

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА и ордена ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ISSN 0234—9124



ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
И ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Сборник научных трудов

№ 197

Москва

1989

ЛИТЕРАТУРА

1. Гайснер А. Д., Тимченко В. Ф. Учет основных факторов повреждения при статистическом анализе надежности дальних линий электропередачи и применение его результатов // Электричество. 1974. № 4. С. 8—16.
2. Барг И. Г., Эдельман В. И. Воздушные линии электропередачи: Вопросы эксплуатации и надежности // М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Ушакова А. Д., Востросаблин А. А., Смольянинова Л. Н. Законы распределения уровней токов КЗ в сетях ЭЭС // Сб. науч. трудов. № 163. М.: Моск. энерг. ин-т. 1988. С. 47—51.

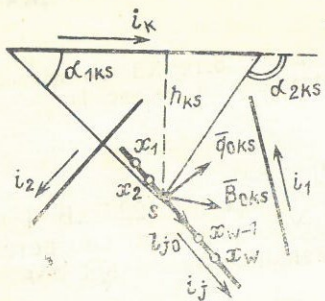
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВРЕМЕННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЖЕСТКИХ ШИН С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

Канд. техн. наук доц. А. П. ДОЛИН,
мл. науч. сотр. А. Н. ХОМЕНКО (Моск.
энерг. ин-т)

Расчет электродинамической стойкости жесткой ошиновки обычно выполняется для прямолинейных конструкций без учета ответвлений и поворотов шин, что в ряде случаев может приводить к существенной погрешности.

Для оценки прочности ошиновки при коротком замыкании (КЗ) предварительно необходимо определить электродинамические нагрузки (ЭДН). В [1] для некоторых конкретных случаев расположения проводников, а в [2] для системы произвольных расположенных прямолинейных проводников получены расчетные выражения для результирующих ЭДН и моментов. Однако для конструкций на напряжение 35 кВ и выше (а в ряде случаев и ниже 35 кВ) кроме результирующих нагрузок необходимо знать распределенные (по длине проводника) ЭДН, а также зависимости этих нагрузок от времени.

Рис. 1. К определению электродинамических нагрузок



В данной статье излагается методика расчета ЭДН в шинных конструкциях с ответвлениями при двух- и трехфазных КЗ.

Шинные конструкции можно рассматривать как трехфазные системы, состоящие из K произвольно расположенных в пространстве кусочно-линейных проводников (рис. 1). Если считать все проводники нитевидными, то нагрузка в произвольной точке s проводника с номером j определяется по формуле

$$\bar{q}_{js} = i_j \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^K [\bar{l}_{j0} \times \bar{B}_{ks}] = \frac{I_0}{4\pi a} i_j \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^K i_k \bar{q}_{0ks} S_{ks}, \quad (1)$$

где i_j, i_k — токи в проводниках с номерами j и k ; \bar{l}_{j0} — единичный вектор, совпадающий с принятым в расчете направлением тока i_j ; \bar{B}_{ks} — вектор магнитной индукции в точке s от тока в k -м проводнике; $\bar{q}_{0ks} = [\bar{l}_{j0} + \bar{B}_{0ks}]$ — единичный вектор ЭДН; $\bar{B}_{0ks} = \bar{B}_{ks} / |\bar{B}_{ks}|$ — единичный вектор магнитной индукции; $S_{ks} = a (|\cos \alpha_{1ks} - \cos \alpha_{2ks}|) / h_{ks}$; α_{1ks} и α_{2ks} — углы, образованные векторами \bar{l}_k и векторами, соединяющими начало и конец k -го проводника с точкой s ; h_{ks} — наименьшее расстояние от точки s до k -го проводника; a — минимальное для системы проводников междуфазное расстояние.

Токи КЗ можно определить как

$$i_k = I_{mk} \{ \sin[\omega t + \psi - 2/3 \pi (p-1)] - e^{-t/T_a} \sin[\psi - 2/3 \pi (p-1)] \}, \quad p = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где I_{mk} — амплитуда периодической составляющей тока КЗ, А; ω — угловая частота тока сети, рад/с; t — время, с; ψ — угол включения тока КЗ, рад; T_a — постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, с; p — параметр: $p=1$ при двухфазном КЗ и для фазы А при трехфазном, $p=2$ и 3 при трехфазном КЗ для фаз В и С.

Произведение токов i_j и i_k в уравнении (1) в соответствии с (2) приводится к виду

$$i_j i_k = I_{mj}^2 \beta_k \sum_{n=1}^6 D_{nk}(\psi) T_n(t), \quad (3)$$

где $\beta_k = I_{mk} / I_{mj}$ — отношение амплитуд периодических токов КЗ в k -м и j -м проводниках; D_{nk} — коэффициенты, зависящие от вида КЗ, угла включения тока КЗ и фаз проводников k и j ; T_n — функции времени, причем

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

Подставляя (3) в (1), получим

$$\bar{q}_{is} = \frac{\mu_0}{4\pi a} I_{mj}^2 \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^K \beta_k S_{ks} \bar{q}_{0ks} \sum_{n=1}^6 D_{nk}(\psi) T_n(t). \quad (4)$$

