

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МАГНИТОМЯГКИХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.С. Парамонов

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

Изучение эффективности использования электротехнических материалов является актуальной проблемой в области изготовления электрических машин. Одним из важнейших аспектов изготовления электрических машин является проектирование магнитной системы машины. В качестве магнитной системы используют магнитопроводы из различных магнитомягких материалов. Эти материалы отличаются магнитной проницаемостью и удельными магнитными потерями. Данные параметры материалов влияют на нагрев, размер, стоимость и эффективность электрической машины. В целях экономии экспериментальная оценка параметров магнитомягких материалов производится на заготовках различных форм и размеров, на специальных измерительных стендах, согласно международным энергетическим стандартам. В данной статье предлагается экспериментальная установка для лабораторных исследований магнитных свойств магнитомягких материалов, методом кольцевых заготовок, в соответствии со стандартом МЭК-60404-6. В составе установки используется только стандартное недорогое оборудование. Необходимый коэффициент формы магнитной индукции достигается последовательной коррекцией напряжения вторичной обмотки с помощью цифрового регулятора. Подход к программной реализации алгоритма последовательной коррекции напряжения вторичной обмотки изложен в статье. С помощью предлагаемой установки проведено исследование свойств образца из магнитомягкого композиционного порошкового материала Somaloy 700-3p (800 МПа) и сравнение результатов с каталожными данными производителя. По итогам работы выявлено, что с помощью предлагаемой установки могут производиться измерения свойств магнитомягких материалов, в соответствии со стандартом МЭК-60404-6 с необходимой точностью. Предлагаемая установка может быть использована как в качестве учебного стенда, так и в качестве измерительной установки для идентификации свойств магнитомягких материалов при проектировании электрических машин.

Ключевые слова: исследование магнитомягких материалов, порошковый тороидальный магнитопровод, экспериментальная установка

ВВЕДЕНИЕ

Изготовление электрических машин является сложным и дорогостоящим процессом [1]. Частью этого процесса является изготовление магнитопровода из магнитомягких материалов. Исследование свойств магнитомягких материалов в образцах различной формы, изготовленных с помощью различных технологических процессов, позволяет получить информацию о степени насыщения магнитной системы и выделяемой магнитопроводом тепловой энергии. Эта информация необходима для рационального проектирования электрических машин. В данной статье рассматривается экспериментальная установка по изучению свойств магнитомягких материалов.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Магнитные свойства электротехнических материалов принято характеризовать зависимостями магнитной индукции от напряженности $B = f(H)$ (кривая намагничивания) [2]. При циклическом перемагничивании, кривая намагничивания образует петлю гистерезиса.

В работе ставится задача исследования свойств порошкового композиционного материала, производитель которого предоставляет образцы

кольцевой формы. Поэтому испытания должны производиться согласно стандарту МЭК-60404-6 [3].

Согласно стандарту МЭК-60404-6, вторичное напряжение или ток намагничивания должны быть синусоидальными с коэффициентом формы $1,111 \pm 1\%$. Проблему несинусоидальности напряжения вторичной обмотки можно решить, последовательно корректируя напряжение, подаваемое на первичную обмотку.

Для исследования была реализована установка, показанная на рис. 1.

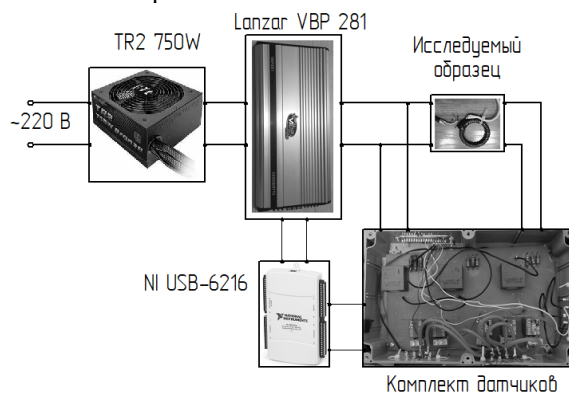


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Установка состоит из блока питания TR2 750W, усилителя Lanzar VBP281, исследуемого кольцевого

образца из магнитомягкого материала с двумя обмотками, датчиков тока и напряжения (три датчика тока LA25-NP и три датчика напряжения LV 25-P), а также устройства NI USB-6216, совмещающего в себе функции АЦП и ЦАП.

