



Рисунок 5 – Зависимость  $U$ , снимаемого с МГ, от расстояния  $x$  до проекции оси излучателя

Последовательность проводимых расчетов: выбор экспериментальной (теоретической) зависимости  $U = U(H_\tau)$  для конкретного носителя, представление ее в виде нескольких функций в заданном приближении  $U_{il} = U_{il}(H_\tau)$ , определение параметров первого воздействующего импульса прямого направления: величины тока линейного индуктора, времени нарастания и спада импульса тока, формы импульса и расстояния от оси линейного индуктора до МН, расчет воздействия найденным импульсом поля на МН и получение зависимости  $U = U(t)$  при считывании по которому определяют параметры объекта.

УДК 620.130

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ КОНТРОЛЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ОБЪЕКТОВ

Павлюченко В.В., Сычик В.А., Дорошевич Е.С.

Белорусский национальный технический университет.

На основе исследования вторичных магнитных полей вблизи электропроводящих объектов установлена квазилинейная зависимость величины максимальной тангенциальной составляющей поля  $H_{\tau Sm}$  от толщины  $d$  объекта, переходящая в экспоненциальную зависимость, при воздействии на объект импульсами поля и экспоненциальная зависимость  $H_{\tau Sm}$  от времени нарастания импульсов  $t_{max}$  [1]. Разработаны новые методы определения свойств электропроводящих объектов с использованием полученных зависимостей, позволяющие записывать распределения магнитных полей с информацией об объектах на площадях поверхности  $1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$  и более в течение  $1 \cdot 10^{-4} \text{ с}$  и повышающие точность контроля электрических и магнитных свойств электропроводящих объектов на 40%. Установлено, что величина  $H_{\tau Sm}$  на линейном участке упомянутой зависимости прямо пропорциональна величине максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля первичного источника  $H_{\tau 0m}$ , прямо пропор-

преобразователем магнитного поля, применение функций  $U_i = U_i(H_\tau)$  к зависимости  $U_i = U_i(x)$ , определение обратных зависимостей  $U_j = U_j(H_\tau)$ , создают оптическое изображение магнитного поля, представление этих зависимостей в виде нескольких функций в заданном приближении  $U_{i2} = U_{i2}(H_\tau)$ , определение параметров второго и последующих импульсов и результатов их воздействия, выбор объекта контроля, повторение указанных действий в присутствии объекта и в его отсутствие и определение свойств объекта путем их сравнения.

Разработанные методы измерения и контроля с дискретизацией и гистерезисом авторы распространяют на все объекты, все носители информации и на все поля.

1. Павлюченко, В.В. Использование магнитного гистерезиса при контроле объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях / В.В. Павлюченко, Е.С.Дорошевич // Дефектоскопия. – 2013. – № 6. – С. 53-68.

2. Павлюченко, В.В. Расчет распределений остаточных магнитных полей при гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля / В.В. Павлюченко, Е.С. Дорошевич, В.Л. Пивоваров // Дефектоскопия. – 2015. – №1. – С. 11-20.

циональна величине удельной электропроводности материала  $\sigma$  и обратно пропорциональна  $t_{max}$ . Разработана новая физическая модель связи величины  $H_{\tau Sm}$  с  $d$ , основанная на расчете плотности токов вторичного источника в момент времени, равный четверти периода волны, и определении  $H_{\tau Sm}$  [1]. Так, использование найденной зависимости  $H_{\tau sm}(d)$  при магнитоимпульсном методе с применением магнитооптической пленки [2] позволяет значительно повысить точность определения параметров изделий. Для каждого времени нарастания воздействующего магнитного поля рассчитывают максимальную величину напряженности магнитного поля согласно найденным экспериментально линейной зависимости и зависимости вида единица минус экспонента этой величины от толщины объекта.

