

Измерительно-вычислительный комплекс для исследования магнитных характеристик магнитомягких материалов

А.В. Егоров¹, В.В. Поляков^{1,2}, А.А. Лепендин¹, Д.Д. Рудер¹

¹Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия)

Measuring And Computing System for Studying the Magnetic Characteristics of Soft Magnetic Materials

A.V. Egorov¹, V.V. Polyakov^{1,2}, A.A. Lependin¹, D.D. Ruder¹

¹Altai State University (Barnaul, Russia)

²Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS (Tomsk, Russia)

Неразрушающая вихретоковая диагностика структуры, состава, физико-механических свойств ферромагнитных материалов, а также вихретоковый контроль эксплуатационных параметров изготовленных из них изделий требует знания магнитных характеристик этих материалов. При вихретоковых измерениях на получаемые результаты влияет значительное число факторов — магнитные и электрические свойства материалов, геометрические характеристики изделий, условия измерения, конструктивные особенности вихретокового датчика и т.д., при этом сами магнитные свойства обладают высокой структурной чувствительностью. В силу этого для выделения диагностируемых параметров важной задачей является разделение влияющих факторов и выделение вклада магнитных свойств.

В настоящей работе описывается измерительно-вычислительный комплекс, позволяющий в автоматическом режиме определять магнитную проницаемость магнитомягких ферромагнитных материалов при различных значениях напряженности внешнего намагничивающего поля. На примере магнитомягких ферритов проведена апробация комплекса. Приведена экспериментальная зависимость магнитной проницаемости от величины магнитного поля для начального участка основной кривой намагничивания, проведено сопоставление полученной начальной магнитной проницаемости с данными независимых косвенных измерений.

Описанное в работе устройство обеспечивает повышение надежности и достоверности результатов экспериментального определения магнитных характеристик и может быть использовано при проведении неразрушающей диагностики изделий из магнитомягких ферромагнитных материалов.

Ключевые слова: магнитная проницаемость, неразрушающая диагностика, вихретоковые измерения, магнитомягкие материалы.

Non-destructive eddy current diagnostics of the structure, composition, physical and mechanical properties of ferromagnetic materials, as well as eddy current monitoring of the operational parameters of products manufactured from them, requires knowledge of the magnetic characteristics of these materials. In eddy current measurements, the results obtained are influenced by a significant number of factors — magnetic and electrical properties of materials, geometric characteristics of products, measurement conditions, design features of an eddy current sensor, etc. Also, the magnetic properties themselves have high structural sensitivity. Thus, identification of the diagnosed parameters puts great importance on the tasks to separate the influencing factors and isolate the contribution of the magnetic properties.

This paper describes the measuring and computing system that allows automatic determination of the magnetic permeability of soft magnetic ferromagnetic materials at various values of the strength of the external magnetizing field. The system has been tested using soft magnetic ferrites samples. An experimental dependence of the magnetic permeability on the magnitude of the magnetic field for the initial section of the main magnetization curve is presented. The obtained initial magnetic permeability is compared with the data of independent indirect measurements.

The proposed system provides an increase in the reliability and accuracy of the results of the experimental determination of magnetic characteristics and can be used for non-destructive diagnostics of products made of soft magnetic ferromagnetic materials.

Key words: magnetic permeability, non-destructive diagnostics, eddy current measurements, soft magnetic materials.

Введение

Измерения магнитных характеристик ферромагнитных материалов [1] широко применяют при различных методах неразрушающего контроля [2], в частности, при вихретоковых методах диагностики структуры, состава, физико-механических свойств. Вихретоковый метод является многопараметрическим, т.е. на его результаты влияют магнитные и электрические свойства материалов, геометрические характеристики изделия, условий измерения, конструктивных особенностей датчика и ряд других параметров. При этом сами магнитные характеристики существенно зависят не только от химического состава ферромагнитного материала, но и от его структуры [3, 4], которая может изменяться при термической обработке и механическом деформировании. В силу этого актуальной задачей является поиск путей, позволяющих выделить контролируемые параметры на фоне других факторов, мешающих проведению диагностики [5, 6].

