

сложнее. Существенный успех в решении экологических проблем может быть достигнут только при системных усилиях: развитие техники и технологий, природозащитные мероприятия и законодательство.

### Литература

1. Авиация и глобальная атмосфера. Специальный доклад рабочих групп I и III МГЭИК / МГЭИК; ред.: Дж. Э. Пеннер [и др.]. – Женева: 1999. – 14 с.

2. Мировой атлас данных / кноема [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://knoema.ru/atlas>. – Дата доступа: 12.05.2020.

УДК 620.130

### **Разработка методов контроля свойств объектов в импульсных магнитных полях**

Дорошевич Е. С., Павлюченко В. В.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Представлены разработки методов контроля свойств металлических объектов с помощью пленочных преобразователей магнитного поля: сплошного и дискретного магнитного носителя, магнитооптической пленки и пленочного флюкс-детектора. При этом использованы полученные авторами результаты исследований гистерезисной интерференции в импульсных магнитных полях и представлены примеры алгоритмов. Разработанные методы позволяют повысить точность и оперативность контроля удельной электропроводности, толщины объекта, а также дефектов в нем.*

Для контроля удельной электропроводности, магнитной проницаемости, наличия дефектов в объектах, а также определения их геометрических размеров используются магнитные и электромагнитные методы контроля. При этом информацию о свойствах объектов можно записывать на магнитный носитель [1], получать с применением магнитоиндукционной томографии [2] и другими способами. Проводимая авторами разработка методов контроля свойств объектов в импульсных магнитных полях включает в себя следующие действия. Проведение теоретических расчетов гистерезисной интерференции для получения оптимальных значений амплитуды, времени нарастания, полярности и числа импульсов магнитного поля в каждой серии, а также времени задержки импульсов. При этом указанные импульсы могут перекрываться во времени, прикладываться непосред-

венно в момент окончания действия предыдущего импульса или прикладываться с временной задержкой. Перекрытие разнополярных импульсов позволяет увеличивать число воздействующих импульсов, как это показано в [3], а также создавать разнообразные формы импульсов в заданной последовательности. Следующим этапом разработки является определение оптимального преобразователя магнитного поля для выполнения поставленной цели контроля. При этом наиболее целесообразно использовать пленочные преобразователи магнитного поля: магнитный носитель (МН), магнитооптическую пленку (МОП), пленочный флюкс-детектор (ПФД), или комбинированные преобразователи, выполненные в виде матриц локальных микро преобразователей, например, катушек индуктивности, феррозондов, преобразователя Холла (ПХ) и других датчиков. Использование пленочного флюкс-детектора описано нами в [4]. Компьютерные методы нахождения распределений импульсных магнитных полей вблизи объектов из электропроводящих материалов изложены в [5]. При разработке методов контроля целесообразно использовать явление гистерезисной интерференции магнитного поля [6], а также теоретические расчеты распределений остаточных магнитных полей [7]. При этом следует учесть работы по контролю методом магнитных полей рассеяния и контролю объектов с трещинами вихретоковым методом [8, 9].

Разработка методов состоит в определении цели разработки, задании погрешностей измерений и составлении программы следующих действий.

Выбор пленочных преобразователей магнитного поля (МН, МОП, ПФД, или матриц локальных микропреобразователей), определение параметров устройства считывания информации и регистрирующего (измерительного) прибора.

Нахождение параметров импульсов: амплитуда  $A_i$ , время нарастания  $t_{\max i}$ , форма импульса, количество импульса  $N_i$ , временная задержка импульсов  $\Delta t_i$ , определяющая перекрытие импульсов. Составление программы воздействия на объект с использованием характеристик магнитного носителя и преобразователя магнитного поля.

Составление программы записи и нахождения распределений  $H(x)$  и  $U(x)$  на экспериментальной установке. Составление программы обработки экспериментальных данных.

В развернутом виде алгоритм двух разработанных методов может быть представлен следующим образом.

