

УДК 537.621.4

Т. А. Гадиев, В. А. Куркачева, Р. Н. Гайнуллин

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ДИАМАГНЕТИКОВ И ПАРАМАГНЕТИКОВ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Ключевые слова: магнитная восприимчивость, индукционный метод.

Предложен метод измерения магнитной восприимчивости широкого класса веществ (парамагнетики и диамагнетики). Показано, что использование описанной схемы измерений позволяет эффективно проводить измерения в широком диапазоне температур.

Keywords: magnetic susceptibility induction method.

Method of measurement of magnetic susceptibility for various substances (paramagnetic and diamagnetic) has been proposed. It was stated that this way of measurements give an opportunity to perform measurements under wide temperature range.

Измерение магнитной восприимчивости играет важную роль в исследовании многих классов веществ, позволяя глубже изучить внутреннюю структуру вещества, а также определить характер взаимодействий веществ между собой [1]. Особый интерес представляет проблема измерения магнитной восприимчивости при низких температурах, что актуально для изучения переходных процессов и исследования особых состояний вещества, например – сверхпроводимости.

В данной работе предложен эффективный метод измерения магнитной восприимчивости, пригодный для исследования диа- и парамагнитных образцов при низких температурах. Представлена схема измерительной установки и определены необходимые параметры используемых компонентов устройства.

Метод измерения

Для измерения магнитной восприимчивости при оговоренных выше условиях хорошо подходит схема индукционного измерения восприимчивости с использованием дифференциальной трансформаторной схемы (рис. 1). Она заключается в измерении индуцированного напряжения на индукционных катушках, соединенных по компенсационной схеме дифференциального трансформатора [2]. Переменное напряжение синусоидальной формы создается низкочастотным генератором НЧГ и, пройдя через узкополосный предусилитель сигнала УПУ, подается на первичную катушку. Первичная модулирующая катушка L_0 создает переменное магнитное поле, которое индуцирует во вторичных катушках L_1 и L_2 переменное напряжение той же частоты, что и частота тока в первичной катушке. Поскольку направление намотки вторичных катушек противоположно, а соединение их последовательно, то индуцированные на обеих вторичных катушках напряжения компенсируют друг друга, и суммарное

напряжение на выходе вторичных катушек равно нулю [3,4].

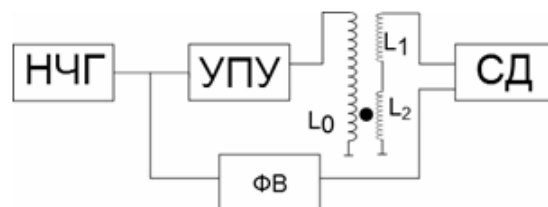


Рис. 1 - Принципиальная схема измерительной установки

При внесении в одну из вторичных катушек измеряемого образца, индуктивность данной катушки изменяется вследствие искажений магнитного поля внутри катушки, вызываемого намагниченностью образца.

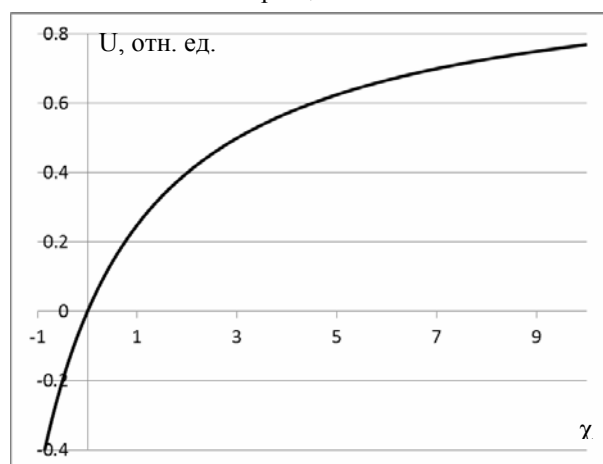


Рис. 2 - Зависимость выходного напряжения (U) от магнитной восприимчивости (χ) исследуемого образца

Это приводит к нарушению изначального баланса схемы дифференциального моста, и на выходе вторичных катушек появляется напряжение, зависящее от намагниченности образца.