Для расширения возможностей вихретоковой диагностики в последнее время были привлечены методы машинного обучения. В частности, оказались эффективными проекционные методы многомерного анализа, позволившие надежно разделять влияющие факторы за счет обработки данных, получаемых при вихретоковых измерениях [7]. Эти методы требуют наличия баз соответствующих экспериментальных данных, созданных для материалов с заранее известными свойствами [8], в частности, с известными

удельной электрической проводимостью и относительной магнитной проницаемостью. При создании таких баз данных для ферромагнитных материалов особую сложность представляют измерения магнитной проницаемости. Справочные значения этой характеристики из-за ее высокой структурной чувствительности, как правило, приводятся в широком допустимом диапазоне, а величина намагничивающего поля может не совпадать с напряженностью магнитного поля, создаваемого вихретоковым датчиком. В силу этого актуальной является задача надежного измерения магнитных характеристик ферромагнитных материалов [9, 10], прежде всего — магнитной проницаемости. В настоящей работе описывается измерительно-вычислительный комплекс, позволяющий определять магнитную проницаемость магнитомягких ферромагнитных материалов при различных значениях напряженности намагничивающего поля.

1. Измерительное устройство

В описываемом измерительно-вычислительном комплексе для определения магнитной проницаемости ферромагнитных материалов была применена методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик магнитомягких материалов, согласно [11]. Структурная схема аппаратной части комплекса приведена на рисунке 1. Регулируемый источник питания 1, выходное напряжение U которого зависит от величины внешнего управляющего напряжения $U_{упр}$, подключен к электронному переключателю 2, задающему направ-

