



УДК 53.082.72/.78
doi:10.21685/2587-7704-2022-7-1-5



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Электронный прибор для прецизионного измерения точки Кюри ферромагнитных материалов

Александр Васильевич Рудин

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
rudin1951@mail.ru

Илья Александрович Шилкин

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
9876532101@mail.ru

Станислав Алексеевич Баркунов

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
barkstas@mail.ru

Анна Дмитриевна Семенова

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
anna-semyonova-02@mail.ru

Аннотация. Приводится описание назначения и принципа действия электронного прибора, предназначенного для прецизионного измерения точки Кюри широкого класса ферромагнитных материалов плоской и цилиндрической формы малых размеров. Приводится также описание блок-схемы и конструктивных особенностей основных электронных блоков предлагаемого прибора. Дается описание конструкции электронагревательной камеры для нагрева ферромагнитных материалов плоской и цилиндрической формы. Принцип действия предлагаемого прибора основано на возбуждении с помощью возбуждающей катушки индуктивности в исследуемом ферромагнитном образце переменного синусоидального магнитного потока оптимальной частоты с последующим локальным нагревом центральной части образца до температуры перехода твердого магнетика из ферромагнитного состояния в парамагнитное, которое сопровождается резким уменьшением магнитного потока в образце, и как следствие, амплитуды ЭДС-индукции электромагнитных колебаний в приемной катушке индуктивности. Точка Кюри определяется посредством аппроксимации температурной зависимости амплитуды синусоидальных электромагнитных колебаний на выходе приемной катушки. Относительная погрешность измерения точки Кюри не превышает 0,3 %.

Ключевые слова: ферромагнитные материалы, точка Кюри, электронагревательная камера, генератор синусоидальных колебаний, усилитель, регистрирующий прибор

Для цитирования: Рудин А. В., Шилкин И. А., Баркунов С. А., Семенова А. Д. Электронный прибор для прецизионного измерения точки Кюри ферромагнитных материалов // Инжиниринг и технологии. 2022. Т. 7(1). С. 1–6. doi:10.21685/2587-7704-2022-7-1-5

An electronic device for precision measurement of the Curie point for ferromagnetic materials

Aleksandr V. Rudin

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
rudin1951@mail.ru

Il'ya A. Shilkin

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
9876532101@mail.ru

Stanislav A. Barkunov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
barkstas@mail.ru



Anna D. Semenova

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
anna-semyonova-02@mail.ru

Abstract. The purpose and operating principle of an electronic device intended for precision measurement of the Curie point for a wide class of small-sized flat and cylindrical ferromagnetic materials are specified. A block diagram and design features of the main electronic units of the proposed device are described. A design of the electric heating chamber for heating flat and cylindrical ferromagnetic materials is presented. The operating principle of the proposed device is based on excitation of the alternating sinusoidal magnetic flux of the optimal frequency, followed by local heating of the central part of the sample to the temperature of transition of the solid magnetic from the ferromagnetic state to the paramagnetic state with the help of an exciting inductor in the examined ferromagnetic sample. This process is accompanied by a sharp decrease in magnetic flux in the sample, and as a result, the amplitude of electromotive force (EMF) induction of electromagnetic oscillations in the receiving inductor. The Curie point is determined by approximating the temperature dependence of the amplitude of the sinusoidal electromagnetic oscillations at the output of the receiving coil. The relative error of the Curie point measurement does not exceed 0.3%.

Keywords: ferromagnetic materials, Curie point, electric heating chamber, sinusoidal oscillation generator, amplifier, recording device

For citation: Rudin A.V., Shilkin I.A., Barkunov S.A., Semenova A.D. An electronic device for precision measurement of the Curie point for ferromagnetic materials. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2022;7(1):1–6. (In Russ.). doi:10.21685/2587-7704-2022-7-1-5

Предлагаемый электронный прибор относится к метрологической технике и предназначен для прецизионного измерения температуры перехода твердого магнетика из ферромагнитного состояния в парамагнитное, которая носит название точки Кюри.

