

УДК 620.130

## ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ГИСТЕРЕЗИСНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

*В. В. ПАВЛЮЧЕНКО, Е. С. ДОРОШЕВИЧ*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

UDC 620.130

## NUMERICAL CALCULATIONS OF THE ELECTRIC SIGNAL DISTRIBUTIONS OF THE MAGNETIC FIELD CONVERTER IN HYSTERESIS INTERFERENCE

*V. V. PAVLYUCHENKO, E. S. DOROSHEVICH*

**Аннотация.** На основании результатов экспериментальных измерений, полученных с помощью разработанных методов гистерезисной интерференции, проведены теоретические расчеты распределений электрического напряжения  $U(x)$ , снимаемого с преобразователя магнитного поля, от пространственной координаты  $x$ . Получены зависимости  $U(x)$  для пластин из алюминия толщиной 0,05, 0,051, 0,0525 и 0,055 мм, находящихся за близлежащей пластиной свинца толщиной  $d_0 = 0,45$  мм. Запись импульсных магнитных полей линейного индуктора осуществляли на магнитный носитель с арктангенсной характеристикой. Найденные зависимости  $U(x)$  позволяют повысить точность контроля толщины металлических объектов за близлежащими металлическими экранами и в слоях металлов, а также дефектов сплошности в них.

**Ключевые слова:** гистерезисная интерференция, импульсное магнитное поле, арктангенсная характеристика магнитного носителя, вторичное магнитное поле.

**Abstract.** Based on the developed methods of hysteresis interference and the obtained results of experimental measurements, theoretical calculations of the distributions of the electric voltage  $U(x)$ , taken from the magnetic field transducer from the spatial coordinate  $x$ , were carried out. The dependences  $U(x)$  were obtained for aluminum plates with a thickness of 0,05, 0,051, 0,0525 and 0,055 mm, located behind a nearby lead plate with a thickness of  $d_0 = 0,45$  mm. The recording of pulsed magnetic fields of a linear inductor was carried out on a magnetic carrier with an arctangent characteristic. The recording of pulsed magnetic fields of a linear inductor was carried out on a magnetic carrier with an arctangent characteristic. The found dependences  $U(x)$  make it possible to increase the accuracy of monitoring the thickness of metal objects behind nearby metal screens and in metal layers, as well as continuity defects in them.

**Key words:** hysteresis interference, pulsed magnetic field, arctangent characteristic of a magnetic carrier, secondary magnetic field.

Толщину металлических объектов и параметры дефектов сплошности в них можно находить разными методами. Так, контроль толстослойных никелевых покрытий на двухслойных (неферромагнетик–ферромагнетик) основаниях контролируют магнитодинамическим методом [1, 2]. Для

контроля сварных швов в изделиях из ферромагнитных материалов применяют магнитографический метод [3–5]. Визуализацию полей дефектов ферромагнитных объектов осуществляют с помощью пленки Flux-detector [6]. Контроль дефектов в металлах можно проводить с помощью магнитоиндукционного интроскопа [7]. Для этих целей наиболее часто используют вихретоковый метод. Так, вихретоковым методом можно вести диагностику пластины с трещиной [8]. Следует отметить также работы Ф. Ферстера по вихретоковой дефектоскопии, например, [9].

Определению толщины и других геометрических размеров металлических объектов, электрических и магнитных свойств материалов объектов, а также определению параметров дефектов сплошности в них посвящены [10–15]. Здесь использована полученная авторами гистерезисная интерференция импульсного магнитного поля, а также разработанные на ее основе методы контроля. В этих работах также представлены экспериментальные результаты определения параметров объектов, находящихся за металлическими экранами.

Целью настоящей работы является повышение точности контроля определения толщины электропроводящих объектов, находящихся за металлическими экранами или слоями металлов, их разнотолщинности и дефектов сплошности в них.

Поставленная цель достигается путем проведения теоретических расчетов распределений электрического напряжения  $U(x)$  от координаты  $x$ , снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего магнитный носитель (МН). Распределения остаточных магнитных полей МН соответствуют распределениям остаточной намагниченности участков магнитного носителя.

