

## ФОРМИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ГИСТЕРЕЗИСНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОВ В ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

© 2020 г. В.В. Павлюченко<sup>1</sup>, Е.С. Дорошевич<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Белорусский Национальный Технический Университет, Республика Беларусь

220013 Минск, пр-т Независимости, 65

\*E-mail: es\_doroshevich@mail.ru

Поступила в редакцию 29.04.2020; после доработки 28.08.2020

Принята к публикации 31.08.2020

На основании разработанных методов гистерезисной интерференции получены расчетные зависимости  $U(x)$  электрического напряжения, снимаемого с преобразователя магнитного поля от координаты  $x$ . На магнитный носитель с арктангенсной характеристикой воздействовали сериями разнополярных импульсов магнитного поля линейного индуктора из одного, двух, трех, четырех, пяти и пятнадцати импульсов. Представлен алгоритм последовательности изменений величины суммарной напряженности импульсов магнитного поля на поверхности алюминиевой пластины, обеспечивающий одинаковую амплитуду гистерезисных колебаний электрического напряжения и позволяющий получить линейную разностную зависимость  $U(x)$  для клинообразного и плоского алюминиевых образцов. Полученные результаты позволяют повысить точность и оперативность контроля толщины объекта и его разнотолщинности в заданных направлениях, а также дефектов объекта.

*Ключевые слова:* гистерезисная интерференция, линейное изменение толщины образца, импульсное магнитное поле, арктангенсная характеристика магнитного носителя.

DOI: 10.31857/S0130308220110044

### ВВЕДЕНИЕ

Для контроля электрических свойств объектов из электропроводящих материалов, а также их геометрических параметров и дефектов сплошности в них используют магнитные, электромагнитные и другие методы контроля. Отметим следующие публикации. Наиболее часто используемым является вихретоковый метод [1—5]. Здесь представлен контроль трещин и других дефектов, а также толщин объектов вихретоковым методом. Магнитоиндукционные методы и устройства контроля описаны в [6, 7]. Определение толщины покрытий на деталях сложной геометрии и контроль никелевых покрытий на двухслойных (неферромагнетик — ферромагнетик) основаниях могут быть осуществлены магнитодинамическим методом [8—10]. Для определения параметров дефектов сплошности ферромагнитных объектов используется магнитографический метод [11, 12], который может быть применен для определения толщины металлических объектов.

Теоретические и экспериментальные результаты исследований свойств электропроводящих объектов с использованием гистерезисных свойств преобразователей магнитного поля, проведенные авторами, изложены в [13—16]. Контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях с учетом гистерезисных свойств магнитного носителя описан в [13]. Расчет распределений остаточных магнитных полей при гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля осуществлен в [14]. В [15, 16] представлены гистерезисные интерференции перекрывающихся во времени импульсов магнитного поля и магнитного поля перемещаемого линейного индуктора. Все перечисленные методы и устройства обладают недостатками, вследствие чего возникает необходимость их совершенствования с целью повышения точности и оперативности контроля, которые могут быть достигнуты с помощью проведения теоретических расчетов с применением методов гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Целью работы является повышение точности и оперативности контроля толщины объектов и дефектов в них. Поставленная цель достигается путем создания алгоритмов последовательности параметров импульсных магнитных полей, обеспечивающих прямо пропорциональное соответствие величины электрического напряжения  $U(x)$ , снимаемого с преобразователя магнитного поля, толщине объекта. Преобразователь считывал информацию с магнитного носителя

(МН) по координате  $x$ . На объект с МН воздействовали сериями разнополярных импульсов магнитного поля линейного индуктора из одного, двух, трех, четырех, пяти и пятнадцати импульсов. При этом проводили анализ зависимостей  $U(x)$  на участках в точке  $x = 0$  на проекции оси индуктора, а также на других участках линии замера объекта вплоть до точек  $x = \pm 6h$ , где  $h$  — высота индуктора над объектом. Теоретические расчеты осуществляли с использованием формул, полученных авторами ранее в [16]. Для записи магнитных полей применен магнитный носитель с арктангенсной характеристикой ветвей гистерезиса [16, рис.1].

В работе рассмотрена теоретическая модель следующего эксперимента. На объект с прижатым к нему магнитным носителем воздействовали импульсами магнитного поля с заданными амплитудами и временами нарастания. После этого рассчитывали величину электрического напряжения  $U$  на выходе магнитной головки, сканирующей МН с выводом электрического сигнала на цифровой осциллограф и далее — на монитор.

