

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОПОГРАФИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОБЛАСТИ НИЗКОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КОНТРОЛЯ ЛИСТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

Шайхутдинов Д. В.¹, Горбатенко Н.И.¹, Гречихин В.В.¹

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия (436428, Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), e-mail: iimt-srstu@mail.ru

При производстве электромагнитных изделий важной технологической операцией является входной контроль используемых листов электротехнической стали. Проблемой при этом является не только несоответствие всего листа паспортным магнитным характеристикам, но и дефекты отдельных его участков. С целью обнаружения участков листа, имеющих значительные отличия магнитной проницаемости, разработан оригинальный подход. Основой данного подхода является анализ результатов измерений магнитного потока в различных участках, создаваемого прикладываемым к испытываемому листу П-образным источником магнитного поля, например постоянным магнитом. Проведены исследования разработанного метода на трехмерной модели. Расчет параметров магнитного поля модели выполнялся с помощью метода конечных элементов. Результат исследований показал работоспособность разработанного подхода. Предложенный подход повышает производительность и достоверность операций контроля по сравнению с известными способами испытания листовой электротехнической стали.

Ключевые слова: магнитные характеристики, электромагниты, измерение, приборы

DETERMINATION OF THE TOPOGRAPHY OF MAGNETIC FIELD AND LOCALIZATION OF THE LOW-PERMEABILITY REGION FOR ELECTRICAL STEEL SHEET TEST

Shaykhutdinov D.V.¹, Gorbatenko N.I.¹, Grechikhin V.V.¹

¹ Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI), Novochechassk, Russia (436428, Novochechassk, st. Prosvjasheniya, 132), e-mail: iimt-srstu@mail.ru

In the production of electromagnetic devices an important technological phase is the incoming inspection of electrical steel sheets. The problem in this case is not only the mismatching of real magnetic characteristics of sheets and their passport data, but defects of its individual parts. In order to detect areas of the sheet, with significant differences between the magnetic permeability, it developed an original approach. The basis of this approach is the analysis of the measurement results of the magnetic flux in different areas created applied to the examinee sheet U-shaped magnetic field source, for example a permanent magnet. The research method was checked by using three-dimensional model. Calculation of the parameters of the magnetic field model was performed using the finite element method. The results showed efficiency of the developed approach. Proposed approach increases the performance and reliability of the testing operations in comparison with known test methods electrical steel sheet.

Keywords: magnetic characteristics, electromagnets, measuring, instruments

Эффективность использования электротехнических сталей в устройствах, основанных на электромагнитном взаимодействии, определяется их наиболее информативными магнитными параметрами. Для испытания электротехнических сталей используются специальные устройства измерения и контроля, которые различаются типами объектов испытаний, принципом действия, способами исполнения, спектром контролируемых параметров, производительности и точности измерений и т.п.

На первом этапе производства электротехнических изделий [7,9,10], материал для

изготовления магнитопроводов обычно поступает в виде листов. Именно магнитные свойства листов определяют как эксплуатационные параметры конечных изделий, так и режимы работы технологического оборудования, задействованного в системе производства. Для определения магнитных характеристик на целых листах и в движущейся ленте существует несколько аппаратов, отличающихся между собой принципом организации магнитной цепи (разомкнутая и замкнутая магнитные цепи) [2, 3]. Примерами устройств, основанных на данных подходах, являются установки У-5021П и У-5021ПМ, предназначенные для измерения интегральных магнитных свойств. Однако, при таких испытаниях наличие малой, по сравнению с габаритами всего листа, дефективной области может быть нивелировано высокими магнитными свойствами остальной части листа. В этом случае неизбежен брак выпускаемых электротехнических изделий.

Существует ряд устройств, основанных на первичных преобразователях накладного принципа действия [4, 5, 6, 8, 11]. Основным недостатком таких устройств является низкая производительность операций контроля при испытаниях больших по площади объектов – листов электротехнической стали.

Таким образом, актуальной задачей является разработка подходов, обеспечивающих локализацию дефектных областей листов электротехнической стали.

Цель работы: разработка подходов к выявлению и локализации областей листов электротехнической стали с ухудшенными магнитными свойствами.

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

Результаты и обсуждение

Одним из основных параметров, определяющим качество электротехнической стали, является относительная магнитная проницаемость μ [1]:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H},$$

где B – магнитная индукция, μ_0 – магнитная постоянная вакуума, H – напряженность магнитного поля. В общем случае магнитная проницаемость μ различна для каждой точки материала.

