

МОСКОВСКОМУ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ИНСТИТУТУ (ТУ) — 75 ЛЕТ

Московскому
энергетическому институту — 75 лет

Кафедре тепловых электрических
станций МЭИ — 75 лет

Технические решения
по регулированию электрической нагрузки
одновальных энергетических ГТУ.
Российский и зарубежный опыт

Расчет коэффициента теплопередачи
в испарителе кипящего типа на практике

О проблеме координации
уровней токов короткого замыкания
в энергосистемах

К развитию компьютерных технологий
в эксплуатации электрооборудования
электростанций

Еще раз о составляющих модели
отказа выключателя

Расчет электродинамической стойкости
и других параметров жесткой ошиновки ОРУ
высоких и сверхвысоких напряжений

Защита низковольтных электроустановок
с.н. электростанций от коротких замыканий

Технико-экономический анализ
параметров распределительных электрических
сетей городов с учетом их развития

Комплексные анализаторы
процессов функционирования
электрооборудования электростанций

К истории энергетики России

ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВО ЗА РУБЕЖОМ

Системные аварии
и меры по их предупреждению

ХРОНИКА

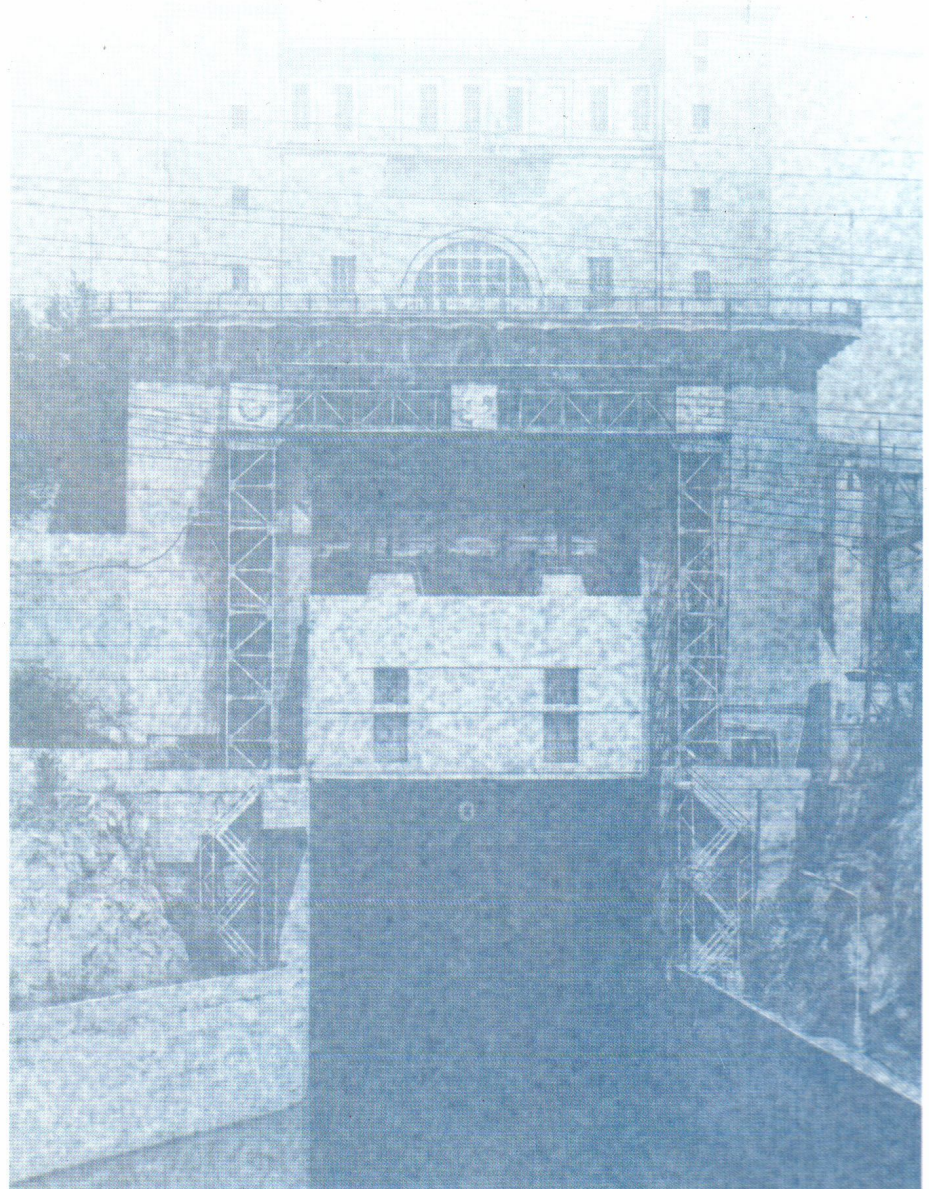
Научно-технический семинар
“Водно-химические режимы
и водоподготовка на тепловых
электростанциях”

