

Т Р У Д Ы

М Э И

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ
И ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

629



К РАСЧЕТУ СТОЙКОСТИ ИЗОЛЯТОРОВ И ШИН ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Канд. техн. наук доц. А. П. ДОЛИН,
асп. А. Н. ХОМЕНКО

В настоящее время расчет жесткой ошиновки на электродинамическую стойкость проводится для равномерно распределенных по длине шин нагрузок [1, 2]. Предполагается, что шины бесконечно длинные, влияние поворотов и ответвлений не учитывается. Ниже анализируются особенности расчета изоляторов и жестких шин при неравномерном распределении электродинамических нагрузок (ЭДН).

Шинные конструкции распределительных устройств 35 кВ и выше можно рассматривать как плоские или пространственные рамы. Расчет колебаний таких рам может быть проведен численными методами, например путем решения системы дифференциальных уравнений методом разностных схем. Вместе с тем в ряде случаев целесообразно использовать более простую расчетную схему. Так, движение некоторых пролетов ошиновки заводского изготовления при коротком замыкании можно представить как колебания стержней с опертями или заделанными концами на неподвижных жестких опорах. Например, этой расчетной схеме отвечают пролеты сборных шин открытых распределительных устройств 500 кВ (разработчик институт Энергосетьпроект) при КЗ на ответвлениях, а также ошиновка нижнего яруса комплектных распределительных устройств блочного типа напряжением 110 кВ (КРУБ-110, разработчик институт Оргэнергострой) при КЗ за разъединителями.

Вынужденные поперечные колебания стержня на неподвижных жестких опорах описываются дифференциальным уравнением четвертого порядка в частных производных [3]

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \mu EJ \frac{\partial^5 y}{\partial t \partial x^4} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = q(x, t), \quad (1)$$

где y — прогиб шины, м; E — модуль упругости шины, Па; J — момент инерции, м⁴; t — время, с; m — погонная масса шины, кг/м; q — ЭДН, Н/м; $\mu = \delta / (\pi \Omega)$ — параметр затухания, с; δ — логарифмический декремент затухания; Ω — угловая частота собственных колебаний стержня — шины, рад/с.

Второе слагаемое в (1), характеризующее рассеяние энергии, может быть принято равным нулю при расчетах в нерезонансных областях шинных конструкций, а также без учета автоматического повторного включения на КЗ. В этом случае прогибы, нагрузки на опоры и механические напряжения в материале шин определяются с некоторым запасом.

Как правило, ЭДН, действующая при КЗ на элементы жесткой ошиновки сложной пространственной конфигурации, неравномерно распределена по длине. В каждой точке шины ЭДН изменяется во времени по модулю и направлению, оставаясь перпендикулярной оси проводника. Поэтому нагрузку удобно представить в виде геометрической суммы проекций на две плоскости: плоскость ν , проходящую через оси опор, и τ , перпендикулярную плоскости ν и проходящую через ось шины. Проекция вектора ЭДН на плоскости ν и τ изменяются во времени только по модулю. Значения этих составляющих для произвольной точки x элемента ошиновки с номером j определяются по формуле [4]

$$\bar{q}_{ji}(x, \psi, t) = \frac{\mu_0}{4\pi a} I_{mj}^2 \sum_{n=1}^6 \bar{Y}_{ni}(x, \psi) T_n(t), \quad (2)$$

где i — индекс плоскости ν или τ ; x — координата точки на оси j -го элемента, м; ψ — угол включения тока КЗ, рад; t — время, с; μ_0 — магнитная постоянная, Гн/м; a — минимальное междуфазное расстояние, м; I_{mj} — амплитуда периодической составляющей тока КЗ в j -м элементе, А; $T_n(t)$ — функции времени, равные $T_1 = 1$; $T_2 = e^{-2t/T_a}$; $T_3 = e^{-t/T_a} \cos \omega t$; $T_4 = e^{-t/T_a} \sin \omega t$; $T_5 = \cos 2\omega t$; $T_6 = \sin 2\omega t$; $\bar{Y}_{ni}(x, \psi) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^K \beta_k Z_{ki}(x) \bar{q}_{0ki} D_{nk}(\psi)$;

K — число токоведущих элементов шинной конструкции; $\beta_k = I_{mk}/I_{mj}$; Z_{ki} — функция, зависящая от геометрических размеров конструкции; \bar{q}_{0ki} — проекция единичного вектора ЭДН на плоскости ν или τ ; $D_{nk}(\psi)$ — функции, зависящие от вида КЗ, угла включения тока КЗ и фазы проводников.

