

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ГИБКОЙ ОШИНОВКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Докт. техн. наук СЕРГЕЙ И. И., канд. техн. наук. ПОНОМАРЕНКО Е. Г.

Белорусский национальный технический университет

Докт. техн. наук, проф. МИХАЛЕВ А. С.

Республиканский институт высшей школы БГУ

Согласно ПУЭ [1, разд. IV–24] проверку гибких шин на схлестывание или опасное в отношении пробоя сближение фаз необходимо производить при действующих значениях начального тока короткого замыкания (КЗ) в 20 кА и более. В настоящее время токи КЗ в электрических сетях 110 и 330 кВ энергосистемы Беларуси значительно превышают указанное значение. Например, максимальный расчетный ток трехфазного КЗ на сборных шинах открытого распределительного устройства (ОРУ) 110 кВ Минской ТЭЦ-3 составил, по данным НИ и ПИ РУП «Белэнергосетьпроект», 44 кА. Однако из-за отсутствия утвержденной методики расчеты электродинамической стойкости гибкой ошиновки при проектировании распределительных устройств (РУ) высокого напряжения не выполняются. Как следствие уже наблюдаются случаи нарушения электродинамической стойкости токоведущих конструкций с гибкими проводниками, например на подстанции 220 кВ Барановичских электрических сетей, которые способствовали развитию аварии (письмо ГПО «Белэнерго» ИП-06–2008 от 19.12.2008).

В связи со строительством Белорусской АЭС, выдача мощности которой будет производиться через шины распределительного устройства 330 кВ, в обязательном порядке потребуется произвести выбор геометрических размеров и физико-механических параметров гибкой ошиновки 330 кВ с учетом электродинамического действия возросших токов КЗ. Введенный в действие в 1999 г. в качестве государственного стандарта Республики Беларусь ГОСТ 30323–95 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания» [2] не дает возможности обосновать комплекс технических решений, направленных на повышение электродинамической стойкости и надежности работы РУ при токах КЗ свыше 20 кА. Более глубоко проработан международный стандарт на расчет электродинамического действия токов КЗ [3], разработка которого длительно велась экспертами рабочих групп 23-02 «Большие токи» и 23-11 «Действие токов КЗ» комитета 23 «Подстанции» СИГРЭ, и техническим комитетом 73 Международной электротехнической комиссии. Однако указанный метод не позволяет в полной мере определить параметры электродинамической стойкости гибких проводников РУ, так как он пригоден только для частных случаев их расположения.

Большой опыт в изучении электродинамического действия токов КЗ на гибкие проводники электроустановок накоплен на кафедре электрических станций БНТУ. Разработана теория расчета движения токоведущих конструкций с гибкими проводниками при КЗ и пакеты компьютерных программ (КП), которые были использованы для исследования электродинамической стойкости гибкой ошиновки РУ с сокращенными габаритами проектируемых крупных АЭС и компактных воздушных линий [4]. Вместе с тем в процессе эксплуатации КП были выявлены недостатки разработанного алгоритма, связанные с использованием явной схемы численного решения и представления проводов ответвлений абсолютно гибкой нитью.

В статье излагаются усовершенствованный метод расчета электродинамической стойкости токоведущих конструкций с гибкими проводниками РУ высокого напряжения и разработанный на его основе упрощенный алгоритм расчета. Особенностью токоведущих конструкций с гибкими проводниками РУ является наличие ответвлений к электрическим аппаратам (спусков), присоединенных к проводам сборных шин. Провода сборных шин имеют длину в несколько десятков метров и монтируются с тяжением до нескольких сот килограммов. Действующие на них при КЗ электродинамические усилия (ЭДУ) значительно превышают сопротивление проводов изгибу. Поэтому представление проводов гибкой упругой нитью дает хорошие результаты, близкие к опытным данным [4]. Присоединенные же к гибким шинам спуски, выполненные, как правило, проводом того же сечения, имеют значительно меньшую длину и монтируются практически без натяжения. В ряде случаев они имеют вид ненатянутых вертикально расположенных отпаяк. В этих условиях заметное влияние на динамику спусков при КЗ оказывает жесткость проводов на изгиб [5]. Для учета жесткости провода нужно решить уравнения динамики «жесткой» нити, которые являются уравнениями четвертого порядка в частных производных с нелинейными правыми частями. В процессе численного решения этих уравнений был выбран простой и устойчивый алгоритм решения, в котором составляющая уравнения движения провода, содержащая четвертую производную, заменяется силой, величина которой в каждый момент времени определяется по следующей формуле:

$$\bar{F}_{k+1,k-1} = k_s \frac{L_{k-1,k} + L_{k,k+1} - L_{k-1,k+1}}{L_{k-1,k} + L_{k,k+1}}, \quad (1)$$