Записи магнитных полей получали путем воздействия на объект с МН сериями из нескольких разнополярных импульсов магнитного поля линейного индуктора. Для расчетов использовали формулы, полученные ранее в [14, 15] для МН с арктангенсными характеристиками ветвей гистерезиса.

При проведении теоретических расчетов прохождение импульсов магнитного поля моделировали следующим образом. Исходя из экспериментальных зависимостей величины вторичного магнитного поля вблизи поверхности металлического объекта от его толщины [10] и характеристик магнитного носителя [14, 15] определяли амплитуды и время нарастания импульсов поля, воздействующих на МН с объектом. После этого создавали программу компьютерных расчетов с найденными зависимостями, с помощью которой рассчитывали величину электрического напряжения  $U$  на выходе преобразователя магнитного поля, сканирующего МН, с выводом электрического сигнала на цифровой осциллограф и на монитор. С полученными распределениями проводили

алгебраические операции с построением фигур гистерезисной интерференции.

Тангенциальную составляющую напряженности импульсного магнитного поля, созданного линейным индуктором, рассчитывали по формуле

$$H = A / (x^2 + b^2), \quad (1)$$

где  $A$  – постоянная;  $x$  – расстояние в сантиметрах до проекции оси индуктора в плоскости измерения;  $b$  – расстояние в сантиметрах от оси индуктора до магнитного носителя.

Величину электрического напряжения, снимаемого с используемого преобразователя магнитного поля при воздействии на МН одним импульсом магнитного поля в прямом направлении  $H_1$ , рассчитывали по формуле

$$U_1 = B + 24,3 \operatorname{arctg} (0,011H_1 - C), \quad (2)$$

а величину электрического напряжения при воздействии на МН одним импульсом магнитного поля  $H_1$  в прямом направлении и вторым обратным импульсом  $H_2$  находили как

$$U_2 = -B + 0,61U_1 + (24,5 + 0,40U_1) \operatorname{arctg} ((0,011 + DU_1)H_2 + C - 16U_1), \quad (3)$$

где  $B, C, D$  – постоянные. При использовании метода нулевого центрального максимума [12, 14, 15] получали максимальную чувствительность в точке, лежащей на проекции оси индуктора.

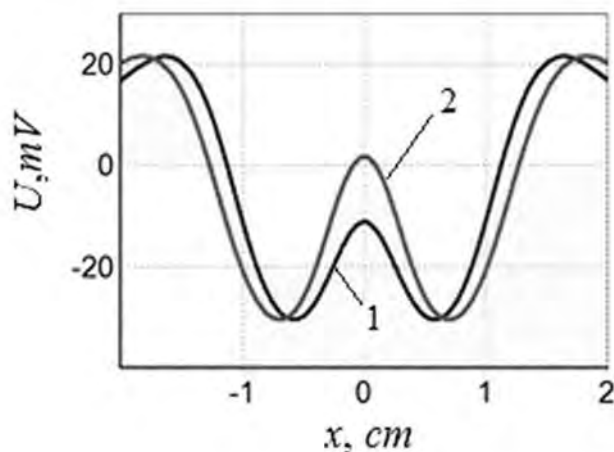


Рис. 1. Расчетные зависимости  $U(x)$ : 1 – для пластины из свинца; 2 – для пластины из свинца, под которой находится пластина из алюминия. Толщина пластины  $d = d_0$

Рассчитаем распределение электрического напряжения  $U(x)$  преобразователя магнитного поля, сканирующего МН после воздействия на МН с пластиной из свинца толщиной  $d_0 = 0,45$  мм тремя импульсами магнитного поля с чередующейся полярностью. Время нарастания импульса  $1,8 \cdot 10^{-5}$  с. В результате получаем зависимость 1 (рис. 1) величины  $U(x)$  снимаемого с преобразователя магнитного поля от расстояния  $x$  до оси проекции индуктора на МН. Далее воздействуем серией из трех импульсов магнитного поля

