \approx 2{,}0 \text{ м (стрела провеса токопровода).}$$

Очевидно, что при токах КЗ 10…15 кА и $t_k = 0{,}5...1{,}2$ с надежная работа гибкого токопровода при КЗ без специальных ограничителей колебаний невозможна, так как даже в момент отключения КЗ отклонение фазы y_k может быть больше, чем допустимая по ПУЭ величина:

$$y_{\text{доп}} = \frac{1}{2}\left(a - a_{\min\text{ доп}} - a_{\text{р}}\right) = \frac{1}{2} \cdot (1{,}2 - 0{,}15 - 0{,}4) = 0{,}325 \text{ м},$$

где $a_{\min\text{ доп}} = 0{,}15$ м − минимально допустимое расстояние между соседними фазами при $U_{\text{ном}}$ = 10 кВ; $a_{\text{р}} = 0{,}4$ м − шаг расщепления.

Диапазон изменения y_k равен

$$y_k = f_0(1 - \cos\alpha_k) = 2{,}0 \cdot (0{,}08...1{,}0) = 0{,}16...2{,}0 \text{ м}, \qquad (4)$$

где $\alpha_k = \frac{v_k t_k}{f_0} = \frac{(1{,}6...6{,}3)}{2{,}0} \cdot (0{,}5...1{,}2) = 0{,}4...3{,}8.$

Как видно, расчетная величина y_k в большинстве случаев даже без учета инерции масс после отключения КЗ больше допустимой величины. Принципиальным техническим решением, ограничивающим размах колебаний проводов, является установка междуфазных распорок, которые резко ограничивают сближение фаз. При установке одной распорки в пролете стрела провеса в подпролете уменьшается до $f_{01} = 0{,}6$ м, но и в этом случае максимально возможное отклонение фазы $y_{\max}$ может превысить величину $y_{\text{доп}} = 0{,}325$ м. И только при двух и более междуфазных распорках можно избежать недопустимого сближения и схлестывания фаз, так как при этом значительно уменьшаются стрела провеса в подпролете и возможный размах колебаний проводов. Например, при двух распорках в пролете

$$f_{02} = \frac{3{,}24 \cdot 26{,}7^2}{8 \cdot 1300} = 0{,}22 \text{ м.}$$

Однако из-за влияния на размах колебаний изменения геометрии проводов и податливости гирлянд, входящих в конструкцию междуфазных распорок, происходит дополнительное увеличение $y_{\max}$. По данным [6], $y_{\max} = (1{,}25...1{,}3) f_0 = (1{,}25...1{,}3) \cdot 0{,}22 = 0{,}27...0{,}29$ м, что близко к $y_{\text{доп}}$. С учетом сказанного потребовалось математическое моделирование динамики токопровода в пределах целого пролета (учитывалось влияние гирлянд, распорок, разности подвеса и других особенностей его конструкции). Для этого на кафедре «Электрические станции» БНТУ были разработаны численный алгоритм и компьютерная программа расчета сближения фаз гибкого токопровода 10 кВ в режиме двухфазного КЗ. Провода вместе с V-образными гирляндами изоляторов по концам пролета, междуфазными и внутрифазными распорками, отпайками к электрическим аппаратам образуют при КЗ единую колебательную систему. При составлении математической модели расчета динамики указанной системы применяется принцип связей механики: действие проводов на распорки, гирлянды изоляторов и зажимы заменяется реакциями связей. Используя в качестве расчетной модели провода абсолютно гибкую, растяжимую по закону Гука нить, можно вычислить указанные реакции по формуле

$$\overline{Ti} = T \frac{d\overline{R}_i}{dS}, \tag{5}$$

где $\overline{R_i}$ – радиус-вектор, определяющий мгновенное пространственное положение провода в точках его крепления к конструктивным элементам гибкого токопровода 10 кВ; T – модуль тяжения провода, Н; S – дуговая координата по проводу, м.