Импульсное магнитное поле создавали с помощью линейного индуктора. Тангенциальную составляющую напряженности магнитного поля индуктора рассчитывали по формуле [16]:

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

где  $A$  — постоянная в  $A \cdot \text{см}$ ,  $x$  — расстояние в сантиметрах до проекции оси индуктора в плоскости измерения,  $b$  — расстояние в сантиметрах от оси индуктора до магнитного носителя.

Зависимость величины электрического напряжения, снимаемого с датчика магнитного поля с максимальной чувствительностью  $\gamma_{\max 2} = 0,26 \text{ мВ} \cdot \text{см}/\text{А}$ , при воздействии на МН одним импульсом магнитного поля в прямом направлении определяли по формуле [16]:

$$U_1 = 23,5 + 24,3 \arctg(0,011H_1 - 1,45), \quad (2)$$

а зависимость величины электрического напряжения при воздействии на МН одним импульсом магнитного поля  $H_1$  в прямом направлении и вторым обратным импульсом  $H_2$  находили как [16]:

$$U_2 = -23,5 + 0,61U_1 + (24,5 + 0,40U_1)\arctg((0,011 + 0,000087U_1)H_2 + 1,45 - 0,0016U_1). \quad (3)$$

Величину  $U$  в результате воздействия третьим и последующими импульсами рассчитывали по формуле (3) с учетом знаков  $U$  и  $H$ .

В случае использования метода нулевого центрального максимума получали максимальную чувствительность только в точке, лежащей на проекции оси индуктора. В остальных точках чувствительность не была определена.

Найдем чувствительность метода в различных точках распределения  $U(x)$ .

Построим гистерезисные ветви остаточных магнитных полей МН, созданные серией из пяти последовательных импульсов магнитного поля при  $x = 0$  и  $b = 0,6 \text{ см}$  в (1) следующим образом. Зададим амплитуды пяти одиночных импульсов с чередующейся полярностью и коэффициентами  $A$  в (1) соответственно равными  $200 A \cdot \text{см}$ ,  $-100 A \cdot \text{см}$ ,  $90 A \cdot \text{см}$ ,  $-50 A \cdot \text{см}$  и  $39,5 A \cdot \text{см}$ . Тогда получаем ветви гистерезиса, показанные на рис. 1.

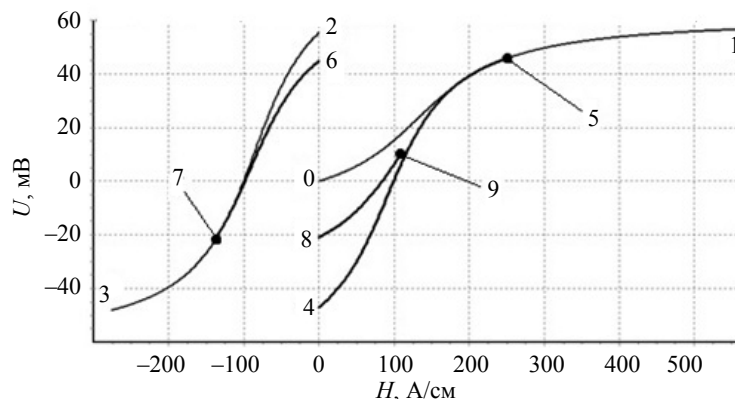


Рис. 1. Ветви гистерезиса с начальными и конечными точками 0—9.

Этим значениям коэффициента  $A$  соответствуют напряженности магнитного поля 555,56 А/см, -277,78 А/см, 250,00 А/см, -138,89 А/см и 109,72 А/см.

Начальные и конечные точки обозначены следующим образом: первая ветвь — 0,1; вторая — 2, 3; третья — 4, 5; четвертая — 6, 7 и пятая — 8, 9. Численные значения  $U$  составили: 56,807 мВ (точки 1, 2); -48,154 мВ (3, 4); 45,747 мВ (5, 6); -21,836 мВ (7, 8) и конечной точки пятой ветви 10,231 мВ.

Далее в работе представлены теоретические расчеты воздействия на МН с образцами сериями импульсов магнитного поля.

Рассчитаем зависимости электрического напряжения  $U(x)$ , снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего магнитный носитель (МН), от расстояния  $x$  до оси проекции магнитного индуктора на МН.

Пусть время нарастания импульса составляет  $t_{\max} = 1,8 \cdot 10^{-5}$  с, а толщина образца из алюминия порядка  $d_0 = 0,1$  мм.

