

## ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МОНОЛИТНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ МЕР В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2019 г. В.А. Сясько<sup>1,\*</sup>, С.С. Голубев<sup>2</sup>, Я.Г. Смородинский<sup>3, 4</sup>, П.В. Соломенчук<sup>5</sup>,  
Е.Б. Брюховецкая<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Горный университет, Россия 199106 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2

<sup>2</sup>Росстандарт, Россия 109074 Москва, Китайгородский пр., 7, стр. 1

<sup>3</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия  
620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

<sup>4</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия 620002  
Екатеринбург, ул. Мира, 19

<sup>5</sup>ФГУП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Россия 190005 Санкт-Петербург, Московский пр-т, 19  
\*E-mail: 9334343@gmail.com

Поступила в редакцию 10.06.2019; после доработки 25.07.2019

Принята к публикации 16.08.2019

Описывается методика измерения относительной магнитной проницаемости монолитных электропроводящих кольцевых образцов в переменном магнитном поле частотой от 50 Гц до 5 МГц, с применением тороидальных обмоток, намотанных на них. Обозначены причины существенного влияния удельной электрической проводимости образцов на результаты измерения. В предложенной методике применяется поправочный коэффициент, зависящий от величины удельной электрической проводимости образца и определяемый по двумерной градуировочной таблице, полученной при конечно-элементном моделировании данной задачи измерения, с учетом отклонения геометрических размеров измеряемого образца от размеров образца конечно-элементной модели.

*Ключевые слова:* магнитная проницаемость стали в переменном магнитном поле, кольцевые образцы с тороидальной обмоткой, конечно-элементное моделирование.

**DOI:**

Измерение магнитной проницаемости  $\mu$  ферромагнитных металлов и сплавов необходимо для расчета параметров любых электрических машин, использующих магнитопроводы или ферромагнитные сердечники. Помимо этого, параметры ферромагнитных металлов и сплавов необходимо контролировать во всех задачах неразрушающего контроля (НК), где возникает взаимодействие магнитного поля и объекта контроля, в частности, при измерении толщины покрытий, наносимых на ферромагнитные металлы, магнитными и вихретоковыми методами [1].

Существует несколько методов измерения  $\mu$  в постоянном магнитном поле [2—4] и в переменных магнитных полях [5, 6]. Существует оборудование, позволяющее проводить измерение магнитных характеристик магнитомягких материалов в низкочастотном синусоидальном [7], линейно нарастающем [8] и импульсном [9] переменном магнитном поле. Также известны методы измерения магнитных параметров ферромагнитных неэлектропроводящих материалов (ферритов и т.п.) [10, 11]. Методы измерения  $\mu$  в переменном магнитном поле необходимы в первую очередь для НК листовых металлов и шихтованных ферромагнитных сердечников, применяемых в электрических машинах и аппаратах. Особенностью всех перечисленных методов является ограниченность их применения (при относительно низких частотах магнитного поля или для шихтованных сердечников, составленных из относительно тонких листов металла). При необходимости измерения  $\mu$  металлов, которые изготавливаются не в виде тонких пластин, а в виде монолитных прутков и относительно толстых листов, необходимо изготавливать из контролируемого металла шихтованные образцы, составленные из тонких кольцевых образцов, что очень трудоемко и увеличивает погрешность измерения  $\mu$ .

В качестве основы для предлагаемой методики измерения  $\mu$  металлов взят мостовой метод, предназначенный для измерения магнитных параметров ферритов, описанный в [10, п. 2.1]. Этот метод применим для измерения магнитных параметров неэлектропроводящих материалов при частоте магнитного поля от 10 кГц до 1 МГц и предполагает проведение измерения магнитных параметров кольцевых образцов, на которые наматывается тороидальная обмотка, подключаемая к источнику переменного тока.