Движение провода как упругой механической системы на участках между распорками и гирляндами под воздействием распределенных ЭДУ, пульсирующих с частотами 50 и 100 Гц, описывается нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных

$$\frac{\partial T}{\partial S} \frac{\partial \overline{R}}{\partial S} + T \frac{\partial^2 R}{\partial S^2} + \overline{F} + \overline{P} = \rho \frac{\partial^2 R}{\partial t^2}, \tag{6}$$

где $\overline{F}$ – удельное электродинамическое усилие, Н/м; $\overline{P}$ – сила веса провода, Н/м; ρ − масса 1 м провода.

Динамика междуфазной распорки под действием приложенных от проводов переменных сил $\overline{T_i}$ представляется как движение системы сосредоточенных масс и пружин по уравнениям [6]:

$$M_s \frac{d^2 \overline{R}_{ci}}{dt^2} + f' \frac{d\overline{R}_{ci}}{dt} = \sum_{j=1}^{m} \overline{F}_{ijc} + \overline{P}_s; \tag{7}$$

$$M_c \frac{d^2 \overline{R}_{ij}}{dt^2} + f' \frac{d\overline{R}_{ij}}{dt} = \overline{T}_{ij1} + \overline{T}_{ij2} + \overline{F}_{ij} + \overline{F}'_{ij} + \overline{F}'_{ijc} + \overline{P}_c,$$

$$j = 1, ..., m; \quad i = 1, ..., n,$$

где $\overline{F}_{ij} = -\overline{F}'_{ij}$ – упругая реакция *j*-й пружины, соединяющей *j*-й и $(j+1)$-й зажимы *i*-й распорки (при $j+1 = m+1$ индекс $(j+1)$ равен 1); $\overline{F}_{ijc} = -\overline{F}'_{ijc}$ – то же, соединяющей центр масс *i*-й распорки с ее *j*-м зажимом; f' – вязкостная жесткость распорки, Н·с/м; M_s, P_s – масса и вес рамы распорки соответственно; M_c, P_c – то же зажима распорки.

Упругие реакции пружин по отношению к сосредоточенным массам распорки являются внешними силами. Они равны:

$$\overline{F}_{ij} = F_{ij}\overline{k}_{ij}; \quad \overline{F}_{ijc} = F_{ijc}\overline{k}_{ijc}, \tag{8}$$

где $\overline{k}_{ij}$, $\overline{k}_{ijc}$ – единичные векторы положения пружин относительно системы координат *Oxyz* .

Определение векторов $\overline{k}_{ij}$ и $\overline{k}_{ijc}$ производится по следующим выражениям:

$$\overline{k}_{ij} = \frac{\overline{R}_{i,j+1} - \overline{R}_{ij}}{\left|\overline{R}_{i,j+1} - \overline{R}_{ij}\right|}, \quad j = 1, ..., (m-1);$$

$$\overline{k}_{im} = \frac{\overline{R}_{i1} - \overline{R}_{im}}{\left|\overline{R}_{i1} - \overline{R}_{im}\right|}; \quad \overline{k}_{ijc} = \frac{\overline{R}_{ci} - \overline{R}_{ij}}{\left|\overline{R}_{ci} - \overline{R}_{ij}\right|}, \; j = 1, ..., m. \tag{9}$$

Принимаем, что зажимы V-образных гирлянд изоляторов могут перемещаться только в поперечном пролету направлении. Математическое описание динамики гирлянды производится приближенно как сосредоточенной массы и пружины, направленной по оси *y*. Жесткость пружины, учитывающая реальную податливость гирлянды, определялась опытным путем в лаборатории «Электрические станции» БНТУ. Влияние проводов отпаек на динамику гибких токопроводов также учитывается приближенно с использованием модели с сосредоточенной массой и пружиной.

В соответствии с межгосударственным стандартом СНГ 30323–95 [3] расчетным видом КЗ для проверки недопустимого сближения и схлестывания фаз является двухфазное КЗ. Расчеты проводились по разработанной компьютерной программе BUSEF–SPACER, в которой реализован указанный выше численный алгоритм расчета. В расчетах учитывались динамика V-образных гирлянд изоляторов по концам пролета, междуфазных изолирующих распорок (рис. 2) и проводов отпаек к электрическим аппаратам. В качестве примера был выполнен расчет недопустимого сближения фаз гибкого токопровода ОАО «Могилевхимволокно» для двух величин токов КЗ: 13,13 и 8,4 кА.

