

А. Н. Ткачев, А. А. Пасенчук (Новочеркасск, ЮРГТУ (НПИ)).
Математическое моделирование магнитного гистерезиса.

Повышение точности расчета динамических характеристик электротехнических устройств на этапе их проектирования требует учета всех физических процессов, наблюдаемых в их магнитных системах: гистерезиса, вихревых токов, магнитной вязкости. Гистерезис возникает в результате сложных необратимых процессов в ферромагнетиках, строгое описание которых выполнить затруднительно. В связи с этим в настоящее время наиболее перспективным является построение имитационных моделей гистерезиса, позволяющих с приемлемой для практики точностью воспроизвести контролируемые экспериментально характеристики ферромагнетика при циклическом перемагничивании (основную кривую намагничивания, зависимость потерь от максимальной индукции, предельную петлю гистерезиса).

В относительных единицах оператор гистерезисного типа, сопоставляющий индукцию $b = b(t)$ и напряженность $h = h(t)$ магнитного поля, ищется в виде

$$h = h(t) = f(b) + g(b), \quad (1)$$

где первое слагаемое в правой части равенства (1) является однозначной функцией, а второе описывается разными функциями $g = g^+(b)$ и $g = g^-(b)$ при намагничивании и размагничивании ферромагнетика.

В общем случае функция $g = g(b)$ ищется как решение нелинейного дифференциального уравнения первого порядка

$$dg/db = F(b, g). \quad (2)$$

С учетом физических свойств ферромагнетиков уравнение (2) для случаев намагничивания и размагничивания преобразуется к виду

$$dg^+/db = -\lambda(b)g^+(b) + \eta(b), \quad dg^-/db = +\lambda(b)g^-(b) + \eta(b), \quad (3)$$

где $\lambda = \lambda(b) = \lambda_0 + \chi(b)$, $\lambda_0 \in \mathbf{R}$.

Функции $f(b)$ и $\eta(b)$ в уравнениях (1), (3) выражаются через известные из эксперимента характеристики ферромагнетика: основную кривую намагничивания $h = h_m(b_m)$, зависимость потерь $p = p(b_m)$ от максимума индукции b_m при циклическом перемагничивании:

$$f(b) = h_m(b) - \eta^{-1}p'(b) \operatorname{cth}(\lambda_0 b), \quad \eta(b) = \eta^{-1}\lambda_0 p'(b) + h'_m(b) - f'(b).$$

Параметр λ_0 определяется в результате минимизации средней погрешности моделирования перемагничивания по предельной петле при $\lambda = \lambda_0$, когда $\chi(b) = 0$. Учет малого слагаемого $\chi = \chi(b)$ позволяет практически точно воспроизвести предельную петлю гистерезиса. Данная функция находится в результате решения уравнения Вальтера первого рода.

Результаты выполненных расчетов подтверждают возможность использования построенной модели для анализа работы электротехнических устройств в динамических режимах.