

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

$$n_a = \frac{4Pk_M}{jn_\Phi \pi d^2 U_K \cos \varphi}, \quad (1)$$

где k_M — коэффициент запаса по материалу; n_Φ — число токопроводящих фаз криокабеля; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности; j — плотность тока; U_K — напряжение коаксиала.

При включении кабеля по схеме с противоположным направлением токов в проводниках коаксиала (схема Кафки) $U_K = U_H / \sqrt{3}$; если кабель включается по схеме электропередачи со спаренными фазами [1], то $U_K = U_H$; при включении кабеля по схеме на режим противофазы токов и напряжений $U_K = 2U_H / \sqrt{3}$.

При выполнении оплеток из меди или алюминия j принимается из условий обеспечения заданных параметров режима хладагента по концам криокабельной линии. В случае использования оплеток из материалов с нулевым омическим сопротивлением при гелиевых температурах плотность тока j принимается равной критической.

Диаметр D токопровода, на который навивается оплетка, выполненная из m пасм и с числом проволок в пасме, равном n , можно определить из условия

$$\pi D = 0,5(nd + b)m \sin^{-1} \psi, \quad (2)$$

где ψ — угол наложения пасм; b — расстояние между пасмами одного направления.

Промышленность выпускает оплетки с плотностью Π (обычно $0,75 \leq \Pi \leq 0,98$ [2]). При выполнении условия

$$n_a = nm, \quad (3)$$

и задаваясь плотностью оплетки Π , расстояние b между пасмами можно оценить с помощью уравнения

$$b = nd \sqrt{1 - \Pi} (1 - \sqrt{1 - \Pi})^{-1}. \quad (4)$$

С учетом уравнений (4), (3) и (1) из условия (2) можно получить выражение для расчета внутреннего диаметра D'_a коаксиала под оплеткой:

$$D'_a = \frac{2Pk_M}{-jn_\Phi \pi^2 d U_K (1 - \sqrt{1 - \Pi}) \sin \psi \cos \varphi}$$

Тогда при наложении оплетки в один слой наружный диаметр внутреннего токопровода коаксиала опишется равенством

$$D_a = D'_a + 4d. \quad (5)$$

Внутренний диаметр D_B внешнего токопровода коаксиала можно определить из условия выбора электроизоляции. Наибольшая напряженность электрического поля имеет место на внешней поверх-

ности внутреннего проводника и определяется известным уравнением

$$E_M = \frac{2\sqrt{2} U_K}{D_a \ln D_B / D_a} \quad (6)$$

При выборе электроизоляции в криокабеле коаксиальной конструкции приходится считаться с такими факторами, как возможность возникновения внутренних перенапряжений, неоднородность изоляции по радиусу и длине коаксиала, с неровностью поверхности токопровода и др. Поэтому расчетная напряженность электрического поля E_p на поверхности внутреннего токопровода коаксиала должна быть не больше пробивной напряженности $E_{пр}$ электроизоляции, т.е.

$$E_p = \frac{2\sqrt{2} U_K k_u}{D_a \ln D_B / D_a} \leq E_{пр}, \quad (7)$$

где k_u — коэффициент запаса по электроизоляции.

Из условия (6) можно найти уравнение внутреннего диаметра внешнего токопровода коаксиала:

$$D_B = D_a \exp \left(\frac{2\sqrt{2} U_K k_u}{D_a E_{пр}} \right).$$

Если предположить, что оплетка внешнего токопровода коаксиала содержит то же число проволок n_a и пасм m , то же число проволок n диаметром d в каждой пасме, что и внутренний токопровод, тогда можно определить ожидаемое расстояние b между пасмами и угол наложения пасм ψ :

$$\psi = \arcsin \left(\frac{2\pi D_B}{mnd} - \frac{\sqrt{1-\Pi}}{1-\sqrt{1-\Pi}} \right); \quad b = \frac{2\pi D_B}{m} - nd \sin \psi.$$

Обычно в оплетках $b \geq 0,73d$. Поэтому толщина оплетки равна $2d$ и внешний диаметр токопровода D'_B круглого профиля может быть оценен с помощью формулы (5), а внешний диаметр коаксиала D — по равенству

$$D = D'_B + 2(\Delta_{II} + \Delta_{И}),$$

где $\Delta_{И}$ — толщина внешнего изоляционного слоя коаксиала,

$$\Delta_{И} = \frac{\sqrt{2} U k_u}{E_{пр}}.$$

Здесь U — напряжение между коаксиалами, зависит от схемы электропередачи и напряжения токовых фаз; Δ_{II} — толщина стабилизирующей подложки. При выполнении оплеток из меди или алюминия $\Delta_{II} = 0$.

Толщину стабилизирующей подложки Δ_{II} как внутреннего, так и внешнего токопроводов коаксиала рекомендуется принимать не

более двойной глубины проникновения δ магнитного поля в материал подложки. Если материал подложки с магнитной проницаемостью μ при температуре T имеет удельное сопротивление $\rho(T)$, то при частоте поля 50 Гц глубина проникновения δ описывается известным уравнением

$$\delta = 71,7 \sqrt{\frac{\rho(T)}{\mu}} .$$

Зная толщину подложки $\Delta_{\text{п}}$, можно определить внешний диаметр каркаса $D_{\text{к}}$, на который наносится подложка внутреннего токопровода коаксиала, $D_{\text{к}} = D_{\text{а}}' - \Delta_{\text{п}}$.

Геометрию шунтирующих подложек следует проверить по условию отвода тепла в режимах возмущений электропередачи

$$j_{\text{п}} \geq \frac{I_{\text{м}}^2 \rho(T)}{a F h (T_{\text{к}} - T_{\text{х}})} . \quad (7)$$

Здесь $I_{\text{м}}$ — максимальный ток, протекающий по токовой фазе в режиме возмущения электропередачи; F — поверхность шунтирующей подложки, омываемая хладагентом с температурой $T_{\text{х}}$; h — эффективный коэффициент теплоотдачи от поверхности подложки к хладагенту; a — кратность повышения температуры оплетки при протекании тока $I_{\text{м}}$ в подложке по отношению к критической температуре $T_{\text{к}}$ при нулевом токе (критерий Стекли). Для полностью стабилизированного токопровода $a < 1$.

В случае невыполнения условия (7) следует внести соответствующую коррекцию в геометрические размеры токовых фаз криокабеля, или принять в качестве шунтирующей подложки материал с меньшим значением $\rho(T)$, или предусмотреть мероприятия на интенсификацию отвода тепла из низкотемпературной зоны кабеля, что приводит к увеличению коэффициента h и разности температур $T_{\text{к}} - T_{\text{х}}$. Условия выбора материалов для шунтирующих подложек рассмотрены в нашей работе [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. П о с п е л о в Г.Е., Ф е д и н В.Т. Проектирование электрических сетей и систем. — Минск: Выш. шк., 1978. — 302 с. 2. Б е л о р у с с о в Н.И. Электрические кабели и провода. — М.: Энергия, 1971. — 512 с. 3. Б е р е ж н о й А.В., К о р о л ю к В.Г. Необходимые условия стабилизации сверхпроводящих токопроводов из оплеток с технологическим покрытием. — В кн.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Минск: Выш. шк., 1979, вып. 6, с. 50—52.