

УДК 621.317.4; 621.317

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

И. И. БРАНОВИЦКИЙ, И. Т. СКУРТУ, А. С. ЕРОШЕНКО

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

Минск, Беларусь

UDC 621.317.4; 621.317

PRECISION MEASUREMENTS OF MAGNETIC PROPERTIES OF ELECTRICAL STEEL

I. I. BRANOVITSKY, I. T. SKURTU, A. S. YEROSHENKO

Аннотация

В статье описана реализация индукционного метода измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов при частоте 50 Гц, включая разработанный высокоточный алгоритм синусоизации магнитного потока в ферромагнетике. Дано описание созданной на этой основе эталонной установки и государственных стандартных образцов для аттестации, поверки и калибровки рабочих средств контроля магнитных свойств электротехнических сталей в соответствии с требованиями нормативной документации.

Ключевые слова:

эталонная установка, алгоритм синусоизации, магнитные характеристики.

Abstract

The paper is about implementation of inductive method for magnetic measurements of soft-magnetic materials characteristics at 50 Hz. High precision algorithm of sinusoidal magnetic flux realization is considered. Anetalon with thereference materials for calibration and verification of the ordinary instruments for electrical steels magnetic measurements are described.

Key words:

ethalon, reference installation, sinusoising algorithm, magnetic characteristics.

В связи с тем, что магнитные характеристики магнитопроводов, изготавливаемых из магнитомягких материалов типа электротехническая сталь (ЭТС) являются одним из основных факторов, определяющих технический уровень изделий электромашиностроения, в развитых странах реализована четкая система аттестации ЭТС по магнитным характеристикам (удельные магнитные потери и магнитная индукция) на стадии выходного (производители) и входного (потребители стали) контроля. В 1998 г. с целью восстановления единых правил аттестации ЭТС Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации стран СНГ, в том числе Беларуси, принята система межгосударственных стандартов (ГОСТ 12119.(0–8)–98) [1–3], устанавливающих порядок определения магнитных и электрических свойств ЭТС. Указанные стандарты определяют

основные требования к процедурам измерения магнитных характеристик ЭТС рабочими средствами.

В Институте прикладной физики НАН Беларуси созданы первые в Республике Беларусь и одни из первых в странах СНГ современные рабочие средства измерения удельных магнитных потерь и магнитной индукции в ЭТС – магнитоизмерительные установки УМ-ИМПИ и УМЦ, предназначенные для контроля магнитных свойств ЭТС. Работа установок методически и технически соответствует установленным международным процедурам и указанным выше межгосударственным стандартам, они сертифицированы в Республике Беларусь, а УМ-ИМПИ и в Российской Федерации.

Для разработки эталонной базы, которая позволила бы осуществлять в Республике Беларусь поверку, калибровку и аттестацию рабочих средств измерения в ИПФ НАН Беларуси была проведена НИОКР в рамках подпрограммы «Эталоны Беларуси» ГНТП «Эталоны и научные приборы» и создана в 2015 г. эталонная установка (ЭУ) (см. рис. 1), а также стандартные образцы для воспроизведения, хранения и передачи размера единиц удельных магнитных потерь и магнитной индукции в электротехнической стали. К работе по заданию были привлечены также специалисты БелГИМ. В результате были изготовлены, исследованы и сертифицированы 4 государственных стандартных образца (ГСО) для хранения и передачи рабочим средствам размера единиц удельных магнитных потерь и магнитной индукции в электротехнической стали. ГСО созданы в виде пакетов пластин 280x30 мм (эпштейновская проба) из анизотропной и изотропной ЭТС, в виде отдельного листа 250x500 мм и кольца – оба из анизотропной ЭТС.

В основе работы созданной ЭУ лежит индукционный метод измерений, который базируется на аналого-цифровом преобразовании мгновенных значений сигналов, пропорциональных напряженности магнитного поля на поверхности стандартного образца и производной по времени средней по сечению образца магнитной индукции, в цифровые коды с последующим вычислением магнитных характеристик образца.

Разработанная ЭУ измеряет динамические магнитные характеристики ГСО из магнитомягких материалов типа электротехническая сталь в синусоидальном режиме перемагничивания на частоте 50 Гц. Персональный компьютер, входящий в состав магнитоизмерительной установки, работает по измерительной программе, разработанной для данной установки на языке высокого уровня и управляет программируемым генератором, входящим в состав блока намагничивания и состоящим из цифроаналогового преобразователя и усилителя мощности, задавая синусоидальный режим перемагничивания испытуемого образца, обеспечивает измерение электрических сигналов, пропорциональных напряженности магнитного поля и скорости изменения магнитной индукции в образце, рассчитывает необходимые магнитные характеристики. Использование компьютера позволяет

автоматизировать процесс измерения и расширить функциональные возможности установки в части измерения дополнительных магнитных характеристик, таких как остаточная индукция, коэрцитивная сила, магнитная проницаемость и др. ЭУ выполнена в виде комплекса аппаратно-программных подсистем, реализующих разработанный функциональный порядок операций, и обеспечивающих высокоточные измерения указанных выше магнитных характеристик ЭТС на ГСО различного типа.