В результате воздействия на МН с образцом серией из пяти импульсов получаем распределение  $U(x)$  с пятью максимумами 1—5, показанное на рис. 2, при постоянных в (1):  $A_{11} = 200$  А · см,  $A_{12} = -100$  А · см,  $A_{13} = 90$  А · см,  $A_{14} = -50$  А · см,  $A_{15} = 39,5$  А · см. Величины коэффициентов  $A$  для толщины алюминиевой пластины  $d_0 = 0,1$  мм найдены в [13], исходя из зависимости величины максимальной напряженности вторичного магнитного поля при указанном времени нарастания импульса. На рис. 2 также показано распределение  $U(x)$  с максимумами 6—10, которому соответствуют величины  $A_{11} = 200$  А · см,  $A_{12} = -100$  А · см,  $A_{13} = 92$  А · см,  $A_{14} = -50$  А · см,  $A_{15} = 34,5$  А · см в (1). Количество максимумов распределения сигнала по координате может не соответствовать количеству воздействующих на МН импульсов. Так, на рис. 2 показано появление максимума 8 при изменении коэффициентов третьего и пятого импульсов. При дальнейшем уменьшении величины коэффициента  $A$  пятого импульса максимум 8 исчезает.

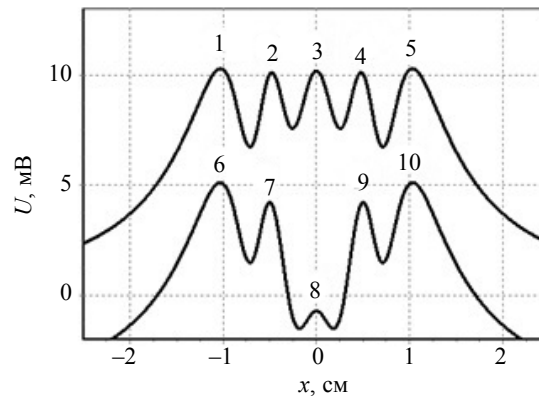


Рис. 2. Расчетные зависимости  $U(x)$  в результате воздействия пятью импульсами на алюминиевую пластину толщиной 0,1 мм с максимумами 1—5 и 6—10.

Найдем распределение  $U(x)$  для алюминиевой пластины в виде клина с линейно изменяющейся вдоль координаты  $x$  толщиной  $d = d_0(1 + 0,2x)$  при воздействии на нее пятью указанными импульсами ( $A_{11} = 200$  А · см,  $A_{12} = -100$  А · см,  $A_{13} = 90$  А · см,  $A_{14} = -50$  А · см,  $A_{15} = 39,5$  А · см) с тем же временем нарастания. Толщина образца на проекции оси индуктора ( $x = 0$ ) равна  $d_0 = 0,1$  мм.

Согласно [13] для указанного образца в виде клина получаем следующую зависимость величины тангенциальной составляющей напряженности суммарного магнитного поля вблизи поверхности пластины:

$$H = H_0(1 + 0,04x). \quad (4)$$

Воздействуем на образец в виде клина пятью импульсами магнитного поля и найдем распределение  $U(x)$  для него, вычтем это распределение из распределения на рис. 2 (зависимость с максимумами 1—5) и получим разностное распределение 1, показанное на рис. 3. На рис. 3 показано также разностное распределение  $U(x)$  для образца толщиной  $d = d_0(1 + 0,1x)$  и для образца толщиной  $d = d_0$ . Этому образцу соответствует распределение напряженности магнитного поля

$$H = H_0(1 + 0,02x). \quad (5)$$

На рис. 3 показаны также зависимости 3 и 4 соответственно для зависимостей 1 и 2, полученные по точкам максимумов сигнала для этих кривых и проходящие через точку  $x = 0, U = 0$ , которая соответствует толщине объекта  $d_0$ . Таким образом, получены линейные зависимости величины максимумов сигнала от толщины объекта.

