

Метод решения обратных задач магнитных измерений

Ю. А. БАХВАЛОВ, Н. И. ГОРБАТЕНКО, В. В. ГРЕЧИХИН

Южно-Российский государственный политехнический университет им. М. И. Платова,
Новочеркасск, Россия, e-mail: vgrech@mail.ru

Предложен эффективный натурно-модельный метод определения основной кривой намагничивания и петель гистерезиса ферромагнитных материалов в устройствах с разомкнутой магнитной цепью, не требующий больших вычислительных мощностей.

Ключевые слова: основная кривая намагничивания, петли гистерезиса, разомкнутая магнитная цепь, обратные задачи, минимизация функционала.

The effective natural-model method of definition of the normal magnetization curve and of the hysteresis loops of ferromagnetic materials in devices with the opened magnetic circuit is suggested. It is not required high computational power.

Key words: normal magnetization curve, hysteresis loops, open magnetic circuit, inverse problems, functional minimization.

Наиболее полную информацию о магнитных свойствах ферромагнитных материалов получают из основной кривой намагничивания и петель гистерезиса. Указанные характеристики можно измерить в замкнутой магнитной цепи, например, с использованием образца в форме тороида. Однако это не всегда возможно, особенно в системах неразрушающего контроля и измерений, проводимых при массовом производстве изделий, когда на установку испытываемого изделия (ИИ) в измерительную позицию отводится мало времени.

Пример магнитной системы с разомкнутой цепью для измерения магнитных характеристик ИИ в виде цилиндров приведен на рис. 1. Магнитная система содержит цилиндрическое ИИ 3 диаметром 10 и высотой 20 мм, два цилиндрических стержня (ЦС) 1, 4 диаметрами 10 мм, высотой 140 мм из магнитомягкого материала для усиления поля, а

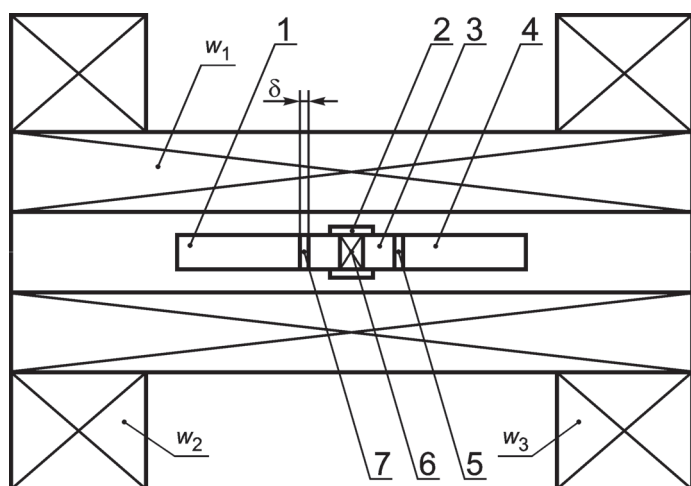


Рис. 1. Пример магнитной системы для испытания электротехнических изделий:

1, 4 — цилиндрические стержни; 2 — преобразователь напряженности; 3 — испытываемое изделие; 5, 7 — прокладки; 6 — преобразователь индукции; w_1, w_2, w_3 — обмотки соленоида

также соленоид с тремя обмотками: основной $w_1 = 2514$ витков и двумя дополнительными $w_2 = w_3 = 54$ витка. Дополнительные обмотки поддерживают неравномерность магнитного поля соленоида не более 0,5 % на длине $L_1 = 0,8L$, где L — полная длина соленоида. Общая длина ИИ и ЦС $2l = 300$ мм. Немагнитный зазор между ИИ и каждым из ЦС $\delta \leq 0,2$ мм.

Для измерений магнитной индукции B используется преобразователь 6. Напряженность магнитного поля H измеряется на некотором расстоянии от поверхности ИИ с помощью преобразователя 2. Использование прокладок 5, 7 создает малые фиксированные немагнитные зазоры для уменьшения влияния непараллельности торцов ИИ и ЦС.

