

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ТОКА ДЛЯ УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИКИ КОММУТАЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Проус В.Р.; Фугаров Д.Д.; Пурчина О.А.

(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия)

В электрических сетях предприятий ежегодно фиксируется большое количество отказов исполнительных коммутационных элементов (КЭ) присоединений 0,4 кВ [1], всё дело в том, что КЭ (например, автоматические выключатели) в процессе эксплуатации могут находиться в состоянии скрытого отказа, который проявляется в аварийном режиме сети. Несвоевременное выявление таких отказов во многом вызвано практическим отсутствием на электроустановках предприятий специализированных мобильных устройств, обеспечивающих необходимый комплекс диагностических работ. Диагностика заключается в определении время–токовых характеристик КЭ методом создания диагностического воздействия, представляющего собой испытательный ток синусоидальной формы, эквивалентный короткому замыканию в цепи элемента, стоящего перед, заранее исправным КЭ, с теми же параметрами отключения цепей. Измерение испытательного тока в устройствах диагностики может быть выполнено с помощью индукционных датчиков тока (ДТ), имеющих достаточный диапазон линейного преобразования и минимальные массогабаритные параметры.

Сравнительный анализ показал, что для обеспечения гальванической развязки цепей испытательного тока и измерительной схемы наиболее целесообразно применение измерительных преобразователей индукционного типа, однако применение трансформаторов тока не обеспечивает заданный диапазон линейности для всей шкалы задания величин нагрузочных токов при приемлемых массогабаритных характеристиках. Решением является использование датчиков тока с магнитодиэлектрическим сердечником (МДТ) на основе порошковых материалов (*Iron Powder*) фирмы *Magnetics* (США). В литературных источниках описываются МДТ, созданные на основе порошков карбонильного железа марок P10, P20, P100 или ПС, которые применялись в корабельных энергетических системах [2]. Применение современных материалов даёт возможность обеспечить улучшенные характеристики МДТ при приемлемой погрешности преобразования первичных токов.

На рис. 1 представлена основная кривая намагничивания смеси *Magnetics 60* [3]. В данном случае задача аппроксимации основной кривой намагничивания, с требуемой точностью простыми выражениями является крайне актуальной. Предлагается основную кривую намагничивания магнитодиэлектриков на основе *Iron Powder* аппроксимировать формулой

$$B = A \ln(\alpha H + 1), \quad (1)$$

где B и H – координаты кривой намагничивания; A и α – коэффициенты аппроксимации.

Для дальнейших расчетов выходных напряжений датчиков тока с магнитодиэлектрическим сердечником с наименьшей погрешностью необходимо достичь

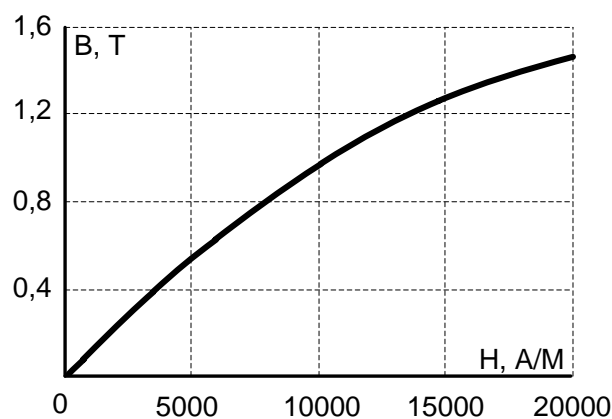


Рисунок 1 - Основная кривая намагничивания магнитодиэлектрика на основе смеси *Magnetics 60*

максимально возможного совпадения экспериментальной кривой и аппроксимирующей функции на начальном участке кривой намагничивания, в связи с чем на все аппроксимируемые выражения наложим дополнительные ограничения:

$$\lim_{H \rightarrow 0} B(H) = 0, \quad \lim_{H \rightarrow 0} \frac{dB}{dH} = \mu_H, \quad (2), (3)$$

где μ_H – начальная магнитная проницаемость основной кривой намагничивания.