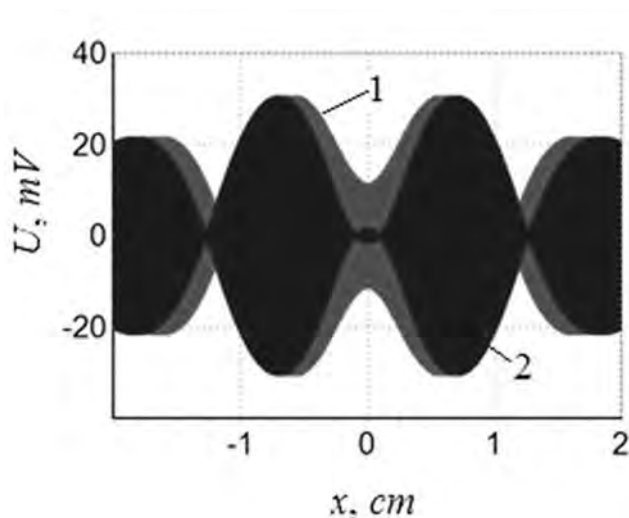


Рис. 2. Оптические изображения магнитных полей, соответствующие распределениям 1 и 2 на рис. 1

информацию о толщине изделий, электрических свойствах материала и параметрах дефектов сплошности в них. Оптические изображения построены путем формирования зеркальных функций полученных распределений  $U(x)$ , смещения зависимости  $U(x)$  по линии ординат, поиска и установления масштабов изображений, а также путем введения соответствия заданным уровням оттенка цветности изображения построенным замкнутым геометрическим фигурам. Так, смещение зависимостей 1 и 2 на рис. 2 равно нулю и нумерация зависимостей 1 и 2 совпадает. Величины коэффициентов  $A$  для расчета полей в (1) для данного рисунка не указаны. Значения коэффициентов  $A$  для расчета полей при воздействии на МН с

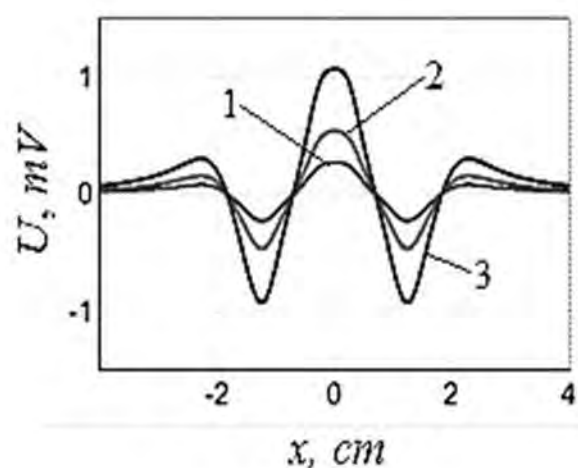


Рис. 3. Расчетные разностные зависимости  $U(x)$

с такими же параметрами на МН с пластиной из свинца толщиной  $d_0 = 0,45$  мм, под которой вплотную находится пластина из алюминия толщиной  $d_0 = 0,05$  мм. В результате получаем зависимость 2 на рис. 1. Для более точного анализа полученных результатов построим оптические изображения  $U(x)$  (рис. 2), соответствующие распределениям остаточной намагниченности МН. Оптические изображения  $U(x)$  (распределений остаточной намагниченности, распределений остаточных магнитных полей) позволяют оперативно обрабатывать

образцами тремя импульсами магнитного поля указаны при построении графиков на рис. 3 и 4. В программу численных расчетов зависимостей 1, 2 и 3 (рис. 3) внесены следующие значения коэффициентов  $A$  в (1). Зависимость 1 – первый импульс  $A_{11} = 720$  А·см; второй импульс  $A_{12} = -202$  А·см; третий импульс  $A_{13} = 37$  А·см. Зависимость 2 –  $A_{21} = 722,7$  А·см;  $A_{22} = -202,7575$  А·см;  $A_{23} = 37,13875$  А·см. Зависимость 3 –  $A_{31} = 725,4$  А·см;  $A_{32} = -203,515$  А·см;  $A_{33} = 37,2775$  А·см. Зависимость 4 –  $A_{41} = 730,8$ ;  $A_{42} = -205,03$ ;  $A_{43} = 37,555$ .

