

ДАТЧИК И ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИСТОВОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

Шайхутдинов Д.В.¹, Горбатенко Н.И.¹, Ахмедов Ш.В.¹, Шайхутдинова М.В.¹

¹ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)», Новочеркасск, Россия (436428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132)

В статье предлагается новый первичный преобразователь магнитного потока в электротехнической стали при ее испытаниях. Данный первичный преобразователь интегрирован с намагничивающей частью и является накладным, что обеспечивает высокую скорость измерений характеристик стали – до 15 с. На основании данного первичного преобразователя реализован прибор, обеспечивающий измерение магнитных характеристик на переменном токе вплоть до магнитного насыщения испытуемой области образца. Прибор дополнительно содержит: первичный преобразователь напряженности магнитного поля, генератор синусоидального напряжения с регулируемой частотой, усилитель переменного напряжения, блок измерения электрических сигналов с датчиков, персональный компьютер с программным обеспечением. Разработанное программное обеспечение позволяет задавать режим намагничивания, снимать зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля в виде динамической кривой намагничивания и определять по ним наиболее информативные параметры образца: максимальную дифференциальную магнитную проницаемость и максимальную магнитную индукцию. Отличительной особенностью прибора является возможность проведения измерений на образцах произвольной формы и размеров. Прибор реализован на открытой платформе компании *National Instruments* и может быть использован как в составе систем управления технологическим процессом производства электротехнических изделий, так и при проведении лабораторных испытаний. Применение разработанного прибора позволит в значительной степени увеличить скорость выполнения измерительных операций при сохранении высокой точности.

Ключевые слова: магнитные характеристики, электротехническая сталь, измерения, приборы.

SENSOR AND DEVICE FOR MEASURING MAGNETIC PARAMETERS OF ELECTRICAL STEEL SHEET

Shaykhutdinov D.V.¹, Gorbatenko N.I.¹, Ahmedov S.V.¹, Shaykhutdinova M.V.¹

¹South-Russian State Technical University (Novocherkassk Polytechnic Institute), Novocherkassk, Russia (436428, Novocherkassk, st. Prosvjasheniya, 132)

The paper proposes new primary sensor of magnetic flux in the electrical steel sheet at her trial. This sensor is integrated with the magnetizing portion and overlaid to provide a high speed measurements of steel – up to 15 s. On the basis of the primary converter implemented device provides a measurement of the magnetic characteristics of the AC magnetic saturation up to the test of the sample. The device further comprises: a transducer of the magnetic field, a sinusoidal voltage with a variable frequency, variable voltage amplifier, the unit of measurement of electrical signals from the sensors to the personal computer interface software. The developed software allows you to set the mode of magnetization reversal, we measured the magnetic flux density of the magnetic field in the form of the dynamic of the magnetization curve and identify them on the most informative parameters of the sample: the maximum differential permeability, and a maximum magnetic induction. Distinctive feature of the device is the ability to carry out measurements on samples of arbitrary shape and size. The device is implemented on an open platform company *National Instruments* and can be used in the process control of production of electrical products, and for laboratory research. Application of the developed tool will allow a significant degree to increase the speed of the measurement operation while maintaining high accuracy.

Key words: magnetic characteristics, electrical steel, measuring, instruments.

Введение

Современное развитие техники и увеличение производства энергии расширяет область применения магнитомягких материалов и требует развития методов и устройств контроля параметров электротехнических изделий и их составляющих. Одним из важнейших состав-

ляющих любого такого изделия является магнитопровод, представляющий собой пакет формованных заготовок из тонколистовой электротехнической стали. Свойства стали определяют возможности готового изделия, такие как максимальная допустимая мощность и его эффективность. В условиях стремления к миниатюризации на одно из первых мест, определяющих работоспособность продукта, выходят магнитные свойства электротехнической стали – концентратора магнитного поля в электротехнических изделиях.

Цель работы: разработка прибора для измерения магнитных свойств электротехнической стали, обеспечивающего высокую точность и скорость испытаний.

Материал и методы исследований: элементы теории магнитного поля, методы теории планирования эксперимента, теории измерений, математического моделирования с использованием лицензированных пакетов прикладных программ *LabVIEW*, *GMSH*.