На материал с приложенной к нему магнитооптической пленкой воздействуют импульсами магнитного поля с разными временами нарастания  $t_{imax}$  и получают изображения доменной

структуры пленки, соответствующие проникновению магнитного поля на разные глубины. Однако  $H_{csm}$  на поверхности контролируемого объекта увеличивается с увеличением его толщины. Поэтому магнитооптическая пленка находится в разных исходных состояниях при воздействии на объект импульсами магнитного поля с одной и той же  $H_{\tau 0m}$  и разными временами его нарастания, что не позволяет производить точный контроль электрических и магнитных свойств материалов, а также определять параметры дефектов сплошности в них. Более того, при достаточно большой толщине объекта доменная структура пленки может прийти в состояние насыщения, что не позволит осуществлять контроль свойств материала. В моменты времени  $t = t_{imax}$  для каждого импульса величина максимальной тангенциальной составляющей напряженности поля на поверхности однородного материала  $H_{itm}$  должна быть одной и той же  $H_{itm} = const$ . Из найденной квазилинейной зависимости определяем величину напряженности первичного поля, обеспечивающую одну и ту же величину  $H_{itm} = const$  на поверхности материала:

$$H_{itom} = H_{itm} - k \cdot d,$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от  $\sigma$  и  $t_{i max}$ . На втором участке зависимость величины  $H_{itsm}$  от  $d$  носит экспоненциальный характер и описывается найденной эмпирической формулой:

$$H_{itsm} = k_{is} \cdot H_{itom} (1 - e^{-bd}),$$

где  $b$  – коэффициент, зависящий от  $\sigma$  и  $t_{i max}$ ,  $k_{is}$  – коэффициент, равный отношению величин максимальных тангенциальных составляющих магнитного поля индукционных токов  $H_{itsm}$  и воздействующего поля  $H_{itom}$  при толщине материала  $d$ , стремящейся к бесконечности. Используя найденную экспоненциальную зависимость находим напряженность первичного поля, обеспечивающего одинаковую  $H_{itm} = const$  на поверхности однородного материала при разных временах нарастания воздействующего поля  $t_{i max}$  на втором участке зависимости:

$$H_{it m} = H_{itm} \left[ 1 + k_{is} (1 - e^{-bd}) \right]^{-1}$$

Воздействуя на материал одиночными импульсами магнитного поля с разными  $t_{imax}$  и  $H_{itm}$ , определяемыми из указанных формул, находят соответствующие им изображения доменной структуры магнитооптической пленки в моменты времени  $t_{imax}$ , накладывают изображения друг на друга и находят распределение  $\sigma$  материала и ее неоднородности по глубине. Глубину залегания этих неоднородностей находят по времени  $t_{i max}$  импульса, соответствующего эффективной глубине проникновения магнитного поля в материал, при воздействии которым начинают проявляться неоднородности доменной структуры магнитооптической пленки.

Метод магнитоимпульсного контроля дефектности, электрических и магнитных свойств объекта из магнитного или немагнитного электропроводящего материала [3] осуществляют следующим образом. Воздействуют на объект импульсами магнитного поля с разными временами нарастания и определяют распределение максимальной тангенциальной составляющей напряженности по заданной линии замера для каждого импульса, по которым формируют строки и полосы растра телевизионного изображения, соответствующие разной глубине объекта. Далее изображение каждой полосы накладывают на изображения всех остальных полос, причем ширина каждой полосы растра соответствует эффективной глубине проникновения магнитного поля, определяемой временем нарастания импульса поля. На поверхности контролируемого объекта выбирают линию замера. Воздействуют на объект импульсами магнитного поля со временами нарастания  $t_{imax}$ , находят распределение максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_{itm}$  по линии замера и для каждого импульса на поверхности объекта формируют полосу растра. Ширину этой полосы  $L$  устанавливают прямо пропорциональной эффективной глубине проникновения магнитного поля в объект  $\Delta_i$  для каждого времени нарастания  $t_{imax}$ :

$$\Delta_i = \sqrt{\frac{4t_{imax}}{\pi \mu_0 \sigma}}. \quad (2)$$

При этом величине  $H_{itm}$  вводят в соответствие уровни сигнала, например, электрического, и производят запись каждой полосы растра на элементы памяти. После этого воспроизводят информацию, записанную на элементы памяти каждой полосы, на экране монитора по отдельности и получают оптическое изображение распределения  $H_{itm}$  для слоев объекта толщиной  $\Delta_i$  с цифровой индикацией величины  $H_{itm}$ . В случае немагнитных электропроводящих материалов  $H_{itm} = H_{itm}(\sigma, t_{i max})$ , а, для для магнитных  $H_{itm} = H_{itm}(\sigma, \mu, t_{i max})$  Таким образом, измерив  $H_{itm}$  на поверхности объекта по предварительно найденным функциям  $H_{itm} = H_{itm}(\sigma, t_{i max})$  и  $H_{itm} = H_{itm}(\sigma, \mu, t_{i max})$  соответственно для известных немагнитных и магнитных материалов, определяют  $\sigma$  и  $\mu$  материала объекта. Разделение информации о величинах  $\sigma$  и  $\mu$  в указанной зависимости  $H_{itm}$  от них ведут по ее параметрам с учетом дополнительной информации о величинах  $\sigma$  и  $\mu$  для материала конкретного объекта.