При расчетах на стойкость неравномерно распределенную ЭДН, определяемую по (2), в каждой из базисных плоско-

стей удобно аппроксимировать достаточно простой кусочно-линейной функцией координаты x [4]

$$q_{ji}(x) \approx A_{jiv}x + B_{jiv}; \quad x_{(v-1)} \leq x \leq x_v; \quad v = 1, 2, \dots, V, \quad (3)$$

где

$$A_{jiv} = \frac{q_{ji}(x_v) - q_{ji}(x_{(v-1)})}{x_v - x_{(v-1)}};$$

$$B_{jiv} = q_{ji}(x_{(v-1)}) - A_{jiv}(x_{(v-1)}).$$

Здесь $q_{ji}(x_v)$ — ЭДН в точке с координатой x_v , определяемая по (2).

Решение уравнения (1) с учетом (2) и (3) в каждой из плоскостей ν или τ можно найти путем разложения в ряд по фундаментальным функциям

$$y_i(x, t) = \sum_{u=1}^{\infty} \theta_{ui}(t) \chi_u(x), \quad (4)$$

где $\chi_u(x)$ — фундаментальные функции, зависящие от способа крепления шины на опорах (граничных условий);

$$\theta_{ui}(t) = (m\Omega_u)^{-1} \int_1^t S_{ui}(\tau) \sin \Omega_u(t - \tau) d\tau —$$

функции времени;

$$\Omega_u = 2\pi f_u = \frac{r_u^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} — \quad (5)$$

собственные угловые частоты колебания шины, рад/с;

$$S_{ui}(\tau) = \frac{\int_0^l q_i(x, t) \chi_u(x) dx}{\int_0^l \chi_u^2(x) dx} \approx \frac{\sum_{v=1}^V \int_{x_{(v-1)}}^{x_v} (A_{jiv}x + B_{jiv}) \chi_u(x) dx}{\int_0^l \chi_u^2(x) dx};$$

f_u — собственные частоты колебания шины; r_u — корни характеристического уравнения колебания шины.

Опорные реакции в пролете и механические напряжения в материале шины при колебаниях в плоскости ν или τ определяются как

$$R_i(t) = EJ \frac{\partial^3 y_i}{\partial x^3} \Big|_{x=0, l}; \quad (6)$$

$$\sigma_i(x, t) = \frac{M_i}{W_i} = \frac{EJ}{W_i} \frac{\partial^2 y_i}{\partial x^2}, \quad (7)$$

где M_i — изгибающий момент в плоскости ν или τ , Н·м; W_i — момент сопротивления поперечного сечения шины, м³, при колебании в плоскости ν или τ .

Выражения (4), (6), (7) с учетом (2) могут быть приведены к виду

$$y_i = \frac{2 \cdot 10^{-7} l}{aC} I_m^2 y_{*i}(\psi, x, t); \quad (8)$$

$$R_i = \gamma \frac{2 \cdot 10^{-7} l}{a} I_m^2 R_{*i}(\psi, t). \quad (9)$$

$$\sigma_i = \frac{2 \cdot 10^{-7} l^2}{\lambda a W} I_m^2 \sigma_{*i}(\psi, x, t), \quad (10)$$

где C — жесткость шины, зависящая от граничных условий; γ и $1/\lambda$ — коэффициенты, определяемые условием опирания шины на опоры; y_{*i} , R_{*i} и σ_{*i} — соответственно относительные прогиб, нагрузки и напряжения в материале шины.

Найдем максимальные результирующие прогибы шин и нагрузки на опоры

$$y_{max} = \max \sqrt{y_\nu^2(\psi, x, t) + y_\tau^2(\psi, x, t)};$$

$$R_{max} = \max \sqrt{R_\nu^2(\psi, t) + R_\tau^2(\psi, t)}.$$

Максимальные механические напряжения в шинах кольцевого и круглого сечений составляют

$$\sigma_{max} = \frac{\max \sqrt{M_\nu^2(\psi, x, t) + M_\tau^2(\psi, x, t)}}{W},$$

а шин прямоугольного и других несимметричных сечений с выступающими углами —

$$\sigma_{max} = \max \left(\frac{|M_\nu(x, \psi, t)|}{W_\nu} + \frac{|M_\tau(x, \psi, t)|}{W_\tau} \right),$$