Выставка
“Power Kazakhstan 2004”

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ISSN 0201-4564

2005 4



Расчет электродинамической стойкости и других параметров жесткой ошиновки ОРУ высоких и сверхвысоких напряжений

Долин А. П., канд. техн. наук, Кудрявцев Е. П., доктор техн. наук, Козина М. А., инж.

Московский энергетический институт (Технический университет) – НПО “Техносервис-Электро”

В последние годы в нашей стране и за рубежом в открытых распределительных устройствах (ОРУ) напряжением 110 кВ и выше наряду с гибкой ошиновкой все шире используются экономичные, прогрессивные конструкции с жесткими шинами.

Нагрузки на изоляторы и напряжения в шинах при коротких замыканиях (КЗ) определяются в результате расчета колебаний шинной конструкции под действием электродинамических нагрузок. Упругую систему шины – изоляторы можно рассматривать как раму. Расчет колебаний рамных систем весьма трудоемкая задача, требующая значительной аналитической проработки. Одним из основных параметров для расчета колебаний жесткой шины является частота собственных колебаний шины. Традиционный способ ее нахождения описан в [1 – 3], другой изложен далее.

В настоящей статье рассматриваются конструкции, где шинами служат горизонтальные ригели рамы, а поддерживающие шины изоляторы представляют собой ее вертикальные стойки. Обсуждаемые в статье расчетные схемы шинных конструкций изображены на рис. 1.

При КЗ достаточно “жесткие” шинные конструкции ОРУ совершают неустановившиеся колебательные движения, отвечающие всему спектру частот электродинамической нагрузки [4]. В конструкциях с большой упругой податливостью (в “податливых” конструкциях) колебания с частотами, соизмеримыми с превалирующими частотами возмущающей электродинамической нагрузки, несущественны, и комплекс шина – опоры ведет себя подобно упругой системе, внезапно нагруженной распределенными по длине шины постоянной во времени и апериодической составляющими электродинамической нагрузки. Если шины параллельны, то электродинамические нагрузки распределены вдоль шин равномерно.

Естественно, удобные для практического использования способы оценки электродинамической стойкости “жестких” и “податливых” рам (рис. 1) оказываются существенно различными. Расчеты и опыты показали, что действием периодических составляющих электродинамических сил на колебания рам можно пренебречь, если частота f_1 собственных колебаний рамы с формой, близкой к ее

прогибам под действием электродинамических сил, составляет не более 20% промышленной частоты переменного тока, т.е. примерно 10 Гц. Приступая к расчету электродинамической стойкости рамных конструкций ОРУ, необходимо прежде всего определить частоту собственных колебаний рамы f_1 . В случаях рамных конструкций, у которых параметр частоты r_1 [1] не изучен, для принятия инженерных решений при проектировании достаточно точным будет вычисление приближенного значения угловой собственной частоты рамы методом Релея [3, 5, 6]

$$\Omega_1 = 2\pi f_1 = \sqrt{U_{\max}/T_{\max}}, \quad (1)$$

где U_{\max} – потенциальная энергия деформации стержней расчетной рамы при максимальном отклонении ее в процессе собственных колебаний от положения равновесия, Н · м; T_{\max} – максимальная кинетическая энергия стержней расчетной рамы в процессе собственных колебаний с точностью до множителя Ω_1^2 , Н · м · с²; Ω_1 – угловая собственная частота, рад/с.

