

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ПРИБОРА ЭКСПРЕСС-ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЛИСТОВОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

Шайхутдинов Д.В., Горбатенко Н.И., Наракидзе Н.Д., Леухин Р.И., Широков К.М., Дубров В.И., Стеценко И.А., Ахмедов Ш.В.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия (436428, Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), e-mail: iimt-srstu@mail.ru

В статье предлагается новый первичный измерительный преобразователь напряженности магнитного поля в электротехнической стали при ее испытаниях. Данный первичный преобразователь конструктивно интегрирован с первичным преобразователем магнитного потока и намагничивающей частью устройства для испытаний и входит в единую накладную конструкцию, что обеспечивает высокую скорость измерений характеристик стали – до 10 с. На основании данного первичного преобразователя реализован прибор, обеспечивающий измерение магнитных характеристик на переменном ток, вплоть до магнитного насыщения испытуемой области образца. Прибор дополнительно содержит: первичный преобразователь магнитного потока, цифровой генератор синусоидального напряжения с регулируемой частотой и перестраиваемой амплитудой, усилитель переменного напряжения, блок измерения электрических сигналов с датчиков, блок обработки информации с программным обеспечением. Разработанное программное обеспечение позволяет задавать режим перемагничивания, снимать зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля в виде динамической кривой намагничивания, определять и контролировать по ней наиболее информативные параметры образца: максимальную дифференциальную магнитную проницаемость и максимальную магнитную индукцию. Отличительной особенностью прибора является проведение измерений на образцах произвольной формы и размеров с высокой скоростью и точностью. Прибор реализован на открытой платформе компании *National Instruments*, имеет необходимые интерфейсы для использования в составе систем управления технологическим процессом производства электротехнических изделий. Применение разработанного прибора позволит в значительной степени повысить достоверность контроля при испытаниях заготовок для электротехнических изделий.

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

MEASURING CONVERTER OF MAGNETIC FIELD STRENGTH FOR DEVICE FOR RAPID TESTING PRODUCT OF ELECTRICAL STEEL SHEET

Shaykhutdinov D.V., Gorbatenko N.I., Narakidze N.D., Leukhin R.I., Shirokov K.M., Dubrov V.I., Stetcenko I.A., Akhmedov S.V.

Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI), Novocherkassk, Russia (436428, Novocherkassk, st. Prosvjasheniya, 132), e-mail: iimt-srstu@mail.ru

In this paper we propose a new transducer of the magnetic field strength for device for tests of the electrical steel. This transducer is structurally integrated with the magnetizing flux sensor of the device for testing and included in a single invoice design that provides high-speed measurements of steel - up to 10 seconds. On the basis of the primary unit inverter is implemented that provides measurement of magnetic characteristics of an alternating current up to a magnetic saturation field of the sample under test. The device further comprises: a primary magnetic flux converter, a digital sine wave generator with adjustable frequency and amplitude tunable amplifier AC voltage measurement unit the electrical signals from the sensors, the processing unit with the software. The developed software allows you to set the magnetization reversal mode, remove the dependence of the magnetic induction of the magnetic field in the form of dynamic magnetization curve, determine and control over it most informative parameters of the sample: the maximum differential permeability and maximum flux density. A distinctive feature of the device is conducting measurements on an arbitrary shape and dimensions with high speed and accuracy. The device is implemented on an open platform of National Instruments, has the necessary interfaces for use in process control systems of production of electrical products. Application of the developed device will significantly improve the reliability of the control during the test pieces for electrical products.

Keywords: magnetic characteristics, electrical steel, measuring, instruments

Для испытания изделий из электротехнических сталей используются специальные устройства измерения и контроля наиболее важных параметров изделий. Использование

электротехнических сталей в устройствах, основанных на электромагнитном взаимодействии, определяет в качестве наиболее информативных параметров магнитные свойства материалов и изделий [2, 4]. К измеряемым магнитным свойствам электротехнических сталей, подлежащим контролю, относятся удельные потери на промышленных частотах и кривая намагничивания (КН) – семейство вершин частных петель гистерезиса $B_m(H_m)$. Кроме того, рядом приборов для косвенной оценки этих и других параметров (например, механических напряжений, возникающих внутри изделия) определяются такие параметры, как динамическая петля гистерезиса, магнитная проницаемость материала, магнитная восприимчивость и т.д.