Результаты и обсуждение

Из открытых источников [1] известно, что любой вид обработки стали вызывает изменение ее магнитных свойств. Магнитные свойства, ухудшенные вследствие резки и пробивки отверстий, могут быть частично либо полностью восстановлены путем последующего отжига [1]. Однако данный вид обработки сопряжен со значительными материальными затратами. Таким образом, важным этапом является определение степени ухудшения магнитных свойств формованных заготовок из электротехнической стали с целью принятия последующего решения о необходимости проведения операций по восстановлению свойств. Данная задача может быть решена путем применения соответствующих контрольно-измерительных устройств в технологический процесс изготовления изделий [5].

Существующие устройства для испытания электротехнической стали можно классифицировать по типу возможных для испытания образцов на два типа. Первый тип представлен различными приборами на основе аппарата Эпштейна [2], являющегося эталоном в этой области измерений, и устройствами для испытания целых листов электротехнической стали. Этот тип характеризуется высокой точностью измерений, но не позволяет испытывать заготовки произвольной формы и требует больших затрат времени на осуществление подготовительных операций. Второй тип приборов представлен устройствами на базе накладных намагничивающих систем, интегрированных с измерительными преобразователями. Эти приборы позволяют испытывать образцы произвольной формы, а также обеспечивают высокую скорость испытаний. Их недостатками является узкий спектр измеряемых параметров, низкая точность измерений в режиме магнитного насыщения образца и, как следствие, невозможность измерения полностью кривой намагничивания. К таким приборам относится ранее предложенное устройство на основе H-образного магнитопровода [4]. Устройство обеспечивает высокую скорость контроля и позволяет измерять магнитные свойства образ-

цов из электротехнической стали ограниченных размеров. Это же устройство позволяют контролировать образцы одинаковой формы путем непосредственного сравнения с эталоном. Недостатками этих устройств являются: неравномерность намагничивания испытуемой области образца, зависимость результатов измерений от относительного положения первичного преобразователя на испытуемом образце.

Предлагается прибор для измерения динамической кривой намагничивания изделий из листовой электротехнической стали произвольной формы, основанный на использовании оригинального дифференциального преобразователя магнитного потока (ДПМП). Структура ДПМП показана на рисунке 1.

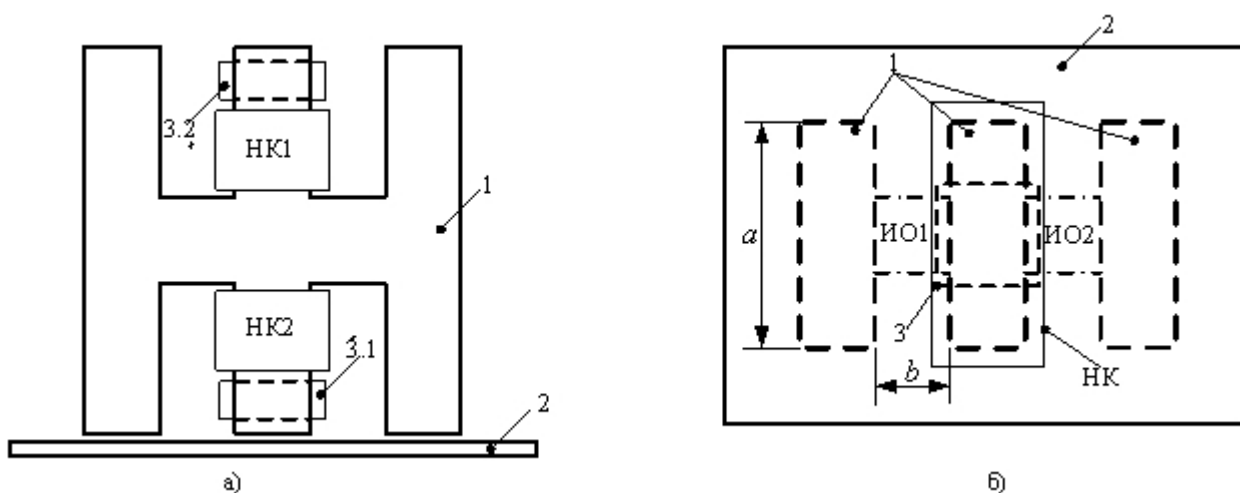


Рис. 1. Структура преобразователя магнитного потока:
а – вид сбоку, б – вид снизу