Энергии U_{\max} и T_{\max} вычисляются для принимаемой в расчете формы колебаний. Обычно ее принимают совпадающей с деформациями при статическом приложении к раме единичной нагрузки (в нашем случае электродинамической нагрузки на единицу длины шины $q_0 = 1$). Если учитывать только деформации изгиба стержней расчетной рамы, для энергий U_{\max} и T_{\max} будем иметь формулы

$$U_{\max} = 0,5 \sum_{i=1}^n \int_0^{l_i} (\bar{M}_{iq}^2 / (E_i J_i)) dz, \quad (2)$$

где \bar{M}_{iq} – изгибающие моменты в стержне с номером i при действии статически приложенной к шине единичной электродинамической нагрузки, Н · м; E_i и J_i – соответственно модуль упругости, Па, и изгибная жесткость i -го стержня рамы; l_i – длина i -го стержня, м; n – число стержней в расчетной раме;

$$T_{\max} = 0,5 \sum_{i=1}^n \int_0^{l_i} m_i \bar{Y}_{iq}^2 dz, \quad (3)$$

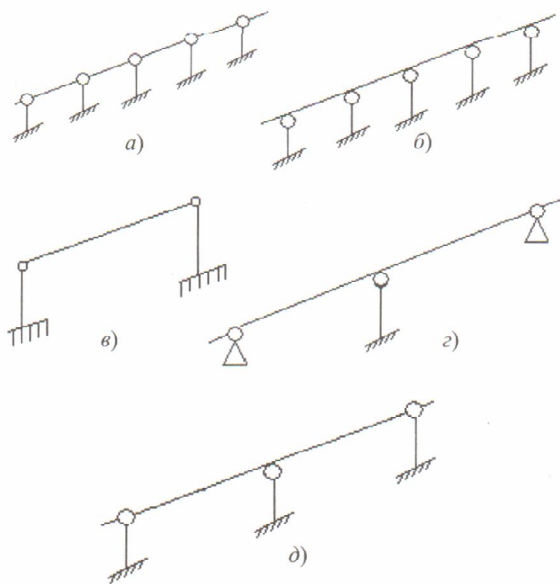


Рис. 1. Расчетные схемы шинных конструкций:

a – многопролетная шина на упругих опорах с равными пролетами, в сечениях шины над опорами врезаны шарниры; *б* – многопролетная неразрезная шина на упругих опорах с равными пролетами, *в* – шарнирно-опертая однопролетная шина на упругих опорах; *г* – двухпролетная неразрезная шина с абсолютно жесткими крайними и упругой средней опорой; *д* – двухпролетная неразрезная шина с упругими опорами

где m_i – масса стержня с номером i на единицу его длины; \bar{Y}_{iq} – прогибы стержня с номером i при действии на шину статически приложенной единичной электродинамической нагрузки q .

Формула (1) с учетом выражений (2) и (3) для равнопролетных конструкций приводится к традиционному виду [1, 2]

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E_{ш} J_{ш}}{m_{ш}}}, \quad (4)$$

где $E_{ш}$ – модуль упругости, Па; $J_{ш}$ – момент инерции, m^4 ; $m_{ш}$ – погонная масса шины, кг/м; l – длина пролета шины, м.

В качестве примера на рис. 2 построены кривые зависимости первой частоты собственных колебаний r_1 для шинных конструкций, изображенных соответственно на рис. 1, *г*, *д*. Кривые построены в зависимости от безразмерного параметра $C_{оп} l^3 / E_{ш} J_{ш}$ при различных значениях отношения $M_{оп} / m_{ш} l$ ($M_{оп} / m_{ш} l = 0, 2, 4, 7$), где $C_{оп}$ – жесткость опоры, которая для изоляционных опор может быть определена экспериментально; $M_{оп}$ – приведенная масса опоры, которая для опор с постоянными по длине погонными массами и жесткостью приближенно может быть принята равной

$$M_{оп} \approx M \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^2 \approx \frac{M}{4}, \quad (5)$$