Ранее были разработаны накладной датчик и приборы на его основе, позволяющий контролировать магнитные свойства образцов [9, 5, 8]. Недостатком данных приборов является зависимость результатов измерений от формы изделия и от степени магнитного насыщения магнитопровода первичного преобразователя при испытании миниатюрных заготовок. Точность измерения магнитной характеристики материала образца не достаточна. Для решения данной проблемы предлагается использовать метод натурно-модельных испытаний [6, 11]. Однако данный подход не в полной мере подходит для испытания изделий в производственных условиях [7, 10], так как расчетные операции занимают слишком длительное время (до 10 мин.). Вариантом решения данной задачи является разработка специализированного датчика напряженности магнитного поля на поверхности испытываемого образца.

Цель работы: разработка первичного измерительного преобразователя напряженности магнитного поля для использования в составе прибора для измерения магнитных свойств электротехнической стали, обеспечивающего высокую точность и скорость испытаний образцов произвольной формы и размеров.

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

Для измерения напряженности магнитного поля H в образце применяются следующие методы: индукционный, магнитометрический, электродинамический, на эффекте Холла, метод ядерного магнитного резонанса [1]. Индукционный метод основан на измерении переменной ЭДС, индуцируемой в катушке при изменении сцепляющегося с ней магнитного потока. Он может быть использован для измерения как постоянных, так и переменных магнитных полей. При измерении переменных во времени полей измерительная катушка остается неподвижной. Погрешности измерений H индукционным методом в переменных полях составляют 2...5 %. Магнитометрический метод основан на взаимодействии подвижной магнитной стрелки магнитометра и намагниченного образца. По углу отклонения магнитной

системы от начального положения определяется магнитный момент M образца. Далее можно рассчитать намагниченность J , индукцию магнитного поля B и H . Метод отличается высокой точностью и чувствительностью. Предельная погрешность метода имеет порядок десятых долей процента, а порог чувствительности примерно $10^{-3} \dots 10^{-4}$ А/м. Высокая чувствительность и точность метода обеспечили ему широкое применение при измерениях слабых полей (например, поля Земли) и для решения некоторых метрологических задач. В области испытаний магнитных материалов вследствие большой сложности метод находит применение только в коэрцитиметрах.

В электродинамическом методе напряженность магнитного поля определяется по углу поворота катушки с известным электрическим током, помещенной в измеряемое поле. На этом принципе выполнен, например, прибор типа ИМИ-1, позволяющий измерять поля в пределах от 80 до 1300 кА/м с погрешностью не более 4 %. Достоинство метода состоит в том, что шкала указателя может быть отградуирована непосредственно в единицах измеряемой величины (напряженности поля или магнитной индукции). Основным недостатком электродинамического метода является малая точность и чувствительность.

Метод, основанный на эффекте Холла, позволяет непосредственно измерять напряженность как постоянного, так и переменного магнитных полей. Эффект Холла заключается в возникновении поперечной разности потенциалов при прохождении электрического тока в поперечном ему магнитном поле. Преобразователь Холла (ПХ) представляет собой пластину из полупроводникового материала, по четырем сторонам которой расположено четыре контакта, два из них называются токовыми, а два выходными или измерительными (иногда эти контакты называют холловскими). Для изготовления магниточувствительных элементов ПХ наиболее широко используются: кремний (Si), германий (Ge), арсенид индия (InAs), антимонид индия (InSb), арсенид галлия (GaAs). Конструктивно ПХ могут быть выполнены как в виде дискретных элементов, так и в виде полупроводниковых структур, расположенных в кристалле полупроводникового материала, в том числе и вместе с электронной схемой усиления и обработки сигнала ПХ. Не существует единой универсальной конструкции, приемлемой для всех случаев технического использования преобразователей.

Основываясь на требованиях к точности прибора, простоте использования и стоимости, сделан вывод, что наиболее перспективным методом измерения напряженности магнитного поля в образце являются использование ПХ.

Вследствие конечности размеров чувствительного элемента первичного преобразователя сделано предположение, что для решения задачи определения напряженности магнитного поля на поверхности испытуемого образца необходимо использование нескольких элементов Холла, расположенных удаленно от поверхности. Структурная схема предлагаемого

комплексного измерительного преобразователя в составе прибора для экспресс-испытаний изделий из листовой электротехнической стали представлена на рисунке 1.