где k_s – коэффициент изгибной жесткости, Н; k – номер узла сетки численного решения уравнений ($k = 0, 1, 2, \dots, N-1, N$), N – количество узлов разбиения по длине провода; L – длина соответствующего участка, м.

При этом применяется более устойчивая неявная схема численного решения, при использовании которой конечно-разностные уравнения сводятся к векторно-матричным уравнениям следующего вида:

$$C\bar{U}_{k+1} + B\bar{U}_k + C\bar{U}_{k-1} = \bar{D}, \quad (2)$$

где $\bar{U}$ – матрица-вектор координат провода на $(t+1)$ -м временном слое; C и B – матрицы коэффициентов; $\bar{D}$ – матрица правых частей уравнений.

Для решения уравнений (2) применяется матричная прогонка. Выражения для матриц прогонки имеют вид:

$$E_k = -(A + E_{k-1})^{-1}; \quad (3)$$

$$\bar{H}_k = (A + E_{k-1})^{-1} (\bar{F} - \bar{H}_{k-1}) = E_k (\bar{H}_{k-1} - \bar{F}),$$

где A и $\bar{F}$ – матрицы коэффициентов; $A = C^{-1}B$ и $\bar{F} = C^{-1}\bar{D}$.

Координаты провода на $(t + 1)$ -м слое сетки рассчитываются по выражению

$$\bar{U}_k = E_k \bar{U}_{k+1} + \bar{H}_k. \quad (4)$$

Разработанный метод численного решения уравнений движения провода с использованием неявной схемы реализован в КП FLEBUS, работающей в операционной среде WINDOWS [5]. Для оценки достоверности результатов расчета по компьютерной программе FLEBUS проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных [5]. В качестве экспериментальных данных использованы результаты испытаний на тестовом пролете LABORELEC [3], рекомендованные СИГРЭ для сравнительной оценки программных средств.

Для иллюстрации влияния жесткости провода в уравнениях движения проводников на ход компьютерного расчета на рис. 1 приведены диаграммы тяжений в спуске провода экспериментального пролета LABORELEC с учетом и без учета его жесткости на изгиб. Всплески и провалы тяжения на рис. 1а, возникающие в результате изломов провода, указывают на нарушения устойчивости численного решения, которые в некоторых случаях могут привести к аварийному останову расчета по программе.

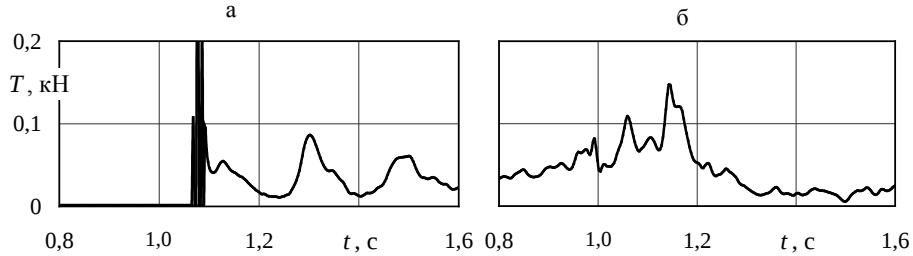


Рис. 1. Динамика тяжения в спуске восточного провода экспериментального пролета LABORELEC: а – без учета жесткости провода спуска; б – с учетом

Разработанная КП пригодна для расчета движения гибких шин со спусками в пролетах любой пространственной конфигурации. Путем вычислительного эксперимента по КП получены токи электродинамической стойкости пролетов типовых ОРУ 110–330 кВ с гибкой ошиновкой [6]. В качестве тока электродинамической стойкости гибких шин $I_{\text{дин}}$ принимался ток, при котором

$$a_{\text{min расч}} = a_{\text{min доп}}, \quad (5)$$

где $a_{\text{min доп}}$ – нормированное ПУЭ минимальное допустимое расстояние между соседними фазами в момент их наибольшего сближения при и после КЗ, м; $a_{\text{min расч}}$ – расчетное расстояние между соседними фазами в точках их наибольшего сближения, автоматически определяемое КП.