Цель разработки первого метода: повышение оперативности и повышение качества визуализации контроля толщины, удельной электропроводности  $\sigma$ , магнитной проницаемости  $\mu$  металлических объектов и дефектов сплошности в них.

Выбран преобразователь магнитного поля в виде пленочного флюкс-детектора. Выбрано считывающее устройство – цифровой фотоаппарат с выходом на монитор. Определено намагничивающее устройство – электромагнит (постоянный магнит). Задана величина нормальной  $H_n$  и тангенциальной  $H_t$  составляющих напряженности магнитного поля источника.

Задана спектральная характеристика излучения источника света  $W(\nu)$ , где  $W$  – энергия излучения, а  $\nu$  – его частота. Определена мощность источника света  $N$ . Задана освещенность  $E$  объекта с ПФД. Задан угол  $\alpha$  падения луча света. Установлены параметры оптических систем фокусировки луча света с фокусными расстояниями линз  $F_i$ . Задана ориентация оптической оси фотоаппарата относительно поверхности объекта и флюкс-детектора (углы относительно нормали к поверхности объекта  $\beta_i$ ). Выбрана яркость изображения. Установлена контрастность изображения. Установлена резкость изображения. Определены уровни оттенков цветности участков изображения.

Определена величина  $\Delta$ , абсолютной погрешности измерения расстояния. Определена величина  $\epsilon$ , относительной погрешности измерения расстояния. Для записи и нахождения распределений  $H(x)$  и  $U(x)$ , где  $x$  – пространственная координата, на экспериментальной установке используется компьютерная программа цифрового осциллографа.

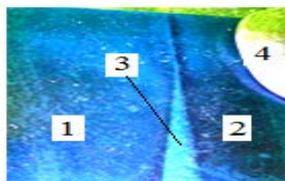


Рис. 1. Оптическое изображение флюкс-детектора с записями магнитных полей: 1, 2 – ферромагнитные образцы; 3 – часть пленочного флюкс-детектора; 4 – прижимной элемент

На рис. 1 показано оптическое изображение пленочного флюкс-детектора с записями магнитных полей. Два образца из оцинкованного железа толщиной 0,8 мм установлены в одной плоскости. Угол между краями образцов составляет порядка  $10^\circ$ . ПФД прижат сверху к плоскости образцов, которые находятся в поле постоянного магнита. На рисунке отчетливо видны границы образцов. Отметим, что аналогичные оптические изображения получены нами для указанных образцов с наложенными на них пластинами из алюминия толщиной 0,07 мм и

0,67 мм. Оперативность контроля определяется временем считывания одного кадра информации ПФД. Время записи может составлять менее 0,1 мс.

Цель разработки второго метода: повышение точности контроля толщины, удельной электропроводности  $\sigma$ , магнитной проницаемости  $\mu$  металлических объектов и дефектов сплошности в них.

Выбран преобразователь магнитного поля в виде МН с найденной нами арктангенсовой характеристикой

Максимальная чувствительность МН составляет  $\gamma_{\max 2} = 0,26$  мВ см/А.

Гистерезисные ветви МН в импульсном магнитном поле описываются найденными нами [3, 6] функциями:

$$U_2 = -A + BU_1 + (C + DU_1)\arctg((F + LU_1)H_2 + M - PU_1). \quad (1)$$

где  $A, B, C, D, F, L, M, P$  – постоянные;  $U_1$  и  $U_2$  – величины электрического напряжения предшествующего и последующего импульсов, снимаемых с МГ;  $H_2$  – максимальная величина  $H_T$  импульса в обратном направлении.

Выбраны считывающее устройство (индукционная МГ) и регистрирующий прибор (цифровой осциллограф с монитором). Определен источник импульсного магнитного поля в виде линейного индуктора, тангенциальная составляющая напряженности которого рассчитывается по формуле:

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

где  $a$  – постоянная, А·см;  $x$  – расстояние до проекции оси индуктора в плоскости измерения, см;  $b$  – расстояние от оси индуктора до магнитного носителя, см.