Для ферромагнитных и ферримагнитных материалов характерна высокая индукция насыщения, которая медленно уменьшается с повышением температуры, а затем резко падает, достигая нулевого значения при некоторой характеристической температуре, известной, как *точка Кюри*. Ферримагнитные вещества во многих отношениях ведут себя как ферромагнетики, обнаруживая при этом не зависящую от внешнего магнитного поля намагниченность насыщения и фиксированную точку Кюри [1].

Температура Кюри – одна из основных и важных характеристик любого ферромагнетика. Являясь функцией химического состава материала – сплава, температура Кюри в некоторых случаях может быть использована для исследования диаграмм состояния, например таких, как диаграммы состояния Fe–Cr, Fe–Ni, Cu–Ni и др. Таким образом, можно считать, что температура Кюри играет главную роль при рассмотрении границ применения ферромагнетиков как в машиностроении, так и в приборостроении. Поэтому при конструкторских разработках и выборе типа и марки ферромагнетика для проектируемого приборного блока или специальной детали станка необходимо располагать информацией о величине его точки Кюри.

Для измерения температуры Кюри в настоящее время применяются различные методики [2, 3]. Все они базируются на резком уменьшении магнитного потока при переходе ферромагнетика из ферромагнитного в парамагнитное состояние при температуре Кюри. Магнитный поток в исследуемом образце создается переменным магнитным полем электрической спирали нагревателя промышленной частоты. Общим недостатком данных методик является то, что и первичная и вторичная катушки подвергаются нагреву до высокой температуры, что оказывает отрицательное влияние на изоляцию вторичной обмотки от первичной. Кроме того, вторичная обмотка выполняется из нихромового провода, который обладает большим сопротивлением, которое является функцией температуры, и это приводит к необходимости учитывать изменение сопротивления вторичной обмотки от температуры при обработке результатов измерений. Таким образом, существующие методики энергоемки, очень сложны как в конструктивном аспекте, так и при обработке результатов измерений точки Кюри.

В данной работе описывается устройство лабораторного электронного прибора, который позволяет с высокой точностью и оперативно осуществлять измерение температуры перехода различных магнитных материалов из ферромагнитного состояния в парамагнитное – точки Кюри, выполненные в виде тонкой прямоугольной пластины или тонкого стержня цилиндрической формы, длиной не более 15 см.



В электронном приборе предлагается новая методика возбуждения переменного магнитного потока синусоидальной формы оптимальной частоты $f = 400$ Гц в исследуемом образце с помощью возбуждающей катушки индуктивности, которая свободно закрепляется на одном конце исследуемого образца. Переменный магнитный поток наводит ЭДС-индукции в приемной катушке индуктивности, которая свободно закрепляется на другом конце исследуемого образца. Нагрев исследуемого образца осуществляется только в локальной узкой центральной части, длиной не более 2–3 см в интервале температур от +600 °С до +1000 °С коротким электронагревателем постоянного тока. Время нагрева центральной части образца не превышает 5–10 мин.

При быстром нагреве центрального участка исследуемого образца до температуры перехода магнетика из ферромагнитного состояния в парамагнитное – точки Кюри – амплитуда ЭДС-индукции на выходе приемной катушки будет резко уменьшаться до нулевого уровня вследствие резкого уменьшения магнитного потока в центральной части объема исследуемого образца. При этом одновременно осуществляется контроль температуры образца и амплитуды напряжения синусоидальных колебаний на выходе приемной катушки, которая подключается к входу усилителя напряжения, в котором осуществляется усиление электрических сигналов по напряжению. Выход усилителя через диодный выпрямитель подключается к регистрирующему цифровому прибору, по показаниям которого строится график зависимости ЭДС-индукции синусоидальных колебаний на выходе приемной катушки от температуры. Точка Кюри определяется посредством аппроксимации температурной зависимости амплитуды синусоидальных электромагнитных колебаний на выходе приемной катушки L_2 на температурную ось.

Суть метода заключается в регистрации температурной зависимости ЭДС электромагнитной индукции ε_2 в измерительной катушке L_2 при электрическом токе постоянной амплитуды I_1 в возбуждающей катушке L_1 . При этом исследуемый ферромагнитный образец выполняет роль сердечника [2].