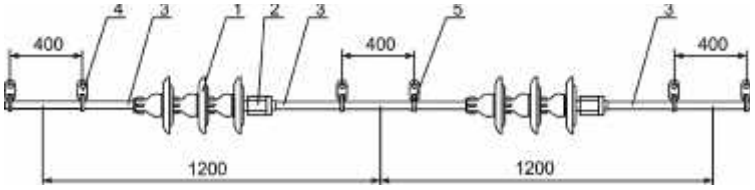

Рис. 2. Междуфазная распорка: 1 – изолятор фиксаторный специальный; 2 – муфта; 3 – тяга; 4 – планка; 5 – зажим

В первую очередь выполнялась оценка влияния количества междуфазных распорок на размах колебаний фаз в пролете длиной 80 м. При одной распорке, установленной в середине пролета, и токе КЗ, равном 13,13 кА, электродинамическая стойкость гибкого токопровода обеспечивается только при небольшой продолжительности КЗ, не превышающей 0,1 с (рис. 3). Установка двух междуфазных распорок в 1/3 и 2/3 частях пролета существенно ограничивает размах колебаний проводов: наибольшее горизонтальное отклонение средней точки фазы в пролете при t_k = 1,0 с составляет 0,315 м (рис. 4). Увеличению указанного отклонения способствовала упругая податливость междуфазной распорки и наличие люфта в конструкции ее зажима. Несмотря на то, что КЗ происходит между фазами *B* и *C* (рис. 5), за счет междуфазных распорок в колебаниях участвует и фаза *A*. КП автоматически выбирает мгновенное наименьшее расстояние между средними точками фаз в пролете.

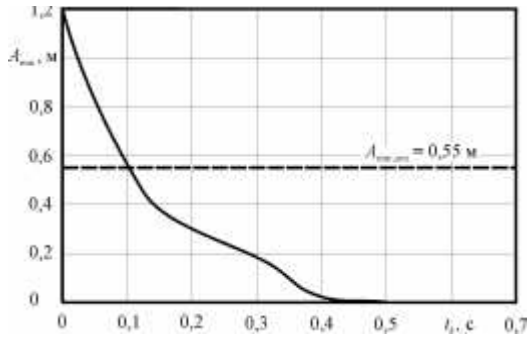

Рис. 3. Зависимость минимальных расстояний между осями соседних фаз A_{min} от t_k при одной распорке в пролете в режиме двухфазного КЗ: $I_k^{(2)}$=13,13 кА

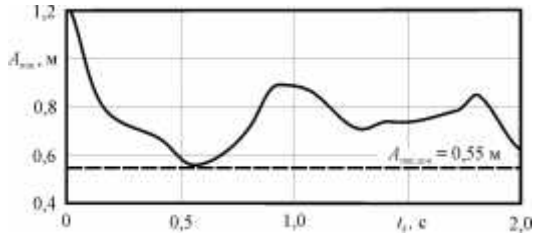

Рис. 4. Зависимость минимальных расстояний между осями соседних фаз A_{min} от t_k при двух распорках в пролете в режиме двухфазного КЗ: $I_k^{(2)}$=13,13 кА

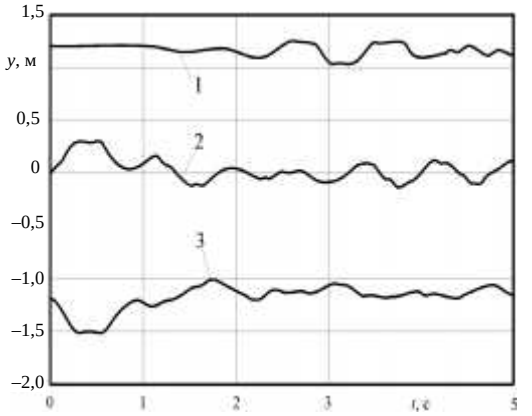

Рис. 5. Изменение горизонтальных отклонений средних точек фаз во времени: 1 – фаза *A*; 2 – фаза *B*; 3 – фаза *C*; m = 2; $I_k^{(2)}$ = 13,13 кА; t_k = 1 с

В моменты времени максимального отклонения фаз от первоначального положения имеют место максимальные тяжения в проводах гибкого токопровода, практически достигающие двухкратной величины по сравнению с эксплуатационным тяжением (рис. 6, 7).