Для решения задачи дефектоскопии листов электротехнической стали рассмотрим магнитную систему, представленную на рисунке 1. Данная магнитная система состоит из источника магнитного поля (рис. 1, 1, материал – AlNiCo, коэрцитивная сила – 120 кА/м), концентраторов магнитного поля (рис. 1, 2, материал – магнитомягкий типа АРМКО, магнитная проницаемость $\mu=4000$), испытуемого образца из листовой электротехнической

стали (рис. 1, 3), сенсоров магнитного поля (рис. 1, 5, например, датчики Холла). Решение задачи локализации области листа электротехнической стали с ухудшенными магнитными свойствами (рис. 1, 4) предполагает обнаружение и определение положения частей образца, имеющих более низкую магнитную проницаемость μ .

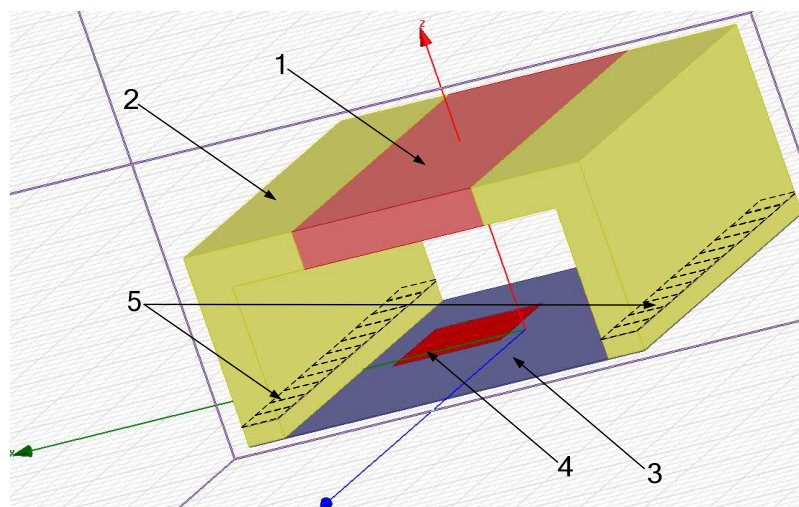


Рис. 1. Магнитная система. Трехмерная модель:

1 – источник магнитного поля, 2 – концентратор магнитного поля, 3 – испытуемый лист электротехнической стали, 4 – пример расположения области дефекта, 5 – позиции сенсоров магнитного поля

Для решения поставленной задачи предлагается обобщенный подход, заключающийся в приложении испытуемого образца (рис. 1, 3) к полюсам концентраторов магнитного поля (рис. 1, 2), фиксации показаний сенсоров магнитного поля (рис. 1, 5), повороту образца на угол 90° , повторной фиксации показаний сенсоров магнитного поля. В результате будут получены четыре матрицы-вектора значений:

- A – вектор значений магнитного поля $[a_1, \dots, a_n]$, определенных с помощью сенсоров, установленных на первом (условно) концентраторе магнитного поля, при испытании в первом (условно) направлении;

- B – вектор значений магнитного поля $[b_1, \dots, b_n]$, определенных с помощью сенсоров, установленных на втором (условно) концентраторе магнитного поля, при испытании в первом (условно) направлении намагничивания;

- C – вектор значений магнитного поля $[c_1, \dots, c_n]$, определенных с помощью сенсоров, установленных на первом (условно) концентраторе магнитного поля, при испытании во втором (условно) направлении намагничивания;

- D – вектор значений магнитного поля $[d_1, \dots, d_n]$, определенных с помощью сенсоров, установленных на втором (условно) концентраторе магнитного поля, при испытании во втором (условно) направлении намагничивания.

Каждый из сформированных векторов будет иметь n значений, соответствующих

количеству сенсоров магнитного поля на полюсе одного концентратора магнитного поля.

На первом этапе обработки измерительной информации составляются новые 4 матрицы, каждая из которых имеет размерность $n \times n$:

- матрица L составляется из элементов $l_{ij} = \max(a_i, c_j)$, причем $i=1..n, j=1..n$;
- матрица F составляется из элементов $f_{ij} = \max(b_i, d_j)$, причем $i=1..n, j=1..n$;
- матрица G составляется из элементов $g_{ij} = \max(a_i, d_j)$, причем $i=1..n, j=1..n$;
- матрица M составляется из элементов $m_{ij} = \max(b_i, c_j)$, причем $i=1..n, j=1..n$.

