Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Л. С. Зимин, Д. А. Каримов, Моделирование электродинамических усилий в системах индукционного нагрева цилиндрической формы, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2002, выпуск 16, 203–205

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu125>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.80.253.173

26 апреля 2023 г., 16:33:18

Математическое моделирование

УДК 534

Л.С. Зимин, Д.А. Каримов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ В СИСТЕМАХ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Электромагнитные процессы в системе “индуктор-металл” характеризуются не только выделением тепловой энергии в заготовке и индукторе, но также объемной плотностью электромагнитного поля и связанными с ней электродинамическими усилиями. Приведен подход к моделированию вибрационных процессов в цилиндрических индукторах.

Проблемам качества нагрева и повышения энергетических показателей индукционных установок в последние годы уделяется достаточно большое внимание. Проблема же надежности индукторов, связанная с задачей разработки вибропрочного и малозумного технологического оборудования, остается практически не решенной. Слабая изученность электродинамических и виброакустических процессов в системах индукционного нагрева, отсутствие эффективных методов динамического расчета индукторов становятся сдерживающими факторами при их проектировании и промышленном освоении.

Физические процессы преобразования энергии электромагнитного поля при индукционном нагреве металлов характеризуются не только выделением тепла в заготовке, но и механическими явлениями. Электродинамические процессы при сквозном индукционном нагреве металлов под обработку давлением играют, как правило, резко отрицательную роль, вызывая такие нежелательные явления, как перетирание электроизоляции, разрушение электрических соединений обмоток, а главное создают вибрации элементов конструкции индуктора и его вспомогательных механизмов, которые сопровождаются интенсивным шумоизлучением.

При индукционном нагреве тел вращения отсутствуют условия для возникновения значительных вибраций, так как круглая поперечная форма индуктора обладает большой естественной жесткостью. Однако при проектировании мощных индукционных систем для нагрева тел вращения весьма полезным оказывается динамический анализ конструкции нагревателя с целью оценки его виброакустических параметров и разработки средств фиксации витков.

В общем случае индуктор для нагрева тел вращения как механическая колебательная система занимает промежуточное положение между пружиной и цилиндрической оболочкой, но ближе к последней, учитывая стяжку витков, заливку их эпоксидной смолой или бетоном. Если же в реальной системе преобладают пружинные колебания, то это говорит лишь о некачественной сборке индуктора, на что нет смысла ориентироваться при построении математической модели.

При осесимметричных электродинамических усилиях движение цилиндрической оболочки относительно перемещений $W(z, t)$, $U(z, t)$ вдоль радиуса и вдоль образующей имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{Eh}{1-n^2} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{n}{R} \frac{\partial W}{\partial z} \right) - gh \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} &= -F_z(z, t); \\ \frac{1}{R} \frac{Eh}{1-n^2} \left(n \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{W}{R} \right) + D \frac{\partial^4 W}{\partial z^4} + gh \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} &= Q_R(z, t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

с краевыми условиями

$$\begin{aligned} U(z_k, t) = W(z_l, t) = \frac{\partial W}{\partial z}(z_m, t) &= 0 \quad \forall z_k, z_l, z_m \in L; \\ U(z, 0) = \frac{\partial U(z, 0)}{\partial t} = \frac{\partial^2 U(z, 0)}{\partial t^2} &= 0, \quad W(z, 0) = \frac{\partial W(z, 0)}{\partial t} = \frac{\partial^2 W(z, 0)}{\partial t^2} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; τ – время; γ – плотность материала оболочки индуктора; R – средний радиус цилиндра; F_z – интенсивность осевой нагрузки; Q_R – радиальное давление на индуктор. Расчетная схема конструкции представлена на рисунке

При интегрировании (1), (2) применялся МКЭ, а именно использование криволинейных одномерных элементов. Разобьем поверхность индуктора узловыми линиями на ряд кольцевых

элементов (см. рисунок) радиусом R и линейным размером l . Внутри КЭ в соответствии с порядком производных от осевого $U(z, \tau)$ и радиального $W(z, \tau)$ перемещений в (1) выбирались следующие интерполяционные функции:

$$\left. \begin{aligned} U^I(z) &= \alpha_1 + \alpha_2 z; \\ W^I(z) &= \alpha_3 + \alpha_4 z + \alpha_5 z^2 + \alpha_6 z^3 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

или в матричной форме

$$\begin{bmatrix} U \\ W \end{bmatrix} = [N] \cdot [U_1 W_1 \partial W_1 / \partial z U_2 W_2 \partial W_2 / \partial z]^T, \quad (4)$$

где компоненты матрицы базисных функций задаются матрицей

$$[N] = \begin{bmatrix} 1-z' & 0 & 0 & z' & 0 & 0 \\ 0 & 1-3z'^2+2z'^3 & l(z'-2z'^2+z'^3) & 0 & 3z'^2-2z'^3 & l(z'^3-z'^2) \\ 0 & \frac{6}{l}z'^2-\frac{6}{l}z' & 1-3z'^2-4z' & 0 & \frac{6}{l}(z'-z'^2) & 3z'^2-2z' \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Здесь $z' = z/l$, l – линейный размер КЭ. Матрицы жесткости и массы одномерного кольцевого элемента задаются интегралами

$$[K]^e = \int_0^l [B]^T [G] [B] 2pR l dz', \quad [m]^e = \int_0^l \rho h [N]^T [N] 2pR l dz'; \quad (6)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} -1/l & 0 & 0 & 1/l & 0 & 0 \\ 1-z' & 1-3z'^2+2z'^3 & l(z'-2z'^2+z'^3) & z' & 3z'^2-2z'^3 & l(z'^3-z'^2) \\ R & R & R & R & R & R \\ 0 & \frac{6-12z'}{l^2} & \frac{4-6z'}{l} & 0 & \frac{-6+12z'}{l^2} & \frac{2-6z'}{l} \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$[G] = \frac{Eh}{1-n^2} \begin{bmatrix} 1 & n & 0 \\ n & 1 & 0 \\ 0 & 0 & h^2/12 \end{bmatrix}.$$