В описанной системе магнитная индукция в центральном сечении ИИ измеряется с погрешностью не более ± 2 %. Напряженность магнитного поля невозможно измерить непосредственно на поверхности ИИ. Ее значения можно найти путем решения обратных задач с использованием математической модели магнитного поля измерительной системы. Такой метод, основанный на объединении экспериментальных исследований и математического моделирования, предложено называть методом натурно-модельных испытаний [1].

Для определения основной кривой намагничивания $B(H)_M$ материала ИИ решаем следующую обратную задачу. Математическая модель магнитного поля измерительной системы (рис. 1) и ее параметры известны за исключением характеристики $B(H)_M$. Выбираем метод моделирования поля. Экспериментально получаем дополнительную информацию — зависимость $B(H)_3$ магнитной индукции в ИИ от напряженности поля вблизи его поверхности. Требуется определить $B(H)_M$ и оценить ее погрешность.

Заметим, что обратные задачи относятся к некорректным в классическом смысле. Далее рассматриваем условно корректные задачи (корректные по А. Н. Тихонову [2]). Существование и единственность решений рассматриваемого класса задач математической физики доказана [3], а их устойчивость обеспечивается выбором решений в классе функций с ограниченной нормой [4]. Используем нулевое приближение к искомой характеристике $B(H)_M^{(0)} = B(H)_3$ и пере-

ходим к алгоритму, который для каждого следующего приближения $n = 1, 2, \dots$ состоит из четырех шагов.

Шаг 1. Решаем прямую задачу расчета стационарного магнитного поля выбранным методом. Находим значения

$B(H_j)^{(n)}$ в области системы, где измеряли H при определении $B(H)_3$. При этом $j = 1, 2, \dots, m$, где m — число измерений H при фиксированных значениях B_j .

Шаг 2. Вычисляем значение функционала, подлежащего минимизации:

$$J^{(n)} = \int_0^{B_{\max}} [H(B)^{(n)} - H(B)_3]^2 dB.$$

Удобнее использовать дискретную форму функционала

$$J_d^{(n)} = \sum_{j=1}^m [H(B_j)^{(n)} - H(B_j)_3]^2.$$

Шаг 3. Проверяем выполнение условия

$$\delta^{(n)} \leq \varepsilon, \quad (1)$$

$$\text{где } \delta^{(n)} = \max_{j=1, m} \left[\frac{(\Delta B_j^{(n)} / B_j^{(n)}) (\Delta H_j^{(n)} / H_j^{(n)})}{\sqrt{(\Delta B_j^{(n)} / B_j^{(n)})^2 + (\Delta H_j^{(n)} / H_j^{(n)})^2}} \right]; \Delta B_j^{(n)}, B_j^{(n)},$$

$\Delta H_j^{(n)}, H_j^{(n)}$ находим из графика (рис. 2) [5]; ε — заданная относительная погрешность.

Если условие (1) выполняется, то характеристика $B(H)_m$ найдена, причем $B(H)_m = B(H)^{(n)}$. Решение тестовых задач показало, что относительная погрешность найденной характеристики не превышает ε .

Если условие (1) не выполняется, то находим следующее приближение, минимизируя функционал $J_d^{(n)}$. Авторами предложен эффективный метод его минимизации, заключающийся в следующем. Для фиксированных значений B_j определяются разности

$$\Delta H(B_j)^{(n)} = K [H(B_j)^{(n)} - H(B_j)_3], \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

где K — коэффициент релаксации, и строится новое приближение, определяются H для всех B_j по формуле

$$H(B_j)^{(n+1)} = H(B_j)_3 - \Delta H(B_j)^{(n)}.$$

Алгоритм поясняется на рис. 3.

Шаг 4. Переход к шагу 1.

Обычно для решения задачи достаточно 3—4 итерации. Отметим, что расчет магнитного поля методом конечных элементов с помощью программы «Maxwell 2D Field Simulator» на ЭВМ с процессором Pentium II при $n = 4, m = 14$ потребовал около трех часов, что неприемлемо при испытаниях изделий из ферромагнитных материалов в условиях массового производства.