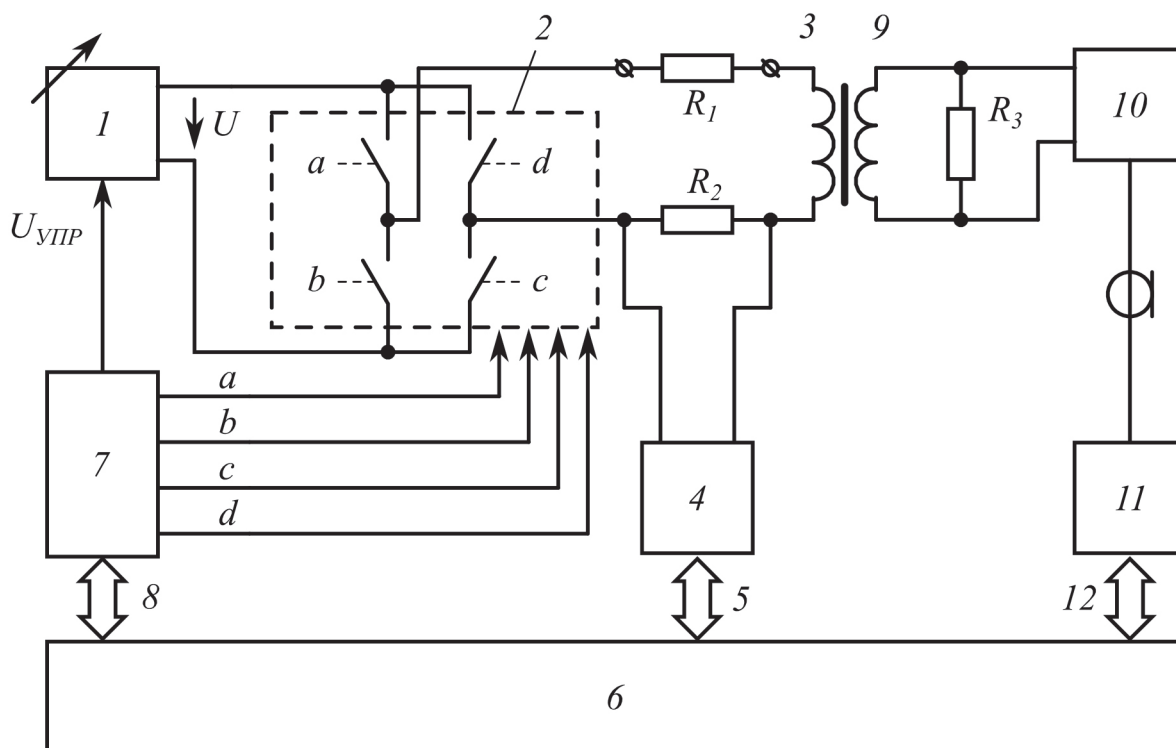


Рис. 1. Структурная схема измерительно-вычислительного комплекса

ление тока в намагничивающей цепи в зависимости от комбинации логических сигналов на входах a , b , c и d . Намагничивающая цепь состоит из намагничивающей обмотки 3, токоограничивающего резистора R_1 и прецизионного резистора R_2 . Намагничивающая обмотка 3 предназначена для создания магнитного поля заданной напряженности, в котором находится исследуемый образец. Резистор R_1 ограничивает диапазон плавной регулировки тока в цепи путем изменения напряжения U . Прецизионный резистор R_2 служит для преобразования тока, протекающего через намагничивающую обмотку, в напряжение. Это напряжение измеряется цифровым вольтметром 4, показания которого по каналу связи 5 передаются управляющему компьютеру 6.

Эти показания используются в дальнейшем для расчета напряженности намагничивающего поля. Управляющее напряжение $U_{упр}$, отвечающее за плавную регулировку тока в намагничивающей обмотке, устанавливается на аналоговом выходе формирователя 7, собранном на микроконтроллере и подключенном по каналу связи 8 с управляющим компьютером. Это же устройство генерирует на выводах a , b , c и d логические сигналы, управляющие работой электронного переключателя. Сигнал с измерительной обмотки 9, к которой подключен резистор R_3 , через ком-

пенсированный делитель напряжения 10 подается на вход цифрового осциллографа 11. Осциллограф обладает возможностью подключения к компьютеру посредством канала связи 12 и его удаленного управления командами языка SCPI (Simple Commands for Programmable Instruments). Используя данный язык программирования, управляющая программа настраивает необходимый режим измерения и выдает запрос на передачу осциллографом данных зарегистрированного импульсного сигнала с измерительной обмотки. Проводя численное интегрирование этого сигнала по времени, рассчитываем магнитный поток внутри образца.

Принципиальная схема электронного переключателя приведена на рисунке 2. Переключатель собран по схеме электрического Н-моста, в плечах которого находятся электронные ключи на мощных полевых транзисторах с изолированными затворами. К питающей диагонали моста подключается регулируемый источник постоянного напряжения, а к другой диагонали — намагничивающая цепь. Следует отметить, что сопротивление каналов открытых полевых транзисторов много меньше общего сопротивления намагничивающей цепи и они практически не влияют на величину силы тока в ней.