Известно, что

$$\varepsilon_2 = -M_{21} \frac{dI_1}{dt}, \quad (1)$$

где M_{21} – коэффициент взаимной индукции. Если обе катушки имеют одинаковую длину l и диаметр, обе намотаны «виток к витку», то для M_{21} справедливо выражение

$$M_{21} = \frac{n_1 n_2}{l} \mu_0 \mu S. \quad (2)$$

Здесь S – площадь, охватываемая одним витком, μ – магнитная проницаемость сердечника, n_1 и n_2 – количество витков в задающей и измерительной катушках соответственно.

Магнитная проницаемость связана с намагниченностью соотношением

$$\mu = \frac{J_S(T)}{H} + 1. \quad (3)$$

Если диаметр катушек значительно меньше их длины, то

$$H \approx \frac{n_1 I_1}{l}. \quad (4)$$

Подставив (2), (3) и (4) в (1), для ε_2 получаем

$$\varepsilon_2 = -\mu_0 J_S(T) \frac{n_2 S}{I_1} \frac{dI_1}{dt} - \mu_0 n_1 n_2 \frac{S}{l} \frac{dI_1}{dt}. \quad (5)$$

Таким образом, с точностью до температурно-независимого слагаемого ε_2 пропорциональна $J_S(T)$.

Блок-схема предлагаемого лабораторного электронного прибора, предназначенного для измерения точки Кюри ферромагнитных материалов, выполненных в форме тонкого стержня или тонкой прямоугольной пластины, приведена на рис. 1.

Электронный прибор образован электронагревательной печью 1, выполненной в виде короткого цилиндрического электронагревателя, в которую помещается исследуемый образец 2, выполненный в форме тонкого цилиндра или прямоугольной пластины, длиной не более 15 см.

На свободные концы исследуемого образца 2 надеваются возбуждающая 4 – L_1 и приемная 5 – L_2 катушки индуктивности. Возбуждающая катушка индуктивности 4 – L_1 подключается к выходу



усилителя мощности УМ-6, вход которого подключен к выходу генератора синусоидальных колебаний низкой частоты ГНЧ-7. Приемная катушка индуктивности $5 - L_2$ подключена к усилителю напряжения низкой частоты УНЧ-8, выход которого подключен к электронному осциллографу ОЦ-9 и через диодный мостик Д-10 к регистрирующему цифровому прибору ММ-11. Нагрев электропечи осуществляется постоянным током от блока питания БП-3, что полностью исключает влияние тока нагревателя на синусоидальное напряжение в возбуждающей и приемной катушках. Измерение и контроль температуры образца осуществляется с помощью хромель-алюмелевой термопары 12, непосредственно закрепленной на поверхности исследуемого образца 2 и помещенной в зону максимального нагрева высокотемпературной печи 1. Свободные концы термопары 12 подключаются к мультиметру ММ-13, типа ДТ-838, который позволяет проводить измерения температуры в печи в градусах Цельсия с точностью до $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

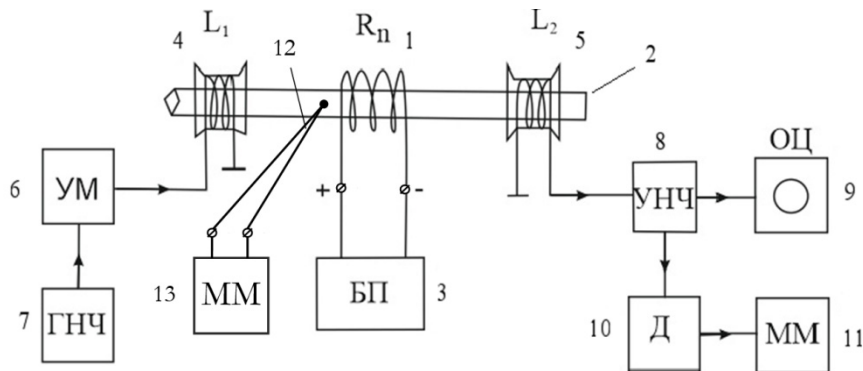


Рис. 1. Блок-схема электронного прибора

Основным элементом электронного прибора является высокотемпературная печь с коротким электронагревателем. Конструкция электронагревательной печи приведена на рис. 2.