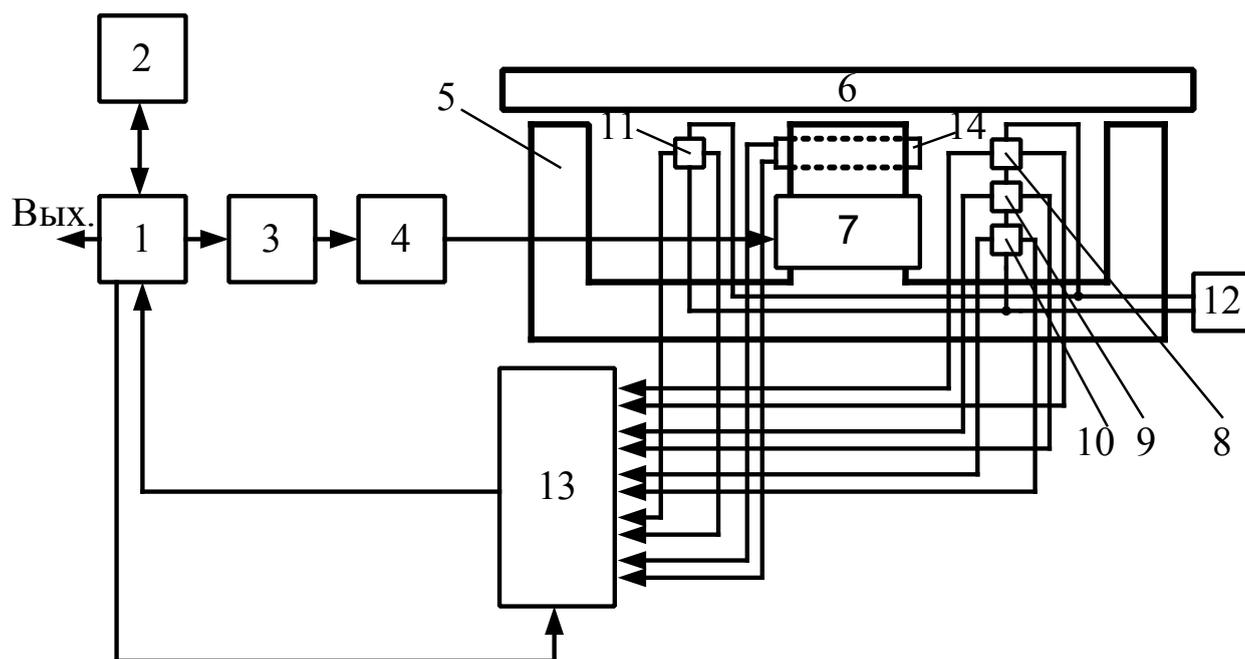


Рис. 1. Структурная схема прибора для экспресс-испытаний изделий из листовой электротехнической стали

Прибор для экспресс-испытаний изделий из листовой электротехнической стали содержит микропроцессорный анализатор 1, первый выход которого соединяется с компьютером для считывания данных из блока запоминающего устройства 2, подключенного к микропроцессорному анализатору по двунаправленному каналу, второй выход микропроцессорного анализатора 1 подключен к входу источника переменного тока (на рис. 1 не обозначен), состоящего из цифроаналогового преобразователя 3, вход которого подключен ко второму выходу микропроцессорного анализатора 1, и усилителя переменного напряжения 4, вход которого подключен к выходу цифроаналогового преобразователя 3, преобразователь магнитного потока 5, прикладываемый к испытуемому образцу 6 и представляющий собой сердечник Ш-образной формы из шихтованной электротехнической стали, на средний полюс которого нанесена намагничивающая катушка 7, подключенная к выходу усилителя переменного напряжения 4, четыре сенсора напряженности магнитного поля 8, 9, 10, 11, размещенных на одной оси, совпадающей с центром по толщине сердечника Ш-образной формы, первый 8, второй 9 и третий 10 из которых размещены на фиксированном расстоянии друг под другом в одном межполюсном пространстве сердечника Ш-образной формы, а четвертый 11 в другом межполюсном пространстве сердечника Ш-образной формы на одинаковом с первым сенсором напряженности магнитного поля 8 расстоянии до верхнего края сердечника Ш-образной формы, при этом выходы четырех сенсоров напряженности магнитного поля 8, 9, 10, 11 подключены к первым четырем входам дифференциального

многоканального аналого-цифрового преобразователя 13, а их питание осуществляется с помощью блока питания 12, пятый вход дифференциального многоканального аналого-цифрового преобразователя 13 подключен к выходу измерительной катушки 14, шестой вход дифференциального многоканального аналого-цифрового преобразователя 13 является тактовым и подключен к третьему выходу микропроцессорного анализатора 1, а выход дифференциального многоканального аналого-цифрового преобразователя 13 подключен к входу микропроцессорного анализатора 1, кроме того в центральном полюсе преобразователя магнитного потока 5 – сердечника Ш-образной формы, выполнены два пропила на всю толщину полюса, и разделяющие полюс на три равных части, ширина которых совпадает с расстоянием от внутреннего края каждого из крайних полюсов сердечника Ш-образной формы до ближайшего края среднего полюса, а измерительная катушка 14 нанесена таким образом, что охватывает среднюю часть центрального полюса сердечника Ш-образной формы, получившуюся после пропилов.