Как и ожидалось, наименьшей электродинамической стойкостью обладают пролеты ячеек с $U_{\text{ном}} = 110$ кВ, ток электродинамической стойкости которых меньше 20 кА.

Токи $I_{\text{дин}}$ определены с учетом действующих на гибкие проводники климатических нагрузок (ветер, гололед). ПУЭ [1] нормируют сочетание указанных нагрузок, которые учитываются при проектировании. Для этого выполняется механический расчет гибких проводников в заданных климатических режимах. Расчет начального положения производится по разработанной на кафедре «Электрические станции» БНТУ КП MR21 [7], в которой учитываются все элементы пролета с гибкой ошиновкой, температура проводника, сила и направление ветра, толщина и плотность гололедных отложений. Вычислительным экспериментом с помощью пакета КП FLEBUS и MR21 определены расчетные сочетания климатических нагрузок и электродинамических усилий, при которых $a_{\text{min расч}}$ имеет наименьшую величину, а тяжения проводов максимальны. По этому критерию наиболее опасными климатическими режимами, предшествующими КЗ, могут считаться режим с максимальной температурой проводника и режим с максимальным скоростным напором ветра.

Разработанный метод позволяет не только определять параметры электродинамической стойкости гибкой ошиновки, но и пригоден для оценки способов ее повышения [6]. Как показано в [6], наиболее действенным техническим решением по ограничению размаха колебаний гибких проводников при КЗ является использование междуфазных изолирующих распорок.

Предлагаемый численный метод и КП позволяют достаточно точно решить задачу движения гибких проводов при КЗ при их различном пространственном расположении с учетом основных конструктивных элементов РУ в различных климатических режимах до КЗ. Однако численные методы позволяют найти только частное решение задачи динамики провода при КЗ, соответствующее одному набору исходных данных.

Для обобщения частных численных решений уравнений движения проводов при КЗ была использована безразмерная форма их записи. В процессе преобразования уравнения к безразмерному виду получены сочетания и комбинации параметров проводов, одинаковые для подобных решений уравнений, которые являются критериями подобия. Уравнения движения провода, представленного гибкой нитью с малой стрелой провеса [4], в режиме КЗ, записанные в безразмерной форме, имеют следующий вид:

$$T_* \frac{\partial^2 y_*}{\partial x_*^2} + \frac{f_3 l^2}{T_0 f_0} = \frac{\partial^2 y_*}{\partial t_*^2}; \quad T_* \frac{\partial^2 z_*}{\partial x_*^2} + \frac{p_z l^2}{T_0 f_0} = \frac{\partial^2 z_*}{\partial t_*^2}, \quad (6)$$

где $x_* = \frac{x}{l}$; $y_* = \frac{y}{f_0}$; $z_* = \frac{z}{f_0}$; $T_* = \frac{T(t)}{T_0}$; $t_* = \sqrt{\frac{T_0}{\rho l^2}} t$; l – длина пролета;

T_0 и f_0 – соответственно начальное тяжение и стрела провеса провода в пролете; p_z – удельная нагрузка от веса провода с учетом гололеда; ρ – масса единицы длины провода; f_3 – эквивалентное ЭДУ на единицу длины провода, находится через импульс электродинамического усилия

$$f_{\text{э}} = \frac{S^{(2)}}{lt_{\text{к}}}, \quad (7)$$

где $S^{(2)}$ – импульс ЭДУ двухфазного КЗ, Н·м; $t_{\text{к}}$ – продолжительность КЗ, с.

Из (6) определяется динамический критерий подобия

$$\pi_{\text{д}} = \frac{f_{\text{э}} l^2}{T_0 f_0}. \quad (8)$$

Комбинация параметров $\pi_{\text{д}}$ используется для обобщения частных численных решений по КП, так как для подобных решений она принимает одинаковые значения. На рис. 2–4 представлены обобщенные зависимости параметров электродинамической стойкости от динамического критерия подобия. Проверка достоверности проведена сопоставлением результатов, найденных с использованием зависимостей на рис. 2–4, и компьютерных расчетов (табл. 1).

