

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий

## Отчёт о выполнении лабораторной работы 3.4.2 Закон Кюри-Вейса

Автор:  
Тихонов Дмитрий Романович,  
студент группы Б01-206

Долгопрудный, 2023

# 1 Введение

**Цель работы:** изучение температурной зависимости магнитной восприимчивости ферромагнетика выше точки Кюри.

**В работе используются:** катушка самоиндукции с образцом из гадолиния, термостат, частотомер, цифровой вольтметр,  $LC$ -автогенератор, термopара медь-константан.

## 2 Теоретические сведения

Вещества с отличными от нуля атомными магнитными моментами обладают парамагнитными свойствами. Внешнее магнитное поле ориентирует магнитные моменты, которые в отсутствие поля располагались в пространстве хаотичным образом. При повышении температуры  $T$  возрастает дезориентирующее действие теплового движения частиц, и магнитная восприимчивость парамагнетиков убывает по *закону Кюри* – обратно пропорционально температуре:

$$\chi \propto \frac{1}{T}. \quad (1)$$

Некоторые парамагнетики при понижении температуры испытывают фазовый переход в ферромагнитное состояние. При малых температурах тепловое движение всё меньше препятствует магнитным моментам атомов ориентироваться в одном направлении при сколь угодно слабом внешнем поле. Благодаря обменному взаимодействию, имеющему электростатическую природу, в ферромагнетиках самопроизвольное упорядочение магнитных моментов возможно при довольно высоких температурах. Температуру фазового перехода парамагнетик-ферромагнетик называют *температурой Кюри*  $\Theta_K$ . Температурная зависимость магнитной восприимчивости у ферромагнетиков выше точки Кюри с удовлетворительной точностью описывается *законом Кюри-Вейсса*:

$$\chi \propto \frac{1}{T - \Theta_p}, \quad (2)$$

где  $\Theta_p$  – параметр с размерностью температуры, называемый иногда *парамагнитной точкой Кюри*. Величина  $\Theta_p$  близка к  $\Theta_K$ , но не совпадает с ней.

Непосредственно вблизи  $\Theta_K$  закон Кюри-Вейсса (2) нарушается. На практике наблюдается зависимость, изображённая на рис. 1.

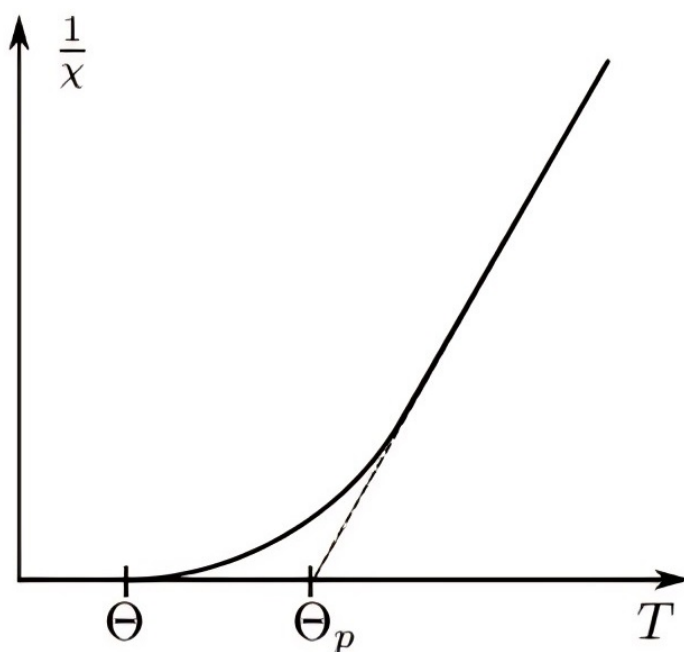


Рис. 1: Теоретическая зависимость обратной магнитной восприимчивости от температуры

### 3 Методика измерений и экспериментальная установка

Схема установки для проверки закона Кюри-Вейсса показана на рис. 2. Исследуемый ферромагнитный образец (гадолиний) расположен внутри пустотелой катушки самоиндукции, которая служит индуктивностью колебательного контура, входящего в состав  $LC$ -автогенератора.

