

Разработка математических и физических моделей для исследования высоковольтных резистивных делителей цифровых трансформаторов напряжения

В. Д. ЛЕБЕДЕВ, А.А. ЯБЛОКОВ
ФГБОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина»
Россия
vd_lebedev@mail.ru

В рамках концепции инновационного развития электроэнергетики ИЭС ААС актуальной задачей является разработка цифровых трансформаторов тока и напряжения. Перспективным первичным преобразователем напряжения является резистивный делитель. В работе выполнены разработка и исследование высоковольтного делителя напряжения, содержащего резистивные элементы в твердотельной изоляции. Использование твердой изоляции в трансформаторе создает дополнительное тепловое сопротивление, препятствующее отводу тепла от резистивных элементов. Нагрев резистивных элементов приводит к изменению их сопротивления, а, следовательно, и к уменьшению точности измерения напряжения резистивным делителем. Чтобы уменьшить влияние нагрева резистивных элементов необходимо выбирать резисторы с минимальным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), максимальной поверхностью для увеличения теплоотдачи, а также с максимальным сопротивлением для снижения тепловыделения. Однако, с увеличением сопротивления резистивных элементов увеличивается влияние токов электрического смещения и токов утечки в изоляции трансформатора, что ограничивает класс точности трансформатора напряжения, предназначенного для работы в условиях открытых распределительных устройств.

Учитывая вышесказанное, задача разработки и исследования трансформатора на основе резистивного делителя направлена на определение оптимального значения сопротивлений резистивных элементов и их взаимного расположения с учетом распределения теплового и электромагнитного полей для достижения максимальной точности измерения. Резистивные элементы, их расположение и параметры задают и определяют уровни электромагнитного и теплового полей, таким образом это итерационная взаимосвязанная задача.

Целевые функции для создания делителя напряжения можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
TKC &\rightarrow \min; \\
\Delta T &\leq 30^\circ \text{C}; \\
\lambda_{\text{герм}} &\rightarrow \max; \\
I_C^k &\rightarrow \min; \\
U_{\text{доп}} &\geq U_{\text{гроз.имп.}}; \\
E &< E_{\text{доп}},
\end{aligned} \tag{1}$$

где ТКС – температурный коэффициент сопротивления резистивных элементов; ΔT – нагрев резистивных элементов относительно температуры окружающей среды; $\lambda_{\text{герм}}$ – теплопроводность герметика; I_C – емкостный ток; $U_{\text{доп.}}$ – допустимое напряжение резистивного делителя; $U_{\text{гроз. имп.}}$ – испытательное напряжение грозового импульса для соответствующего класса напряжения трансформатора согласно ГОСТ 1516.3-96; E – напряженность электрического поля.

В представленной работе разработаны методы анализа тепловых и электромагнитных полей резистивного делителя, на основе которых выполнен расчет оптимальной конструкции резистивного делителя напряжения. Методы анализа основаны на численном моделировании тепловых и электромагнитных полей методом конечных элементов. Для математического моделирования теплового состояния трансформатора используется уравнение теплопроводности, записанное в цилиндрической системе координат:

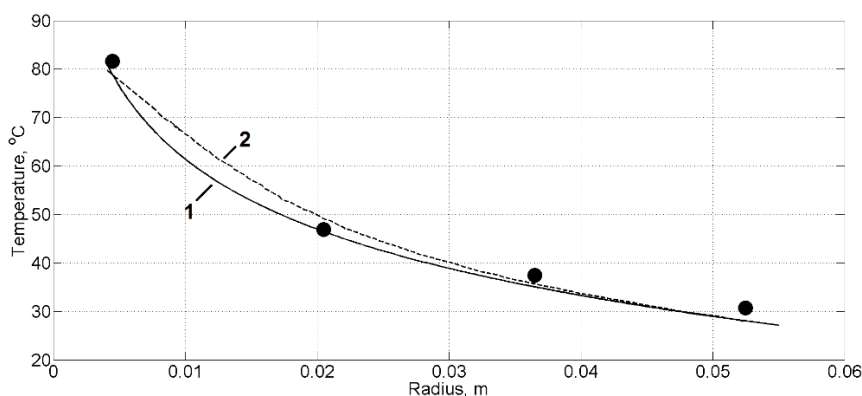
$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{q_v}{c \cdot \rho}, \tag{2}$$

где T – температура, r , φ , z – координаты (ось z совпадает с осью цилиндра), t – время процесса, a – коэффициент температуропроводности, q_v – тепловой источник, связанный с выделением тепловой энергии на резистивных элементах, c – теплоемкость, ρ – плотность.

Математические модели тепловых полей резистивного делителя верифицированы по экспериментальным данным, полученным в результате исследований разработанного экспериментального образца (рис. 1).



а)



б)

Рисунок 1 – Фотография экспериментального образца (а) и зависимость установившегося распределения температуры вдоль радиуса в центральной части трансформатора (б): 1 – результаты расчета в COMSOL Multiphysics; 2 – результаты расчета модифицированным методом, точки – результаты экспериментальных замеров

Для анализа влияния токов электрического смещения с учетом токов утечки в изоляции резистивного делителя на точность измерения напряжения были разработаны методы последовательных вычислений с предварительным расчетом частичных емкостей и параллельных вычислений через наведенные токи. Расчет частичных емкостей выполнен на математической модели трансформатора, основанной на решении уравнения Лапласа, записанного для электрического поля

$$-\nabla \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \varphi = 0, \quad (3)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость, Ф/м; φ – электрический потенциал, В.

Второй метод расчета основан на квазистатической модели резистивного делителя, решающей уравнение:

$$-\nabla \cdot ((\sigma + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r) \nabla \varphi) = 0, \quad (4)$$

где σ – электрическая проводимость, См/м; j – мнимая единица; ω – угловая частота, рад/с; φ – потенциал, В.

Методы расчета токов электрического смещения и токов утечки позволяют вычислять амплитудные и фазовые погрешности резистивного делителя напряжения и исследовать динамические процессы.

Математические модели верифицированы по аналитическим формулам, проверены экспериментально и позволяют осуществлять анализ тепловых и электромагнитных полей с последующей оптимизацией конструкции резистивного делителя.