Для исследования распределения напряженности магнитного поля в межполюсном пространстве сердечника Ш-образной формы проведено моделирование его работы в среде *GMSH+GetDP*. При моделировании получено, что напряженность магнитного поля в воздухе вблизи испытываемой области образца изменяется линейно, возрастая при приближении к намагничивающей катушке (рис. 2).

Поэтому для измерения напряженности магнитного поля принято решение применять двухточечный датчик Холла [3] с последующей аппроксимацией полученных значений на поверхность по формуле:

$$H=H_2-(H_2-H_1)/(D_2-D_1)\cdot D_2, \quad (1)$$

где H_2 – напряженность магнитного поля, показанная датчиком Холла, удаленным от поверхности образца на расстояние D_2 , H_1 – напряженность магнитного поля, показанная датчиком Холла, удаленным от поверхности образца на расстояние D_1 .

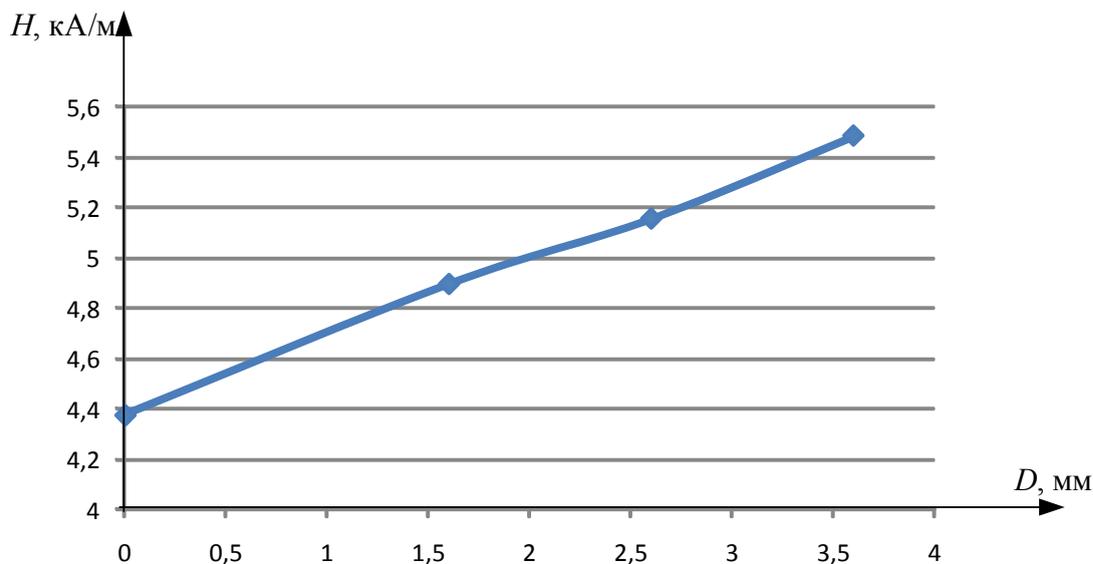


Рис. 2. Зависимость напряженности магнитного поля H , от расстояния до поверхности испытуемого образца D . Результат моделирования

Для подтверждения полученного результата линейного нарастания напряженности магнитного поля по мере удаления от поверхности испытуемого образца, проведены экспериментальные исследования. Результат представлен на рисунке 3.