Сигнал, снимаемый с вторичных катушек в виде напряжения, индуцированного измеряемым образцом, подается на синхронный детектор СД, который отфильтровывает ненужные наводки и шумы, выделяя лишь сигнал на исходной частоте подаваемого на первичную катушку напряжения. Также синхронное детектирование позволяет выделить сигнал с нужной нам фазой относительно исходного. Если нас интересует вещественная часть магнитной восприимчивости, то сигнал на выходе вторичных катушек будет сдвинут относительно исходного напряжения на $\pi/2$. Для выделения нужной фазы, сигнал с выхода генератора пропускается через фазовращатель ФВ и подается на вход синхронного детектора СД в качестве опорного напряжения.

Для образца сферической формы с учетом размагничивающего фактора напряжение на выходе вторичных катушек будет иметь следующую зависимость от магнитной восприимчивости образца [5]:

$$U_{\text{вых}} = \frac{\alpha \chi}{3 + \chi} \quad (1)$$

где χ – магнитная восприимчивость исследуемого образца, α – коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрии катушек и напряженности магнитного поля внутри них.

Из приведенного выражения видно, что четкая зависимость выходного напряжения от магнитной восприимчивости исследуемого образца наблюдается лишь при относительно малых значениях магнитной восприимчивости χ . На рис. 2 приведен график этой зависимости. Как можно заметить, при разных величинах восприимчивости характер зависимости выходного сигнала от измеряемого параметра будет существенно различаться.

На практике наиболее распространенными являются два крайних случая по отношению к порядку величины восприимчивости:

1) случай диамагнетиков и парамагнетиков:

$$\chi \ll 1$$

2) случай ферромагнетиков: $\chi \gg 1$

В случае с ферромагнетиками выражение (1) можно упростить, пренебрегая слагаемым в знаменателе дроби. Получим, что

$$U_{\text{вых}} = \alpha \quad (2)$$

Отсюда видно, что при высоких значениях магнитной восприимчивости исследуемого вещества выходное напряжение перестает зависеть от величины восприимчивости и стремится к постоянному значению. Это свойство используется для калибровки измерительной схемы и определения коэффициента α . Для этого перед проведением измерений на основном образце, состоящем из парамагнитного или диамагнитного материала, в измерительную установку помещают образец такой же формы, как и исследуемый, но состоящий из ферромагнитного материала.

Для материалов с низким значением магнитной восприимчивости выражение (1) можно упростить следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = \frac{\alpha}{3} \chi \quad (3)$$

т.е. зависимость выходного напряжения от восприимчивости образца можно с высокой степенью точности считать линейной.

Таким образом, данная схема позволяет достаточно эффективно измерять величину магнитной восприимчивости большого класса веществ (парамагнетики и диамагнетики), не используя прецизионные механические весы, как в случае измерения магнитной восприимчивости стандартными механическими методами. Также данный подход позволяет проводить измерения в широком диапазоне температур (включая сверхнизкие).

Литература

1. Чечерников, В.И. Магнитные измерения. М.: Изд-во Московского университета, 1969. С.388.
2. Pobell, F. Matter and Methods at Low Temperatures. Berlin : Springer-Verlag, 1992.
3. Макаров В.Г. Трехфазный магнито-транзисторный инвертор напряжения на трехстержневом трансформаторе / В.Г. Макаров// Вестн. Казан. технол. ун-та.- 2011. -Т.14, №17. - С .50-53
4. Макаров В.Г. Трехфазный магнито-транзисторный инвертор напряжения на трехстержневом трансформаторе / В.Г. Макаров// Вестн. Казан. технол. ун-та.- 2011. -Т.14, №20. - С .155-159
5. Кифер, И.И. Испытания ферромагнитных материалов. М. : б.н., 1969.