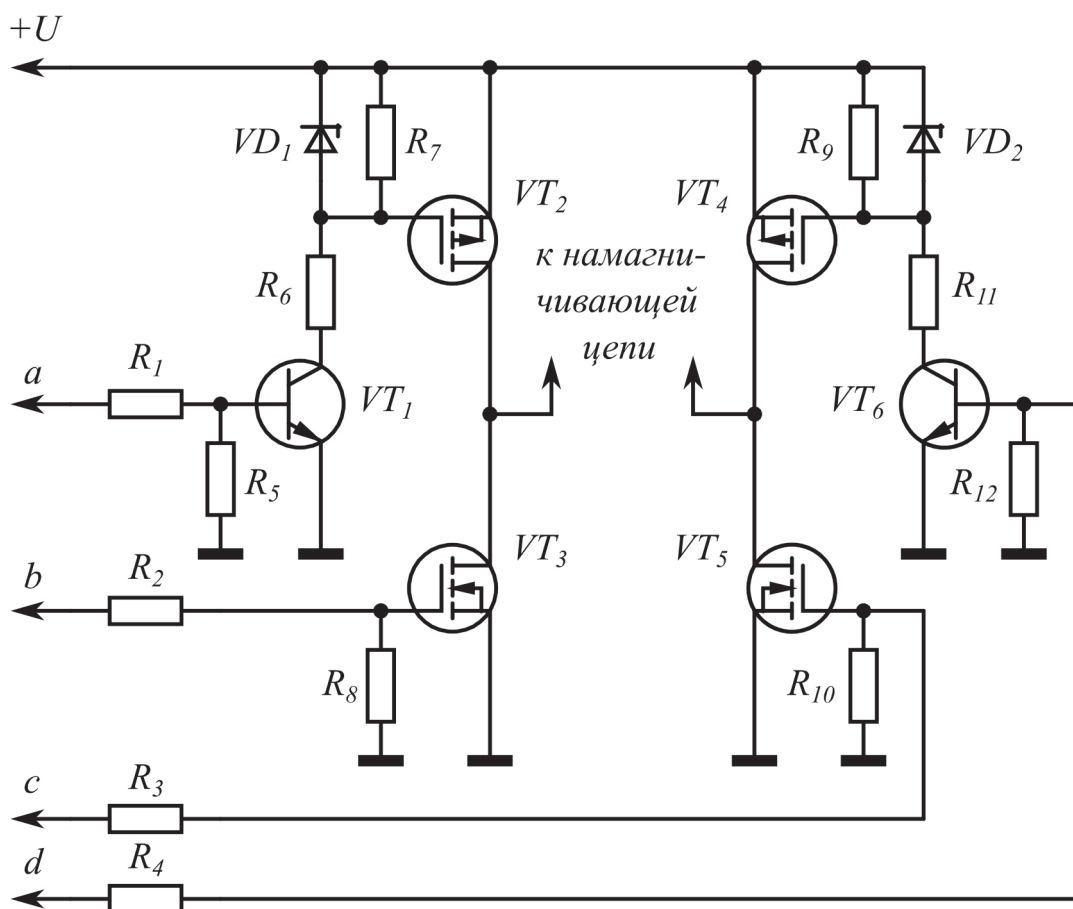


Рис. 2. Принципиальная схема электронного переключателя

Текущее состояние электронного переключателя определяется логическими сигналами с TTL-уровнями, которые подаются на входы a, b, c и d (рис. 2). Логическая единица на входе открывает соответствующий полевой транзистор в плече моста, а логический «0» закрывает его. В верхних плечах использовались транзисторы с каналом p-типа, а в нижних — с каналом n-типа. Для упрощения схемы управления применялись «логические» полевые транзисторы, которые надежно открываются при напряжении 5В между затвором и истоком. Это позволило управлять транзисторами нижних плеч непосредственно логическими сигналами с TTL-уровнями (входы b и c). Резисторы R_2 и R_3 ограничивают импульс тока в момент переключения транзисторов на безопасном уровне. Резисторы R_8 и R_{10} служат для надежного закрывания ключей при отсутствии сигналов на управляющих входах. Входы a и d предназначены для управления ключами верхних плеч моста.

Рассмотрим участок схемы, подключенной к входу a. Если на вход управления подается логический ноль, то эмиттерный переход биполярного транзистора VT_1 закрыт и транзистор находится в режиме отсечки. В этом режиме ток в цепи коллектора бес-

конечно мал, поэтому напряжение на резисторе R_7 , подключенном к истоку и затвору транзистора VT_2 , стремится к нулю. Ключ на транзисторе VT_2 разомкнут. Если на вход управления подается логическая единица, то через эмиттерный переход транзистора VT_1 течет ток. Резистор R_1 ограничивает ток базы на безопасном уровне и обеспечивает режим насыщения работы этого транзистора. На участок цепи, состоящей из стабилитрона VD_1 и резистора R_6 , подается практически все питающее напряжение. Из схемы видно: к истоку и затвору транзистора VT_2 приложено напряжение, равное напряжению на стабилитроне, поэтому ключ на транзисторе VT_2 замкнут. Резистор R_5 повышает помехоустойчивость схемы при отсутствии управляющего сигнала на входе управления. Аналогично работает верхний ключ в другом плече, собранном на элементах $VT_4, VT_6, VD_2, R_4, R_9, R_{11}, R_{12}$.