Зависимость минимальных расстояний между осями соседних фаз от продолжительности КЗ (t_k) при $m = 2$ (рис. 4) показывает, что электродинамическая стойкость гибкого токопровода обеспечивается во всем рассматриваемом диапазоне t_k от 0,1 до 2,0 с.

Расчеты, выполненные при токе КЗ, равном 8,4 кА, показали, что электродинамическая стойкость гибкого токопровода обеспечивается даже при одной распорке в пролете (рис. 8). Однако максимальные тяжения остаются значительными (рис. 6). С учетом влияния спусков к электрическим аппаратам взаимное сближение фаз несколько уменьшается.

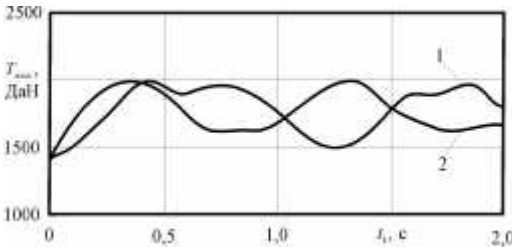

Рис. 6. Зависимость максимальных тяжений T_{max} от t_k при двухфазном КЗ: $I_k^{(2)}$ = 8,4 кА; 1 – m = 1; 2 – m = 2

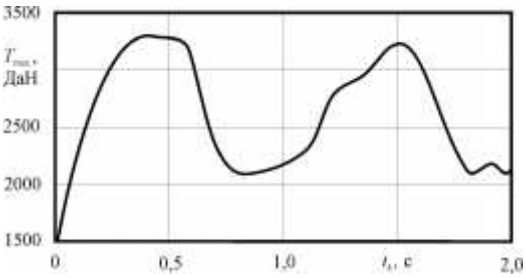

Рис. 7. Зависимость максимальных тяжений T_{max} от t_k при двухфазном КЗ: m = 2; $I_k^{(2)}$ = 13,13 кА

Можно выделить два граничных случая, благоприятных для уменьшения механических усилий, возникающих в расщепленной фазе при КЗ: большой шаг расщепления и малая длина подпролета, малый шаг расщепления и большая длина подпролета [7]. Для иллюстрации данного утверждения на рис. 9 приведены зависимости максимальных тяжений и сил сжатия внутрифазных распорок в зависимости от длины подпролета для шага расщепления 0,4 и 0,12 м.

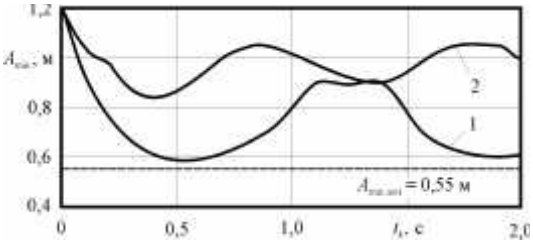

Рис. 8. Зависимость минимальных расстояний между соседними фазами A_{min} от t_k в режиме двухфазного КЗ: $I_k^{(2)}$ = 8,4 кА; 1 – m = 1; 2 – m = 2

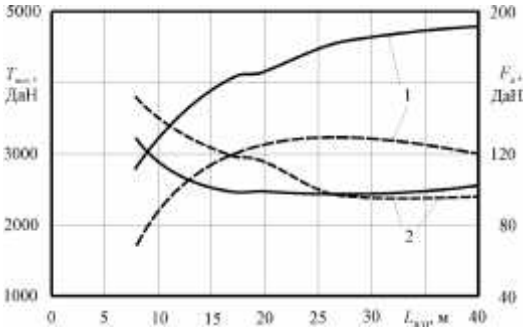

Рис. 9. Зависимость максимальных тяжений ——— и сил сжатия – – – – от длины подпролета; 1 − для шага расщепления 0,4 м; 2 − то же 0,12 м

В типовой конструкции гибкого токопровода 10 кВ принят слишком большой шаг расщепления: a_p = 0,4 м. Его можно уменьшить до 0,12 м с использованием типовой распорки для ОРУ-110 кВ. В этом случае допустимый размах колебаний проводов составит 0,93 м вместо 0,65 м. В результате указанного технического решения при токе КЗ 13,13 кА и одной распорке в пролете недопустимое сближение фаз будет только при t_k = 0,2 с (рис. 3). При двух распорках в пролете будет

большой запас электрической прочности промежутков между фазами (рис. 4).