Проводится нормализация матриц по минимальному значению их элементов:

$$l_{ij}^{norm} = \frac{l_{ij}}{\min(L)}, i=1..n, j=1..n; f_{ij}^{norm} = \frac{f_{ij}}{\min(F)}, i=1..n, j=1..n;$$
$$g_{ij}^{norm} = \frac{g_{ij}}{\min(G)}, i=1..n, j=1..n; m_{ij}^{norm} = \frac{m_{ij}}{\min(M)}, i=1..n, j=1..n.$$

На следующем этапе составляется обобщенная матрица Φ распределения магнитного поля $[\varphi_{11}, \dots, \varphi_{nn}]$ в образце, размерностью $n \times n$. Элементы матрицы Φ рассчитываются по формуле:

$$\varphi_{ij} = l_{ij}^{norm} + f_{ij}^{norm} + g_{ij}^{norm} + m_{ij}^{norm}, i=1..n, j=1..n.$$

Затем проводится ее нормализация по минимальному значению:

$$\Phi_{ij}^{norm} = \frac{\varphi_{ij}}{\min(\Phi)}, i=1..n, j=1..n.$$

Минимальные значения элементов матрицы Φ соответствуют минимальным значениям магнитного потока, проходящего через соответствующие участки испытуемого образца (рис. 2). Это объясняется тем, что относительная магнитная проницаемость μ данных участков мала. На рисунке 2 видно, что уровень магнитного поля мал не только в области дефекта. Данная область оставляет так называемые «следы», направление распространения которых совпадает с направлением магнитного поля. Данные «следы» изменяют магнитного поле полюсов концентраторов магнитного поля и могут быть зафиксированы с помощью сенсоров магнитного поля, установленных в концентраторах (рис. 1 – 5, рис. 2 – 4). Таким образом, по измеренным значениям магнитного поля могут быть определены дефективные участки образца с низкой магнитной проницаемостью.

Для подтверждения работоспособности данного подхода проведено моделирование магнитной системы, представленной на рисунке 1. При моделировании магнитная проницаемость области дефекта (рис. 2, 3) была задана в 40 раз меньше, чем магнитная проницаемость остальной части листа. Результаты измерения значений магнитного поля – магнитного потока Φ , [мкВб] через участки, соответствующие местам расположения

сенсоров магнитного поля (рис. 1, 5) представлены в виде трехмерного графика распределения значений элементов обобщенной матрицы распределения магнитного поля Φ (рис. 3).