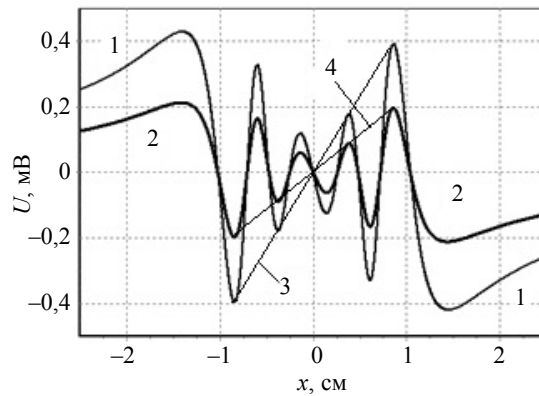


Рис. 3. Расчетные зависимости  $U(x)$  при воздействии пятью импульсами на МН с образцом: 1 — разностная зависимость для образца толщиной  $d = d_0(1+0,2x)$  и образца толщиной  $d = d_0$ ; 2 — разностная зависимость для образца толщиной  $d = d_0(1+0,1x)$  и образца толщиной  $d = d_0$ ; 3 — зависимость максимумов сигнала для зависимости 1; 4 — зависимость максимумов сигнала для зависимости 2.

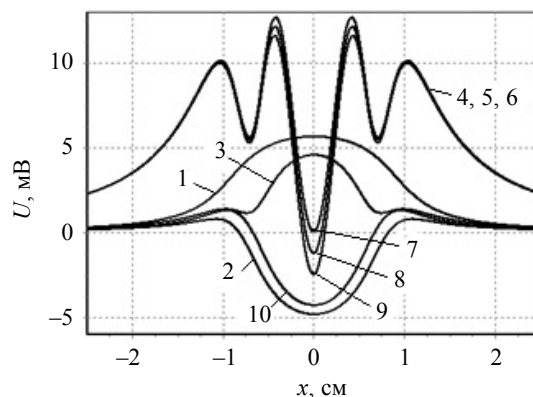


Рис. 4. Расчетные зависимости  $U(x)$  1—6, 10 с центральными максимумами сигналов 7, 8, 9. Зависимости 1—3 и 10 изображены в масштабе  $0,1U$ .

Применим метод нулевого максимума (участок МН при  $x = 0$ , то есть на проекции оси индуктора) в случае воздействия на МН с объектом четырьмя импульсами магнитного поля (участок МН при  $x = 0$  намагничен четыре раза).

На рис. 4 показаны зависимости 1  $U(x)$  после воздействия последовательно первым импульсом ( $A_{11} = 200 \text{ A} \cdot \text{см}$ ), 2 — вторым импульсом ( $A_{12} = -100 \text{ A} \cdot \text{см}$ ), 3 — третьим импульсом ( $A_{13} = 90 \text{ A} \cdot \text{см}$ ) и 4 — четвертым импульсом ( $A_{14} = -35,55 \text{ A} \cdot \text{см}$ ) с максимумом 7. Здесь показаны также зависимости 5 и 6, полученные с изменением коэффициента только четвертого импульса соответственно для  $A_{24} = -36,261 \text{ A} \cdot \text{см}$  и  $A_{34} = -36,972 \text{ A} \cdot \text{см}$  с максимумами 8 и 9. Центральные или нулевые максимумы 7—9 (с учетом знака — это минимумы указанных зависимостей) имеют четвертый порядок, то есть участки МН намагничивались на проекции оси индуктора четыре раза. Величины максимумов 7, 8 и 9 соответствуют толщине алюминиевой пластины 0,1 мм, 0,11 мм и 0,12 мм [10]. Как видно из рис. 4, чувствительность метода составляет порядка 1000 мВ/см, так как изменению величины сигнала на 1 мВ соответствует изменение толщины образца на 0,01 мм. Из рис. 3 следует, что чувствительность в случае измерения на остальной части линии замера составляет порядка 500 мВ/см: величина второго максимума зависимости 1, находящегося на удалении

0,8 см от проекции оси индуктора, равна 4 мВ. В этой точке толщина образца равна 0,116 мм. Таким образом, чувствительность метода в два раза меньше, чем чувствительность метода нулевого максимума. Однако при измерениях отпала необходимость передвижения индуктора над поверхностью объекта с МН и многочисленных измерений в точках  $x$  по линии замера. Оперативность контроля возросла в десятки раз. Покажем, как можно увеличить размеры участка контроля по линии замера с увеличением числа воздействующих на объект с МН импульсов магнитного поля без передвижения индуктора.