Преобразователь магнитного потока включает: магнитопровод Ж-образной формы (рис. 1, 1), две одинаковые включенные последовательно и согласованно намагничивающие катушки (рис. 1, НК1, НК2), две одинаковые включенные последовательно и встречно измерительные катушки (рис. 1, 3.1 и 3.2). Также на рисунке 1 показаны: испытуемое изделие (рис. 1, 2) и испытуемые области изделия (ИО1, ИО2). В намагничивающие катушки подается переменный ток. Ток формирует магнитный поток, который проходит как через сам магнитопровод, так и через испытуемое изделие. За счет значительного превышения ширины полюса магнитопровода a (рис. 1) над расстоянием между полюсами b (рис. 1), в ИИ проявляются области равномерного намагничивания ИО1 и ИО2. Магнитный поток, вышедший из магнитопровода в области измерительной катушки 3.1 (рис. 1), поступает либо в ИО1 и ИО2, либо, в режиме магнитного насыщения образца, проходит по воздуху, «ниже» испытуемого изделия 2. Часть магнитного потока, прошедшая по воздуху и преобразованная катушкой 3.1 в напряжение, компенсируется напряжением на выходе измерительной катушкой 3.2, сквозь которую проходит магнитный поток воздуха верхней части ДПМП. Таким образом, в резуль-

тате встречного включения измерительных катушек 3.1 и 3.2 с выхода организованной комплексной катушки 3 поступает сигнал, пропорциональный только магнитному потоку в ИО1 и ИО2. При симметрии расстояний от крайних полюсов магнитопровода ДПМП до испытуемого изделия магнитные потоки $\Phi_{ио1}$ и $\Phi_{ио2}$ через ИО1 и ИО2, соответственно, будут равны между собой: $\Phi_{ио1} = \Phi_{ио2} = \Phi_{ик3} / 2$, где $\Phi_{ик3}$ – магнитный поток, прошедший через комплексную измерительную катушку 3.

В состав прибора для измерения магнитных параметров электротехнической стали (рис. 2), кроме намагничивающего устройства (НУ) – ДПМП, к трем нижним концам которого прижимается испытуемое изделие (ИИ), входят: усилитель переменного напряжения (УПН); датчик тока (ДТ); измерительные катушки (ИК1, ИК2); интерфейсная плата NI 6321[6], подключенная к персональному компьютеру (ПК).

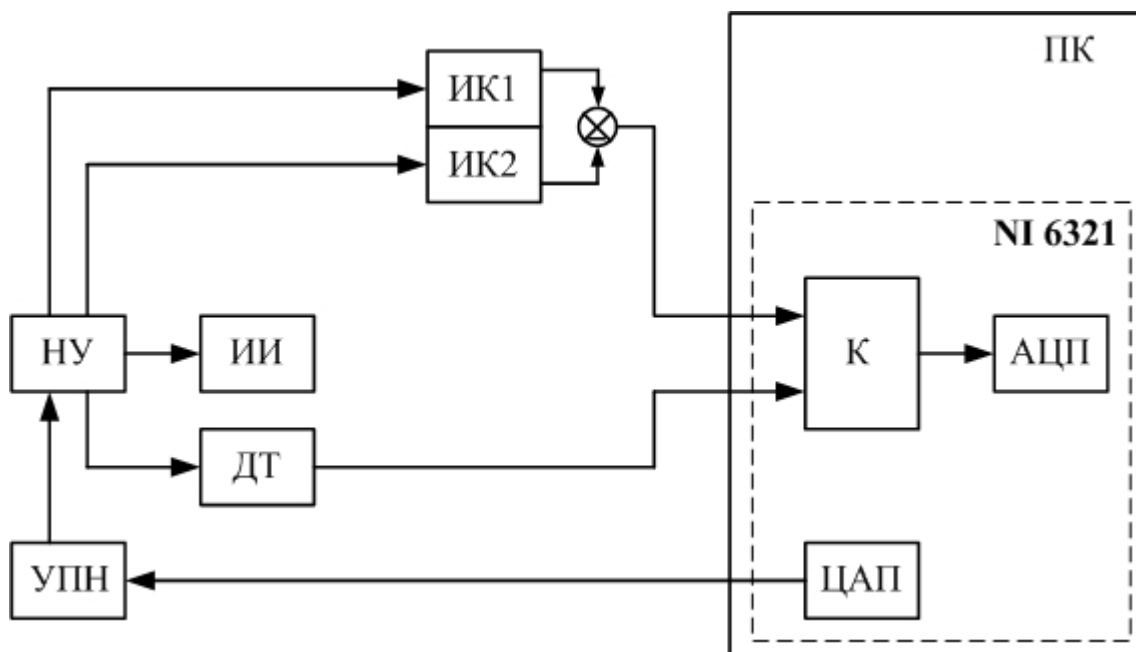


Рис. 2. Структурная схема прибора для измерения магнитных параметров электротехнической стали

Для управления процессом измерения, обработки полученной информации и принятия решения о соответствии свойств образца предъявляемым требованиям разработана и реализована программа в среде создания виртуальных приборов *LabVIEW 2012*.