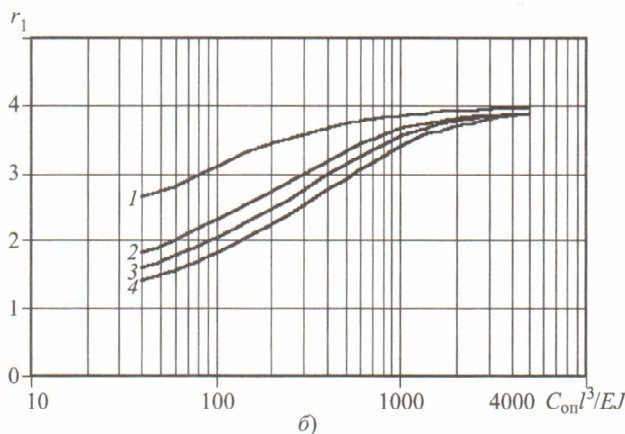
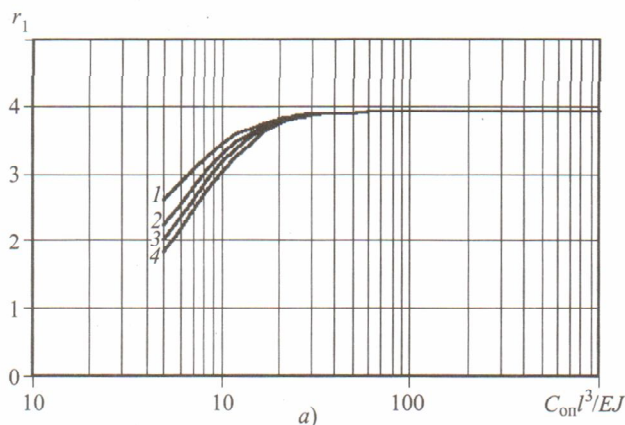


Рис. 2. Зависимости параметров первой частоты собственных колебаний r_1 системы шины – опоры (изоляторы) от $C_{оп} l^3 / EJ$ при различных значениях $M_{оп} / m_{ш} l$:

a – конструкция с двумя пролетами без шарнира на средней упругой опоре с неподвижными крайними шарнирными опорами (рис. 1, *г*); *б* – конструкция с двумя пролетами без шарнира на средней опоре с тремя одинаковыми упругими опорами (рис. 1, *д*); 1 – $M_{оп} / m_{ш} l = 0$; 2 – $M_{оп} / m_{ш} l = 2$; 3 – $M_{оп} / m_{ш} l = 4$; 4 – $M_{оп} / m_{ш} l = 7$

где M – масса опоры, кг; H_1 и H_2 – расстояние от основания опоры соответственно до центра массы опоры (изолятора) и до точки крепления шины к изолятору.

Кривые (рис. 2), полученные с использованием метода Релея, практически совпадают с точным решением задачи.

При $f_1 \geq 10$ Гц расчет электродинамической стойкости наиболее часто встречающихся типов конструкций регламентирован действующими документами [4]. Конструкции, не рассмотренные в нормативных документах, рассчитываются по методикам, имеющимся в литературе [1, 2]. Расчеты “жестких” шинных конструкций ОРУ ведутся с учетом всех составляющих электродинамической нагрузки.

Расчеты многопролетных “жестких” конструкций регулярной структуры (рис. 1, *a*, *б*, *г*, *д*) с шарнирным или неподвижным закреплением на одинаковых опорах – шинах производятся по методике [6], подробно разработанной для шинных линий с шинами – стержнями, лежащими на одинаковых невесомых упругоподатливых опорах с

приведенными точечными массами в местах соединения шин с опорами. Чтобы использование этой методики стало возможным, в расчетной схеме рамы опоры с распределенной массой заменяются на невесомые опоры с соответственно подобранными жесткостями и точечными массами, расположенными в местах крепления шин к опорам. Подобранные “приведенные” жесткости и массы должны обеспечивать равенство частот f_1 шинной конструкции и его расчетной схемы с сосредоточенными в точках расчетными массами опор. Рекомендации по определению приведенных параметров содержатся в [1].

Электродинамические нагрузки, возникающие при токах КЗ в общем случае, записываются в виде

$$q(x, t) = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2 \sum_{n=1}^6 D_n(x) T_n(t), \quad (6)$$

где a – расстояние между фазами, м; $I_m = \sqrt{2} I_{п0}$ – амплитуда периодической составляющей тока КЗ, А; $I_{п0}$ – действующее значение периодической составляющей тока КЗ, А; $D_n(x)$ – коэффициенты, зависящие от взаимного расположения проводников шин и угла включения тока КЗ; $T_n(t)$ – функции времени, равные

$$T_1 = 1; T_2 = e^{-t/T_a}; T_3 = e^{-t/T_a} \cos \omega t; \\ T_4 = e^{-t/T_a} \sin \omega t; T_5 = \cos 2\omega t; T_6 = \sin 2\omega t,$$

где t – время, с; ω – угловая частота тока; T_a – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, с.

Для параллельных шин значения D_1, \dots, D_6 остаются постоянными по длине проводников. Коэффициенты D_n , при которых электродинамические нагрузки достигают максимума, для ряда конструкций приводятся, например в [2].