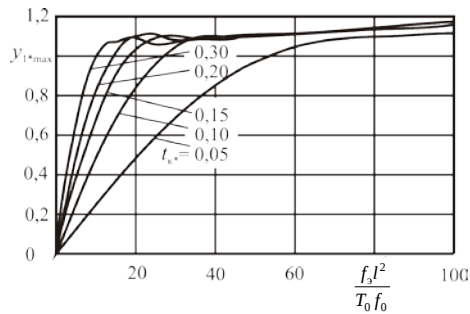


Рис. 2. Максимальные горизонтальные относительные отклонения средней точки провода для различных относительных продолжительностей КЗ

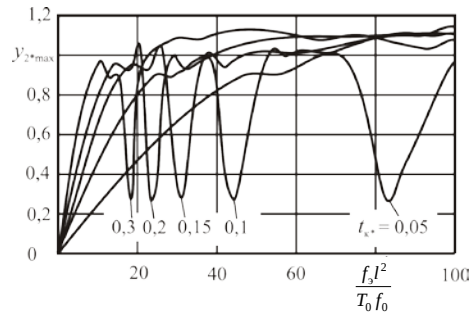


Рис. 3. Максимальные горизонтальные относительные отклонения средней точки провода при сближении проводов

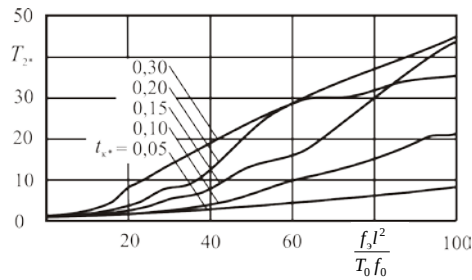


Рис. 4. Максимальные тяжения проводов при их отталкивании

Таблица 1

Сопоставление y_{1*max} , определенных по рис. 2 и КП

№ п/п	l , м	a , м	f_0 , м	Марка провода	$I_{\text{по}}$, кА	$t_{\text{к}*}$	y_{1*max} , (рис. 2)	y_{1*max} , КП	Δy_{1*max} , %
1	20	2,5	1,0	АС-185/24	10,0	0,15	0,900	0,900	0,00
2	27,5	2,5	1,38	АС-500/27	20,0	0,1	0,990	0,999	0,90
3	30	4,0	1,5	АС-500/27	25,0	0,11	1,109	1,102	0,63
4	50	4,0	2,0	АС-600/72	20,0	0,1	0,525	0,524	0,19
5	60	4,0	2,4	АС-300/39	25,0	0,2	1,060	1,069	0,84

Графики на рис. 2–4 составлены для заданных краевых условий, которые предполагают, что точки подвеса провода находятся на одной высоте. В такой постановке задачи они пригодны для определения максимальных отклонений и тяжений проводов по заданным геометрическим размерам, начальным тяжениям проводов и характеристикам КЗ для горизонтальных участков гибкой ошиновки между электрическими аппаратами.

Для пролетов гибкой ошиновки, содержащих натяжные гирлянды изоляторов и не имеющих разности высот подвеса, разработан упрощенный явный метод определения параметров электродинамической стойкости, не требующий обращения к программным средствам вычисления и в большинстве случаев дающий удовлетворительный результат. Такой упрощенный метод удобен для проектных расчетов и используется российскими и зарубежными специалистами при составлении методических указаний на расчет электродинамического действия токов КЗ. Отличительной характеристикой предлагаемого метода является широкое использование результатов вычислительного эксперимента по КП, анализ которых позволил более полно выявить закономерности электродинамического взаимодействия гибких проводников и улучшить разрабатываемый метод. В основу данного метода расчета электродинамической стойкости, как и в [2, 3], положена расчетная модель провода в виде физического маятника. В отличие от [2, 3] при выводе явных формул для расчета параметров электродинамической стойкости используются интегральный и энергетический принципы механики, в соответствии с которыми получена формула для нахождения максимального отклонения провода в середине пролета

$$y_{\max} = \sqrt{(h + h_k)(2f_0 - h - h_k)}, \quad (9)$$

где h и h_k (рис. 5) зависят от импульса ЭДУ $\bar{S}$. При $h + h_k > f_0$, $y_{\max} = f_0$.