Управление работой H-моста осуществлялось микроконтроллером, который согласно командам, поступающим с компьютера, формировал последовательность управляющих сигналов с небольшими временными задержками между собой, чтобы исключить влияние переходных процессов при переключении ключей на корректную работу схемы.

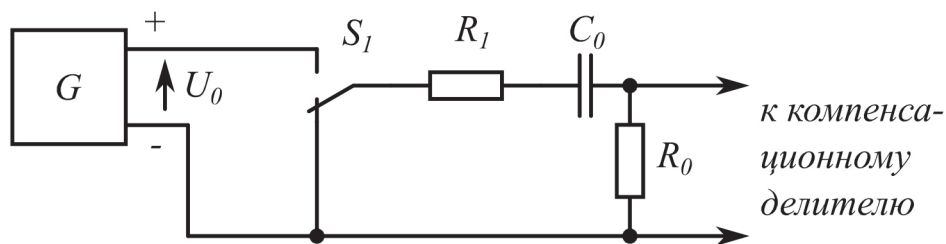


Рис. 3. Принципиальная схема меры магнитного потока

При изменении направления намагничивающего тока на концах измерительной обмотки возникает импульс э.д.с., вольт-секундная площадь которого равна потокоцеплению измерительной катушки. В разработанном устройстве эта площадь определялась путем численного интегрирования зарегистрированного цифровым осциллографом импульсного сигнала. Для уменьшения погрешности измерений, обусловленной искажением формы сигнала за счет паразитных параметров коаксиального кабеля, выход измерительной катушки был подключен к компенсированному делителю напряжения. Этот делитель напряжения настраивался с помощью меры магнитного потока [12], принципиальная схема которого приведена на рисунке 3. В верхнем положении переключателя S_1 конденсатор C_0 заряжается от калибратора напряжения G до напряжения U_0 . После перевода K_1 в нижнее положение (показано на рис. 3) конденсатор разряжается через последовательно включенные сопротивления R_0 и R_1 . Если считать, что переключатель перевели в нижнее положение в момент времени $t=0$, то ток $i(t)$ в цепи определяется выражением:

$$i(t) = \frac{U_0}{R_0 + R_1} e^{-\frac{t}{(R_0 + R_1)C_0}}.$$

На сопротивлении R_0 возникает импульс напряжения, вольт-секундная площадь которого равна

$$\int_0^{\infty} R_0 i(t) dt = \frac{R_0}{R_0 + R_1} U_0 \int_0^{\infty} e^{-\frac{t}{(R_0 + R_1)C_0}} dt = R_0 C_0 U_0 = K_{\text{фм}} U_0,$$

где $K_{\text{фм}} = R_0 C_0$ — постоянная цепи, размерность которой Вб/В (сопротивление резистора R_0 задается в омах, емкость конденсатора C_0 — в фарадах). Данное выражение показывает, что меру магнитного потока можно оперативно менять напряжением U_0 при фиксированных номиналах элементов R_0 и C_0 . В настоящей работе компенсированный делитель напряжения настраивали по минимальному расхождению значений мер магнитного потока и рассчитанной вольт-секундной площади импульсов, зарегистрированных цифровым осциллографом. Напряжение U_0 задавали калибратором ПЗ20, $R_0 = 1 \text{ Ом} \pm 0,3 \%$, $C_0 = 1 \text{ мкФ} \pm 0,3 \%$.