Рассчитаем зависимости электрического напряжения  $U(x)$  при воздействии на МН с образцом толщиной  $d_0 = 0,1$  мм серией из пятнадцати импульсов магнитного поля с таким же временем нарастания. Пусть величина коэффициентов  $A$  импульсов в (1) соответствует величине суммарного магнитного поля на поверхности образца, то есть поля индуктора и поля индукционных токов, и меняется в последовательности: 3200, -2400, 1600, -1200, 800, -600, 400, -300, 200, -151, 100, 3, -77,2, 52,7, -40,85 и 20,05 А·см. В результате получаем распределение 1  $U(x)$ , показанное на рис. 5, с амплитудами напряжения двенадцати максимумов порядка 1,8 мВ. После этого воздействуем такой же серией импульсов на образец в виде клина толщиной  $d = d_0(1+0,1x)$ . Рассчитаем распределение  $U(x)$  для клинообразного образца, вычтем это распределение из распределения 1 (см. рис. 5) и получим разностное распределение сигнала 2  $U(x)$  с двенадцатью максимумами, изображенное в масштабе  $3U(x)$  с максимальной амплитудой пятого максимума порядка 0,7 мВ ( $2,3 \text{ мВ} \cdot 0,3 = 0,69 \text{ мВ}$ ). Из рис. 5 (зависимость 2 и 3) видно, что амплитуда импульсов изменяется линейно с увеличением  $x$ , как и при воздействии на клинообразный образец пятью импульсами магнитного поля (см. зависимости 3 и 4, рис. 3).

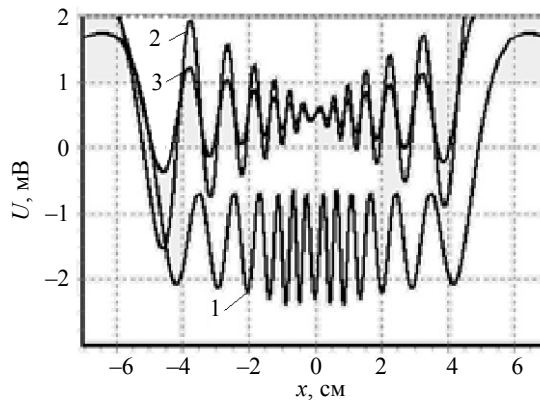


Рис. 5. Расчетные зависимости  $U(x)$  при воздействии 15 импульсами:

1 — для образца толщиной  $d_0 = 0,1$  мм; 2 — разностная зависимость для образца толщиной  $d = d_0(1+0,1x)$  и образца толщиной  $d = d_0$ ; 3 — разностная зависимость для образца толщиной  $d = d_0(1+0,05x)$  и образца толщиной  $d = d_0$ .

Построим оптическое изображение распределения магнитных полей соответствующее разностному распределению  $U(x)$  для образца клинообразной формы толщиной  $d = d_0(1+0,05x)$  и образца толщиной  $d_0 = 0,01$  мм, изображенное на рис. 5 (зависимость 3). При этом учтем, что толщина образца  $d$  увеличивается с увеличением  $x$ . Тогда получаем оптическое изображение сигнала, показанное на рис. 6.

При построении оптического изображения на рис. 6 проведены операции инвертирования и смещения относительно оси  $U = 0$ . Это сделано следующим образом. Сначала путем смещения на -0,5 мВ установлен нулевой уровень сигнала при  $x = 0$ . После этого части графика функций  $U \geq 0$  при  $x \leq 0$  и  $U \leq 0$  при  $x \geq 0$  заменены графиками зеркальных функций, в результате чего максимумы и слева и справа от точки  $x = 0$  стали однополярными и их количество увеличилось в 2 раза, то есть разрешающая способность измерений по координате  $x$  увеличена вдвое. При этом максимальные значения однополярных импульсов увеличены в 2 раза с тем, чтобы они соответствовали амплитуде импульсов.

Проведены также последующие смещения нулевого уровня сигнала, обеспечивающие пересечение точки  $U = 0$ ,  $x = 0$  линейными отрезками прямых, построенных на максимумах сигнала, при отрицательных и положительных значениях аргумента  $x$ .

Полученные с использованием разработанного метода контроля оптические изображения на рис. 6 позволяют оперативно и с высокой точностью определять толщину металлических объ-

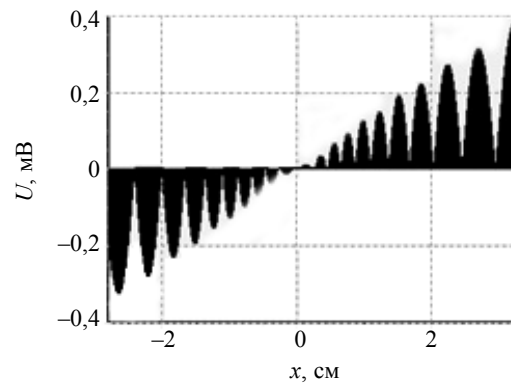


Рис. 6. Оптические изображения распределения  $U(x)$  разностного сигнала для образца клинообразной формы толщиной  $d = d_0(1+0,05x)$  и образца толщиной  $d = d_0$ .