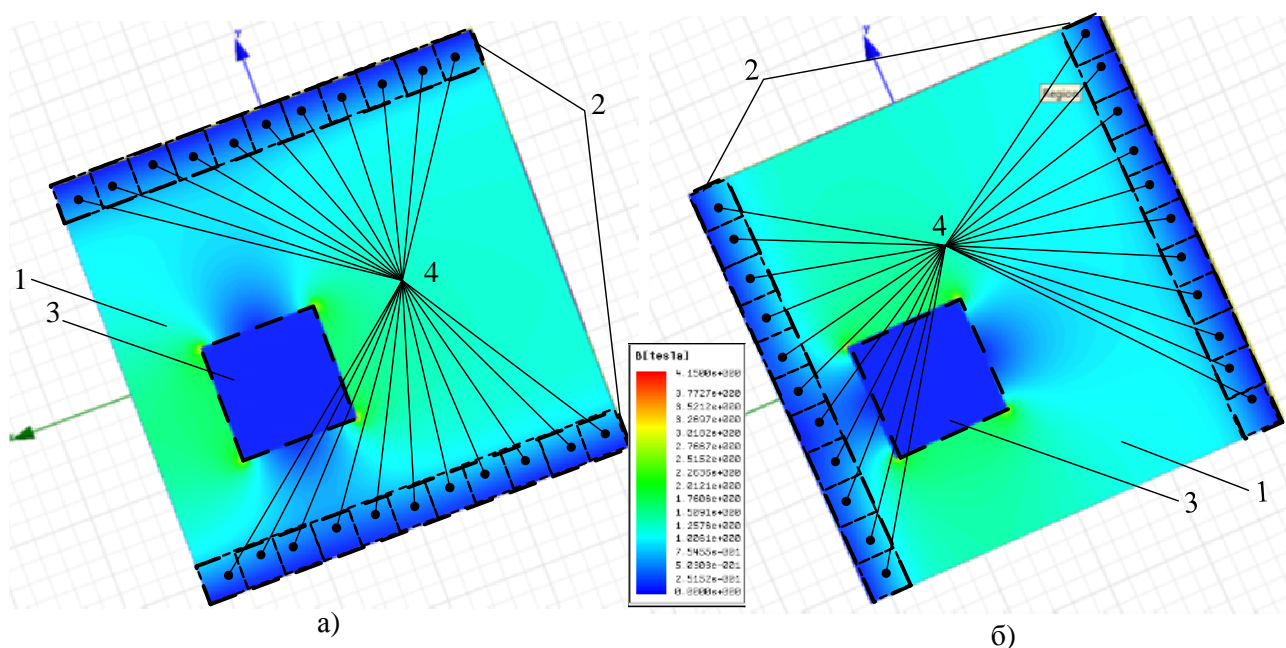


Рис. 2. Объект испытаний. Распределение магнитной индукции B , H при различном (а, б) направлении приложения магнитного поля:

1 – испытуемый лист электротехнической стали, 2 – полюса концентраторов магнитного поля, 3 – пример расположения области дефекта, 4 – позиции сенсоров магнитного поля

На основании анализа полученных данных (рис. 3), делаем вывод, что областью высокой магнитной проницаемости является область с относительными координатами [5-7] и [6-9]. Данные координаты определены относительно порядковых номеров сенсоров магнитного поля (рис. 1, 5) и совпадают с расположением дефективной области (рис. 1, 4). Как видно из графика (рис. 3), отличие в 40 раз магнитной проницаемости дефективной области занимающей (9/121) частей от общего объема образца вызывает отличие магнитного потока обобщенной матрицы Φ в области дефекта 12 %. Дополнительно проведены исследования показавшие следующее. При отличии магнитной проницаемости дефекта в 4 раза, при том же относительном объеме дефекта, отличие магнитного потока обобщенной матрицы Φ в области составляет 7 %. При отличии магнитной проницаемости в 40 раз и дефективной области занимающей (1/121) часть от общего объема образца отличие магнитного потока обобщенной матрицы Φ в области дефекта составляет 1,2 %. В отсутствие дефекта, неравномерность магнитных потоков не превышает 0,25 %.

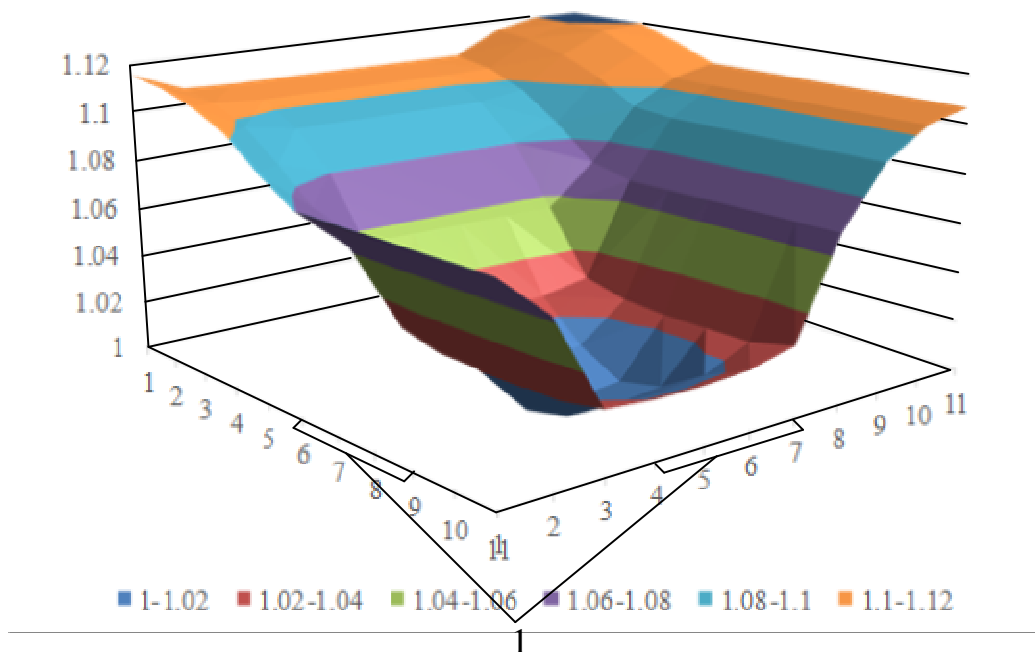


Рис. 3. Результат расчета обобщенной матрицы распределения магнитного поля в испытуемом образце в виде 3D-графика: 1 – координаты рассчитанной области значений низкого магнитного поля – участков высокой магнитной проницаемости образца