Из основной формулы (1) в общем виде получим:

$$\frac{dB}{dH} = \frac{A\alpha}{\alpha H + 1}, \quad (4)$$

откуда при $H \rightarrow 0$ имеем

$$\lim_{H \rightarrow 0} \frac{dB}{dH} = A\alpha \quad (5)$$

С учетом выражений (3) и (5) можем записать:

$$A = \frac{\mu_H}{\alpha}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (1) получим:

$$B = \frac{\mu_H}{\alpha} \ln(\alpha H + 1). \quad (7)$$

При достаточно больших напряженностях ($H > 300000$ А/м) кривая намагничивания стремится к наклону прямой, т.е. удовлетворять выражению:

$$B = B_s + \mu_0 H, \quad (8)$$

где B_s – ордината, полученная продолжением насыщенного участка кривой намагничивания; μ_0 – магнитная постоянная.

$$\lim_{H \rightarrow \infty} \frac{dB}{dH} = 0. \quad (9)$$

Для того, что бы скорректировать выражение (9) и обеспечить выполнение условия:

$$\lim_{H \rightarrow \infty} \frac{dB}{dH} = \mu_0 \quad (10)$$

Представим кривую намагничивания в следующем виде:

$$B = \frac{\mu_H - \mu_0}{\alpha} \ln(\alpha H + 1) + \mu_0 H \quad (11)$$

Полученное выражение (11) удовлетворяет основным требованиям к кривой намагничивания, т.е. $\lim_{H \rightarrow 0} B(H) = 0$; $\lim_{H \rightarrow 0} \frac{dB}{dH} = \mu_H$; $\lim_{H \rightarrow \infty} \frac{dB}{dH} = \mu_0$.

В выражении (11) необходимо определить коэффициент аппроксимации α . Для этого используем координаты экспериментальной кривой намагничивания и известный метод наименьших квадратов. Согласно этому методу вычисляется абсолютная ошибка в точке по формуле:

$$\varepsilon_i(\alpha) = \left| \frac{\mu_H - \mu_0}{\alpha} \ln(\alpha H_i + 1) + \mu_0 H_i - B_i \right|, \quad (12)$$

где H_i, B_i – координаты кривой намагничивания.

Квадрат ошибки будет равен:

$$\varepsilon_i^2(\alpha) = \left(\frac{\mu_H - \mu_0}{\alpha} \ln(\alpha H_i + 1) + \mu_0 H_i - B_i \right)^2. \quad (13)$$

Для учета информации всей экспериментальной кривой составим суммарную квадратичную ошибку в виде:

$$\Phi(\alpha) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \text{ или } \Phi(\alpha) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\mu_H - \mu_0}{\alpha} \ln(\alpha H_i + 1) + \mu_0 H_i - B_i \right)^2, \quad (14)$$

где n – число экспериментально полученных точек.

Параметр α находится в результате минимизации суммарной квадратичной ошибки (14).

Для этого продифференцируем (14) по α :

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{d\alpha}(\alpha) = 2 \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\mu_H - \mu_0}{\alpha} \ln(\alpha H_i + 1) + \mu_0 H_i - B_i \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{\mu_H - \mu_0}{-\alpha^2} \ln(\alpha H_i + 1) + \frac{\mu_H - \mu_0}{\alpha} \frac{H_i}{\alpha H_i + 1} \right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

Для минимизации $\Phi(\alpha)$ требуется выполнение необходимого условия:

$$\frac{d\Phi}{d\alpha}(\alpha) = 0. \quad (16)$$

Подстановка (15) в (16) приводит к необходимости решения следующего трансцендентного уравнения:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\mu_H - \mu_0}{\alpha} \ln(\alpha H_i + 1) + \mu_0 H_i - B_i \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{\mu_H - \mu_0}{-\alpha^2} \ln(\alpha H_i + 1) + \frac{\mu_H - \mu_0}{\alpha} \frac{H_i}{\alpha H_i + 1} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

Решение уравнения (17) методом половинного деления при $\mu_n = 1,22 \cdot 10^{-5} \text{ Гн/М}$ приводит к следующему результату $\alpha = 1,13 \cdot 10^{-5} \text{ м/А}$.

Предложенная математическая модель основной кривой намагничивания может быть использована для инженерных и научных расчетов переходных процессов в измерительных электрических цепях устройства диагностики силовых коммутационных элементов электроустановок.

Перечень ссылок

1. Лачин В.И., Проус В.Р., Фугаров Д.Д. Устройство выявления скрытых отказов автоматических выключателей. – Проблемы энергосбережения и технической диагностики энергетического оборудования: сборник трудов науч.-практ. конф., г. Ростов н/Д, 15 февр. 2007 г.: в 3 ч. /ВЦ «ВертолЭкспо» – Ростов н/Д, 2007.

2. Темиров А.П. Разработка и создание элементов интегрированных корабельных систем электроэнергетических систем. – Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского Университета, 2005.

3. Интернет источник: mag-inc.com, доступ открытый.