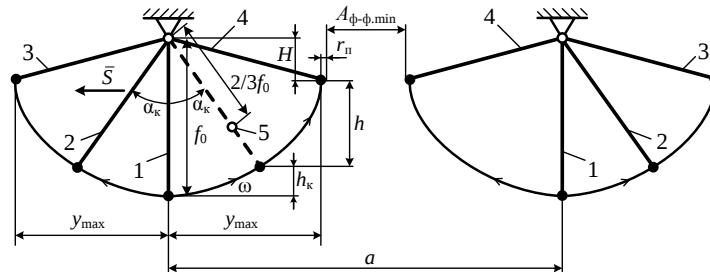


Рис. 5. Поясняющая схема для расчета отклонений проводов: 1 – положение провода до КЗ; 2 – в момент отключения тока КЗ ($t = t_k$); 3 – в момент максимального отклонения; 4 – в момент максимального сближения соседних фаз; 5 – положение центра масс провода

Входящие в (9) параметры h и h_k определяются по следующим формулам:

$$h_k = f_0 \left(1 - \cos \left[0,75 \frac{v_k t_k}{f_0} \right] \right); \quad (10)$$

$$h = 0,092 v_k^2 = 0,092 \left(\frac{S^{(2)}}{\rho l} \right)^2. \quad (11)$$

Приведенная масса провода ρ , используемая в расчетах, определяется из условия равенства длины однородной нити с равномерно распределенной массой длине комбинированной нити с распределенными массами равной интенсивности и сосредоточенными нагрузками разной величины, приложенными в разных местах пролета [6].

Для учета увеличения $y_{\max}$, обусловленного изменением формы кривой провисания провода с гирляндами изоляторов и его искривлением и вытяжкой при КЗ, в расчетную формулу вводится коэффициент формы k_{ϕ}

$$y_{1\max} = k_{\phi} y_{\max} \quad (12)$$

Величины коэффициентов k_{ϕ} имеют различные значения для разных длин пролетов, гирлянд изоляторов и определяются по диаграммам, построенным для пролетов типовых ОРУ с использованием КП (рис. 7). Результаты расчетов с использованием диаграмм коррелируют с численными расчетами по КП.

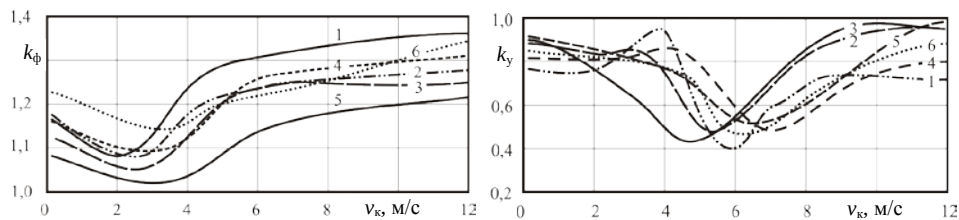


Рис. 6. Поправочные коэффициенты k_{ϕ} и k_y для пролетов типовых ОРУ 110–330 кВ в функции скорости провода v_k при КЗ: 1 – $U_{\text{ном}} = 110$ кВ, $l = 14,5$ м; 2 – 110 кВ, 20 м; 3 – 110 кВ, 27,5 м; 4 – 220 кВ, 30,8 м; 5 – 220 кВ, 40,5 м; 6 – 330 кВ, $l = 48$ м

Существуют три типичные траектории движения проводов при коротком замыкании (рис. 7), для которых определяющим фактором является угол максимального отклонения плоскости провода $\alpha_{\max}$ [3]. Из указанных траекторий движения проводов видно, что при наиболее частом случае КЗ, когда $70^\circ \leq \alpha_{\max} < 180^\circ$, провод достигает своего наивысшего положения и практически отвесно падает вниз. При этом максимальные отклонения проводов при их сближении после отключения КЗ $y_{2\max}$ могут быть значительно меньше, чем при отталкивании. Для повышения точности расчета в этом случае вводится коэффициент уменьшения k_y , величина которого определяется по диаграммам на рис. 6. Таким образом:

$$y_{2\max} = k_{\phi} k_y y_{\max} \quad (13)$$

Для ориентировочных расчетов получена формула для определения тока электродинамической стойкости пролета гибкой ошиновки, не имеющего отпайки к электрическим аппаратам. Она базируется на использовании основного условия проверки сближения проводов

$$A_{\phi-\phi} - 2(y_{2\max} + r_{\pi}) \geq A_{\phi-\phi, \text{доп}}, \quad (14)$$

где $A_{\phi-\phi}$ – расстояние между соседними фазами в режиме, предшествующем КЗ, м; r_{π} – радиус провода или расщепления фазы, м.