С помощью КП BUSEF–SPACER составлен обобщенный график зависимостей максимально допустимого расстояния между междуфазными изолирующими распорками $L_{\max\ доп}$ от величины тока электродинамической стойкости пролета $I_{эд}$ для разных продолжительностей КЗ t_k (рис. 10). Из него можно определить $L_{\max\ доп}$ для конкретного пролета, не прибегая к сложным компьютерным расчетам. Для повышения электродинамической стойкости гибкого токопровода 10 кВ рекомендуется также заменить существующую междуфазную распорку (рис. 2) полимерной из стеклопластика. Известны примеры успешного применения указанных распорок для ограничения амплитуд пляски проводов воздушных ЛЭП [8].

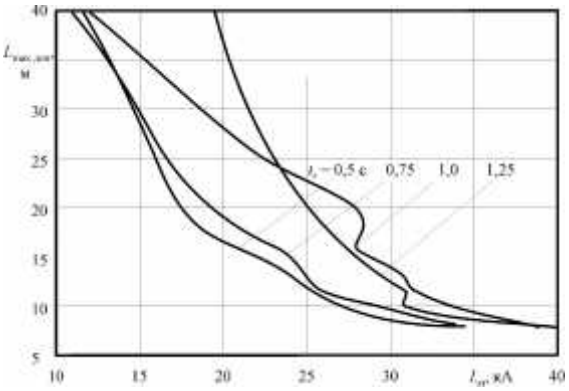

Рис. 10. Зависимость максимально допустимого расстояния между междуфазными изолирующими распорками $L_{\max\ доп}$ от тока электродинамической стойкости пролета $I_{эд}$ для разных продолжительностей КЗ

В Ы В О Д Ы

1. Разработаны численный метод и компьютерная программа расчета электродинамической стойкости гибких токопроводов 6−10 кВ систем электроснабжения, учитывающие их основные конструктивные элементы.

2. Компьютерная программа расчета пригодна для выбора оптимальных параметров и размеров гибких токопроводов, повышающих их электродинамическую стойкость. Она может быть использована как при проектировании, так и, модернизации действующих гибких токопроводов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. T h e m e c h a n i c a l effects of short-circuit currents open-air substations (rigid or flexible bus-bars). Brochure from CIGRE. SC 23. – Paris, 1996.

2. Г О С Т Р50254–92. Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. − Введ. 01.01.94. − М.: Госстандарт России, 1993. − 57 с.

3. ГОСТ 30323–95. Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. – Введ. 01.03.1999. – Мн., 1999. – 57 с.

4. П р а в и л а устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. − М.: Энергоатомиздат, 1987. − 648 с.

5. С е р г е й И. И., П о н о м а р е н к о Е. Г., С а м м у р В а и л ь М а х м у д. Оценка сближения проводов распределительных устройств электростанций по допустимому импульсу электродинамических усилий // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 4. – С. 5–9

6 У п р о щ е н н ы й метод расчета сближения гибких шин распределительных устройств при коротких замыканиях по импульсу электродинамических усилий // И. И. Сергей, Е. Г. Пономаренко, Саммур Ваиль, П. И. Климкович / Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2005. – № 3. – С. 13–18.

7. G r a i g D. B., F o r d G. L. The response of strain bus to short-circuit currents // IEE Trans. Power Appar and Syst. – 1980. – 99, № 2. – P. 434–442.

8. К р ы л о в С. В. Междуфазовые изолирующие распорки как средство ограничения пляски проводов // Проблемы механики ВЛ, климатические условия, нагрузки и воздействия, колебания проводов и методы их ограничения: Материалы науч.-техн. семинара / ВНИИЭ − Москва: 20–24 янв. 2003 г. − С. 1–5.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 19.09.2005