Разработанный метод позволяет определять толщину алюминиевой пластины, находящейся под пластиной из свинца.

На рис. 3 показаны разностные зависимости 1, 2 и 3 величины  $U(x)$  для разных толщин алюминиевых пластин, которые находятся под пластинами из свинца. Зависимость 1 соответствует разности распределения для образца толщиной 0,05 мм и распределения для образца толщиной 0,051 мм; зависимость 2 – для образцов толщиной 0,05 и 0,0525 мм; зависимость 3 – для образцов толщиной 0,05 и 0,055 мм. При этом находили зависимости величины максимальной напряженности магнитного поля для пластин указанных толщин исходя из полученных ранее экспериментальных результатов [10]. Так, при времени нарастания импульса порядка  $1,8 \cdot 10^{-5}$  с увеличению толщины пластины на 10, 5 и 2,5 % соответствует увеличение напряженности суммарного магнитного поля вблизи поверхности алюминиевой пластины в 1,015, 1,0075, 1,00375 раза. Информация о толщине пластины может быть получена не только с помощью разностных зависимостей, но и путем анализа прямых и обратных зависимостей  $U(x)$  без их вычитания друг из друга. Так, на рис. 4 показаны оптические изображения, построенные с использованием прямых зависимостей  $U(x)$ .

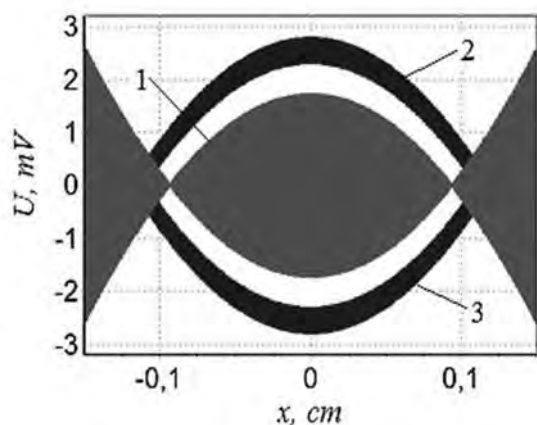


Рис. 4. Оптические изображения магнитных полей, соответствующие распределениям

Увеличению толщины алюминиевой пластины на 5 % соответствует увеличение электрического напряжения, снимаемого с преобразователя магнитного поля, с 3,2 до 4,4 мВ, то есть в 1,375 раза. Увеличению толщины алюминиевой пластины на 10 % – увеличение электрического напряжения в 1,75 раза. Путем проведения операций вычисления по точкам зависимости относительное увеличение может быть достигнуто в 5 и более раз. Погрешности при экспериментальных измерениях определяются величинами приборных погрешностей.

В расчетах зависимостей, представленных на рис. 4, приняты следующие коэффициенты  $A$ : 1 –  $A_{11} = 720$  А·см,  $A_{12} = -202$  А·см,  $A_{13} = 37$  А·см; 2 –  $A_{31} = 725,4$  А·см,  $A_{32} = -203,515$  А·см,  $A_{33} = 37,2775$  А·см; 3 –  $A_{41} = 730,8$  А·см,  $A_{42} = -205,03$  А·см,  $A_{43} = 37,555$  А·см. Из рис. 4 найдем амплитуды сигналов. Зависимость 1 – 3,2 мВ; зависимость 2 – 4,4 мВ; зависимость 3 – 5,6 мВ. Значит, увеличению толщины алюминиевой пластины на 5 % соответствует увеличение электрического напряжения, снимаемого с преобразователя магнитного поля, с 3,2 до 4,4 мВ, то есть в 1,375 раза. Увеличению толщины алюминиевой пластины на 10 % – увеличение электрического напряжения в 1,75 раза. Путем проведения операций вычисления по точкам зависимости относительное увеличение может быть достигнуто в 5 и более раз. Погрешности при экспериментальных измерениях определяются величинами приборных погрешностей.