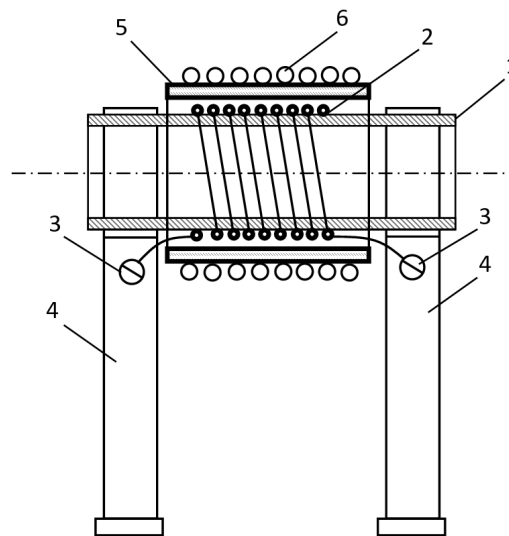


Рис. 2. Конструкция электронагревательной печи

Электронагревательная высокотемпературная печь представляет собой кварцевую трубку 1, на которую никромовым проводом намотана спираль 2, методом «виток к витку». Длина намотки спирали составляет 3 см. Кварцевая трубка 1 помещена коаксиально в экранирующую корундовую трубу 5, которая обеспечивает тепловую и механическую защиту спирали электронагревателя, на поверхность которой дополнительно наматывается асбестовый шнур 6. Выводы спирали нагревателя 2 закрепляются с помощью болтов 3 на двух металлических стойках-хомутах 4, которые жестко закреплены на концах кварцевой трубки 1. Стойки-хомуты 4 крепятся в вертикальном положении на горизонтальной опорной плите. Вертикальные стойки 4 одновременно являются токопроводящими электрическими контактами нагревательной никромовой спирали 2.



Данная конструкция электронагревательной печи позволяет осуществлять локальный нагрев исследуемого ферромагнитного образца только в узкой центральной его части, длиной от 20 мм до 30 мм. При этом концы исследуемого образца, длина которого составляет от 13 см до 15 см имеют комнатную температуру, что значительно упрощает конструкцию возбуждающей и приемной катушек индуктивности.

Генератор синусоидальных колебаний низкой частоты ГНЧ-7 в совокупности с усилителем мощности УМ-6 предназначен для возбуждения в катушке индуктивности 4 – L_1 синусоидальных колебаний оптимальной частоты $f = 400$ Гц, мощностью не менее 0,5 Вт. Данная величина частоты и мощности синусоидального тока необходимы для возбуждения переменного магнитного потока оптимальной амплитуды в объеме ферромагнитного образца, который возбуждает в приемной катушке индуктивности ЭДС-индукцию с амплитудой не менее 1 мВ. Величина магнитного потока в исследуемом образце контролируется с помощью приемной катушки 5 – L_2 , подключенной к входу усилителя напряжения УНЧ-8, который усиливает переменное напряжение до величины от 300 мВ до 400 мВ, которое затем подается на вход электронного осциллографа ОЦ-9, типа С1-83, и на диодный мостик D-10, который преобразует переменное напряжение низкой частоты в постоянное напряжение, величина которого измеряется регистрирующим цифровым прибором (мультиметром) ММ-11, типа ДТ-838.

На рис. 3 показана типичная зависимость амплитуды напряжения ЭДС-индукции на выходе приемной катушки L_2 в режиме нагрева ферромагнитного образца – трансформаторной стали. Из приведенного рисунка видно, что в интервале температур от +750 °С до +850 °С ЭДС-индукции на выходе приемной катушки резко уменьшается, что свидетельствует о переходе исследуемого магнетика из ферромагнитного состояния в парамагнитное.