Максимальные значения электродинамических нагрузок для параллельных шин можно представить в виде

$$q_{\max} = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2 \max(\sum_{n=1}^6 D_n T_n) \approx \frac{\alpha}{a} i_{уд}^2, \quad (7)$$

где q – электродинамическая нагрузка, Н/м; $\alpha = \sqrt{3} \cdot 10^{-7}$ Н/А² при трехфазном КЗ и $\alpha = 2 \cdot 10^{-7}$ при двухфазном КЗ; $i_{уд} = \sqrt{2} I_{п0} K_{уд}$ – ударный ток КЗ, А; $K_{уд}$ – ударный коэффициент.

В этом случае напряжения в материале шины (без учета собственного веса) и нагрузки (силы) на изоляторы при КЗ могут быть приведены к традиционному виду

$$\sigma_{\max} = \frac{\alpha l^2}{\lambda a W} i_{уд}^2 \eta; \quad (8)$$

$$R_{\max} = \beta \frac{\alpha l}{a} i_{уд}^2, \quad (9)$$

где β и λ – параметры, зависящие от условий опирания шин на изоляторы и пролета [1]; W – момент сопротивления поперечного сечения шины, м³ [2]; η – динамический коэффициент [2].

При $f_1 < 10$ Гц определяющими колебания конструкции будут экспоненциальная и постоянная составляющие электродинамической нагрузки.

Внезапное нагружение расчетной упругой конструкции постоянными во времени электродинамическими силами вызывает движение конструкции, подобное собственным колебаниям, со смещенным положением устойчивого равновесия. При собственных колебаниях смещения и деформации стержней расчетной конструкции меняются во времени по гармоническому закону.

Задание формы колебаний позволяет свести задачу о колебаниях упругой системы с бесконечно большим числом степеней свободы к задаче о колебаниях конструкции, обладающей только одной степенью свободы.

В этом случае изгибающие моменты $M_{эл}(t)$ в поперечных сечениях стержней конструкции

$$M_{эл}(t) = M_{эл.ст} q_{ст}(1 + \sin \Omega_1 t), \quad (10)$$

где $M_{эл.ст}$ – совокупность изгибающих моментов во всех стержнях расчетной рамы от статически приложенной единичной электродинамической нагрузки. В этом случае максимальное значение суммы $(1 + \sin \Omega_1 t)$, равное 2, в правой части формулы (10) является динамическим коэффициентом, отвечающим случаю внезапно приложенной нагрузки.

Расчетной постоянной во времени нагрузкой $q_{ст}$ в данном случае будет нагрузка, равная произведению постоянной составляющей электродинамической нагрузки и эквивалентного импульса от апериодической составляющей, т.е.

$$q_{ст} = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2 (D_1 + \Delta D) = \\ = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} I_m^2 \gamma D_1, \quad (11)$$

где D_1 – коэффициент при временной составляющей T_1 электродинамической нагрузки; $\gamma = (1 + \Delta D/D_1)$; ΔD определяется как импульс от апериодической составляющей электродинамической нагрузки за полупериод собственной частоты колебания $T/2 = 1/(2f_1)$

$$\Delta D = \frac{2D_2}{T} \int_0^{T/2} T_2(t) dt = \\ = T_a D_2 f_1 \left(1 - e^{-\frac{1}{f_1 T_a}} \right). \quad (12)$$

Для крайних фаз системы параллельных шин, расположенных в одной плоскости, при трехфазном КЗ $D_1 = 0,375$ и $D_2 = 0,808$ [2].

При продолжительности КЗ больше половины периода собственных колебаний конструкций с частотой f_1 расчетные изгибающие моменты от действия тока КЗ в произвольном стержне i шинной конструкции равны

$$M_{расч\ i} = 2\bar{M}_{эл.ст}q_{ст}. \quad (13)$$

Прочность шины круглого или кольцевого поперечного сечения при коротких замыканиях (с учетом собственного веса шины) будет обеспечена при выполнении во всех сечениях шины условия

$$\sigma_{max} = (M_{расч.ш}^2 + M_g^2)^{0,5} / W_{ш} \leq [\sigma], \quad (14)$$

где $M_{расч.ш}$ – расчетный изгибающий момент в шине от действия тока КЗ, Н · м; $M_g = m_{ш}gl^2/\lambda W$ – изгибающий момент от собственного веса шины, Н · м; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; $[\sigma]$ – допустимое напряжение в материале шины при изгибе, Па.