Алгоритм работы установки показан на блок схеме, показанной на рис.2. Первым этапом задаются требуемые частота F и амплитуда напряжения U вторичной обмотки. Далее формируется синусоидальный сигнал, который через усилитель подается на первичную обмотку. Для измеренного в результате опыта графика напряжения вторичной обмотки вычисляется коэффициент формы напряжения. Этот коэффициент формы сравнивается с требованием стандарта и, если он удовлетворяет этому требованию, то данные, полученные в результате опыта, сохраняются и производится постобработка. Иначе рассчитывается график ошибки по напряжению вторичной обмотки. Этот график масштабируется путем умножения на постоянный коэффициент и добавляется к заданию напряжения первичной обмотки. Таким образом производится последовательная коррекция напряжения вторичной обмотки, приближающая её форму к синусоидальной.

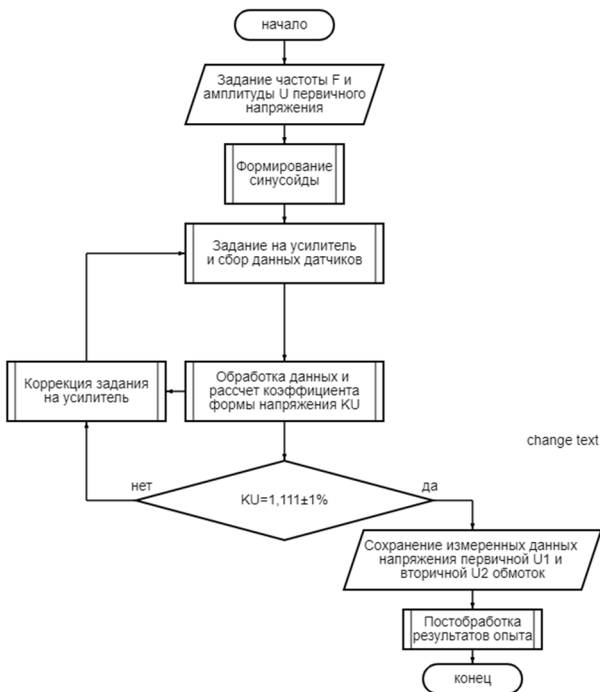


Рис. 2. Блок схема алгоритма работы установки

Для реализации последовательной коррекции формы задаваемого напряжения с помощью устройства NI USB-6216 была написана программа в среде Lab View [4], блок схема которой показана на рис.3. Программа, формирующая сигнал на усилитель показана на рис.4.