Для рассматриваемого случая вносимая индуктивность  $L'$  тороидальной обмотки будет равна

$$L' = L_x - L_{xx}, \quad (1)$$

где  $L_x$  — измеренное значение индуктивности тороидальной обмотки, намотанной на измеряемый образец из ферромагнитного металла,  $L_{xy}$  — измеренное значение индуктивности тороидальной обмотки, намотанной на образец той же формы и размеров, но изготовленный из неферромагнитного неэлектропроводящего материала. При этом в соответствии с [10]  $L'$  связана с  $\mu$  — действительной составляющей относительной магнитной проницаемости материала кольцевого образца соотношением

$$\mu = \frac{L' \cdot D_r \cdot 10^7}{4 \cdot S \cdot W^2} + 1, \quad (2)$$

где  $W$  — число витков обмотки, намотанной на кольцевой образец;  $D_r$  — гармонический диаметр измеряемого образца, равный

$$D_r = \frac{D_n - D_b}{\ln\left(\frac{D_n}{D_b}\right)}, \quad (3)$$

где  $D_n$  — наружный диаметр кольцевого образца;  $D_b$  — внутренний диаметр кольцевого образца высотой  $h$ , а  $S$  — площадь его сечения:

$$S = \frac{D_n - D_b}{2} \cdot h. \quad (4)$$

Кольцевая форма измеряемого образца предпочтительна, т.к. при его намагничивании с применением равномерной тороидальной обмотки практически не возникают поля рассеяния, искажающие результаты измерения. Точность измерений может быть близка к теоретическому пределу.

Как известно, значение  $\mu$  зависит от частоты магнитного поля, в связи с чем необходимо учитывать ее изменение в интересующем нас диапазоне частот применительно к рассматриваемой задаче измерений.

Основным недостатком рассматриваемого метода является то, что если материал кольцевого образца имеет существенную удельную электрическую проводимость, то в нем образуются вихревые токи, искажающие результаты измерений. В случае измерения ферромагнитных металлов, например, стали, пренебречь влиянием вихревых токов в инженерных расчетах можно только при частоте магнитного поля не более 10 Гц [6]. При больших частотах магнитного поля необходимо учитывать влияние вихревых токов на результаты измерений.

Как было указано выше, под воздействием вихревых токов происходит вытеснение первичного магнитного поля, тем самым происходит уменьшение эффективной площади сечения образца, в котором накапливается магнитное поле.

Для анализа влияния вихревых токов на результаты измерений в среде моделирования Ansoft Maxwell была построена конечно-элементная модель (КЭ модель) кольцевого образца с намотанной на него тороидальной обмоткой (рис. 1).

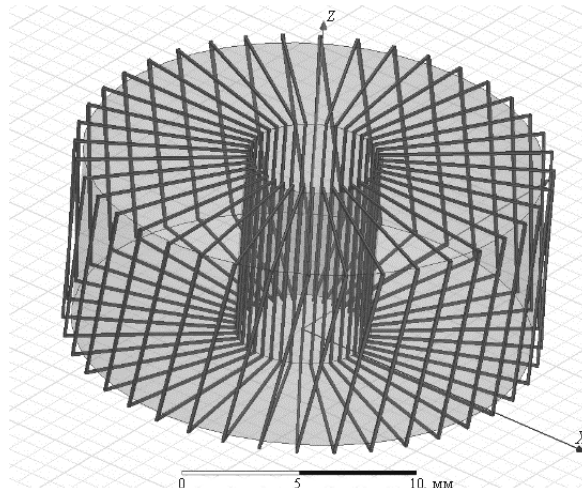


Рис. 1. Конечно-элементная модель кольцевого образца с намотанной на него тороидальной обмоткой.

Размеры кольцевого образца заданы переменными значениями для определения степени их влияния на результаты измерения, тороидальная обмотка задана замкнутой с заданным током возбуждения в сечении одного из витков. Для повышения точности вычислений по всей поверхности кольцевого образца задана поверхностная сетка конечных элементов с уменьшенным размером ячейки. Генерация сетки с закруглением внутри кольцевого образца и пошаговое учащение сетки производится штатными алгоритмами, количество адаптивных шагов задано одинаковым для всех решений – 7 шагов. Выходными параметрами модели является индуктивность и активное сопротивление обмотки.

В модели производился расчет индуктивности и активного сопротивления обмотки, намотанной на кольцевой образец. Анализ результатов моделирования показал, что влияние вихревых токов на результаты измерения  $\mu$  имеет множество составляющих (источников), причем на частотах порядка нескольких мегагерц превалирующими составляющими становятся такие, как толщина изоляции провода и плотность укладки обмотки на поверхность образца (зазор между проводом и поверхностью образца). Очевидно, что учесть эти технологические параметры в аналитическом расчете сложно и нерационально.