Прочность изоляционных опор при КЗ будет обеспечена при выполнении условия

$$R_{max} = (M_{расч.оп}/H) \leq [R], \quad (15)$$

где $M_{расч.оп}$ – расчетный изгибающий момент в изоляционных опорах от действия тока КЗ, Н · м; H – высота опоры (изолятора), м; $[R]$ – допустимая поперечная нагрузка на вершину изолятора, Н.

Пример. Определить наибольшие нагрузки на изоляционные опоры внутрирядковых связей ОРУ напряжением 330 кВ. Шинная конструкция отвечает расчетной схеме, изображенной на рис. 1, г. Конструкция выполнена трубами с внешним диаметром $D = 150$ мм и внутренним $d = 140$ мм. Шины изготовлены из сплава 1915Т (модуль упругости $E = 7 \cdot 10^{10}$ Па, плотность $\delta = 2770$ кг/м). Длина неразрезной шины 21 м. В середине, т.е. на расстоянии от крайней точки $l = 10,5$ м, шина опирается на упругую опору жесткостью $C_{оп} = 190$ кН/м и массой $M_{оп} = 270$ кг. Крайние опоры абсолютно жесткие. Расстояние между фазами $a = 3,5$ м. Трехфазный ток короткого замыкания $I_{п0} = 50$ кА, постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ $T_a = 0,1$ с.

Площадь поперечного сечения шины и момент инерции трубчатой шины

$$S = \pi(D^2 - d^2)/4 = 3,14(0,15^2 - 0,14^2)/4 = 0,00227 \text{ м}^2;$$

$$J = \pi(D^4 - d^4)/64 = 3,14(0,15^4 - 0,14^4)/64 = 5,99 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4.$$

Масса шины определяется по формуле

$$m_{ш} = \delta S = 2770 \cdot 0,00227 = 6,3 \text{ кг}.$$

Для того чтобы воспользоваться кривыми (рис. 2, а), необходимо определить параметры $C_{оп}l^3/(E_{ш}J_{ш})$ и $M_{оп}/(m_{ш}l)$:

$$C_{оп}l^3/(E_{ш}J_{ш}) = (190 \cdot 10^3 \cdot 10,5^3)/(7 \cdot 10^{10} \cdot 5,99 \cdot 10^{-6}) = 524,$$

$$M_{оп}/(m_{ш}l) = 270/(6,3 \cdot 10,5) = 4,08.$$

По кривым (рис. 2, а) определяем $r_1 = 3,9$.

По формуле (4) вычисляем основную частоту собственных колебаний шины

$$f_1 = \frac{3,9^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 10,5^2} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 5,99 \cdot 10^{-6}}{6,3}} = 5,6 \text{ Гц}.$$

Согласно выражению (15) из решения статически неопределимой задачи для равномерно распределенной по длине шины (рис. 1, г) при постоянной во времени нагрузке для центральной (упругой) опоры имеем

$$\frac{R_{ст}}{q_{ст}l} = \beta = \frac{5}{4 + 24E_{ш}J_{ш}/(C_{оп}l^3)} = 1,23. \quad (16)$$

При трехфазном КЗ коэффициенты электродинамических нагрузок расчетных крайних шин (фаз А и С) согласно [2] и уравнению (12) равны

$$D_1 = 0,375;$$

$$\Delta D = 0,1 \cdot 0,808 \cdot 5,6(1 - e^{-1/(5,6 \cdot 0,1)}) = 0,376.$$

Наибольшие нагрузки на среднюю (упругую) изоляционную опору в соответствии с уравнениями (15) и (16) определяются по формуле

$$\begin{aligned} R_{max} &= \beta \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} l_m (\sqrt{2}I_{п0})^2 (D_1 + \Delta D) \cdot 2 = \\ &= 1,23 \frac{2 \cdot 10^{-7}}{3,5} 10,5(\sqrt{2} \cdot 50)^2 \times \\ &\times 10^6 (0,375 + 0,376) \cdot 2 = 5500 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Сравним полученное значение R_{max} с результатами расчетов по формуле (9). Предварительно определяем ударный ток КЗ из формулы (7)

$$i_{уд} = \sqrt{2}I_{п0}(1 + e^{-0,01/T_a}) = \sqrt{2} \cdot 50 \cdot 1,9 = 134 \text{ кА}.$$

Далее по кривым, приведенным в [2], в зависимости от f_1 и T_a находим динамический коэффициент $\eta = 0,45$. Согласно уравнению (9) наибольшая нагрузка на среднюю опору

$$R'_{max} = (1,23 \cdot \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot 10,5 \cdot 134^2 \cdot 10^6 \cdot 0,45)/3,5 = 5200 \text{ Н}.$$

Таким образом, разница между R_{max} и R'_{max} составляет около 5%, следовательно, предложенная

методика вполне отвечает точности инженерных расчетов.