Рис. 1. Общий вид ЭУ для измерения магнитных свойств электротехнической стали

Были проведены исследования по оптимизации режимов намагничивания ГСО, а также измерительных процедур, в результате которых разработаны алгоритмы: синусоизации формы изменения магнитной индукции в материале ГСО за цикл перемагничивания; выхода на точки максимальных значений магнитной индукции и напряженности магнитного поля; автоматической калибровки ЭУ и др.

При проведении магнитных измерений, в особенности эталонных, одной из наиболее важных задач является поддержание синусоидального режима перемагничивания исследуемого образца. Причиной появления искажений намагничивающего сигнала является активно-реактивный характер нагрузки намагничивающей системы. Вклад искажений для образцов электротехнической стали становится существенным на достаточно больших напряженностях магнитного поля (1000–2500 А/м), где они могут негативным образом влиять на результаты измерений. Количественной мерой оценки искажений может служить коэффициент нелинейных искажений (КНИ).

В [4] показана возможность поддержания магнитного потока в образце в итерационном режиме, однако, иногда изменение формы намагничивающего сигнала во время задания режима перемагничивания может быть затруднительно в силу сложности переходных процессов обновления сигнала при использовании цифровых генераторов. В таком случае можно привести форму потока к синусоидальной, используя алгоритм, основанный на наличии априорной информации.

Информацию об искажениях магнитного потока при различных значениях магнитного поля можно получить путем записи сигналов напряжения вторичной обмотки первичного преобразователя и напряжения на токосъемном шунте при размагничивании стандартного образца. Далее с помощью интерполяции двумерного массива можно получить искаженный сигнал для требуемого значения индукции или напряженности магнитного поля.

Сигнал предыскажений получается путем вычитания искаженного сигнала из синуса той же амплитуды. Также следует учитывать дополнительный фазовый сдвиг, вносимый всей системой в целом, который сложно оценить аналитически.

Перед вычислением сигнала предыскажений необходимо привести амплитуду искаженного сигнала к единичной и произвести его сдвиг. Разность полученного сигнала и синуса единичной амплитуды дадут искомый сигнал предыскажений. Далее он складывается с синусоидальным сигналом и записывается в буфер ЦАП. Сигнал предыскажений может быть представлен следующим образом:

$$U(i) = U(i) - \frac{U_B(i-n)}{\max(U_B)}, \quad (1)$$

где U_c – сигнал синуса единичной амплитуды; U_B – искаженный сигнал измерительной обмотки первичного преобразователя; $\max(U_B)$ – амплитуда искаженного сигнала измерительной обмотки первичного преобразователя; $i = 0 \dots N - 1$ – текущий отсчет; N – количество отсчетов; n – сдвиг искаженного сигнала.

Оптимальный сдвиг искаженного сигнала зависит от разницы фаз между током и напряжением, который может быть вычислен как:

$$\varphi = \arctg((2 \cdot \pi \cdot f \cdot L)/R), \quad (2)$$

где f – частота намагничивающего сигнала; L – оценка индуктивности намагничивающей обмотки первичного преобразователя; R – суммарное активное сопротивление шунтирующего резистора и намагничивающей обмотки.

Эта зависимость может быть аппроксимирована функцией

$$n(\varphi) = \alpha_1 \cdot \exp(\beta \cdot \varphi) + \alpha_2, \quad (3)$$

где $\alpha_1, \beta, \alpha_2$ – коэффициенты.

Таким образом, намагничивающий сигнал имеет форму смеси синусоидального сигнала и сигнала предыскажений, что позволяет получить синусоидальный режим перемагничивания исследуемого образца при проведении измерения.

Используя вышеприведенную методику, удалось добиться снижения КНИ до величин менее 0,1 % на индукции 1,9 Тл и выше.

Результаты испытаний ЭУ при аттестации свидетельствуют о высокой стабильности ее показаний и точности измерения, удовлетворяющих требованиям ТЗ на создание эталонной установки.

Основные характеристики эталонной установки: диапазон воспроизведения единицы удельных магнитных потерь – 0,3–10,0 Вт/кг; диапазон воспроизведения единицы магнитной индукции – 0,1–1,95 Тл; доверительные границы суммарной погрешности воспроизведения единицы удельных магнитных потерь при доверительной вероятности $P = 0,99$ и числе измерений $n = 10$ не более: при измерении на ГСО в виде пакета пластин и в виде кольца – 0,8 %; при измерении на ГСО в виде листа – 1 %; доверительные границы суммарной погрешности воспроизведения единицы магнитной индукции при доверительной вероятности $P = 0,99$ и числе измерений $n = 10$ не более: при измерении на ГСО в виде пакета пластин и в виде кольца – 0,5%; при измерении на ГСО в виде листа – 1 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 12119.0-98.** Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Общие требования. – Минск, 1999.
2. **ГОСТ 12119.4-98.** Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения удельных магнитных потерь и действующего значения напряженности магнитного поля. – Минск, 1999.
3. **ГОСТ 12119.5-98.** Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения амплитуд магнитной индукции и напряженности магнитного поля. – Минск, 1999.
4. **Пат. 10958 Республика Беларусь, МПК G 01R 33/12.** Способ формирования синусоидальной индукции в ферромагнитном образце / И. И. Брановицкий, М. Н. Путырский; заявитель и патентообладатель Институт прикладной физики НАН Беларуси. – № 20060894; заявл. 12.09.06; опубл. 30.04.08. – 3 с.

E-mail: branovitsky@iaph.bas-net.by