В соответствии с (8)–(10) максимальные прогибы, нагрузки и напряжения определяются следующим образом:

$$y_{max} = \frac{2 \cdot 10^{-7} l}{aC} I_m^2 y_{*max} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} l}{aC} i_{уд}^2 \eta_y;$$

$$R_{max} = \gamma \frac{2 \cdot 10^{-7} l}{a} I_m^2 R_{*max} = \gamma \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} l}{a} i_{уд}^2 \eta_R;$$

$$\sigma_{max} = \frac{2 \cdot 10^{-7} l^2}{\lambda a W} I_m^2 \sigma_{*max} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} l^2}{\lambda a W} i_{уд}^2 \eta_\sigma,$$

где

$$\eta_y = \frac{\sqrt{3}}{2} y_{*max} k_{уд}^2; \quad \eta_R = \frac{\sqrt{3}}{2} R_{*max} k_{уд}^2;$$

$$\eta_\sigma = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_{*max} k_{уд}^2.$$

Здесь $k_{уд}$ — ударный коэффициент; $i_{уд}$ — ударный ток КЗ, А.

На основе разработанного алгоритма составлена ФОРТРАН-программа расчета EDS, реализованная на ЭВМ ЕС-1045. В качестве входных параметров использованы первая (основная) собственная частота колебания шины, вид крепления шины на изоляторах пролета, продолжительность КЗ, а также параметры ЭДН, предварительно рассчитанные по программе EDNAG [4]. В расчете определяются относительные значения прогибов шины, механических напряжений в материале, нагрузок на опоры в плоскостях ν и τ , их результирующие значения и динамические коэффициенты. Программа позволяет рассчитывать любые шинные конструкции, пролеты которых отвечают расчетной схеме балки на неподвижных (абсолютно жестких) опорах. Тестирование программы проводилось для конструкций с параллельными шинами (при равномерном распределении ЭДН) и при различных видах закрепления шины на изоляторах пролета.

В качестве примера на рис. 1 представлен фрагмент ошиновки распределительного устройства 110 кВ, нижний ярус которой (элемент AA') удовлетворяет расчетной схеме балки с жестким опиранием на одной и шарнирным на другой опоре. Элемент AA' фазы А длиной $l=3$ м имеет кольцевое сечение диаметром 80×4 мм, погонную массу $m=2,602$ кг/м, модуль упругости $E=7 \cdot 10^{10}$ Па. Первая частота собственных колебаний элемента, определенная по (5), равна 27 Гц.

Установлено, что результирующие ЭДН на элемент AA' достигают наибольшего значения при угле включения тока трехфазного КЗ $\psi \approx 1,57$ рад (рис. 2).

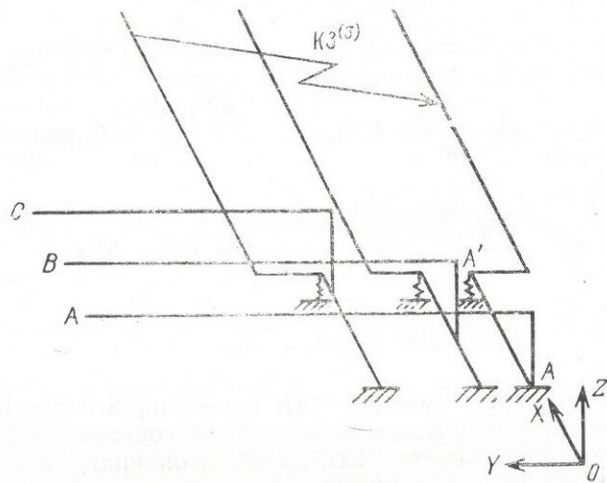


Рис. 1. Фрагмент расчетной схемы ошиновки и система координат

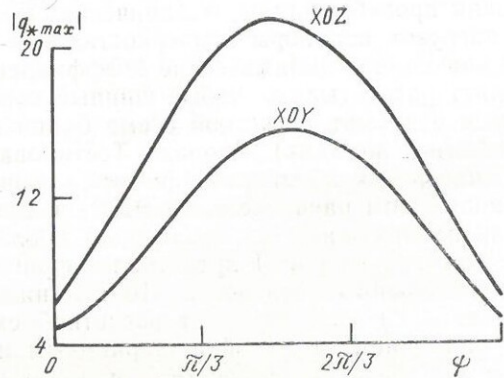


Рис. 2. Зависимость изменения абсолютных максимумов ЭДН в плоскостях XOY и XOZ от угла включения тока КЗ

На рис. 3 показаны распределения относительных ЭДН, прогиба и напряжений по длине элемента в плоскостях XOY и XOZ для момента времени возникновения абсолютных максимумов.