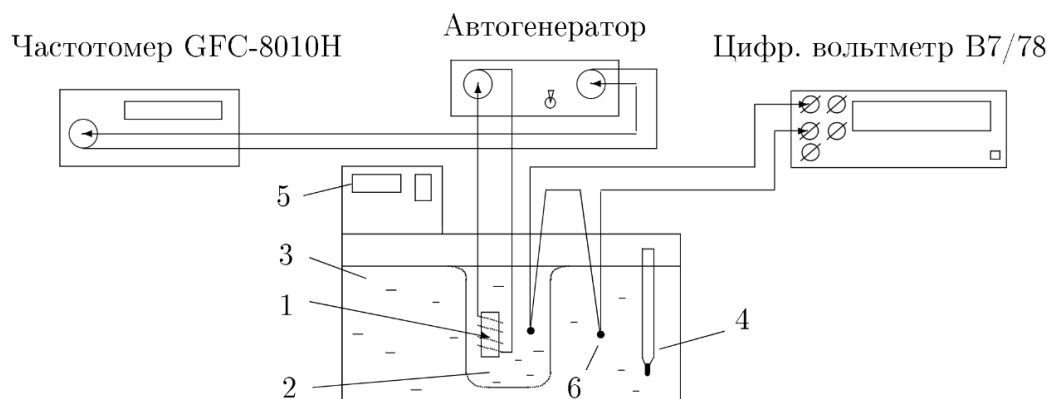


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

Магнитная восприимчивость образца  $\chi$  определяется по изменению самоиндукции катушки. Обозначив через  $L$  самоиндукцию катушки с образцом, а  $L_0$  – её самоиндукцию в отсутствие образца, получим

$$(L - L_0) \propto \mu - 1 = \chi. \quad (3)$$

При изменении самоиндукции образца меняется период колебаний автогенератора:

$$\tau = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (4)$$

где  $C$  – ёмкость контура автогенератора. Период колебаний в отсутствие образца определяется самоиндукцией пустой катушки:

$$\tau_0 = 2\pi\sqrt{L_0C}. \quad (5)$$

Остюда находим

$$L - L_0 \propto \tau^2 - \tau_0^2 \Rightarrow \chi \propto \tau^2 - \tau_0^2. \quad (6)$$

Из формул (2) и (6) следует, что закон Кюри-Вейсса *справедлив*, если выполнено соотношение

$$\frac{1}{\tau^2 - \tau_0^2} \propto T - \Theta_p. \quad (7)$$

Температура исследуемого образца всегда несколько отличается от температуры воды в термостате. После того как вода достигла заданной температуры, идёт медленный процесс выравнивания температур образца и воды. Разность их температур контролируется с помощью медно-константановой термопары 6, один из спаев которой находится в тепловом контакте с образцом, а другой погружён в воду. Измерение периода колебаний автогенератора проводилось в тот момент, когда указанная разность температур становилась меньше  $0,5^\circ\text{C}$ , т.к. *более точному измерению температур мешают паразитные ЭДС*, возникающие в цепи термопары.

## 4 Результаты измерений и обработка данных

1. Подготовим приборы к работе. Оценим допустимую ЭДС термопары:  $\Delta U = \frac{\Delta T}{k} = 0,0208$  мВ, где  $k = 24$  °С/мВ и  $\Delta T = 0,5$  °С.
2. Исследуем зависимость периода колебания генератора от температуры образца, отмечая период колебаний  $\tau$  по частотомеру, а температуру  $T$  – по показаниям дисплея и цифровому вольтметру. Занесём в таблицу 1 измеренные и рассчитанные значения.