Выводы

1. Предлагаемая методика расчета позволяет проводить расчеты электродинамической стойкости жесткой ошиновки различного конструктивного исполнения, в том числе шинных конструкций ОРУ 330 – 750 кВ.

2. Разработанный инженерный подход значительно упрощает решение задачи по оценке электродинамической стойкости различных типов шинных конструкций с низкой частотой собственных колебаний, сохраняя при этом достаточно высокую точность решений.

3. Для жесткой ошиновки любого конструктивного исполнения оценку частот собственных колебаний удобно проводить методом Релея, позволя-

ющим получать значения с достаточной степенью точности.

Список литературы

1. Кудрявцев Е. П., Долин А. П. Расчет жесткой ошиновки распределительных устройств. М.: Энергия, 1981.
2. Долин А. П., Шонгин Г. Ф. Открытые распределительные устройства с жесткой ошиновкой. М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Кудрявцев Е. П. Колебания и прочность жестких шинных линий при коротких замыканиях. Механика управляемых систем, машин и механизмов. – Сборник научных трудов МЭИ, 1987, № 140.
4. ГОСТ Р 50254-92. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания. М.: Изд-во стандартов, 1993.
5. Болотин В. В. Вибрации в технике. Справочник. М.: Машиностроение, 1978, т. 1.
6. Биргер И. А., Панко Я. Г. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник. М.: Машиностроение, 1968, т. 3.

Защита низковольтных электроустановок с.н. электростанций от коротких замыканий

Беспалов А. В., Борисова Е. С., Гусев О. Ю., инженеры,
Гусев Ю. П., Старшинов В. А., кандидаты техн. наук

Московский энергетический институт (Технический университет)

Исторически сложилось так, что в последние десятилетия вопросам совершенствования электроустановок переменного тока напряжением 0,4 кВ собственных нужд (с.н.) электростанций уделялось недостаточно внимания со стороны отраслевой и вузовской науки. Увеличение единичных мощностей основного оборудования атомных, тепловых и гидравлических электростанций, ужесточение требований к качеству электроэнергии для питания новых систем управления технологическими процессами на электростанциях, усиление требований к надежности и живучести энергетических объектов и электроэнергетических систем в целом обуславливает необходимость поиска новых технических решений в организации системы электроснабжения с.н. электростанций. Опыт эксплуатации показывает, что гарантией высокого уровня надежности работы с.н. электростанций является обеспечение эффективной защиты электроустановок с.н. от коротких замыканий (КЗ). На действующих электростанциях значительная часть коротких замыканий имеет недопустимо большую продолжительность. Следствием таких замыканий являются пожары, повреждение оборудования, остановки энергетических блоков.

Можно выделить три основные причины неудовлетворительной работы защит низковольтных электроустановок. Первая – выбор защитных аппаратов и их уставок при проектировании ныне действующих электростанций выполнялся на основе упрощенных методик расчета токов КЗ, что приводило к завышению расчетных значений токов и, как следствие, к ошибкам в выборе уставок автоматических выключателей. В настоящее время эта проблема в основном решена: действуют новые государственные стандарты [1, 2], отражающие современную методику расчета токов КЗ; изданы отраслевые документы по расчету токов КЗ [3, 4]. В соответствии с рекомендациями нормативно-технических документов на кафедре электрических станций МЭИ разработана и более 10 лет повсеместно применяется компьютерная программа GUEXPRT. Все это позволяет учесть следующие наиболее существенные факторы, влияющие на результаты расчета токов КЗ: увеличение сопротивления кабелей, обусловленное нагревом их жил током КЗ; наличие в цепи короткого замыкания нелинейного сопротивления электрической дуги; влияние асинхронных двигателей; внутреннее сопротивление защитных аппаратов;