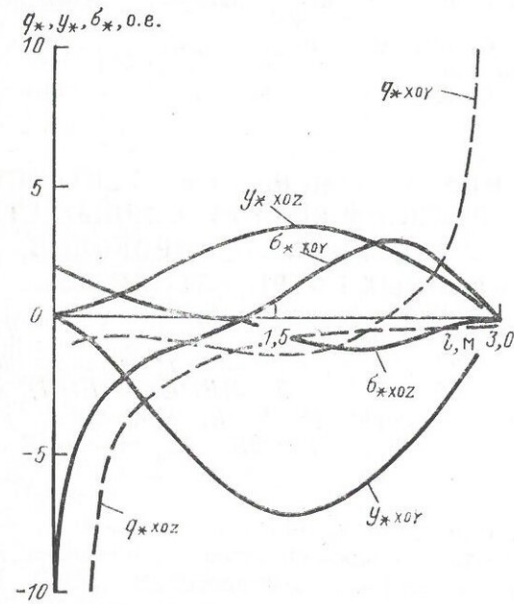


Рис. 3. Распределения по длине элемента AA' в плоскостях XOY и XOZ относительных значений ЭДН, прогиба, механических напряжений для момента времени возникновения абсолютных максимумов

При амплитуде периодической составляющей тока КЗ $I_m = 50$ кА, постоянной времени $T_a = 0,05$ с наибольшие значения прогиба элемента ошиновки, равные 56 мм, зафиксированы при времени 0,02 с на расстоянии 1,8 м от опоры с жестким заземлением. Наибольшие нагрузки на изоляторы с жестким и шарнирным опиранием шин достигали соответственно 6,72 и 13,3 кН, а напряжение в материале шин — 52 МПа. Экспериментально полученные наибольшие значения напряжения в материале шины при указанных параметрах тока КЗ составляли 48,5 МПа, что говорит о достаточно высокой точности предлагаемого метода расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долин А. П., Шонгин Г. Ф. Открытые распределительные устройства с жесткой ошиновкой. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Кудрявцев Е. П., Долин А. П. Расчет жесткой ошиновки распределительных устройств. М.: Энергия, 1981.
3. Филиппов А. П. Колебания деформируемых систем. М.: Машиностроение, 1970.
4. Долин А. П., Хоменко А. Н. Исследование параметров временных составляющих электродинамических нагрузок жестких шин с ответвлениями//Сб. науч. трудов. № 197. М.: Моск. энерг. ин-т. 1989. С. 96—103.

ВЛИЯНИЕ ТИПА И РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ВЫБОР ПРИВОДА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ — КРУПНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЭС

Канд. техн. наук зав. лаб. Ю. Д. БОРОДКИН, канд. техн. наук зав. сектором В. Я. ПЕЙСАХОВИЧ, мл. науч. сотр. Е. А. БУЛГАКОВА, вед. инж. С. Н. ЗОТОВ, нач. отдела Д. Л. ФАЙБИСОВИЧ

При проектировании крупных и энергоемких народнохозяйственных объектов производится их привязка к существующим электроэнергетическим системам (ЭЭС). В зависимости от структуры энергетических мощностей ЭЭС и мест размещения конкретных электростанций выбираются дислокация, а также основные энерготехнологические схемы намечаемых объектов. Однако указанной зависимости неотъемлемо присуща и обратная связь, т. е. способность энергоемких потребителей влиять на формирование ЭЭС. Взаимозависимость крупных потребителей и источников энергии необходимо учитывать при анализе перспективного развития электроэнергетики, а в ряде случаев — и всего топливно-энергетического комплекса страны.

В настоящей статье рассматриваются вопросы, связанные с энергообеспечением магистральных газопроводов, представляющих собой одновременно и источник, и потребитель энергоресурсов.

Советский Союз занимает ведущее место в мире по объему добычи природного газа и протяженности транспортирующих газопроводов. От мест добычи в центральные районы