Во всех рассмотренных случаях предложенный подход показал высокую эффективность в локализации области низкой магнитной проницаемости. На основании полученных данных делаем вывод, что для проведения испытаний в соответствии с предлагаемым подходом, необходимы высокоточные магнитные сенсоры, обеспечивающие погрешность измерений не хуже 0,5 %.

Разработанный подход может быть использован для построения устройств предварительной оценки неоднородности листов из электротехнической стали на предприятиях – производителях электротехнической промышленности. Подробное исследование магнитных свойств дефективных областей, при их обнаружении, должно производиться с помощью устройств накладного типа [4, 5, 6, 8, 11].

Результаты работы получены 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 2015 по 2017 гг., номер гранта СП-4108.2015.1.

Список литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. / Л.А. Бессонов - М.: Высш. шк., 1986. С. 126–127.
2. Корзунин Г.С., Чистяков В.К., Римшев Ф.Ф. Развитие методов контроля магнитных

- свойств электротехнической стали. III. Листовые аппараты // Дефектоскопия. – 2001. – №6. – С. 42-71.
3. Корзунин Г.С., Чистяков В.К., Римшев Ф.Ф. Развитие методов контроля магнитных свойств электротехнической стали. IV. Контроль рулонной стали // Дефектоскопия. – 2002. – №3. – С. 56-76.
4. Шайхутдинов Д.В. Устройство для экспресс-испытаний изделий из листовой стали // Контроль. Диагностика.– 2011. – №6(156). – С.55-61.
5. Шайхутдинов Д.В., Горбатенко Н.И., Ахмедов Ш.В., Шайхутдинова М.В. Датчик и прибор для измерения магнитных параметров листовой электротехнической стали // Современные проблемы науки и образования - 2013. - №4. - URL: www.science-education.ru/110-9756.
6. Шайхутдинов Д.В., Горбатенко Н.И., Наракидзе Н.Д., Леухин Р.И., Широков К.М., Дубров В.И., Стеценко И.А., Ахмедов Ш.В. Измерительный преобразователь напряженности магнитного поля для прибора экспресс-испытаний изделий из листовой электротехнической стали // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5; URL: <http://www.science-education.ru/119-14895> (дата обращения: 14.10.2014).
7. Шайхутдинов Д.В., Гречихин В.В., Боровой В.В. Методы и приборы экспресс-контроля магнитных параметров для промышленных систем управления // Современные проблемы науки и образования - 2012. - № 6. - URL: <http://education.ru/106-7516> (дата обращения: 16.05.2014).
8. Шайхутдинов Д.В., Шайхутдинова М.В. Метод определения магнитных свойств электротехнической стали // Международный журнал экспериментального образования. - 2013.- №11-1. - С. 105-107.
9. Широков К.М., Шайхутдинов Д.В., Дубров В.И., Январёв С.Г., Ахмедов Ш.В., Шайхутдинова М.В. Устройство магнитного контроля для подсистемы управления производством электротехнических изделий // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: www.science-education.ru/113-11665 (дата обращения: 16.05.2014).
10. Широков К.М., Гречихин В.В. Исследование бессенсорных устройств определения магнитных характеристик для систем управления производством электромагнитов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6. – С. 1173-1178.
11. Shaykhutdinov D.V., Gorbatenko N.I., Akhmedov Sh.V., Shaykhutdinova M.V., Shirokov K.M. Experimental and Simulation Tests of Magnetic Characteristics of Electrical Sheet Steel // Life Science Journal. -2013. -№ 10(4); URL:http://www.lifesciencesite.com/ljs/life1004/361_22173life1004_2698_2702.pdf.

Рецензенты:

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;

Елсуков В.С., д.т.н., профессор кафедры «Автоматика и телемеханика», ФГБОУ ВПО "Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова", г. Новочеркасск.