ектов. Так, воздействие пятнадцатью указанными импульсами может быть осуществлено за время, меньшее  $1 \cdot 10^{-3}$  с, а при считывании информации могут быть применены преобразователи магнитного поля, работающие в реальном масштабе времени (магнитооптическая пленка, пленочные флюкс-детекторы и так далее).

Последовательность значений  $A$  импульсов (см. рис. 5, зависимость 1) выбрана таким образом для того, чтобы получить линейную зависимость величины разностного сигнала от толщины образца. Зависимости 1—3 на рис. 5 описывают гистерезисные колебания  $U(x)$ , характеризуемые амплитудой, частотой и фазой. Величины пиков разностного распределения зависят от разности величин соответствующих пиков уменьшаемого и вычитающего распределений. Однако при изменении толщины пластины в направлении  $x$  происходит смещение максимумов, то есть изменяется период колебаний  $U(x)$ .

Как показали расчеты, для того, чтобы получить линейную (близкую к линейной) разностную зависимость  $U(x)$  следует установить одинаковые амплитуды всех колебаний не разностных зависимостей. В этом случае на результат влияет преимущественно второй фактор, то есть изменение периода колебаний. Так, на рис. 5 зависимость 1 для образца толщиной  $d_0$  содержит двенадцать максимумов с амплитудами примерно 1,8 мВ. Зависимость  $U(x)$  для образца толщиной  $d = d_0(1+0,05x)$  имеет близкие к зависимости 1 величины максимумов, но эти максимумы сдвинуты по оси  $x$ . Чем дальше от точки  $x = 0$ , тем больше этот сдвиг, в результате чего получаем разностное распределение 3 с явно выраженной линейной зависимостью величины пиков от толщины образца, не смотря на то, что амплитуды сигналов распределения 1 (см. рис. 5) все же отличаются друг от друга на несколько процентов.

Таким образом, определен алгоритм последовательности изменений величины суммарной напряженности импульсов магнитного поля на поверхности алюминиевой пластины толщиной  $d_0$ , обеспечивающий одинаковую амплитуду двенадцати гистерезисных колебаний электрического напряжения  $U_3(x)$  в заданном интервале значений аргумента  $-4 \text{ см} \leq x \leq 4 \text{ см}$  (см. рис. 5). Из рис. 5 и 6 видно, что этот алгоритм позволяет получить линейную (близкую к линейной) разностную зависимость  $U_5(x) = U_4(x) - U_3(x)$ , где  $U_4(x)$  — зависимость для клинообразного алюминиевого образца, толщина которого при  $x = 0$  равна  $d_0$ . Оптические изображения распределения  $U(x)$  разностного сигнала (см. рис. 6) дают возможность определять толщину объектов не только по максимумам сигналов, но и по всем точкам огибающих их линий путем сравнения растровых изображений с аналогичными изображениями для объектов с известными свойствами. Параметры этой разностной зависимости определяются изменением амплитуды и периода гистерезисных колебаний  $U(x)$  с увеличением расстояния  $x$  до точки отсчета  $x = 0$ , что обусловлено зависимостью напряженности вторичного магнитного поля от толщины клина.

Полученные линейные разностные зависимости  $U(x)$  позволяют повысить точность и оперативность измерений, так как обеспечивают прямо пропорциональное соответствие величины электрического напряжения  $U(x)$ , снимаемого с преобразователя магнитного поля, толщине объекта. При этом улучшается наглядность анализа изображений  $U(x)$  при их сравнении с изображениями объектов и возрастает точность проведения расчетов за счет использования точных (прямо пропорциональных) математических преобразований. Разработанный метод может быть использован для контроля поверхностных и внутренних дефектов сплошности объектов. Найденный алгоритм

последовательностей напряженности магнитных полей (величин  $A$ ) позволяет устанавливать соответствие разностного распределения электрического напряжения  $U(x)$  распределению толщины контролируемого объекта по координате  $x$  не только при линейных изменениях толщины объекта.