При измерении магнитной проницаемости в слабых магнитных полях для намагничивания образцов использовали одновитковое устройство [11]. Оно представляло собой длинный провод, проходящий через центр исследуемого образца, имеющего форму кольца, перпендикулярно к его плоскости. Напряженность магнитного поля, при которой определялась магнитная индукция, вычислялась по формуле:

$$H = \frac{2I}{\pi(D_{\text{в}} + D_{\text{н}})},$$

где I — сила намагничивающего тока, $D_{\text{в}}$ — внутренний диаметр образца, $D_{\text{н}}$ — наружный диаметр образца. Для исследуемых образцов выполнялось условие $D_{\text{н}}/D_{\text{в}} < 1,3$.

2. Автоматизация измерений

Программа, управляющая работой всего комплекса, была разработана в программной среде LabVIEW. При запуске программы проводится проверка подключений и начальная инициализация всех устройств: устанавливается минимальное напряжение на выходе регулируемого источника питания, электронный переключатель размыкает намагничивающую цепь, настраивается режим измерения для цифрового осциллографа. Далее программа переходит в режим ожидания действий оператора, который вводит необходимые для начала измерения данные.

Входными параметрами программы являются: геометрические размеры образца, число витков измерительной катушки, напряженность магнитного поля. Далее в программе рассчитывается сила намагничивающего тока и необходимое для этого напряжение, которое посредством $U_{\text{упр}}$ устанавливается на выходе источника питания. Затем с помощью электронного переключателя подключается намагничивающая цепь. Установившуюся силу тока в ней рассчитывают по показаниям вольтметра, которые считываются по запросу управляющей программы. После этого 10 раз меняется направление тока в намагничивающей цепи (1 переключение в секунду) и перед последним переключением запускается цифровой осциллограф в ждущем режиме, который после смены направления

тока фиксирует импульс с измерительной обмотки образца и передает результаты измерений компьютеру для дальнейшей обработки. По рассчитанной вольт-секундной площади Ψ импульсного сигнала определяется индукция B поля внутри образца

$$B = \frac{\Psi}{2S\omega_2},$$

где $S = (D_{\text{н}} - D_{\text{в}})h/2$ — площадь поперечного сечения образца (h — высота кольца), ω_2 — число витков измерительной катушки. Для оценки случайной погрешности измерений (при фиксированном намагничивающем токе) магнитную индукцию измеряют несколько раз (число задается в настройках программы). Далее определяют относительную магнитную проницаемость μ

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ — магнитная постоянная.

Программное обеспечение автоматизированного комплекса дает возможность в автоматическом режиме проводить серию измерений и рассчитывать по их результатам магнитную проницаемость в задаваемом диапазоне напряженностей внешнего магнитного поля. Это обеспечивает получение основной кривой намагничивания материала, описывающей зависимость магнитной проницаемости μ от напряженности магнитного поля H .

В качестве примера на рисунке 4 (см. стр. 26) в виде экспериментальных точек приведены результаты измерений для начального участка основной кривой намагничивания, полученные для магнитомягкого феррита марки 1000НН. Прямой линией представлена линейная аппроксимация экспериментальных данных. Точка пересечения этой прямой с осью ординат соответствует начальной магнитной проницаемости материала и позволяет определить ее значение, равное $\mu_{\text{н}} = 1075 \pm 25$ (указана случайная погрешность измерения).

Найденное значение начальной магнитной проницаемости сопоставлялось с результатами косвенных измерений, полученных по экспериментально найденной индуктивности измерительной катушки L по формуле:

$$\mu_{\text{н}} = \frac{2\pi L}{\mu_0 \omega_2^2 h \ln\left(\frac{D_{\text{н}}}{D_{\text{в}}}\right)}$$

(здесь h — высота кольцевого сердечника, ω_2 — число витков измерительной катушки). Измерение индуктивности проводили на измерителе RLC Актаком АМ-3002 по четырехпроводной схеме на частоте 120 Гц.