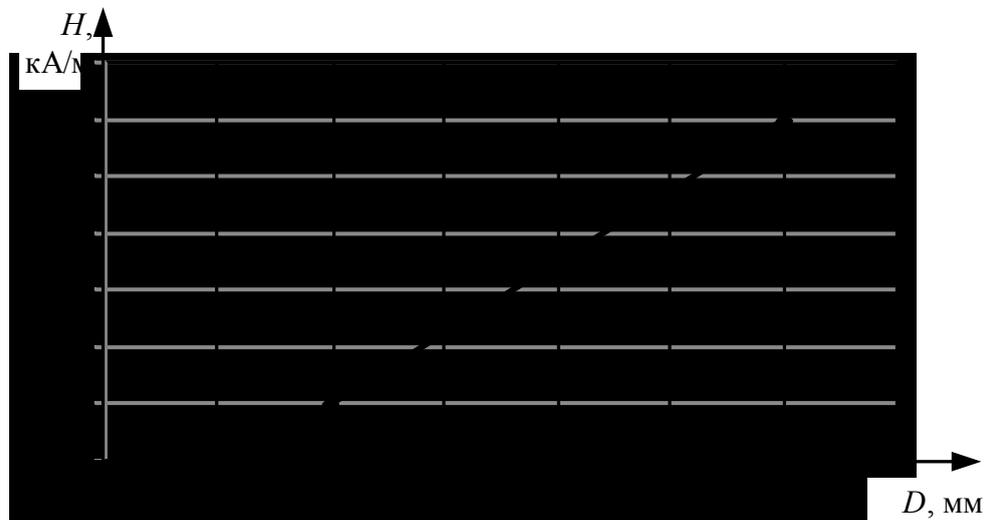


Рис. 3. Зависимость напряженности магнитного поля H , от расстояния до поверхности испытуемого образца D . Результат натурального эксперимента

Исследование, проведенные на трехмерных моделях, основанных на методе конечных элементов, показали, что погрешность определения напряженности магнитного поля на поверхности образца с помощью предложенного преобразователя не превосходит 3 %.

Результаты работы получены по результатам работ, полученным в СНИЛ «ИИС» ЮРГПУ(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 гг., номер гранта СП-748.2012.1 и в период с 2013 по 2014 гг., номер гранта СП-1967.2013.1. Работы были выполнены с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и энергоэффективное электрооборудование» ЮРГПУ(НПИ).

Список литературы

1. Афанасьев Ю.В. Магнитометрические преобразователи, приборы, установки / Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов, А.П. Щелкин. – Л.: Энергия, 1972. – 272 с.
2. Казаджан Л.Б. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов / Л.Б. Казаджан. – М.: ООО «Наука и технологии», 2000. – 224 с.
3. Ланкин М.В. Оптимизация параметров измерительного преобразователя напряженности магнитного поля сумматора / Ланкин М.В., Наракидзе Н.Д. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2008. - №2. – С. 32-35.
4. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы / А.А. Преображенский, Е.Г. Бишард. – М.: Высш. шк., 1986. – 352 с.
5. Шайхутдинов Д.В. Датчик и прибор для измерения магнитных параметров листовой электротехнической стали / Д.В. Шайхутдинов, Н.И. Горбатенко, Ш.В. Ахмедов, М.В. Шайхутдинова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. - №4. – URL: www.science-education.ru/110-9756.
6. Шайхутдинов Д.В. Метод определения магнитных свойств электротехнической стали / Д.В. Шайхутдинов, М.В. Шайхутдинова // Международный журнал экспериментального образования. – 2013. - №11-1. – С. 105-107.
7. 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> (дата обращения: 16.05.2014).
8. Шайхутдинов Д.В. Портативный прибор контроля начальной кривой намагничивания электротехнической стали / Д.В. Шайхутдинов, К.М. Широков, Р.И. Леухин, Ш.В. Ахмедов // Материалы XIII Международная научно-практическая конференция «Техника и технология: новые перспективы развития», г. Москва, 26 мая 2014 г.: – М.: Спутник+, 2014. – С. 26-29.
9. Шайхутдинов Д.В. Устройство для экспресс-испытаний изделий из листовой стали / Д.В. Шайхутдинов // Контроль. Диагностика. – 2011. - №6(156). – С. 55-61.
10. Широков К.М. Устройство магнитного контроля для подсистемы управления производством электротехнических изделий/ Широков К.М., Шайхутдинов Д.В., Дубров В.И., Январёв С.Г., Ахмедов Ш.В., Шайхутдинова М.В.//Современные проблемы науки и образования. – 2013. - № 6; URL:www.science-education.ru/113-11665 (дата обращения: 16.05.2014).

11. Shaykhutdinov, D.V. Experimental and Simulation Tests of Magnetic Characteristics of Electrical Sheet Steel/D.V. Shaykhutdinov, N.I. Gorbatenko, Sh.V. Akhmedov, M.V. Shaykhutdinova, K.M. Shirokov //Life Science Journal. – 2013. - № 10(4); URL:http://www.lifesciencesite.com/ljsj/life1004/361_22173life1004_2698_2702.pdf.

Рецензенты:

Гречихин В.В., д.т.н., профессор кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии», ФГБОУ ВПО "Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова", г. Новочеркасск;

Кириевский Е.В., д.т.н., профессор кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии» ФГБОУ ВПО "Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова", г. Новочеркасск.