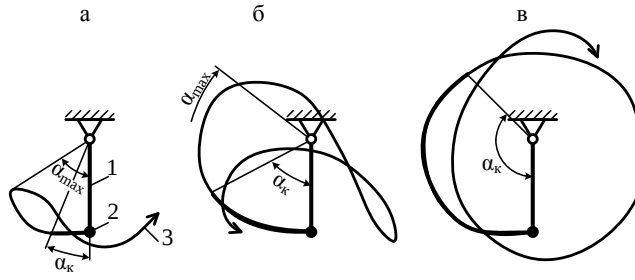


Рис. 7. Типичные траектории движения средней точки провода (разрез перпендикулярно пролету): а – $\alpha_{\max} < 70^\circ$; б – $-70^\circ \leq \alpha_{\max} < 180^\circ$; в – $\alpha_{\max} \geq 180^\circ$; 1 – статическое положение провода; 2 – средняя точка провода; 3 – траектория движения средней точки

Из (14) выражение для допустимых горизонтальных отклонений ($y_{2\max} = y_{\text{доп}}$) имеет вид

$$y_{\text{доп}} = 0,5(A_{\Phi-\Phi} - A_{\Phi-\Phi.\text{доп}}) - r_{\text{п}}. \quad (15)$$

Из уравнения энергетического баланса получено выражение для допустимого импульса ЭДУ [7], соответствующего $y_{\text{доп}}$:

$$S_{\text{доп}}^{(2)} = 3,3\rho l \sqrt{f_0 \cos \alpha_k - \sqrt{f_0^2 - y_{\text{доп}}'^2}}. \quad (16)$$

Отсюда ток электродинамической стойкости

$$I_{\text{дин}} = \sqrt{\frac{5S_{\text{доп}}^{(2)} a_{\text{ср}}}{l(t_k + T_a)}}. \quad (17)$$

Учет удерживающего влияния спусков на сближение гибких шин и взаимодействия спусков между собой в явном виде затруднителен. При наличии спусков рекомендуется использовать для расчетов КП. Для ориентировочной оценки влияния спусков на сближение гибких шин предлагается упрощенный подход, который базируется только на геометрических размерах шин и спусков и не требует учета параметров КЗ. Он позволяет определить предельно возможные отклонения и сближения гибких шин при наличии спусков без обращения к компьютеру. Под действием ЭДУ при некоторых токах КЗ гибкие проводники с отпайками достигают своих предельных отклонений $y_{\max}$, которые затем не изменяются с увеличением тока КЗ. При этом на разных стадиях своего движения проводники принимают характерные формы, показанные на рис. 8.

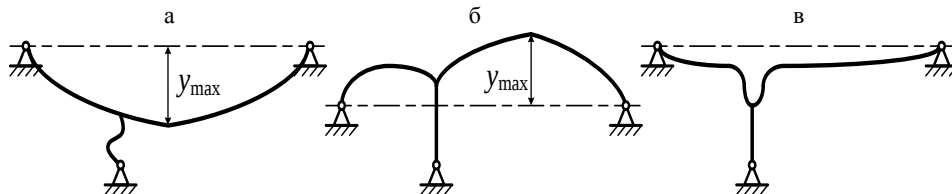


Рис. 8. Характерные формы гибких проводников с отпайками на разных стадиях их движения при КЗ

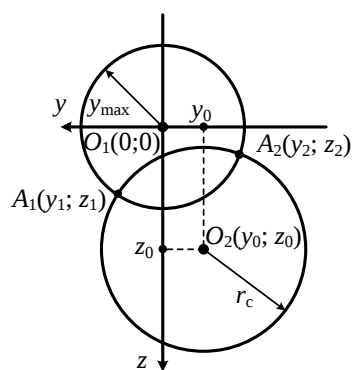


Рис. 9. К определению предельных отклонений

Исходя из этого по известным геометрическим соотношениям определяется область пересечения окружностей возможного перемещения фазного проводника и спуска в искомом сечении (рис. 9). Траектория движения фазного проводника ограничивается этой областью, а ее крайние точки представляют собой максимальные отклонения (рис. 9).