Предложенный метод контроля с использованием гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля не подвержен влиянию электрических наводок при записи сигнала, как это происходит случае вихретокового, магнитодинамического, магнитоиндукционного и других методов. Этот метод обладает высокой чувствительностью и разрешающей способностью. В отличие от перечисленных выше методов он не требует сканирования поверхности объекта точечным преобразователем при контроле и запись вторичных магнитных полей объектов из диамагнитных и парамагнитных металлов может быть осуществлена одновременно на площади в несколько квадратных сантиметров и более воздействием одного импульса сложной формы со временем действия порядка одной миллисекунды. Более того, при визуализации магнитного поля магнитного носителя с помощью магнитооптической пленки или пленочного флюкс-детектора контроль может быть осуществлен в реальном масштабе времени, то есть в течение времени указанного импульса.

Метод позволяет вести контроль как в статическом состоянии объекта, так и при его движении. Он может быть осуществлен для контроля одновременно всего объекта или его отдельных частей, что очень важно при изучении каких-либо процессов, протекающих в объекте. Так, может происходить скоростное изменение параметров объекта, например, его толщины или удельной электропроводности различных участков или изменение геометрических размеров объекта при его деформации. При этом следует найти («сфотографировать») функции распределения напряженности магнитного поля в любые заданные моменты времени одновременно на всей контролируемой поверхности. Таким образом могут быть определены параметры других металлических объектов, появляющихся за контролируемым объектом в разные моменты времени. Может быть также осуществлена запись поверхностных или объемных распределений неизвестных магнитных полей, несущих какую-либо информацию извне путем наложения на них импульсных магнитных полей с заданными параметрами в заданные моменты времени с получением гистерезисной интерференции.

## ВЫВОДЫ

На основании разработанного метода гистерезисной интерференции получены расчетные зависимости  $U(x)$  электрического напряжения, снимаемого с преобразователя магнитного поля, сканирующего магнитный носитель от расстояния  $x$  до оси проекции линейного индуктора на магнитный носитель (МН). На МН с арктангенсной характеристикой воздействовали сериями разнополярных импульсов магнитного поля линейного индуктора из одного, двух, трех, четырех, пяти и пятнадцати импульсов. При этом проводили анализ зависимостей  $U(x)$  на проекции оси индуктора ( $x = 0$ ), а также на других участках линии замера объекта вплоть до точек  $x = -6h$  и  $x = 6h$ , где  $h$  — высота индуктора над объектом. Найдены распределения снимаемого сигнала по заданной координате при линейных изменениях толщины пластины по формулам:  $d = d_0(1 + 0,2x)$ ;  $d = d_0(1 + 0,1x)$ ;  $d = d_0(1 + 0,05x)$ . Толщина алюминиевой пластины порядка 0,1 мм, время нарастания импульса  $1,8 \cdot 10^{-5}$  с.

Представлен алгоритм последовательности изменений величины суммарной напряженности импульсов магнитного поля на поверхности алюминиевой пластины толщиной  $d_0$ , обеспечивающий одинаковую амплитуду гистерезисных колебаний электрического напряжения  $U_3(x)$  в заданном интервале значений аргумента.

Установлено, что этот алгоритм позволяет получить линейную (близкую к линейной) разностную зависимость  $U_5(x) = U_4(x) - U_3(x)$ , где  $U_4(x)$  — зависимость для клинообразного алюминиевого образца, толщина которого при  $x = 0$  равна  $d_0$ . Показано, что параметры этой разностной зависимости определяются изменением амплитуды и периода гистерезисных колебаний  $U(x)$  с увеличением расстояния  $x$  до точки отсчета  $x = 0$ , что обусловлено зависимостью напряженности вторичного магнитного поля от толщины клина. Установлено, что оптические изображения распределения  $U(x)$  разностного сигнала дают возможность определять толщину объектов не только по максимумам сигналов, но и по всем точкам огибающих их линий путем сравнения растровых изображений с аналогичными изображениями для объектов с известными свойствами.

Разработанный метод улучшает наглядность анализа изображений  $U(x)$  при их сравнении с изображениями объектов и повышает точность проведения расчетов за счет использования точных (прямо пропорциональных) математических преобразований. Найденный алгоритм последовательностей напряженности магнитных полей позволяет устанавливать соответствие разностного распре-

деления напряженности электрического напряжения  $U(x)$  распределению толщины контролируемого объекта по координате  $x$  не только при линейных изменениях толщины объекта. В отличие от других методов он не требует сканирования поверхности объекта точечным преобразователем при контроле и запись вторичных магнитных полей объектов из диамагнитных и парамагнитных металлов может быть осуществлена одновременно на площади в несколько квадратных сантиметров и более воздействием одного импульса сложной формы со временем действия порядка одной миллисекунды. Более того, при визуализации распределений магнитных полей, записанных на магнитном носителе, с помощью магнитооптической пленки или пленочного флюкс-детектора контроль может быть осуществлен в реальном масштабе времени, то есть в течение времени действия указанного импульса.