Найдем проекции вектора ЭДН на ортогональные плоскости ν и τ , проходящие соответственно через оси опорных

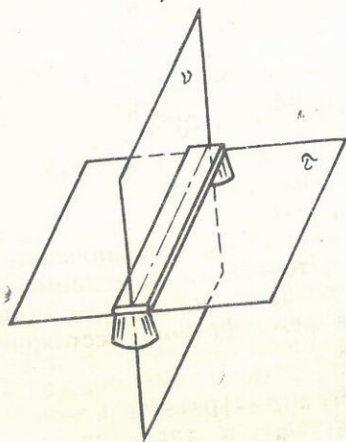


Рис. 2. Ортогональные плоскости ν и τ

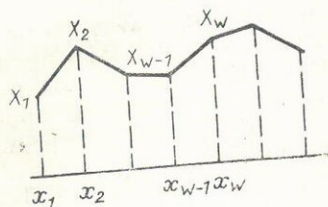


Рис. 3. Аппроксимация ЭДН кусочно-линейной функции

изоляторов и ось проводника (рис. 2):

$$q_{jsi}(x, t, \psi) = \frac{\mu_0}{4\pi a} I_{mj}^2 \sum_{n=1}^6 X_{nsi}(x, \psi) T_n(t), \quad (5)$$

где $i=1, 2$ — индекс, соответствующий плоскости ν или τ ;

$X_{nsi} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^K \beta_k S_{ks}(x) q_{0ksi} D_{nk}(\psi)$; q_{0ksi} — проекции единичной на-

грузки на плоскость ν или τ .
Для практических расчетов профиль распределения проекций ЭДН на ортогональные плоскости ν и τ удобно аппроксимировать достаточно простой аналитической зависимостью, например кусочно-линейной функцией. Если k -й проводник разбить на W интервалов, то на произвольном

участке $[x_{w-1}, x_w]$ (рис. 3) функцию X_{ni} можно определить по формуле

$$X_{ni}(x) \approx M_{niw} x + N_{niw}; \quad x_{w-1} \leq x \leq x_w; \quad w=1, 2, \dots, W;$$

здесь

$$M_{niw} = (X_{niw} - X_{ni(w-1)}) / (x_w - x_{w-1});$$

$$N_{niw} = X_{ni(w-1)} - (X_{niw} - X_{ni(w-1)}) / (x_w - x_{w-1}),$$

где X_{niw} — значение функции в точке x_w .

Аппроксимация проекций ЭДН кусочно-линейной функцией от координаты проводника x позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью оценивать прочность жесткой ошиновки при КЗ известными методами [3, 4] на основе статических и динамических расчетных схем. Погрешность расчетов зависит от числа интервалов разбиения и конфигурации конструкций.

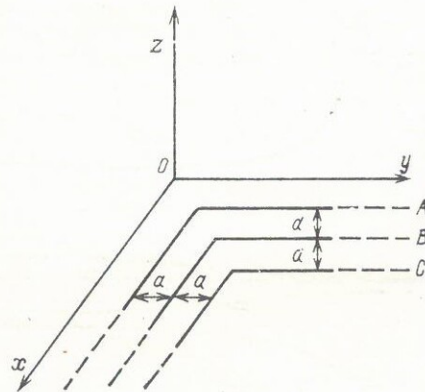


Рис. 4. Расчетная трехфазная система

Для расчета коэффициентов X_{ni} , M и N , а также проекций результирующих ЭДН q_i составлена ФОРТРАН-программа EDNAG, реализованная на ЕС-1045. В качестве исходных параметров в произвольно выбранной декартовой системе вводятся координаты точек начала и концов всех проводников (с учетом принятого направления тока), минимальное междуфазное расстояние и отношения амплитуд периодических составляющих токов КЗ. Если в конструк-

ции имеются протяженные линейные участки проводников, то в исходных параметрах указываются координаты любых точек на их оси; кроме того, добавляется ключевой параметр Δ , равный нулю для практически бесконечно удаленных концов проводника и единице, если введенная координата соответствует крайней точке проводника. Тестирование программы проводилось для параллельных шин конечной и бесконечной длины, а также для шин, расположенных под прямым углом.

В качестве примера рассмотрим результаты расчета ЭДН и их составляющих в шинной линии с поворотом под прямым углом, фазы которой расположены в одной плоскости на расстоянии $a=1$ м (рис. 4). На рис. 5 приведена зависимость коэффициентов X_n ($n=1, 2, \dots, 6$) ЭДН, действующей на проводник фазы А (в плоскости XOY), от координаты x при трехфазном КЗ и угле включения $\psi=\pi/2$. Абсолютные значения коэффициентов X_n постоянной, аperiodической и периодических составляющих