Для решения данной задачи была разработана методика измерений и построена градуировочная характеристика с использованием КЭ модели, учитывающая влияние вихревых токов.

В соответствии с предлагаемой методикой, вычисление  $\mu'$  (действительной составляющей относительной магнитной проницаемости с учетом влияния вихревых токов) производится по формуле:

$$\mu' = \left( \frac{L' \cdot D_r \cdot 10^7}{4 \cdot S \cdot W^2} + 1 \right) \cdot k, \quad (5)$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий влияние вихревых токов, зависящий от  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $f$ , а также от геометрических размеров кольцевого образца и технологических параметров тороидальной обмотки.

Для ограничения числа возможных решений, фиксированными принимаются геометрические размеры кольцевого образца ( $D_n = 20$  мм,  $D_b = 6$  мм,  $h = 8,5$ ) и технологические параметры тороидальной обмотки, соответствующие требованиям, изложенным в [10]. Неоднородность намагничивания кольцевого образца оказывает влияние на результат измерений и учитывается в вычисляемом коэффициенте  $k$  как одна из его неотъемлемых составляющих. Для указанных условий выполнен расчет КЭ модели с массивом параметров  $\mu_{кЭ}$ ,  $\sigma_{кЭ}$ ,  $f$  в интересующих диапазонах каждого из параметров:

$\mu_{кЭ}$  от 1 до 10000 с шагом по 10 отсчетов на декаду (41 отсчет на заданный диапазон, распределенные приближенно линейно на логарифмической шкале);

$\sigma_{кЭ}$  от 1 до 10 МСм/м с шагом по 10 отсчетов на декаду (11 отсчетов на заданный диапазон, распределенные приближенно линейно на логарифмической шкале);

$f$  принимает значения 50, 500 Гц, 5, 50, 500 кГц, 5 МГц.

Полученный массив данных, разделенный на группы по частотам  $f$  магнитного поля, используется в математическом модуле (на основе Excel) двумерной градуировки, где производятся вычисления и построение градуировочной характеристики по описанному ниже алгоритму.

По (2) вычисляется значение  $\mu$  для каждого решения КЭ модели, после чего вычисляется поправочный коэффициент  $k$  как

$$k = \frac{\mu_{кЭ}}{\mu}, \quad (6)$$

где  $\mu_{кЭ}$  — задаваемое в КЭ модели значение относительной магнитной проницаемости материала кольцевого образца.

Далее строится группа функций  $k(L')$  для каждого значения  $\sigma_{кЭ}$  (рис. 2). Для каждой функции  $k(L')$  строится градуировочная характеристика, основанная на методе кусочно-линейной интерполяции.

По результатам физических измерений значений  $L_x$  и  $L_{xx}$  по (1) вычисляется значение  $L'$ . Используя полученное значение  $L'$  и набор градуировочных характеристик  $k(L')$  вычисляется группа значений  $k$  для каждого значения  $\sigma_{кЭ}$ . Строится функция  $k(\sigma_{кЭ})$  для полученного массива данных (рис. 3).

Для каждой функции  $k(\sigma_{кЭ})$  строится градуировочная характеристика второго уровня, основанная на методе кусочно-линейной интерполяции.

Используя измеренное значение  $\sigma$  кольцевого образца, определяется значение  $k$  для измеряемого кольцевого образца.

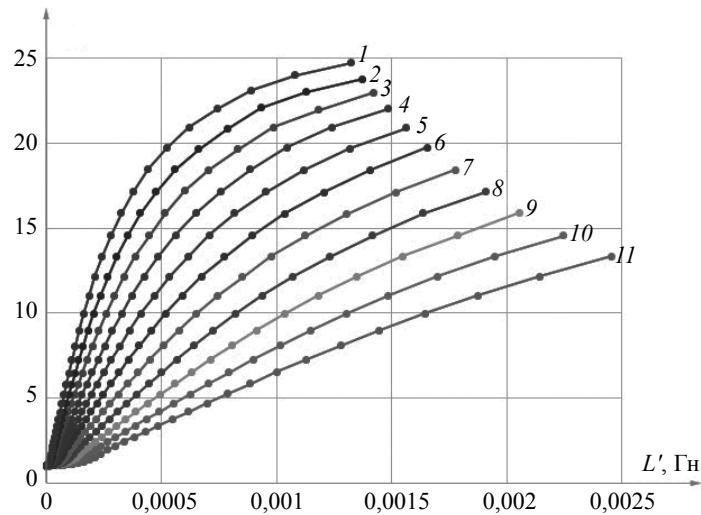


Рис. 2. Группа функций  $k(L')$  для каждого значения  $\sigma_{КЭ}$ , МСм/м:  
 1 — 10; 2 — 7,943; 3 — 6,31; 4 — 5,012; 5 — 3,981; 6 — 3,162; 7 — 2,512; 8 — 1,995; 9 — 1,585; 10 — 1,259; 11 — 1.

