

Рис. 2. Динамика тяжения в точке крепления ошиновки к portalу (ток к.з. — 29,7 кА, продолжительность к.з. — 0,8 с, длина пролета — 40 м, междуфазное расстояние — 2,5 м, провод медный — 324 мм², начальное тяжение — 665 даН, гирлянда: длина — 1,54 м, вес — 52,3 дан); сплошная линия — опытная кривая; штриховая — расчетная (с учетом затухания); штрихпунктирная — расчетная (без учета затухания).

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелюк М.И., Сергей И.И. Влияние расщепления фаз гибкой ошиновки ОРУ на динамику ее параметров при коротких замыканиях. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1981, № 4, с. 3—9.
2. Расчет монтажных напряжений и стрел провеса проводов и тросов воздушных линий с учетом остаточных деформаций/А.С.Зеличенко, Л.М.Кесельман, И.М.Коляков, В.Г.Хотинский. — Электрические станции, 1978, № 2, с. 69—71.
3. Стрелюк М.И., Сергей И.И. О численном решении уравнений движения гибких проводов ОРУ под воздействием электродинамических усилий. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1977, № 12, с. 17—22.
4. Lilien I.L., Geradin M., Pirotte P. Sollicitations électrodynamiques dans les postes lors de défauts. — Can. Commun. and Power Conf., Montreal, 1980. — New York, 1980, p. 192—195.

УДК 621.316.35.064.1

М.И.СТРЕЛЮК, канд.техн.наук, Ю.В.БЛАДЬКО,
И.И.СЕРГЕЙ, канд.техн.наук (БПИ)

РАСЧЕТ СТАТИКИ ГИБКОЙ ОШИНОВКИ ОРУ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ АППАРАТАМ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В основу метода расчета электродинамической стойкости гибкой ошиновки с учетом конструктивных элементов ОРУ положены векторно-параметрические уравнения динамики гибкой упругой

нити [1]. Эти уравнения являются нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных, решение которых возможно при известных начальных и краевых условиях.

Расчет начальных условий сводится к численному решению нелинейных дифференциальных уравнений статики гибкой упругой нити, полученных из уравнений динамики при исключении членов, содержащих производные по времени. Применение разностного метода приводит к решению системы нелинейных конечно-разностных уравнений с помощью вложенных друг в друга итераций на ЦВМ. Сходимость этого итерационного процесса зависит от близости начального приближения к решению задачи. Такое приближение можно получить на основе представления проводов и гирлянд изоляторов гибкой нерастяжимой нитью.

Известно общее решение в векторной форме дифференциальных уравнений статики произвольно расположенной в пространстве однородной нерастяжимой нити [2]. Частные решения этой задачи могут быть получены путем нахождения по заданным граничным условиям конкретных значений постоянных векторов интегрирования. Эти граничные условия для проводов ОРУ и ЛЭП обычно задаются: 1) модулем минимального тяжения и граничными векторами (рис. 1); 2) длиной провода и этими же граничными векторами. В [2] получено частное решение этой задачи в явном виде для первого случая задания граничных условий, соответствующих монтажным. Однако эти формулы непригодны для расчета пространственного положения проводов в различных режимах климатических воздействий, в которых тяжение является функцией приложенных

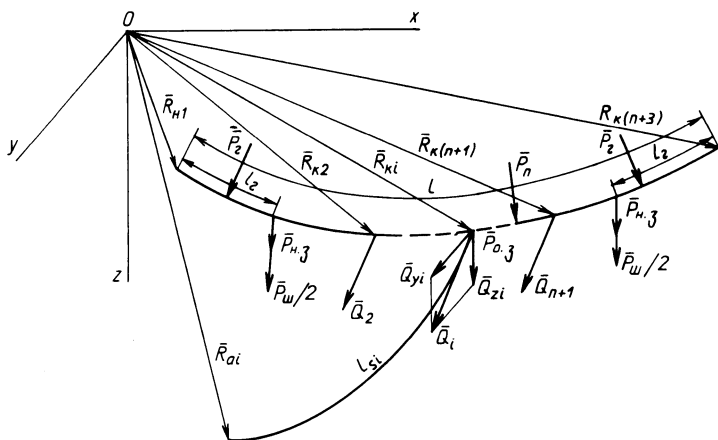


Рис. 1. Расчетная схема гибкой ошиновки с ответвлениями к электрическим аппаратам (\bar{P}_r, \bar{P}_n — погонные нагрузки на гирлянду и провод, l_r — длина гирлянды, $\bar{Q}_{yi}, \bar{Q}_{zi}$ — составляющие усилия \bar{Q}_i в горизонтальной и вертикальной плоскостях).