Метод позволяет вести контроль как в статическом состоянии объекта, так и при его движении. Он может быть использован для изучения каких-либо процессов, протекающих в объекте. Например, изменения со временем толщины или удельной электропроводности различных участков объекта или изменения геометрических размеров объекта при его деформации.

Указанный метод может быть использован для контроля поверхностных и внутренних дефектов сплошности объектов.

Полученные результаты позволяют повысить точность и оперативность определения толщины объекта и его разнотолщинности в заданных направлениях, а также дефектов сплошности объекта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахов В.И., Данилина Э.М., Еришов Ю.К. К вопросу о диагностике пластины с трещиной вихретоковым методом // Дефектоскопия. 2018. № 3. С. 39—49.
2. Шубочкин А.Е., Ефимов А.Г. Современные тенденции развития вихретоковой дефектоскопии и дефектометрии // Контроль. Диагностика. М. 2014. № 3. С. 68—73.
3. Ферстер Ф. Неразрушающий контроль методом магнитных полей рассеяния. Теоретические и экспериментальные основы выявления поверхностных дефектов конечной и бесконечной глубины // Дефектоскопия. 1984. № 12. С. 13—18.
4. Kiselev E.K., Gol'dshtein A.E. Eddy-Current System for Testing Inner Diameter of Pipes // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 3. P. 210—216. [Киселев Е.К., Гольдштейн А.Е. Вихретоковая система контроля внутреннего диаметра труб // Дефектоскопия. 2019. № 3. С. 25—30.]
5. Санников М.А. Влияние кривизны поверхности трубопровода при диагностике вихретоковыми приборами // Контроль. Диагностика. 2006. № 9. С. 24—27.
6. Суханов Д.Я., Совпель Е.С. Магнитоиндукционный интроскоп для дефектоскопии металлических объектов // Дефектоскопия. 2015. № 5. С. 56—62.
7. Суханов Д.Я., Совпель Е.С. Магнитоиндукционная томография электрических схем и приборов // Известия высших учебных заведений. 2015. Т. 58. № 10/3. С. 73—75.
8. Лухвич А.А., Лукьянов А.Л., Шукевич Я.И., Шукевич А.К., Полякова М.Н., Мосякин В.В. Толщинометрия покрытий на деталях сложной геометрии // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 13.
9. Лухвич А.А., Булатов О.В., Лукьянов А.Л. Контроль толстослойных никелевых покрытий на двухслойных (неферромагнетик—ферромагнетик) основаниях магнитодинамическим методом толщинометрии // Дефектоскопия. 2014. № 4. С. 3—12.
10. Лухвич А.А., Булатов О.В., Лукьянов А.Л., Полякова М.Н., Мосякин В.В. Контроль магнитодинамическим методом толщины никелевых покрытий подхромовыми на двухслойных (неферромагнетик—ферромагнетик) основаниях // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 3—10.
11. Козлов В.С. Техника магнитографической дефектоскопии. Мн.: Вышэйшая школа, 1976. 256 с.
12. Грузинцев А.А., Михайлов С.П. Самосогласованный расчет магнитного поля для задач магнитной дефектоскопии. I. Исходная модель для расчета поля магнитной ленты, намагниченной от проводника с током // Дефектоскопия. 2011. № 2. С. 22—30.
13. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях // Дефектоскопия. 2010. № 11. С. 29—40.
14. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Calculating Distributions of Pulsed Magnetic Fields under Hysteretic Interference // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 2. P. 121—127. [Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С., Пивоваров В.Л. Расчеты распределений импульсных магнитных полей при гистерезисной интерференции // Дефектоскопия. 2018. № 2. С. 41—47.]
15. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Hysteretic Interference of Time-Overlapping Magnetic Field Pulses // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 12. P. 949—956. [Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Гистерезисная интерференция перекрывающихся во времени импульсов магнитного поля // Дефектоскопия. 2019. № 12. С. 56—63.]
16. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Hysteretic Interference of Magnetic Field of a Moving Linear Inductor // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 1. P. 49—57. [Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Гистерезисная интерференция магнитного поля перемещаемого линейного индуктора // Дефектоскопия. 2020. № 1. С. 51—60.]