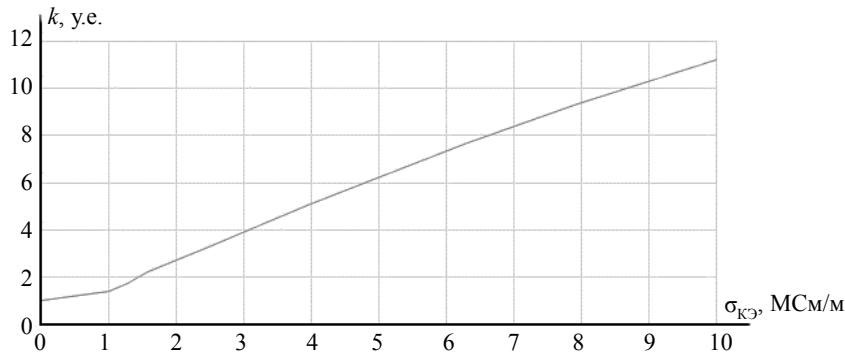


Рис. 3. Функция  $k(\sigma_{КЭ})$ .

КЭ модель построена с учетом номинальных геометрических размеров кольцевого образца. Для учета отклонений геометрических размеров реального кольцевого образца от номинальных значений в (5) необходимо добавить поправочные коэффициенты:

$$\mu'' = \left( \frac{L' \cdot D_r \cdot a \cdot 10^7}{4 \cdot \left( \frac{D_n - D_b}{2} \right) \cdot b \cdot h \cdot c \cdot W^2} + 1 \right) \cdot k, \quad (7)$$

где  $\mu''$  — значение действительной составляющей относительной магнитной проницаемости с учетом влияния вихревых токов и допусков на геометрические размеры кольцевых образцов;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — коэффициенты, учитывающие отношение геометрических размеров реального кольцевого образца к геометрическим размерам образца в КЭ модели и характеризующие соотношение размеров, соответственно  $D_r$ ,  $\left( \frac{D_n - D_b}{2} \right)$  и  $h$ , вычисляемые по формулам (8) — (10):

$$a = \frac{D_r}{D_{rКЭ}} = \frac{\frac{D_n - D_b}{\ln\left(\frac{D_n}{D_b}\right)}}{D_{nКЭ} - D_{bКЭ}}, \quad (8)$$

$$b = \frac{\left(\frac{D_{\text{н}} - D_{\text{в}}}{2}\right)}{\left(\frac{D_{\text{нКЭ}} - D_{\text{вКЭ}}}{2}\right)}, \quad (9)$$

$$c = \frac{h}{h_{\text{КЭ}}}, \quad (10)$$

где  $D_{\text{нКЭ}}$ ,  $D_{\text{вКЭ}}$ ,  $D_{\text{н}}$ ,  $D_{\text{в}}$ ,  $h_{\text{КЭ}}$  — геометрические размеры кольцевого образца в КЭ модели.

Использование коэффициентов  $k$ ,  $a$ ,  $b$  и  $c$  вместо значения  $\mu$  при работе по градуировочными характеристиках обусловлено тем фактором, что размеры физически изготовленных образцов имеют допуски и при проведении серии измерений потребовалось бы проведение серии вычислений аналогичных КЭ моделей, что занимает существенное количество времени (сотни часов машинного времени для каждого размера кольцевого образца). Очевидно, что изменение размера образца, в пределах технологического допуска на его изготовление, окажет соответствующее влияние на результат измерений по формуле (2), однако значение поправочного коэффициента изменится ничтожно мало. По этой причине для всех кольцевых образцов с номинальными значениями геометрических размеров, в пределах технологических допусков, используется одна и та же КЭ модель, один и тот же коэффициент  $k$ , но различные коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$ .