нагрузок. Кроме того, они не учитывают влияния конструктивных элементов ОРУ и ЛЭП.

Указанные обстоятельства потребовали решения поставленной задачи в общем виде. На основе расчетной модели в виде кусочно-однородной нерастяжимой нити были разработаны алгоритм и программа расчета на ЦВМ статики гибкой ошиновки ОРУ, не имеющей ответвлений в ячейку [3]. В соответствии с этим алгоритмом расчет гибкой ошиновки ОРУ производится в двух режимах климатических воздействий. В монтажном или исходном для проектирования режиме климатических нагрузок по заданному тяжению определяется длина гибкой системы "провод-гирлянды изоляторов". Она является основным исходным параметром для определения тяжения и положения гибкой ошиновки в режимах климатических нагрузок, отличных от монтажных.

В данной статье излагается методика расчета статики гибкой ошиновки ОРУ с ответвлениями к электрическим аппаратам и приводится алгоритм его реализации на ЦВМ. Ответвления разбивают гибкую ошиновку ОРУ на однородные участки с распределенной нагрузкой разной интенсивности, в узлах сочленения которых приложены сосредоточенные силы (рис. 1). Каждый из этих участков описывается уравнениями вида [2]:

$$\left. \begin{aligned} \bar{R}_i &= \bar{R}_{ni} + \bar{a}_{1i} + \bar{A}_{1i} \operatorname{arcsh} \frac{p_i^2 s_i - \bar{a}_{0i} \bar{P}_i}{A_{2i}} - \frac{\bar{P}_i}{p_i^2} / \bar{a}_{0i} - \bar{P}_i s_i / , \\ \bar{T}_i &= \bar{a}_{0i} - \bar{P}_i s_i , \quad i = 1, 2, \dots, (n+3), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где

$$\bar{A}_{1i} = \frac{1}{\bar{P}_i} (\bar{a}_{0i} - \frac{\bar{a}_{0i} \bar{P}_i}{p_i^2} \bar{P}_i); \quad A_{2i} = \sqrt{a_{0i}^2 p_i^2 - (\bar{a}_{0i} \bar{P}_i)^2}; \quad 0 \leq s_i \leq l_i.$$

Здесь l_i — длина i -го участка гибкой ошиновки; n — количество ответвлений.

Дополним систему (1) уравнениями равновесия ответвительных и натяжных зажимов. Для этого заменим действие проводов и гирлянд изоляторов на зажимы реакциями связей. При принятой расчетной модели проводов и гирлянд в виде абсолютно гибкой нити эти связи равны векторам тяжения в прилегающих к зажимам элементах проводов (рис. 1). Так как зажимы находятся в равновесии, то сумма приложенных к ним сил равна нулю:

$$\left. \begin{aligned} \bar{T}_{n(2)} - \bar{T}_{k(1)} + \bar{P}_{n,3} + \bar{P}_{ш}/2 &= 0, \\ -\bar{T}_{k(i)} + \bar{T}_{n(i+1)} + \bar{P}_{o,3} + \bar{Q}_i &= 0, \quad i = 2, 3, \dots, n+1, \\ -\bar{T}_{k(n+2)} + \bar{T}_{n(n+3)} + \bar{P}_{n,3} + \bar{P}_{ш}/2 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\bar{T}_{n(i)}$ и $\bar{T}_{k(i)}$ — векторы тяжения в прилегающих к зажимам элементах проводов и гирлянд; $\bar{P}_{n,3}$ и $\bar{P}_{o,3}$ — силы тяжести натяж-

ных и ответвительных зажимов; $\bar{P}_{\text{ш}}$ — сила тяжести шлейфа; \bar{Q}_i — сосредоточенные нагрузки, обусловленные действием проводов ответвлений.