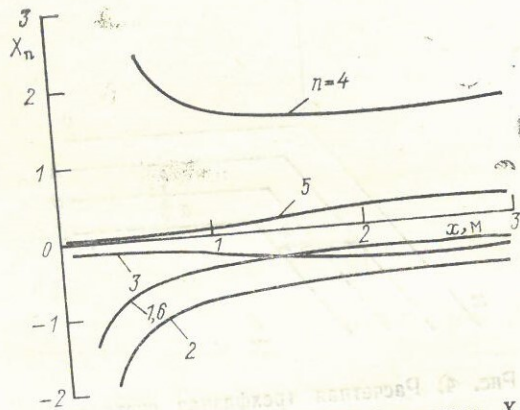


Рис. 5. Зависимость коэффициентов X_n ЭДН от координаты x при трехфазном КЗ и угле включения $\psi=\pi/2$

ческой и периодических составляющих, изменяющихся по синусоидальному закону ($n=1, 2, 3, 5$), при приближении к повороту шины ($x=0$) значительно возрастают, коэффициенты периодической составляющей, изменяющейся по синусоидальному закону ($n=4; 6$), наоборот, снижаются. На расстоянии x , большем 2—2,5 м, от угла поворота коэффициен-

ты X_n становятся практически постоянными и равными соответствующим коэффициентам линий с бесконечно длинными параллельными шинами.

На рис. 6 представлена зависимость коэффициентов X_n ($n=1, 2, \dots, 6$) от угла включения ψ при $x=0,5$ м. Постоянная составляющая ($n=1$) не зависит от угла включения тока КЗ. Коэффициенты X_n аperiodической и периодических косинусоидальных составляющих ($n=2, 3, 5$),

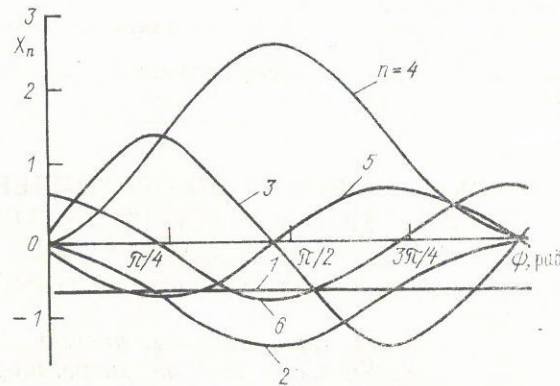


Рис. 6. Зависимость коэффициентов X_n от угла включения при $x=0,5$ м

так же как результирующая ЭДН, достигают наибольших по модулю значений при $\psi \approx 1,473$ рад; при этом угле синусоидальные составляющие ($n=4; 6$) обращаются в нуль. На значительном удалении от угла поворота ($x > 2,5$ м) коэффициенты X_n фазы А ($n=2, 3, 5$) и ЭДН имеют максимум при $\psi=5\pi/12$ (1,309 рад), так же как для бесконечно длинных параллельных шин. По мере приближения к повороту этот угол включения незначительно возрастает примерно до $\pi/2$ (1,570 рад). Время наступления максимума ЭДН для всех точек проводника составляет приблизительно 0,01 с.

Таким образом, при расчете на электродинамическую стойкость шинных линий с поворотом угол включения тока КЗ ψ следует принимать равным от $5\pi/12$ до $6\pi/12$. Для шинных линий распределительных устройств на напряжение 110 кВ и выше с длиной пролета значительно больше 2,5 м, обладающих низкой частотой собственных колебаний и поэтому воспринимающих в основном постоянную и аperiodическую

ческую составляющие нагрузки, без существенной погрешности ЭДН можно определить при $\psi = 5 \text{ л}/12$, так же как для параллельных бесконечно длинных шин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Холявский Г. Б. Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах. М.: Энергия, 1971.
2. Стрелюк М. И., Зарецкий Е. Ф. Расчет электродинамических усилий в системе произвольно расположенных прямолинейных проводников // Электричество. 1976. № 5. С. 77—79.
3. Кудрявцев Е. П., Долин А. П. Расчет жесткой ошиновки распределительных устройств. М.: Энергия, 1981.
4. Филиппов А. П. Колебания деформируемых систем. М.: Машиностроение, 1970.

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ОГРАНИЧЕНИЮ ОПАСНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ОБМОТКИ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

Канд. техн. наук ст. препод. А. К. ИС-КАКОВ (Алма-Атин. энерг. ин-т)

В последние годы наблюдается значительный рост повреждаемости обмоток мощных силовых трансформаторов и автотрансформаторов (АТ) вследствие недостаточной электродинамической устойчивости к токам короткого замыкания (КЗ). Установлено [1], что аварийные токи в трансформаторах и АТ при внешних однофазных КЗ, составляющих основную долю всех КЗ в сетях напряжением 220 кВ и выше, не только соизмеримы, но в ряде случаев существенно превышают нормированные по ГОСТ 11677-75 значения. Отмечается выход из строя трансформаторов и при токах КЗ, меньших расчетных [2]. Это обуславливает необходимость ограничения токов КЗ, что приведет к повышению надежности эксплуатации трансформаторов и АТ.

В настоящей работе проведен анализ изменения сквозных токов КЗ в обмотках АТ и рассмотрена возможность их ограничения с использованием трехфазных реакторов нулевой последовательности (РНП) [3].

В расчетной схеме, представленной на рис. 1, связь между сетями высокого напряжения (ВН) и среднего (СН) осуществляется посредством АТ, а РНП включен последователь-