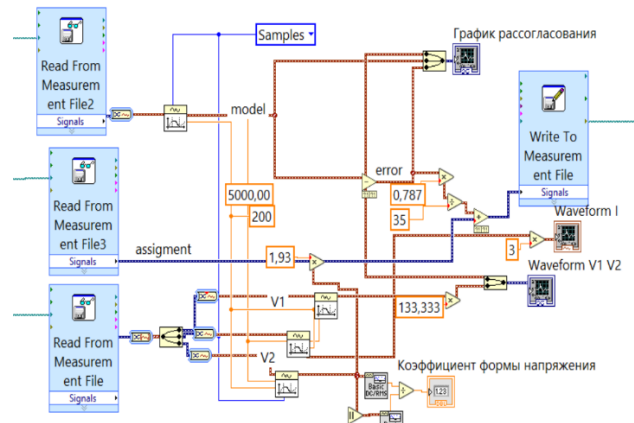


Рис. 3. Программа-регулятор для корректировки задания напряжения

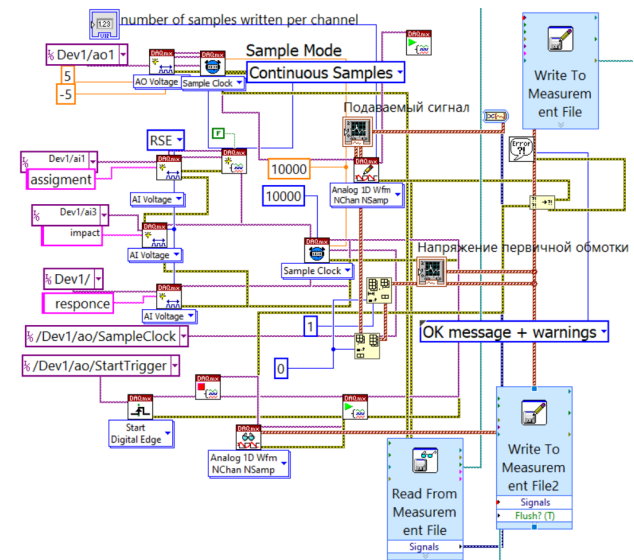


Рис. 4. Управляющая программа

В качестве исследуемого образца использовалось кольцо из магнитомягкого композиционного порошкового материала Somaloy 700-3р (800 МПа) [5] с размерами: $D = 55$ мм (внешний диаметр), $d = 45$ мм (внутренний диаметр), $h = 5$ мм (толщина). Число витков первичной обмотки $w_1 = 63$ с диаметром провода 1 мм. Число витков вторичной обмотки $w_2 = 80$ с диаметром провода 0,18 мм.

Был произведен ряд опытов на частоте питания $F = 100$ Гц. Графики тока и напряжения после коррекции приведены на рис.4 и рис.5. Максимальные индукция B и напряженность H петли гистерезиса и коэффициенты формы напряжения K_U и тока K_I , полученные в ходе опытов, приведены в табл. 1.

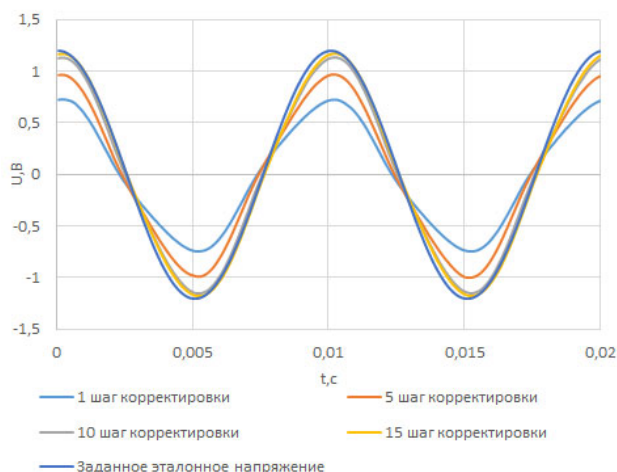


Рис. 5. Графики напряжения на вторичной обмотке на разных шагах коррективы

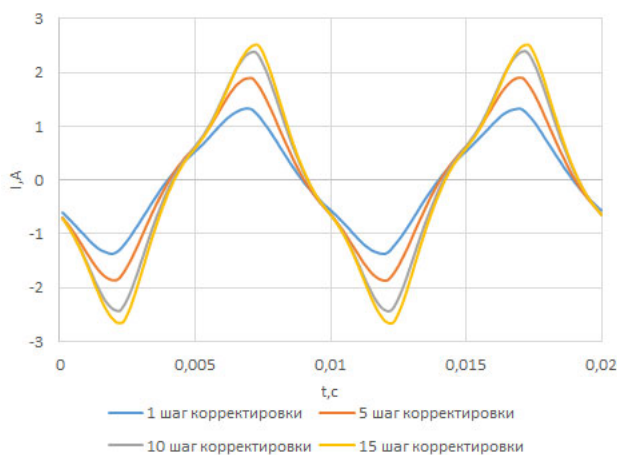


Рис. 6. Графики тока первичной обмотки на разных шагах коррективы

Табл. 1. Результаты опытов на образце Somaloy 700-3p

H, А/м	0	483,79	612,10	863,92	1134,00	1562,00
B, Тл	0	0,49	0,62	0,82	0,96	1,10
K _u	0	1,11	1,11	1,11	1,11	1,09
K _l	0	1,14	1,14	1,17	1,18	1,22

Для сравнения на рис.7 приведены результаты измерения и данные из каталога [5]. Табл.2 также демонстрирует данные из каталога. Можно сделать вывод, что измеренная основная кривая намагничивания хорошо совпадает с данными из каталога производителя.