Провода ответвлений, как и сборные шины, представляются в расчетах абсолютно гибкой нитью. Поэтому силы Q_i равны тяжести спусков в точках их крепления к сборным шинам. Известным параметром для спуска является его длина, а также координаты крепления его концов к аппарату. Этот факт однозначно определяет выбор граничных условий для ответвления.

Из уравнений (1) следует, что вектор тяжения в начале ответвления равен постоянному вектору интегрирования \bar{a}_0 ($s = 0$). Подставляя последовательно в (1) граничные условия по концам ответвления, после ряда преобразований получим формулу для расчета сосредоточенной нагрузки \bar{Q}_i , которая равна постоянному вектору интегрирования \bar{a}_{0i} :

$$\bar{Q}_i = \frac{\bar{Q}_i \bar{P}_s}{P_s^2} + \frac{P_s [\bar{R}_{ai} - \bar{R}_{ki} - \frac{\bar{P}_s}{P_s^2} (|\bar{Q}_i| - \sqrt{Q_i^2 - 2(\bar{Q}_i \bar{P}_s)_{si} + P_{si}^2})]}{P_s^2} \cdot \frac{1}{\text{arcsh} \frac{P_{si}^2 - (\bar{Q}_i \bar{P}_s)}{A_{2i}} + \text{arcsh} \frac{\bar{Q}_i \bar{P}_s}{A_{2i}}}, \quad (3)$$

где \bar{P}_s — вектор суммарной распределенной нагрузки на единицу длины ответвления; \bar{R}_{ai} — радиус-векторы, описывающие положение в пространстве точек крепления спусков к электрическим аппаратам (рис. 1); \bar{R}_{ki} — радиус-векторы, описывающие положение точек крепления ответвлений к сборным шинам ОРУ.

Уравнение (3) является трансцендентным и при известных \bar{R}_{ki} решается методом итерации с улучшением сходимости по Вегстейну [4].

Входящие в (3) векторы \bar{R}_{ki} можно определить лишь из расчета сборных шин ОРУ. Будем считать известными длины участков сборных шин и граничные векторы \bar{R}_{n1} и $\bar{R}_{k(n+3)}$ (рис. 1). Запишем систему уравнений (1) для граничных точек каждого участка сборных шин. В результате получим систему $2(n+3)$ векторных уравнений относительно $2(n+3)$ неизвестных постоянных векторов интегрирования \bar{a}_{0i} , \bar{a}_{1i} и $(n+2)$ векторов \bar{R}_{ki} (рис. 1). Учтем также, что векторы тяжения по концам участков равны:

$$T_{ni} = \bar{a}_{0i}; T_{ki} = \bar{a}_{0i} - \bar{P}_i l_i. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2), получим систему из $(n+2)$ уравнений относительно $(n+3)$ постоянных векторов \bar{a}_{0i} . Преобразуем полученную систему уравнений к более удобному для использования метода Вегстейна виду

