

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ



Т Р У Д Ы
МОСКОВСКОГО ордена ЛЕНИНА
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Тематический сборник

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Выпуск 393

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЭКРАНИРОВАННЫХ
ТОКОПРОВОДОВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Канд. техн. наук доц. Е.П. КУДРЯВЦЕВ,
инж. А.П. ДОЛИН

Расчет электродинамической стойкости проводников и изоляторов проводится в два этапа. На первом этапе определяются электродинамические нагрузки, возникающие при к.з.; на втором - по найденной нагрузке проводится механический расчет шинной конструкции. Методика расчета на механическую прочность при к.з. изложена, например в [1, 2]. Определение электродинамических нагрузок в открытых шинных линиях не вызывает трудностей. Для экранированных токопроводов эта задача должна решаться с учетом вихревых токов в проводящих экранах, а также токов намагниченности в экранах из ферромагнитных материалов.

Если принять электромагнитное поле токопроводов плоско-параллельным, токи - квазистационарными, среду - кусочно-однородной, распределение токов по сечению проводников можно найти путем решения системы уравнений [3, 4]

$$\delta_m \rho_m + \frac{\partial A_m}{\partial t} = U_m, \quad (1)$$

где δ - мгновенная плотность тока в проводнике с номером m (в том числе в экранах); ρ_m - удельное сопротивление; t - время; A_m - векторный магнитный потенциал; U_m - падение напряжения на единицу длины m -го провода.

Векторный магнитный потенциал в произвольной точке S сечения шин или экрана определяется как

$$A_{ms} = -\frac{\mu_0}{2\pi l} \sum_{K=1}^i \mu_K \int_{F_K} \delta_K \ln r_{KS} dF_K, \quad (2)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, μ_K - относительная магнитная проницаемость, r_{KS} - расстояние между точкой S , в которой ищется магнитный потенциал, и элементарной площадкой dF_K ; F_K - площадь шины и экрана с номером K .

Подставляя (2) в (1), получаем систему интегральных уравнений Фредгольма второго рода. Решение этого уравнения для шин и

экранов кольцевого сечения удобно проводить методом коллокаций [3,4]. Если нетолстые экраны выполнены из неферромагнитного материала, то плотность тока по толщине проводника можно считать постоянной, но изменяющейся по периметру экрана. При к.з. плотность тока в каждой точке является суммой плотностей вынужденного тока (периодической и аperiodической составляющих) и свободного тока. Искомые плотности токов в шинах и экранах можно разложить в ряд Фурье с неопределенными коэффициентами a_k и b_k

$$\delta_k = \frac{1}{h_k} \left\{ [b_{k0}^{nep} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{kn}^{nep} \sin n\varphi_k + b_{kn}^{nep} \cos n\varphi_k)] e^{j\omega t} + [b_{k0}^{an} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{kn}^{an} \sin n\varphi_k + b_{kn}^{an} \cos n\varphi_k)] e^{-\frac{t}{T_a}} + \sum_{w=1}^{\infty} [b_{k0w}^{cb} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{knw}^{cb} \sin n\varphi_k + b_{knw}^{cb} \cos n\varphi_k)] e^{-\rho_w t} \right\}, \quad (3)$$

где h_k - толщина провода, ω - частота тока в сети, T_a - постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока к.з.; φ_k - угловая координата точки, в которой определяется плотность тока; ρ_w - корни характеристического уравнения дифференциального уравнения (I). Корни ρ_w в общем случае могут быть комплексными (т.е. свободные составляющие плотностей тока являются либо аperiodическими функциями времени, либо периодическими, затухающими по экспоненциальному закону).

Решение системы уравнений (I) можно проводить независимо для каждой составляющей тока (периодической, аperiodической или свободной). Подставляя плотности периодического и аperiodического токов в (2) и (I), приходим к системе линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов a_{kn} и b_{kn} и падения напряжения U_m , решение которой достаточно просто проводится численными методами на ЭВМ [3]. Для свободных токов после подстановки последнего слагаемого уравнения

(3) в (2) и (I) приходим к следующей системе алгебраических уравнений относительно неизвестных b_{k0w}^{cb} , a_{knw}^{cb} , b_{knw}^{cb} и ρ_w :

$$\sum_{n=0}^Q \sum_{k=1}^i \left\{ a_{knw}^{cb} [\Delta(k-m)] \frac{\rho_w \sin n\varphi_{ms}}{h_m} - \frac{\mu_0 \rho_w}{2\pi h_k F_k} \int \sin n\varphi_k \ln r_{msk} dF_k \right\} + b_{knw}^{cb} [\Delta(k-m)] \frac{\rho_w \cos n\varphi_{ms}}{h_m} - \frac{\mu_0 \rho_w}{2\pi h_k F_k} \int \cos n\varphi_k \ln r_{msk} dF_k = 0, \quad (4)$$

где Q - число точек коллокаций; $\Delta(k-m)$ - дельта-функция Дирака.