Полученное на описанном комплексе значение μ_n хорошо согласуется с результатом косвенных измерений, составившим $\mu_n = 1080 \pm 10$. Кроме того, оно

соответствует имеющимся литературным данным для магнитомягкого феррита [13].

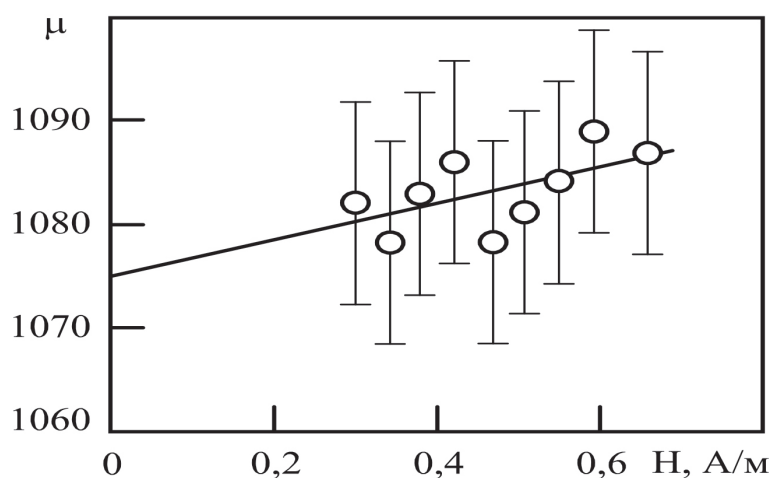


Рис. 4. Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля для магнитомягкого феррита

Заключение

Описано измерительно-вычислительное устройство, позволяющее в автоматическом режиме измерять зависимость магнитной проницаемости магнитомягких материалов от величины внешнего магнитного поля, а также определять значение начальной магнитной проницаемости этих материалов.

Представленное устройство обеспечивает повышение надежности и достоверности результатов измерений магнитных характеристик и может быть использовано при проведении неразрушающей диагностики различных эксплуатационных параметров изделий из магнитомягких ферромагнитных материалов.

Библиографический список

1. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практическое применение. М., 1987.
2. Неразрушающий контроль : справочник ; в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. М., 2003. Т. 2.
3. Поляков В.В., Егоров А.В. Магнитные и электрические характеристики пористых ферромагнетиков // Доклады Академии наук. 1995. Т. 344. № 4.
4. Поляков В.В., Егоров А.В. Влияние структуры высокопористых ферромагнитных материалов на магнитную восприимчивость // Физика металлов и металловедение. 1994. Т. 77. Вып. 6.
5. Garcia-Martin J., Gomez-Gil J., Vazquez-Sanchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing // Sensors (Basel), 2011. Vol. 11 (3).
6. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. М., 2014.
7. Egorov A., Kucheryavskiy S., Polyakov V. Resolution of effects in multi-frequency eddy current data for reliable diagnostics of conductive materials // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2017. Vol. 160. DOI: 10.1016/j.chemolab.2016.11.007.
8. Kucheryavskiy S., Egorov A., Polyakov V. Coupling analytical models and machine learning methods for fast and reliable resolution of effects in multifrequency eddy-current sensors // Sensors. 2021. Vol. 21. Iss. 2. DOI: 10.3390/s21020618.
9. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Установка УИМХ для измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий // Дефектоскопия. 2007. № 3.
10. Сясько В.А., Голубев С.С., Смородинский Я.Г., Соломенчук П.В., Брюховецкая Е.Б. Измерение магнитной проницаемости монолитных кольцевых мер в переменном магнитном поле // Дефектоскопия. 2019. № 11.
11. ГОСТ 8.377-80. Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. М., 1980.
12. МИ 1930-88. Веберметры. Методика поверки. М., 1989.
13. Михайлова М.М., Филиппов В.В., Мусликов В.П. Магнитомягкие ферриты для радиоэлектронной аппаратуры : справочник / под. ред. А.Е. Оборонко. М., 1983.