Расчетная модель цилиндрического индуктора

Выполнив интегрирование (6), можно получить в явном виде выражения для компонент элементных матриц $[K]^e$ и $[m]^e$; размерность последних при принятой аппроксимации равна (6×6) . При вычислении вектора узловой нагрузки цилиндрического индуктора не следует пренебрегать осевыми ЭДУ, поскольку жесткости конструкции в радиальном и продольном направлениях соизмеримы друг с другом:

$$[Q]^e = \int_0^l \{ [N]_2^T Q_R(z, t) - [N]_1^T F_z(z, t) \} 2pR l dz', \quad (9)$$

где $[N]_1$, $[N]_2$ – первая и вторая строки матрицы базисных функций $[N]$.

Точный расчет радиальных и аксиальных составляющих ЭДУ, действующих в цилиндрической системе “индуктор-металл”, возможен только с применением численных методов. Удобно воспользоваться следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} F_R &= m_0 (\operatorname{Re} \hat{I} \cdot \operatorname{Re} \hat{H}_z + \operatorname{Im} \hat{I} \cdot \operatorname{Im} \hat{H}_z), \\ F_z &= m_0 (\operatorname{Re} \hat{I} \cdot \operatorname{Re} \hat{H}_R + \operatorname{Im} \hat{I} \cdot \operatorname{Im} \hat{H}_R), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $\hat{I}$ – комплекс тока индуктора; $\hat{H}_z, \hat{H}_R$ – комплексные составляющие напряженности магнитного поля индуктора, рассчитанные с учетом взаимодействия всех первичных и вторичных ис-

точников (токов обмотки, токов загрузки, токов намагниченности магнитопроводов). Приближенная оценка силовых параметров цилиндрического нагревателя обычно выполняется по аналитическим формулам для плоскопараллельного поля.

При неизменных ЭДУ внутри КЭ вектор $[Q]^e_\tau$ можно получить в явном виде

$$[Q]^e_t = pRl \left[-F_Z(t), Q_R(t), \frac{Q_R(t)l}{6}, -F_Z(t), Q_R(t), -\frac{Q_R(t)l}{6} \right]. \quad (11)$$

Данная методика может применяться в инженерных расчетах при проектировании вибростойких конструкций индукционных нагревательных установок, в САПР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. М.: Энергия, 1967. 416 с.
2. Зимин Л.С. Вибростойкость прямоугольных систем индукционного нагрева // Теория и практика индукционного нагрева: Сб. тр. ВНИИЭТО. М.: Энергоатомиздат, 1985. С. 64-70.
3. Зимин Л.С., Сутягин А.Ф. Расчет вибрационных и акустических характеристик индукторов прямоугольной формы // Изв. вузов. Электромеханика. 1986. №10. С. 103-109.

УДК 621.311.1+621.311.1.001.365

В.Г. Гольдштейн, В.Г. Сливкин

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Определяются опасные для электроприемников низкого напряжения режимы работы систем электроснабжения высокого напряжения. Рассматриваются положения математического моделирования импульсных помех в низковольтных сетях систем электроснабжения. Анализируется электромагнитная совместимость электроприемников низкого напряжения при несимметричных режимах работы высоковольтных сетей.

Для обеспечения электромагнитной совместимости электрооборудования необходимо ограничить уровень воздействующих помех (уровень помехоэмиссии) до уровня помехоустойчивости защищаемого оборудования [1, 2]. Наиболее опасными из электромагнитных помех, уровень помехоэмиссии которых зачастую превышает уровень помехоустойчивости электрооборудования, являются импульсные помехи [3].

Значительные импульсные помехи в низковольтных цепях могут возникать в результате различных процессов в высоковольтной сети вследствие взаимных индуктивных, емкостных и гальванических связей. При нормальном симметричном режиме работы высоковольтной сети уровень таких импульсных помех не представляет опасности. Реальную опасность для электроустановок НН представляют несимметричные режимы работы высоковольтной сети, а именно [4]:

- 1) неполнофазные режимы при коммутациях вследствие появления асимметрии в сети;
- 2) однофазные замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью (сети 6, 10 кВ) вследствие несимметричного повышения напряжения на здоровых фазах и возможного гальванического влияния на электроустановки НН;
- 3) однофазные замыкания на землю в сети с заземленной нейтралью (110 кВ) вследствие появления значительных токов нулевой последовательности, индуктивной связи между проводами ЛЭП и линиями НН, а также гальванической связью через землю.

Принципиальная схема кабельной линии (КЛ), подверженной индуктивному и гальваническому влиянию однофазного КЗ, приведена на рисунке.