Далее формируют растр из всех полученных полос таким образом, что изображение каждой полосы накладывают на изображения всех остальных полос, причем линия каждой полосы, например, верхняя, соответствует поверхности объекта, а положение нижних линий полос опре-

деляется эффективной глубиной проникновения магнитного поля в объект, определяемой  $t_{i \max}$ . Для выделения информации полос устанавливают одинаковый средний уровень сигнала каждой полосы и вычитают информацию заданной полосы из всех последующих, получая данные о свойствах глубинных слоев объекта. При этом оставляют в растре полную ширину только первой, то есть верхней, полосы, соответствующей минимальной величине  $t_{i \max}$ , а у всех последующих полос оставляют в растре только нижние части, исключая наложение полос друг на друга. Располагая все полосы растра в одном масштабе, устанавливают соответствие между положением каждой строки и глубиной проникновения магнитного поля в материал объекта.

1. 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.

2. Способ магнитоимпульсного контроля дефектности, электрических и магнитных свойств объекта из магнитного или немагнитного электропроводящего материала: пат 10464 Респ. Беларусь, МПК С2 ВУ, G 01 N 27/00 / В.В. Павлюченко, Е.С.Дорошевич; заявитель БНТУ – № а20060201; заявл. 09. 03. 2006; опубл. 30.04.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 2. – С. 97-98.

3. Способ магнитного контроля дефектности, электрических, магнитных и механических свойств ферромагнитного материала: пат 11266 Респ. Беларусь, МПК С2 ВУ G 01 N 27/84, G 01 R 33/82 / В.В. Павлюченко, Е.С.Дорошевич; заявитель БНТУ – № а 20060340; заявл. 13. 04. 2006; опубл. 30.04.08// Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008, № 5. – С. 128-129.

УДК 51-73

## ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЭМС НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МАТРИЦАМИ ИЗ ПОРИСТЫХ И ВЕРТИКАЛЬНЫХ НАНОСТРУКТУР

Плескачевский Ю.М.<sup>1</sup>, Горох Г.Г.<sup>2</sup>, Казаченко В.П.<sup>3</sup>, Плиговка А. Н.<sup>2</sup>, Шилько С.В.<sup>4</sup>, Таратын И.А.<sup>5</sup>, Хатько В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

<sup>3</sup>Республиканская ассоциация наноиндустрии Беларуси

Минск, Республика Беларусь

<sup>4</sup>Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси

Гомель, Республика Беларусь

<sup>5</sup>ОАО Минский НИИ радиоматериалов

Минск, Республика Беларусь

Анализ мирового рынка выявляет возрастающую потребность в микроэлектромеханических преобразователях сенсорного и актуаторного типа (далее – преобразователей). Одним из путей повышения эксплуатационных характеристик указанных приборов является разработка новых функциональных, в особенности, интеллектуальных материалов, с использованием основы (подложки), структурированной на наномасштабном уровне [1]. Это открывает перспективы управления физико-механическими свойствами материалов путем создания упорядоченных микро- и наномасштабных поверхностных и объемных кластеров.

В основе настоящей работы лежит идея создания преобразователей в виде актуаторов и сенсоров путем синергетического использования упорядоченных наноструктурированных объектов (рис. 1) и функциональных материалов в

виде полимеров, полупроводников и пьезоэлектриков, способных к регистрации и трансформации физических воздействий.

Реализация этой идеи связана с поиском конкретных соединений и способов их введения в нанопоры (рис. 1а) или столбчатые наноструктуры (рис. 1б) для получения интеллектуальных композитов, обладающих термо-, опто-, тензо- и другими видами чувствительности.

Ранее проведенные исследования [2] показали зависимость модуля Юнга, коэффициента теплопроводности и других физико-механических характеристик нанопористого анодного оксида алюминия от его объемной пористости. Использование указанного наноструктурированного материала в качестве связующего звена между монолитной (например, кремниевой) подложкой и осаждаемым на ней функциональным материалом (полимером, полупроводником и т.д.) обес-