## **Выводы**

На основании результатов измерений, полученных с помощью разработанных методов гистерезисной интерференции, получены расчетные зависимости  $U(x)$  электрического напряжения, снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего магнитный носитель, от расстояния до оси проекции линейного индуктора на магнитный носитель. На магнитный носитель с арктангенсной характеристикой воздействовали сериями разнополярных импульсов магнитного поля линейного индуктора из трех импульсов. Проведен расчет распределения электрического напряжения  $U(x)$  после воздействия на МН с пластиной из свинца толщиной  $d_0 = 0,45$  мм, под которой находились попеременно пластины из алюминия толщиной 0,05, 0,051, 0,0525 и 0,055 мм, импульсом магнитного поля линейного индуктора. Время нарастания импульса  $1,8 \cdot 10^{-5}$  с. Найденные зависимости  $U(x)$  позволяют повысить точность контроля толщины металлических объектов за близлежащими металлическими экранами и в слоях металлов, а также дефектов сплошности в них.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Магнитный метод контроля толщины слабомагнитных двухсторонних покрытий по немагнитному основанию / А. А. Лухвич [и др.] // Дефектоскопия. – 2009. – № 7. – С. 75–82.
2. **Лухвич, А. А.** Контроль толстослойных никелевых покрытий на двухслойных (неферромагнетик–ферромагнетик) основаниях магнитодинамическим методом толщинометрии / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов // Дефектоскопия. – 2014. – № 4. – С. 3–12.
3. **Грузинцев, А. А.** Самосогласованный расчет магнитного поля для задач магнитной дефектоскопии. I. Исходная модель для расчета поля магнитной ленты, намагниченной от проводника с током / А. А. Грузинцев, С. П. Михайлов // Дефектоскопия. – 2011. – № 2. – С. 22–30.
4. **Козлов, В. С.** Техника магнитографической дефектоскопии / В. С. Козлов. – Минск: Вышэйшая школа, 1976. – 256 с.
5. **Павагин, В. А.** Идентификация кольцевых сварных швов на магнитограммах дефектоскопов поперечного намагничивания / В. А. Павагин, А. Ф. Матвиенко // Дефектоскопия. – 2009. – № 8. – С. 13–18.
6. **Новиков, В. А.** Визуализация полей дефектов ферромагнитных объектов с помощью пленки Flux-detector / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 5. – С. 18–22.
7. **Суханов, Д. Я.** Магнитоиндукционный интроскоп для дефектоскопии металлических объектов / Д. Я. Суханов, Е. С. Совпель // Дефектоскопия. – 2015. – № 5. – С. 56–62.

8. **Астахов, В. И.** К вопросу о диагностике пластины с трещиной вихретоковым методом / В. И. Астахов, Э. М. Данилина, Ю. К. Ершов. – Дефектоскопия. – 2018. – № 3. – С. 39–49.

9. **Ферстер, Ф.** Неразрушающий контроль методом магнитных полей рассеяния. Теоретические и экспериментальные основы выявления поверхностных дефектов конечной и бесконечной глубины / Ф. Ферстер. – Дефектоскопия. – 1984. – № 12 – С. 13–18.

10. **Павлюченко, В. В.** Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2010. – № 11. – С. 29–40.

11. **Pavlyuchenko, V. V.** Using magnetic hysteresis for testing electroconductive objects in pulsed magnetic fields / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich. – Russ. J. Nondetr. Test. – 2013. – Vol. 49, № 6. – P. 334–346.

12. **Pavlyuchenko, V. V.** Calculating Distributions of Pulsed Magnetic Fields under Hysteretic Interference / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich, V. L. Pivovarov. – Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – Vol. 54, № 2. – P. 121–127.

13. **Павлюченко, В. В.** Обнаружение протяженных дефектов сложной формы в токопроводящих пластинах с помощью магнитного носителя / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2019. – № 3. – С. 31–38.

14. **Павлюченко, В. В.** Гистерезисная интерференция перекрывающихся во времени импульсов магнитного поля / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2019. – № 12. – С. 56–63.

15. **Павлюченко, В. В.** Гистерезисная интерференция магнитного поля перемещаемого линейного индуктора / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Дефектоскопия. – 2020. – № 1. – С. 51–60.