Значения ρ_w являются корнями определителя системы (4). Коэффициенты a_{knw}^{cb} и b_{knw}^{cb} определяются из начальных условий

$$\delta_k^{nep}(0) + \delta_k^{an}(0) + \delta_k^{cb}(0) = 0. \quad (5)$$

Зная распределение токов по сечению шин и экрана, можно вычислить нормальную и тангенциальную составляющие индукции

$$\left. \begin{aligned} B_{msv} &= \frac{\partial A_{ms}}{\partial \tau} = -\frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^i \int_{F_k} \delta_k \frac{\cos(r_{ks}, \tau_s)}{r_{ks}} dF_k, \\ B_{ms\tau} &= \frac{\partial A_{ms}}{\partial v} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^i \int_{F_k} \delta_k \frac{\cos(r_{ks}, v_s)}{r_{ks}} dF_k. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Составляющие электродинамических нагрузок на плоскости X и Y (рис. I) и крутящие моменты равны

$$\left. \begin{aligned} Q_{mx} &= \int_{F_m} B_{msv} \delta_m \sin \varphi_m dF_m - \int_{F_m} B_{ms\tau} \delta_m \cos \varphi_m dF_m, \\ Q_{my} &= -\int_{F_m} B_{msv} \delta_m \cos \varphi_m dF_m - \int_{F_m} B_{ms\tau} \delta_m \sin \varphi_m dF_m, \\ M_m &= \int_{F_m} B_{mv} \delta_m R_{ms} dF_m, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где R_{ms} - радиус окружности проводника m , на которой расположена точка S .

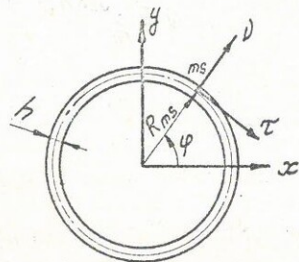


Рис. 1

Если пренебречь влиянием быстро затухающей свободной составляющей плотности токов, электродинамические нагрузки в плоскости X и Y , Н/м, могут быть приведены к удобному для практических расчетов виду

$$q_m = \alpha I_{NM}^2 \sum_{N=1}^6 D_{mN} T_N,$$

где $\alpha = 2 \cdot 10^{-7}$ Н/А²; I_{NM} - периодическая составляющая тока к.з., А; D_{mN} - параметры, зависящие от размеров и взаимного расположения проводников токопровода, м⁻¹; T_N - функции времени:

$$T_1 = 1, \quad T_2 = e^{-\frac{2t}{\tau_a}}, \quad T_3 = e^{-\frac{t}{\tau_a}} \cdot \cos \omega t, \\ T_4 = e^{-\frac{t}{\tau_a}} \cdot \sin \omega t, \quad T_5 = \cos 2\omega t, \quad T_6 = \sin 2\omega t.$$

Программа расчета электродинамических нагрузок и крутящих моментов для токопроводов с общим экраном кольцевого сечения реализована на ЭЕМ "Минск-32" (входной язык ФОРТРАН-IV). Интегралы, входящие в выражения (4) и (6), приводились к табличным [5] и брались аналитически. Интегралы уравнений (7) вычислялись численными методами на ЭЕМ. Время расчета плотности токов составляло 2-3 мин. Полный расчет составляющих D_{mN} электродинамических нагрузок и крутящих моментов длился 30-40 мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев Е.П., Долин А.П., Васильев А.А. Методика расчета шин и опорных изоляторов распределительных устройств напряжением до 35 кВ на электродинамическую стойкость. - Промышленная энергетика, 1975, № II, с. 36-39.
2. Кудрявцев Е.П., Долин А.П. Методика расчета электродинамической стойкости токопроводов напряжением 110 кВ и выте с учетом податливости опор. - Электричество, 1977, № 5, с. 15-19.
3. Кудрявцев Е.П. Расчет вихревых токов в экранированных токопроводах путем приближенного решения системы интегральных уравнений. - Тр./Моск. энерг. ин-т, 1975, вып. 209, с. 115-120.
4. Долин А.П. К расчету электродинамических сил в трехфазных токопроводах с общим экраном. - Тр./Моск. энерг. ин-т, 1975, вып. 274, с. 104-108.
5. Гродштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм рядов и произведений. - М.: Наука, 1971. - 1108 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ
СИНХРОННОЙ МАШИНЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ЭНЕРГИЮ ГАРМОНИК
МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Инж. А.И. ФЕДОТОВ

Широкое распространение синхронных машин, использующих для возбуждения энергию гармонических составляющих магнитного поля воздушного зазора, обуславливает интерес к исследованию и расчету режимов их работы.

На кафедре электрических станций МЭИ на базе синхронного генератора БМЗ-4,5/4-М1 была создана экспериментальная установка синхронной машины, использующей для возбуждения энергию гармоник магнитного поля. Трехфазная дополнительная обмотка (ДО), уложенная вместе с основной обмоткой (ОО) в пазы статора, через управляемый выпрямитель подключалась к обмотке возбуждения (ОВ). Соответствующим соединением катушек ДО выполнялась на то или иное