Прибор работает следующим образом. В соответствии с алгоритмом, заложенным в основу программы управления испытаниями для персонального компьютера, происходит последовательно: размагничивание изделия, затем его намагничивание нарастающим магнитным полем, с параллельной фиксацией измерительной информации об ЭДС в измерительной катушке и токе в намагничивающих катушках. Далее проводится расчет магнитных параметров изделия: максимальной магнитной индукции и максимальной дифференциальной магнитной индукции и вывод их на экран. На графике отображается динамическая кривая

намагничивания. Кроме того, проводится сравнение значений измеренных параметров заготовки с номинальными значениями, предварительно заложенными в файлы, с учетом допуска на отличие, и принятие решения о ее годности или негодности.

Проведены исследования разработанного прибора двух видов: сравнение результата измерения кривой намагничивания с известной – снятой с помощью измерительной катушки, нанесенной на образец, а также проверка зависимости результатов измерений от положения на образце сложной формы. Оба исследования проводились при частоте напряжения в намагничивающих катушках 50 Гц и напряженностью магнитного поля – до 7000 А/м.

Результат сравнения измеренной характеристики с помощью ПМП и с помощью измерительной катушки на образце показан на рисунке 3. Максимальная относительная погрешность измерения в любой точке характеристики не превосходит 3,5%.

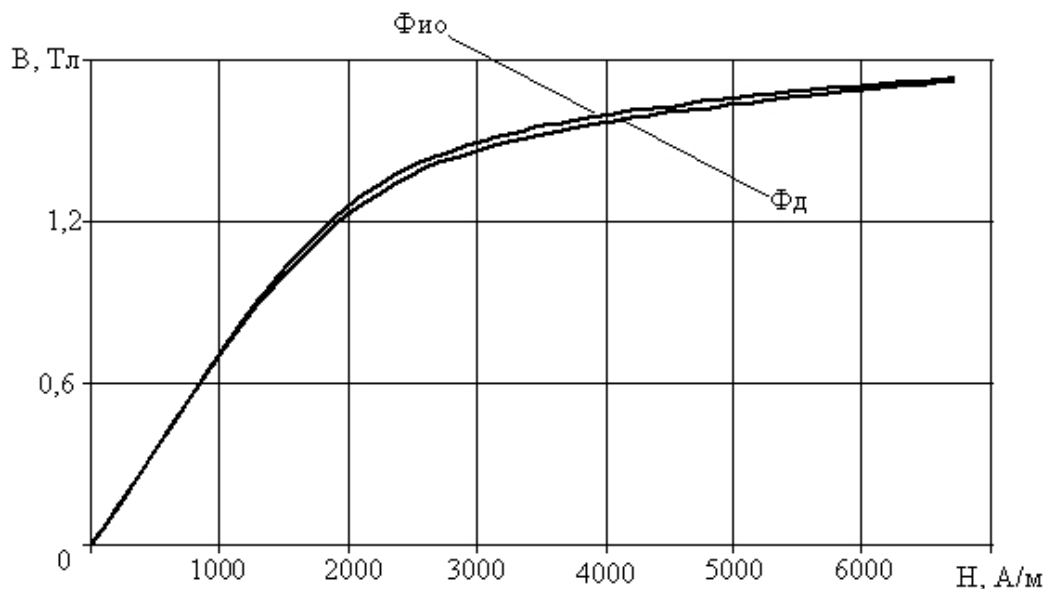


Рис. 3. Измеренные динамические кривые намагничивания: Φио – образцовая, Φд – получена с помощью ДПМП

Результат проверки зависимости результатов измерений максимальной дифференциальной магнитной проницаемости μ_{\max} [3] и максимальной магнитной индукции B_m от положения ДПМП на образце сложной формы (рис. 4) приведен в таблице 1. Для численного определения зависимости результатов измерений от положения ДПМП было рассчитано максимальное относительное отклонение результата на каждом участке от среднего значения по формуле:

$$\delta_x = \max\left(\frac{x_i - x_{\text{ср}}}{x_{\text{ср}}} \cdot 100\%\right), i = 1..7,$$

где x_i – параметр сравнения (B_m или μ_{\max}), $x_{\text{ср}}$ – среднее арифметическое значение параметра

х.