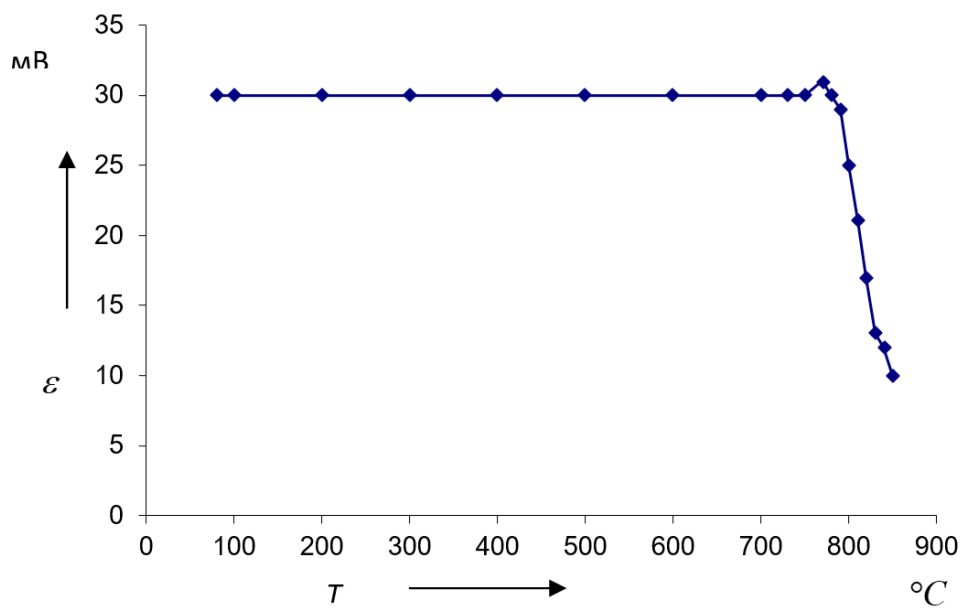


Рис. 3. График зависимости ЭДС-индукции от температуры для трансформаторной стали

Абсолютная и относительная систематическая погрешность измерения температуры Кюри с помощью данного прибора определяется по формуле

$$\varepsilon_{сис} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\varepsilon_i}{\bar{\varepsilon}_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{\bar{T}}\right)^2},$$

где

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{\varepsilon_{max} + \varepsilon_{min}}{2} = \frac{500 + 300}{2} = 400 \text{ (мВ)}, \Delta\varepsilon = 1 \text{ мВ},$$

$$\bar{T} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} = \frac{1000 + 550}{2} = 775 \text{ (К)}, \Delta T = 0,5 \text{ К}.$$



$$\text{Тогда } \varepsilon_{\text{сис}} = \sqrt{\left(\frac{1}{400}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{775}\right)^2} = 0,0026, \text{ или в процентах: } \varepsilon_{\text{сис}} = 0,26 \% .$$

Таким образом, предлагаемый электронный прибор позволит оперативно и с высокой точностью осуществлять измерение точки Кюри ферромагнитных материалов широкого класса как в лабораторных, так и в заводских условиях.

Список литературы

1. Каганов М. И., Цукерник В. М. Природа магнетизма. М. : Наука, 1982. 192 с.
2. Физика твердого тела. Лабораторный практикум. Ч. 2. Физические свойства твердых тел / под ред. А. Ф. Хохлова. М. : Высшая школа, 2001. 485 с.
3. Структура и физические свойства твердого тела : учеб. пособие / под ред. Л. С. Палатника. Киев : Вища шк., 1983. 264 с.

References

1. Kaganov M.I., Tsukernik V.M. *Priroda magnetizma = The nature of magnetism*. Moscow: Nauka, 1982:192. (In Russ.)
2. Khokhlov A.F (ed.). *Fizika tverdogo tela. Laboratornyy praktikum. Ch. 2. Fizicheskie svoystva tverdykh tel = Solid state physics. Laboratory practice. Part 2. Physical properties of solids*. Moscow: Vysshaya shkola, 2001:485. (In Russ.)
3. Palatnik L.S. (ed.) *Struktura i fizicheskie svoystva tverdogo tela: ucheb. posobie = Structure and physical properties of a solid body: A textbook*. Kiev: Vishcha shk., 1983:264. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 02.03.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 05.04.2022

Принята к публикации / Accepted 20.04.2022