

3. Калантаров, П.Л. Расчет индуктивностей : справ. кн. / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.

УДК 621.3.013

Н.Н. ВОРСИН

Брест, БрГУ имени А.С. Пушкина

АНАЛИТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЯ В МАГНИТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЯХ ТОЛЩИНЫ СТЕНОК

Построение приборов магнитного зондирования требует решения задач расчета магнитных полей, создаваемых соответствующими зондами. Даже если конструктивно зонд определен, расчет его поля далеко не всегда является

простой задачей, поскольку граничные условия могут быть весьма сложными. Использование средств компьютерного моделирования полей, таких как ANSYS, Femlab, Elcut, в принципе, позволяет решить любую полевую задачу, однако при этом теряется параметрическая общность. При наличии нескольких параметров необходим многократный пересчет для различного их сочетания, что затрудняет понимание физической сути результатов. В

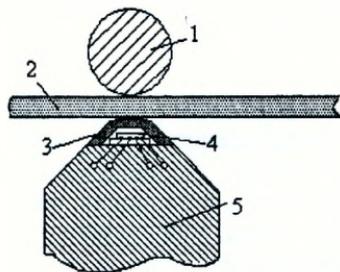


Рисунок 1

этой связи не утратил актуальности классический подход к расчету поля, основанный на допустимых упрощениях и аппроксимациях. Ниже приводятся результаты такого анализа, проведенного в ходе построения магнитного толщиномера стенок. Численное моделирование с помощью программного комплекса Elcut, а также экспериментальные исследования подтвердили допустимость сделанных упрощений, относительные погрешности формульных расчетов не превышают нескольких процентов.

На рисунке 1 показано в разрезе устройство зонда магнитного толщиномера стенок. Зонд имеет форму кругового цилиндра с конусным наконечником. Он состоит из постоянного магнита – 5, на вершине которого закреплен датчик Холла – 4, накрытый защитным колпачком – 3. Принцип работы заключается в том, что постоянный магнит притягивает через измеряемую стенку – 2 ферромагнитный шар – 1, который расположится над вершиной зонда. Ферромагнитный шар при этом намагничивается и создает собственное магнитное поле. С помощью датчика Холла измеряется ин-

дукция суммарного поля, по величине которой формируется оценка толщины измеряемой стенки. Из данного описания следует, что, несмотря на простоту формы, зонд характеризуется весьма большим числом параметров, таких как диаметр магнита, его коэрцитивная сила, диаметр ферромагнитного шара, его проницаемостью, расстояние от датчика до магнита, расстояние от датчика до вершины защитного колпачки и т.п. Для определения влияния этих величин рассмотрим в классическом виде задачу расчета поля ферромагнитного шара, помещенного во внешнее поле.

Классическое решение этой задачи для однородного внешнего поля имеется во многих источниках, например в [1]. Результатом решения является следующая формула, которая в полярной системе координат выражает напряженность поля в точке наблюдения с координатами r, θ :

$$\vec{H} = \vec{H}_0 - H_0 \frac{a^3}{r^3} (\vec{1}_r 2\cos(\theta) + \vec{1}_\theta \sin(\theta)). \quad (1)$$

В данной формуле a – радиус шара, H_0 – напряженность внешнего поля, намагничивающего шарик. Если рассматривать поле только на оси магнита, создающего внешнее поле, то угол $\theta = \pi$, и формула становится очень компактной.

Согласно (1), поле в точке наблюдения представляет собой сумму внешнего поля – первое слагаемое и поле намагниченного шара – второе слагаемое. Множитель H_0 перед вторым слагаемым – это напряженность намагничивающего поля. Поскольку реальное поле неоднородно, напряженности внешнего поля в точке наблюдения и поля, намагничивающего шар, будут различны. Полагая точку наблюдения на оси магнита, т.е. $\theta = \pi$, подставим в (1) различные напряженности:

$$\vec{H} = \vec{H}_{01} + 2\vec{H}_{02} \frac{a^3}{r^3}. \quad (2)$$

Это и есть скорректированная формула суммарного магнитного поля, в которой H_{01} – поле магнита в точке наблюдения, H_{02} – поле того же магнита, но в точке расположения шара, r – расстояние от шара до точки наблюдения. Согласно (2), напряженность поля намагниченного шара убывает при удалении от него по кубическому закону. При построении стенкомеров это обстоятельство накладывает ограничения на выбор диаметра индикаторного шара, так как величина $(a/r)^3$ должна сохранять приемлемое значение (например, не менее 0.1) во всем диапазоне измеряемых толщин.

Напряженность внешнего поля H_{01} и H_{02} определяются при известной форме и размерах используемого магнита. В случае применения цилиндрического магнита с радиусом R и остаточной индукцией B_0 можно воспользоваться известными формулами для индукции поля на оси магнита [2]. В результате получим следующее выражение для индукции поля в зоне расположения датчика

$$B = \frac{B_0}{2} \left[1 - \frac{s}{\sqrt{R_0^2 + s^2}} \right] + B_0 \left[1 - \frac{s+a+h}{\sqrt{R_0^2 + (s+a+h)^2}} \right] \frac{a^2}{(a+h)^2}, \quad (3)$$

в которой s -расстояние от магнита до датчика, h – расстояние от датчика до шара.

Формула (3) многократно подвергалась экспериментальной проверке.



Рисунок 2

Эти проверки показали правомочность и хорошую точность данной формулы. На рисунке 2 показан результат одной из проверок. Там приведен график зависимости показаний датчика Холла, приклеенного к торцу цилиндрического магнита, от расстояния h между датчиком и ферромагнитным шаром. Диаметр шара $2a = 4$ мм. Сплошной линией показан график, рассчитанный по формуле (3), а точками – результаты измерений. Из графика видно, что максимальная относительная погрешность, даваемая расчетной формулой, не превышает 3% при том, что погрешности измерительной аппаратуры имеют тот же порядок величины.

Согласно (3), величина сигнала датчика, обусловленная близостью шара, определяется отношением a/h . По величине этого отношения можно разбить весь диапазон на три участка. Первый участок, который можно назвать измерительным, заключен в диапазоне $0 < a/h < 1$. Здесь имеется сильная зависимость B от h , позволяющая добиться хорошей разрешающей способности измерителя. Второй участок, названный индикаторным, находится в диапазоне $1 < a/h < 2$. Разрешающая способность измерителя на этом участке, особенно в верхней части, значительно хуже, чем на измерительном. Наконец, при $a/h > 2$ измерения практически невозможны.

Из полученной формулы (3), в которой имеется 5 свободных параметров, следует также весьма важный для практики вывод о числе необходимых калибровок прибора, число которых должно быть не менее 5. Каждая из калибровок заключается в измерении известной толщины эталонной стенки и записи результата измерения в память прибора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голосков, Д.П. Уравнения математической физики. Решение задач в системе МЭПЛ / Д.П. Голосков. – СПб. : Питер, 2004. – 539 с.
2. Бухгольц, Г. Расчет электрических и магнитных полей / Г. Бухгольц. – М. : Изд-во иностр. лит., 1961. – 712 с.