Табл. 2. Данные из каталога

H, А/м	0	126	218	624	929	1466	2471
B, Тл	0	0,08	0,18	0,64	0,85	1,06	1,25

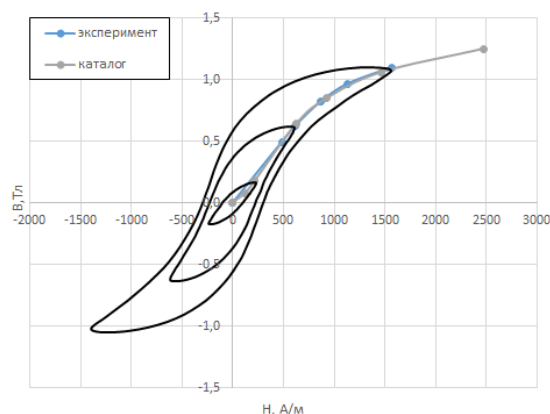


Рис. 7. Сравнение кривых намагничивания

Важной частью исследования магнитомягких материалов является анализ удельных потерь, так как потери в стали влияют на коэффициент полезного действия и нагрев электрических машин. Было проведено сравнение величин потерь, полученных из опытных данных с величинами потерь, рассчитанной по формуле, указанной в каталоге.

Экспериментальная оценка потерь в образце производилась, согласно стандарту МЭК-60404-6 [3]:

$$P_{IEC} = \frac{1}{T} \cdot \frac{N1}{N2} \cdot \int U_{w2} \cdot i_{w1} \cdot dt, P_{IEC.уд} = \frac{P_{IEC}}{m},$$

где, m – масса сердечника заготовки (0,03 кг).

В каталоге [5] указана следующая формула для оценки удельных потерь в стали:

$$P_{полн.уд} = P_{гист.уд} + P_{доб.уд} + P_{re},$$

$$P_{гист.уд} = K_h \cdot B^{1,75} \cdot F \left[\frac{Вт}{кг} \right],$$

$$P_{доб.уд} = Factor \cdot B^2 \cdot F^2 \left[\frac{Вт}{кг} \right],$$

$$P_{re} = \frac{B^2 F^2 d^2}{1,9 \cdot \rho \cdot resistivity \cdot 1000} \left[\frac{Вт}{кг} \right],$$

где для стали марки Somaloy 700-3p (800 МПа) ρ – плотность стали (7,57 г/см³), Resistivity – удельное активное сопротивление стали (200 мкОм·м), K_h и K_{ep} – весовые коэффициенты равные 0,099 и 0,000027 соответственно.

Результаты сравнения обработанных опытных данных и данных, посчитанных по формуле из каталога, показаны в табл.3 и на рис.8. Стоит отметить, что экспериментальные данные с высокой точностью сходятся с расчетными данными.

Табл. 3. Результаты расчетов и измерений потерь в образце на перемагничивание

B, Тл	0	0,49	0,62	0,82	0,96	1,10
P _{IEC} , Вт/кг	0	4,73	7,20	11,83	16,53	21,03
P _{расч} , Вт/кг	0	4,73	7,25	12,09	16,44	20,84