Непосредственное измерение значения  $\sigma$  кольцевого образца невозможно. По этой причине для проведения измерений по описываемой методике (помимо кольцевого образца из измеряемого материала) из той же заготовки изготавливается образец для измерения  $\sigma$ , которое производили по методу ван дер Пау [13], а форма образца и условия измерений должны соответствовать требованиям, описанным в [1, 14, 15].

При проведении измерений  $\mu$  по описываемой методике следует учитывать тот факт, что  $\mu$  нелинейно зависит от индукции магнитного поля в образце. Результаты данного исследования предназначены для их использования в неразрушающем контроле металлопродукции вихретоковыми и магнитными методами с использованием очень слабых магнитных полей. В таких условиях можно утверждать, что значение  $\mu$  соответствует значению  $\mu_{\text{нач}}$  (соответствующего напряженности внешнего магнитного поля  $H \rightarrow 0$ ) для наиболее часто применяемых в промышленности сталей и является постоянной величиной. В связи с этим, в КЭ модели сделано допущение о том, что значение  $\mu$  является постоянным.

В рассматриваемой методике спорным является тот факт, что ключевым звеном, определяющим точность измерений, является не допускаемая погрешность используемых средств измерений, а допускаемые отклонения результатов измерений, полученных в КЭ модели, от действительных значений. В настоящее время не существует аттестованных методик оценки метрологических характеристик КЭ моделей. Опыт применения КЭ моделирования показывает, что при должном подходе к построению КЭ модели и при использовании для расчета ЭВМ с достаточными ресурсами (в первую очередь объемом оперативной памяти) допускаемые отклонения результатов измерений, проведенных с использованием КЭ модели, могут укладываться в интервал 0,1 %, что подтверждается при проведении измерений с применением реальных измерительных приборов.

Для экспериментального исследования описываемой методики были изготовлены кольцевые образцы из сталей, часто используемых в промышленности: Ст. 20, 09Г2С, Р6М5, 40Х, а также из прецизионного сплава 81НМА (после термообработки), обладающего высокой магнитной проницаемостью в магнитных полях с малой индукцией. На кольцевые образцы проводом литцендратом марки ЛЭШО были намотаны тороидальные обмотки с количеством витков 40, а концы провода сплетены на длину 100 мм.

Для измерения удельной электрической проводимости указанных металлов были изготовлены соответствующие образцы и контактная оснастка [1]. Внешний вид кольцевого образца без обмотки, образца с намотанной на него тороидальной обмоткой, а также образца для измерения удельной электрической проводимости приведены на рис. 4.

Удельную электрическую проводимость измеряли по методу ван дер Пау с применением лабораторного источника тока, мультиметра Gwinstek GDM-8245 (в режиме измерения силы тока) и нановольтметра Keysight 34420А, а индуктивность тороидальных обмоток — с применением анализатора иммитанса Wine Keg WK65120P на частотах 50 и 500 Гц, 5, 50 и 500 кГц, а также 5 МГц (соответствующих частотам, используемым в КЭ модели). Сила тока возбуждения составляла 10 мА. Результаты измерений приведены в табл. 1.

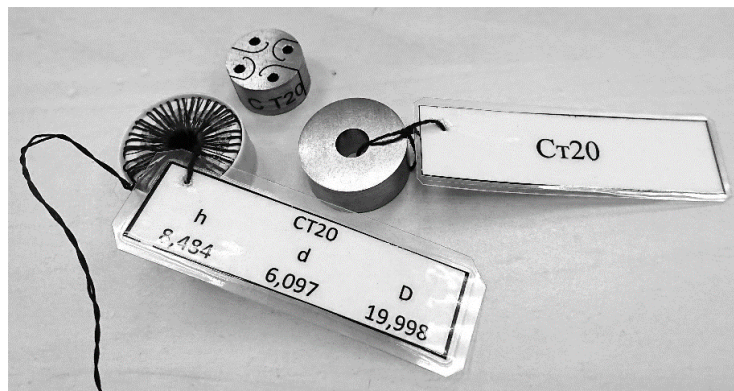


Рис. 4. Внешний вид образцов для измерения удельной электрической проводимости, кольцевых образцов без обмотки и с намотанными на них тороидальными обмотками.