$T',$ °С	$\tau$ , мкс	$\tau_0$ , мкс	$\Delta U$ , мВ	$\Delta T$ , °С	$1/(\tau^2 - \tau_0^2)$ , мкс <sup>-2</sup>	$T$ , °С
14,12	10,789	9,045	-0,0118	-0,28	0,029	13,84
16,09	10,692		-0,0105	-0,25	0,031	15,84
18,09	10,527		-0,0109	-0,26	0,034	17,83
20,10	10,225		-0,0086	-0,21	0,044	19,89
22,11	9,926		-0,0153	-0,37	0,060	21,74
24,10	9,617		-0,0195	-0,47	0,094	23,63
26,00	9,455		-0,0159	-0,38	0,132	25,62
28,16	9,366		-0,0155	-0,37	0,169	27,79
30,02	9,322		-0,0175	-0,42	0,197	29,60
32,03	9,286		-0,0161	-0,39	0,226	31,64
34,01	9,261		-0,0184	-0,44	0,253	33,57
36,12	9,241		-0,0181	-0,43	0,279	35,69
38,05	9,226		-0,0187	-0,45	0,302	37,60
40,07	9,212		-0,0065	-0,16	0,328	39,91

Таблица 1: Результаты исследования зависимости периода колебания генератора от температуры образца

3. Построим график зависимости  $\frac{1}{(\tau^2 - \tau_0^2)} = f(T)$ . Прямую ферромагнитного участка экстраполируем к оси абсцисс, полученное значение – экспериментальное значение точки Кюри для исследуемого образца.

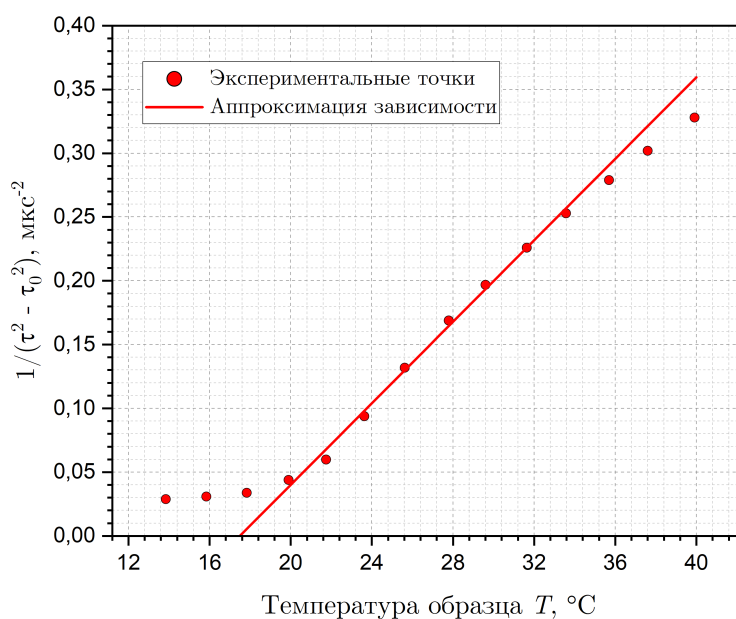


Рис. 3: Зависимость  $\frac{1}{(\tau^2 - \tau_0^2)} = f(T)$

4. Аппроксимируя полученные данные при помощи программы *OriginPro 2023b*, получим значение парамагнитной точки Кюри для гадолиния  $\Theta_p = (17,5 \pm 0,8)^\circ\text{C}$  и значение температуры Кюри для гадолиния  $\Theta_p \approx 20^\circ\text{C}$ .

## 5 Заключение

1. В ходе работы был экспериментально *подтвержден закон Кюри-Вейсса* для металла гадолиния.
2. Была найдена *температура Кюри*:  $\Theta_K \approx 20^\circ\text{C}$ . Полученное значение отличается от табличного  $\Theta_p^{\text{табл}} = 20,2^\circ\text{C}$  на 1%.
3. Была найдена *парамагнитная температура Кюри*:  $\Theta_p = (17,5 \pm 0,8)^\circ\text{C}$ . Заметим, что *парамагнитная температура Кюри меньше температуры Кюри* ( $\Theta_p < \Theta_K$ ).
4. Основной вклад в погрешность внесла неточность данных, полученных при температурах, близких к температуре Кюри.
5. Анализ погрешностей показал, что измерения были проведены с достаточной точностью.