$$\begin{aligned} \bar{a}_{0i} &= \bar{a}_{0(i+1)} + \bar{Q}_i + \bar{P}_{o,3} + \bar{P}_{i1}, \quad i = (n+1), n, \dots, 2, \\ \bar{a}_{0(n+3)} &= \bar{a}_{0(n+2)} - \bar{P}_{n,3} - \bar{P}_{ш}/2_{(n+2)} l_{(n+2)} l_{(n+2)}, \\ \bar{a}_{0(1)} &= \bar{a}_{0(2)} + \bar{P}_{n,3} + \bar{P}_{ш}/2 + \bar{P}_r l_r, \\ \bar{a}_{1(1)} &= \bar{R}_{n1} - \bar{A}_{1(1)} \operatorname{arcsh} \frac{-\bar{a}_{0(1)} \bar{P}_r}{A_{2(1)}} + \frac{\bar{P}_r}{p_r^2} |\bar{a}_{0(1)}|, \\ \bar{R}_{k1} &= \bar{a}_{1(1)} + \bar{A}_{1(1)} \operatorname{arcsh} \frac{p_r^2 l_r - \bar{a}_{0(1)} \bar{P}_r}{A_{2(1)}} - \frac{\bar{P}_r}{p_r^2} |\bar{T}_{k1}|, \\ &\dots \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{a}_{1i} &= \bar{R}_{k(i-1)} - \bar{A}_{1i} \operatorname{arcsh} \frac{-\bar{a}_{0i} \bar{P}_n}{A_{2i}} + \frac{\bar{P}_n}{p_n^2} |\bar{a}_{0i}|, \quad i = 2, \dots, (n+2); \\ \bar{R}_{ki} &= \bar{a}_{1i} + \bar{A}_{1i} \operatorname{arcsh} \frac{p_n^2 l_i - \bar{a}_{0i} \bar{P}_n}{A_{2i}} - \frac{\bar{P}_n}{p_n^2} |\bar{T}_{ki}|, \quad i = 2, \dots, (n+1), \\ &\dots \\ \bar{a}_{1(n+3)} &= \bar{R}_{k(n+3)} - \bar{A}_{1(n+3)} \operatorname{arcsh} \frac{p_r^2 l_r - \bar{a}_{0(n+3)} \bar{P}_r}{A_{2(n+3)}} + \frac{\bar{P}_r}{p_r^2} |\bar{T}_{k(n+3)}|, \\ \bar{R}_{k(n+2)} &= \bar{a}_{1(n+3)} + \bar{A}_{1(n+3)} \operatorname{arcsh} \frac{-\bar{a}_{0(n+3)} \bar{P}_r}{A_{2(n+3)}} - \frac{\bar{P}_r}{p_r^2} |\bar{a}_{0(n+3)}|, \\ &[\bar{R}_{k(n+2)} - \bar{a}_{1(n+2)} + \frac{\bar{P}_n}{p_n^2} |\bar{T}_{k(n+2)}|] P_n \\ \bar{a}_{0(n+2)} &= \frac{\operatorname{arcsh} \frac{p_n^2 l_{(n+2)} - \bar{a}_{0(n+2)} \bar{P}_n}{A_{2(n+2)}} + \frac{\bar{a}_{0(n+2)} \bar{P}_n}{p_n^2} \bar{P}_n}{\operatorname{arcsh} \frac{p_n^2 l_{(n+2)} - \bar{a}_{0(n+2)} \bar{P}_n}{A_{2(n+2)}}} \end{aligned} \right\} (5)$$

При такой последовательной записи уравнений системы (5) достаточно иметь первое приближение $\bar{a}_{0(n+2)}$, которое определяется по монтажному значению тяжения и эксплуатационным нагрузкам.

Подставим значения векторов \bar{R}_{ki} из (5) в (3) и уточним значения сосредоточенных нагрузок \bar{Q}_i . Этот итерационный процесс завершается при достижении заданной точности в определении нагрузок \bar{Q}_i или же векторов \bar{R}_{ki} .

Подставляя последовательно постоянные векторы \bar{a}_{0i} и \bar{a}_{1i} в (1) и изменяя s_i от 0 до l_i с определенным шагом, получим началь-

ные приближения координат и тяжений в виде таблицы чисел в функции заданных климатических нагрузок, граничных векторов и длины гибкой ошиновки ОРУ.

Длина гибкой ошиновки определяется монтажными условиями: тяжением и климатическими нагрузками в этом режиме. Подставим их в (5) и решим эту систему относительно длин участков l_i . Для этого выразим постоянные векторы через монтажное тяжение. Этот вектор для i -го участка провода, содержащего точку с минимальным тяжением, равен

$$\vec{a}_{0i} = T_0 \vec{\tau}' + \vec{P}_i s_0^i,$$

где $\vec{\tau}'$ — единичный вектор направления касательной в точке с минимальным тяжением; s_0^i — дуговое расстояние от начала участка до точки с минимальным тяжением.

Порядок расчета $\vec{\tau}'$ и s_0^i излагается в [2]. Выбор участка провода с минимальным тяжением производится приближенно. Провод представляется в виде балки, для которой записываются урав-

Т а б л и ц а 1.