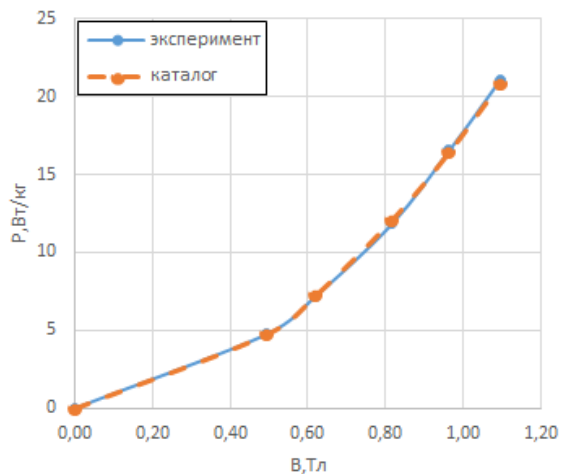


Рис. 8. Сравнение расчетных, измеренных и каталожных потерь в образце

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенных исследований можно сделать вывод, что с помощью предлагаемой установки могут производиться измерения свойств магнитомягких материалов, в соответствии со стандартом МЭК-60404-6 с необходимой точностью. Предлагаемая установка может быть использована как в качестве учебного стенда, так и в качестве измерительной установки для идентификации свойств магнитомягких материалов при проектировании электрических машин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Tong, W., Mechanical Design of Electric Motors, 1st Edition, CRC Press, 2014.
2. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали/В. В. Дружинин. — М.: Энергия, 1974—240 с.
3. IEC 60404-6:2018 RLV, Magnetic materials - Part 6: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetically soft metallic and powder materials at frequencies in the range 20 Hz to 100 kHz by the use of ring specimens.
4. National Instruments (2013), LabVIEW Getting Started with LabVIEW – The access mode, <https://www.ni.com/pdf/manuals/373427j.pdf>
5. Somaloy 3P Material data, Höganäs AB (publ.), June 2018. 2273HOG.

Парамонов Алексей Сергеевич – инженер, Уральский федеральный университет ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», тел. +79011503351, email: paramonov.aleksey@inbox.ru.

LABORATORY STUDIES OF PROPERTIES OF SOFT MAGNETIC POWDER COMPOSITE MATERIALS

A.S. Paramonov

Ural Federal University, Ekaterinburg

The study of the efficiency of using electrical materials is of great interest in the field of manufacturing electrical machines. One of the most important aspects of the manufacture of electrical machines is the design of the magnetic cores of the machine. Magnetic cores made of various magnetically soft materials are used as a magnetic system. These materials differ in magnetic permeability and specific magnetic losses. These material parameters affect the heating, size, cost and efficiency of electric machines. In order to reduce expenses, the experimental evaluation of the parameters of soft magnetic materials is carried out on samples of various shapes and sizes, on special experimental setups, in accordance with international electrotechnical standards. This article proposes an experimental setup for laboratory studies of the magnetic properties of soft magnetic materials by the method of ring specimens, in accordance with the IEC-60404-6 standard. The setup uses only standard inexpensive equipment. The required shape factor of the magnetic flux density is achieved by sequential correction of the secondary winding voltage using a digital regulator. The approach to the software implementation of the algorithm for sequential correction of the secondary winding voltage is described in the article. The proposed experimental setup was used to study the properties of a sample made of a soft magnetic composite powder material Somaloy 700-3p (800 MPa) and compare the results with the manufacturer's catalog data. Based on the results of the work, it was revealed that the proposed setup can be used to measure the properties of soft magnetic materials in accordance with the IEC-60404-6 standard with the required accuracy. The proposed experimental setup can be used both as a training stand and as a measuring installation for identifying the properties of soft magnetic materials in the design of electrical machines.

Index terms: study of soft magnetic materials, powder toroidal magnetic circuit, experimental setup.

REFERENCES

1. Tong, W., Mechanical Design of Electric Motors, 1st Edition, CRC Press, 2014.
2. Druzhinin V. V. Magnetic properties of electrical steel/V. V. Druzhinin. — M.: Energia, 1974—240 p.
3. IEC 60404-6:2018 RLV , Magnetic materials - Part 6: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetically soft metallic and powder materials at frequencies in the range 20 Hz to 100 kHz by the use of ring specimens.
4. National Instruments (2013), LabVIEW Getting Started with LabVIEW – The access mode, <https://www.ni.com/pdf/manuals/373427j.pdf>
5. Somaloy 3P Material data, Höganäs AB (publ.), June 2018. 2273HOG.

Paramonov Aleksey Sergeevich – engineer, Ural Federal University, +79011503351, e-mail: paramonov.aleksey@inbox.ru.