Особенностью задачи расчета в данном случае является неограниченная область магнитного поля, обусловленная применением магнитной системы с разомкнутой цепью. Как показали исследования, применение метода конечных элементов для моделирования поля потребует введения искусственной границы области, положение которой определяется с помощью вычислительного эксперимента, использова-

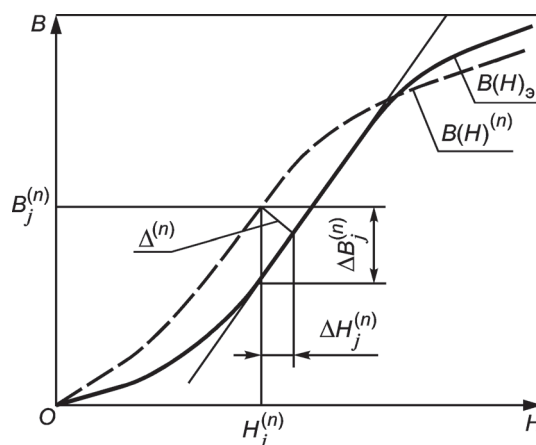


Рис. 2. Оценка погрешности при определении магнитных характеристик $B(H)$

ния конечно-элементной сетки с большим количеством элементов и, следовательно, ЭВМ большой вычислительной мощности для обеспечения приемлемой точности и быстродействия. В связи с этим предложен модифицированный метод интегральных уравнений расчета магнитного поля в магнитных системах для испытаний электротехнических изделий, позволяющий сократить время расчета до 20—35 с [6].

Описанный выше метод определения основной кривой намагничивания был применен для определения петли гистерезиса образца из магнитомягкого материала. На рис. 4 сплошной линией показана предельная петля материала ИИ, пунктирной линией — петля гистерезиса, полученная экспериментально в магнитной системе рис. 1. Петля гистерезиса, полученная в результате моделирования на четвертой итерации, практически совпала с петлей гистерезиса материала. При расчетах использовалась предложенная математическая модель стационарного магнитного поля в виде интегрального уравнения и модифицированный метод интегральных уравнений для численного моделирования полей разомкнутых магнитных систем с малыми немагнитными зазорами [6]. Процесс определения предельной петли гистерезиса заканчивается на четвертой итерации при достижении заданного значения относительной погрешности ε .

Таким образом, предложен эффективный метод измерений магнитных характеристик ферромагнитных материалов, основанный на экспериментальных исследованиях и математическом моделировании. Метод сводится к решению условно корректных обратных задач с применением