Сравнение результатов расчета

Тяже- ние в режи- ме макси- маль- ной на- грузки	Режим максимальной нагрузки ($V = 12,5$ м/с, $c = 15$ мм, $\theta = -5$ °С)						Режим максимальной температуры ($V =$ $= 15$ м/с, $c = 0$, $\theta = 70$ °С)		
	стрела про- веса, м		рас- хож- де- ние Δf_z , %	горизонталь- ное отклоне- ние, м		рас- хож- де- ние Δf_y , %	тяжение, даН		расхож- дение ΔT , %
	по про- грам- ме	по ме- тоди- ке * [5]		по про- грам- ме	по ме- тоди- ке * [5]		по про- грамме	по ме- тоди- ке [5]	
2000	2,326	$\frac{2,397}{2,305}$	$\frac{3,1}{-0,90}$	0,696	$\frac{0,476}{0,705}$	$\frac{-32}{1,3}$	1198	1117	-6,7
1500	3,048	$\frac{3,197}{3,028}$	$\frac{4,9}{-0,66}$	0,878	$\frac{0,630}{0,888}$	$\frac{-28}{1,1}$	890	862	-3,1
1000	4,450	$\frac{4,795}{4,447}$	$\frac{7,8}{-0,07}$	1,221	$\frac{0,934}{1,234}$	$\frac{-23}{1,1}$	577	587	1,7
750	5,798	$\frac{6,393}{5,825}$	$\frac{10,3}{0,47}$	1,548	$\frac{1,230}{1,564}$	$\frac{-20}{1,0}$	418	444	6,2

* Для определения отклонений провода расчет усилий Q_y и Q_z выполнялся: в числителе — в соответствии с "Указаниями по механическому расчету проводов гибкой ошиновки ОРУ 35—500 кВ"; в знаменателе — по разработанной программе.

нения моментов, приложенных к гибкой ошиновке сил относительно точек ее крепления к порталам ОРУ. Из этих уравнений определяются опорные реакции, по которым затем можно определить поперечные силы, действующие по концам каждого участка провода. Участок, на котором эти силы меняют знак, и является искомым. В остальном алгоритм расчета длины гибкой ошиновки ОРУ с ответвлениями аналогичен изложенному в [3].

По разработанному алгоритму производится расчет начальных приближений для координат и тяжений при определении начальных условий для уравнений движения гибкой упругой нити.

Достоверность разработанного алгоритма оценивалась путем сравнения результатов расчета по программе и с получившей в проектной практике приближенной методикой расчета [5]. Сравнение полученных результатов показано в табл. 1.

Приведенные в табл. 1 результаты показывают, что разработанный алгоритм может быть использован самостоятельно для расчета пространственного положения гибкой ошиновки и тяжения в различных режимах климатических воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелюк М.И., Сергей И.И. Расчет электродинамических усилий в трехфазной системе гибких проводов. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1975, № 11, с. 110—114.
2. Кесельман Л.М., Денисов Ю.М. Векторный метод расчета тяжелой гибкой нити. — В кн.: Проектирование энергосистем и электрических сетей. Ташкент: УЗИНТИ, 1967, вып. III, с. 3—19.
3. Сергей И.И. Аналитическое решение уравнений статики гибких шин ОРУ с учетом гирлянд изоляторов. — В кн.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Минск: Выш. шк., 1979, вып. 9, с. 75—81.
4. Ланс Дж.Н. Численные методы для быстродействующих вычислительных машин. — М.: Изд-во иностр. лит., 1962. — 208 с.
5. Бошнякович А.Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП. — Л.: Энергия. Ленинград. отд-ние, 1975. — 248 с.

УДК 621.315.21:537.312.62

А.В.БЕРЕЖНОЙ,

В.Г.КОРОЛЮК, канд-ты техн.наук (БПИ)

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИИ ТОКОПРОВОДОВ ИЗ ОПЛЕТОК ДЛЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ С ГЛУБОКИМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Криокабельные линии имеют специфические отличия от обычных, поэтому расчет геометрии их токопроводов невозможно осуществить по известным методикам.

При проектировании системы электропередачи обычно известны расчетная нагрузка и номинальное напряжение. Если в качестве исходной информации принять расчетную нагрузку P и номинальное напряжение электропередачи U_n , тогда число проволок n_d диаметром d в оплетке внутренней токовой фазы коаксиала можно наметить с помощью уравнения