Таблица 1

Измеренное значение  $\mu''$  – действительной составляющей относительной магнитной проницаемости с учетом влияния вихревых токов и допусков на геометрические размеры кольцевых образцов

Материал кольцевого образца		Р6М5	40Х	Ст. 20	81НМА
$\sigma$ , МСм/м		2,38	4,27	5,11	1,22
Действительная составляющая относительной магнитной проницаемости, о.е. при частоте	50 Гц	60,47	50,82	116,5	15865
	500 Гц	54,86	45,79	106,8	11264
	5 кГц	49,92	41,21	87,43	4388
	50 кГц	36,80	27,58	47,68	1077
	500 кГц	15,89	10,68	15,65	207
	5 МГц	1,995	1,48	1,617	16

Результатом данной работы является методика и технология измерения относительной магнитной проницаемости ферромагнитных электропроводящих материалов (сталей) с применением монолитных кольцевых образцов при частоте магнитного поля от 50 Гц до 5 МГц. Данная методика и оборудование применяются в составе опытного образца распределенного эталонного комплекса свойств металлических покрытий, разрабатываемого в рамках государственного контракта на выполнение опытно-конструкторской работы в области обеспечения единства измерений для обеспечения нужд Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, для определения электрических и магнитных свойств оснований мер свойств покрытия.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Syas'ko V.A., Golubev S.S., Smorodinskii Ya. G. Measurement of Electromagnetic Parameters of Metal-Coating Thickness Measures // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 10. P. 698—710. [Сясько В.А., Голубев С.С., Смородинский Я. Г. и др. Измерение электромагнитных параметров мер толщины металлических покрытий // Дефектоскопия. 2018. № 10. С.25—36.]
2. ГОСТ 8.377—80 ГСОЕИ Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. М.: Изд-во стандартов, 1980. 26 с. Введен с 01.07.1981.
3. ГОСТ 12119.1—98 Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Методы измерения магнитной индукции и коэрцитивной силы в аппарате Эпштейна и на кольцевых образцах в постоянном магнитном поле. М.: Стандартинформ, 2003. 9 с. Введен с 01.07.1999.
4. ГОСТ 12119.2—98 Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения магнитной индукции в пермеатре. М.: Стандартинформ, 2003. 7 с. Введен с 01.07.1999.

5. ГОСТ 12119.6—98 Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения относительной магнитной проницаемости и удельных магнитных потерь мостом переменного тока. М.: Стандартинформ, 2003. 8 с. Введен с 01.07.1999.
6. ГОСТ 18334—73 Материалы магнитомягкие. Методы испытаний в диапазоне частот 50 Гц — 10 кГц. Не действует с 01.01.1979.
7. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Установка УИМХ для измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий // Дефектоскопия. 2007. № 3. С. 12—25.
8. Мельгуй М.А., Осипов А.А. Установка для измерения динамических и квазистатических магнитных характеристик // Дефектоскопия. 1991. № 3. С. 34—39.
9. Дидик Ю. И., Корзунин Г. С., Дидик М.Ю. Установка для измерения магнитных свойств магнитомягких материалов в импульсном режиме намагничивания // Дефектоскопия. 2001. № 7. С. 13—24.
10. ГОСТ 12635—67 Материалы магнитомягкие высокочастотные. Методы испытаний в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц. М.: Изд-во стандартов, 1967. 40 с. Введен с 01.01.1969.
11. ГОСТ 12636—67 Материалы магнитомягкие высокочастотные. Методы испытаний в диапазоне частот от 1 до 200 МГц. М.: Изд-во стандартов, 1967. 25 с. Введен с 01.01.1969.
12. ГОСТ 12637—67 Материалы магнитомягкие высокочастотные. Методы испытаний в диапазоне частот от 200 до 2000 МГц. М.: Изд-во стандартов, 1967. 26 с. Введен с 01.01.1969.
13. van der PAUW L.J. A method of measuring specific resistivity and Hall Effect of discs of arbitrary shape // Philips Research Reports, 1958. V. 13. No. 1—9.
14. Thompson A.M. and Lampard D.G.. A new theorem in electrostatics and its application to calculable standards of capacitance // Natue. 1956. V. 177. P. 888.
15. Соломенчук П.В., Смирнова Н.И. Измерение удельной электрической проводимости цветных металлов, приборы и средства метрологического обеспечения // В мире НК. 2017. № 3. С. 54—57.