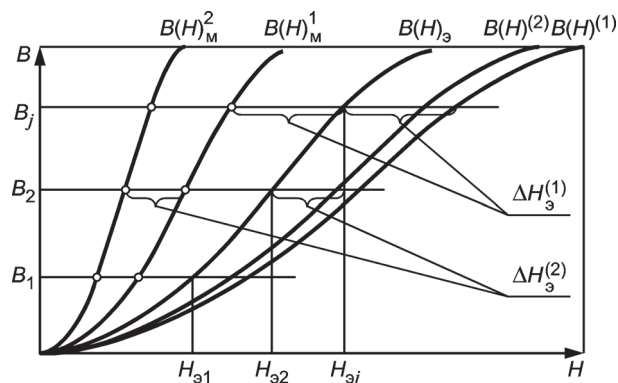


Рис. 3. Пояснение алгоритма минимизации функционала $J_d^{(n)}$

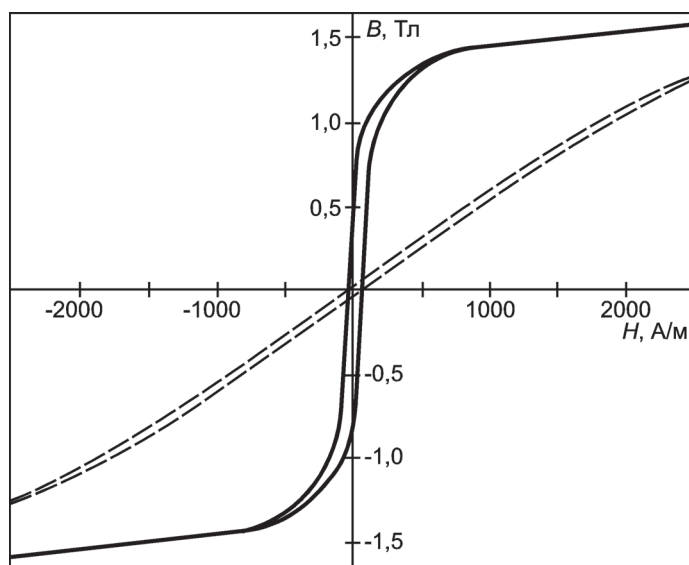


Рис. 4. Первое приближение к характеристике материала ИИ

модифицированного метода интегральных уравнений и нового алгоритма минимизации функционала задачи. Одно из преимуществ метода — возможность его реализации в измерительно-вычислительном комплексе с относительно небольшой вычислительной мощностью.

Результаты работы получены при поддержке проекта № 1.2690.2014/К «Методы решения обратных задач диагно-

стики сложных систем (в технике и медицине) на основе натурно-модельного эксперимента», выполняемого в рамках проектной части государственного задания.

Литература

1. Pat. DE 19944779A1. Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung magnetischer Eigenschaften von Proben / N. Gorbatenko, J. Bachwalov, M. Lankin, E. Kallenbach, F. Beyer. Offenlegungstag 22.03.2001.
2. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.
3. Борухов В. Т., Тимошпольский В. И., Заяц Г. М., Андрианов Д. Н., Цурко В. А. Структурные свойства динамических систем и обратные задачи математической физики // ИФЖ. 2005. Т. 78. № 2. С. 3—15.
4. Самарский А. А., Вабишевич П. Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. М.: Едиториал УРСС, 2004.
5. Антонов В. Г., Петров Л. М., Щелкин А. П. Средства измерений магнитных параметров материалов. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Гречихин В. В., Юфанова Ю. В. Моделирование магнитных полей разомкнутых магнитных систем с малыми воздушными зазорами модифицированным методом интегральных уравнений // Известия вузов. Электромеханика. 2001. № 4—5. С. 5—8.

Дата принятия 26.11.2014 г.

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

534.6.08:534.22:620.179.16

Определение погрешности измерения скорости распространения продольных ультразвуковых волн иммерсионным методом

П. В. БАЗЫЛЕВ, А. И. КОНДРАТЬЕВ, В. А. ЛУГОВОЙ, А. А. РОМАНКО

Дальневосточный филиал Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, Хабаровск, Россия,
e-mail: bazylev@dfvniiftri.ru, lugovoy@dst.khv.ru

Теоретически и экспериментально исследовано влияние слоя адсорбированного газа на границе раздела твердое тело—жидкость на результаты измерений иммерсионным методом скорости распространения продольных ультразвуковых волн в образцах. Выявлена систематическая составляющая погрешности для иммерсионного метода путем сопоставления с данными, полученными бесконтактным методом измерений.

Ключевые слова: распространение акустических колебаний, скорость ультразвуковых волн, иммерсионный и бесконтактный емкостный методы.

Theoretically and experimentally the effect of adsorbed gas layer at the solid-liquid interface on the results of measurement of propagation velocity of longitudinal ultrasonic waves in the samples by immersion method has been studies. By means of comparison with a non-contact measuring method data the systematic component of the immersion method error was revealed.

Key words: propagation of acoustic vibrations, velocity of ultrasonic waves, immersion method, non-contact capacitance method.

При аттестации стандартных образцов и мер, используемых в ультразвуковом (УЗ) неразрушающем контроле для поверки и настройки аппаратуры, применяют иммерсион-

ные методы [1]. Это позволяет устранить трудно контролируемое влияние переходного контактного акустического слоя, характерное для традиционных, контактных методов, и по-