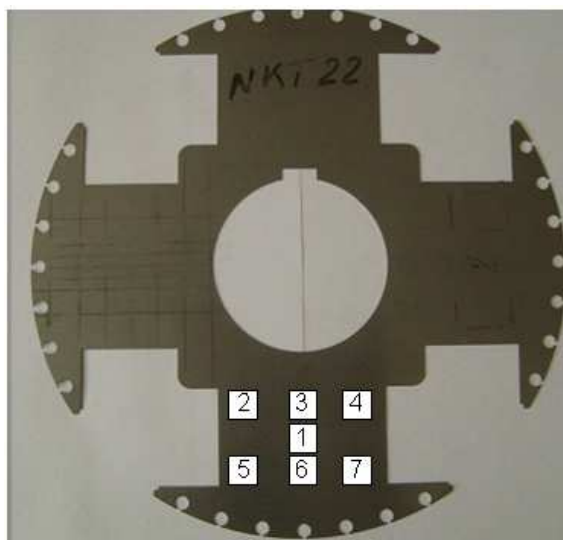


Рис. 4. Образец для испытания прибора для измерения магнитных параметров образцов из электротехнической стали: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – испытываемые участки

Таблица 1

Результаты испытания прибора для измерения магнитных параметров образцов из электротехнической стали

B_{m1} , Тл	B_{m2} , Тл	B_{m3} , Тл	B_{m4} , Тл	B_{m5} , Тл	B_{m6} , Тл	B_{m7} , Тл	B_{mcp} , Тл	δ_{Bm} , %
2,078	2,044	2,032	2,048	2,037	2,020	2,035	2,042	1,8
μ_{max1}	μ_{max2}	μ_{max3}	μ_{max4}	μ_{max5}	μ_{max6}	μ_{max7}	μ_{maxcp}	δ_{μ} , %
1598,8	1609,2	1598,6	1591,8	1584,6	1602,0	1616,3	1600,2	1,0

Как видно из таблицы 1, результаты не зависят от относительного положения датчика и образца: максимальное отличие результатов измерений семи областей от их среднего значения не превышает 2% как по максимальной магнитной индукции B_{mi} , так и по максимальной дифференциальной магнитной проницаемости μ_{maxi} , что значительно превосходит результаты предыдущих разработок, где в зависимости от точки испытания отличие результатов доходило до 50%.

Измерение магнитных параметров на участке 1 образца (рис. 4) вдоль и поперек прокатки показало, что максимальная магнитная индукция B_m вдоль и поперек прокатки материала отличается на 1,6%, а максимальная дифференциальная магнитная проницаемость материала μ_{max} вдоль прокатки на 21,6% больше, чем поперек, что согласуется с результатами известных исследований [1].

Результаты работы получены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания на проведение НИОКР, шифр заявки № 8.2935.2011, по результатам работ, полученным в СНИЛ «ТИММАГ»

ЮРГТУ(НПИ), и в рамках выполнения показателей по стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики в период с 2012 по 2014 г., номер гранта СП-748.2012.1.

Список литературы

1. Казаджан Л.Б. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов. – М. : ООО «Наука и технологии», 2000. – 224 с.
2. Корзунин Г.С. Развитие методов контроля магнитных свойств электротехнической стали. I. Аппарат Эпштейна / Г.С. Корзунин, В.К. Чистяков, Ф.Ф. Римшев // Дефектоскопия. – 2000. – № 11. – С. 7-26.
3. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы / А.А. Преображенский, Е.Г. Бишард. – М. : Высш. шк., 1986. – 352 с.
4. Шайхутдинов Д.В. Устройство для экспресс-испытаний изделий из листовой стали // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 6 (156). – С. 55-61.
5. Шайхутдинов Д.В. Методы и приборы экспресс-контроля магнитных параметров для промышленных систем управления / Д.В. Шайхутдинов, В.В. Гречихин, В.В. Боровой // Современные проблемы науки и образования. - 2012. - № 6. - URL: <http://education.ru/106-7516>.
6. *National Instruments Corporation* [Электронный ресурс] / Электрон. дан. – США, 2012. – Режим доступа: <http://sine.ni.com/nips/cds/print/p/lang/ru/nid/207405>.

Рецензенты:

Гречихин В.В., д.т.н., профессор кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии», ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт), г. Новочеркасск.

Елсуков В.С., д.т.н., профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт), г. Новочеркасск.