Важным элементом оценки электродинамической стойкости гибких проводников является нахождение их максимальных тяжений при КЗ,

которые могут выступать расчетными динамическими нагрузками для выбора и проверки на прочность строительных и опорных изолирующих конструкций в РУ. Выделяют три характерных сдвинутых во времени максимума тяжений, возникающих в проводах в результате электродинамического действия токов КЗ [4]. Для определения второго $T_{2\max}$ и третьего $T_{3\max}$ максимумов тяжений составляются уравнения энергетического баланса кинетической и потенциальной энергии провода и энергии его упругой деформации [8]. Из них получены явные формулы для расчета максимальных тяжений на двух стадиях движения проводов:

$$T_{2\max} = \sqrt{T_0^2 + 0,133 \frac{EA}{\rho} \left(\frac{S^{(2)}}{l} \right)^2}, \quad (18)$$

где E – модуль упругости материала провода, Н/м²; A – поперечное сечение провода, м²;

$$T_{3\max} = \cos^n \alpha_{\text{пад}} \sqrt{T_0^2 + 13,08 \cdot EA \rho f_0 (1 - \cos \alpha_{\max})}, \quad (19)$$

где n – показатель степени; $n = 3$, если $\alpha_{\max} \leq 100^\circ$; $n = 1$, если $\alpha_{\max} > 100^\circ$; $\alpha_{\text{пад}}$ – угол падения проводника.

С использованием динамического критерия подобия получены графики для определения угла $\alpha_{\max}$ для различных продолжительностей КЗ [9]. Угол $\alpha_{\text{пад}}$ находится из зависимости $\alpha_{\text{пад}} = f(\alpha_{\max})$, построенной с использованием КП [9].

ВЫВОДЫ

1. Разработан векторно-матричный метод расчета, учитывающий жесткость проводов спусков на изгиб, позволяющий определить мгновенные положения гибких шин и спусков в любой момент при КЗ и после его отключения и оценить способы повышения электродинамической стойкости гибкой ошиновки РУ.

2. Составлено программное обеспечение, включающее КП FLEBUS и MR21. Выбраны расчетные условия КЗ и климатические нагрузки для определения параметров электродинамической стойкости гибкой ошиновки РУ.

3. Разработан упрощенный метод расчета параметров электродинамической стойкости, учитывающий гирлянды изоляторов в пролете, гибкость опорных конструкций и изменение формы проводника при КЗ, достоверность расчетов по которому подтверждена сравнением с компьютерными расчетами. Определены поправочные коэффициенты, повышающие точность упрощенного метода.

4. Разработанные методы расчета и программное обеспечение могут быть положены в основу методических указаний по расчету электродинамического действия токов КЗ на гибкую ошиновку РУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
2. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. ГОСТ 30323–95. – Введ. 01.03.1999. – Минск, 1999. – 57 с.
3. The mechanical effects of short-circuit currents in open-air substations (rigid or flexible bus-bars). – Paris, 1996. – 90 p. – (Preprint / CIGRE; Brochure № 105. Working Group 23–11, SC 23.)
4. 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.
5. Пономаренко, Е. Г. Расчет электродинамической стойкости гибкой ошиновки распределительных устройств с применением неявной схемы / Е. Г. Пономаренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2008. – № 5. – С. 34–45.
6. Сергей, И. И. Численный анализ токов электродинамической стойкости гибких проводов электроустановок и способов их повышения / И. И. Сергей, Е. Г. Пономаренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 1. – С. 10–17.
7. Сергей, И. И. Оценка сближения проводов распределительных устройств электростанций по допустимому импульсу электродинамических усилий / И. И. Сергей, Е. Г. Пономаренко, Саммур Ваиль Махмуд // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 4. – С. 5–9.
8. Сергей, И. И. Упрощенный расчет максимальных тяжений проводов на двух стадиях их движения при коротком замыкании / И. И. Сергей, А. П. Андрукевич, Е. Г. Пономаренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 6. – С. 12–16.
9. Сергей, И. И. Упрощенный расчет максимального тяжения проводов при коротком замыкании / И. И. Сергей, А. П. Андрукевич // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2007. – № 6. – С. 5–11.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 16.09.2010