Определена величина абсолютной погрешности  $\Delta_i$  измерения  $U_i$  и величина относительной погрешности  $\epsilon_i$  измерения  $U_i$ .

Составлена программа воздействия на объект: для  $H_n$  каждого импульса поля амплитуда  $a_i(500, -400, 300, -200)$ , время нарастания  $t_{\max i}$  (20 мкс), форма импульса (синусоидальная, в полволны) количество импульсов  $N_i$  (4), временная задержка импульсов  $\Delta t_i$  ( $1,5t_{\max i}$ ), определяющая перекрытие импульсов. Составлена программа использования характеристик магнитного носителя и преобразователя магнитного поля при воздействии на объект. Для нахождения зависимостей  $U(x)$  на экспериментальной уста-

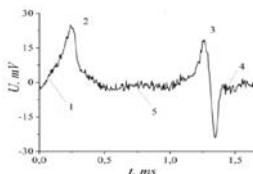


Рис. 2. Зависимость  $U(t)$ :

1 – для образца из железа с внутренним дефектом; 2, 4 – максимумы сигналов  $U(t)$  от краев МН; 3 – пик сигнала дефекта; 5 – сигналы помех

новке используется компьютерная программа цифрового осциллографа. Для обработки экспериментальных данных (операции сложения, вычитания и умножения по точкам зависимостей  $U(x)$  от координаты или времени) выбрана компьютерная программа. Для проведения теоретических расчетов выбран язык программирования.

В качестве примера использования указанного метода контроля с применением МН на рис. 2 показана зависимость величины электрического напряжения  $U(t)$ , снимаемого с магнитной головки, от времени  $t$  при считывании информации с МН.

Образец – пластина из оцинкованного железа толщиной 0,8 мм с подповерхностным дефектом в виде конуса. Дефект начинается на глубине 0,2 мм. Здесь также показаны сигналы от краев МН 2 и 4 и сигналы помех 5. На образец вместе с МН воздействовали импульсом магнитного поля сложной конфигурации с использованием разработанного нами метода гистерезисной интерференции [3, 6, 7]. Передний край МН соответствует максимуму 2 и обнаружен благодаря тому, что в этом месте на образец из железа наложена фольга из алюминия толщиной 0,06 мм. Под дальним краем МН 4 фольги нет и нет максимума сигнала. Средний диаметр дефекта найден по временным координатам положительного пика 5 (1,26 мс) и последующего отрицательного пика (1,34 мс). Разность временных координат составляет 0,07 мс, что соответствует среднему диаметру дефекта 0,08 мм. Отметим, что указанный дефект выявлен с помощью воздействия на образец импульсом магнитного поля со временем нарастания менее 0,1 мс.

Величину напряженности магнитного поля над алюминиевой фольгой и оцинкованным железом можно определить из рис. 3 и характеристики

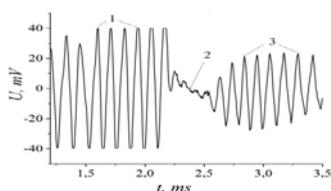


Рис. 3. Зависимости  $U(t)$  ДДМП:

- 1 – над фольгой из алюминия толщиной 0,06 мм;
- 2 – между частями образца;
- 3 – над оцинкованным железом толщиной 0,8 мм

использованного дискретного датчика магнитного поля. Максимумы сигнала 1 и 3 пропорциональны величине напряженности магнитного поля. При этом следует учесть, что участок МН над фольгой перемножен дважды. Величина сигнала над фольгой составляет 40 мВ, а над железом – 23 мВ, а с учетом указанного перемножения это соотношение составляет 120 мВ и 23 мВ.

По сравнению с безгистерезисными методами разработанный метод с использованием МН позволил повысить в три – пять раз точность контро-

ля толщины, удельной электропроводности  $\sigma$ , магнитной проницаемости  $\mu$  металлических объектов и дефектов сплошности в них.

### Литература

1. Козлов, В. С. Техника магнитографической дефектоскопии / В. С. Козлов. – Мн.: Вышэйшая школа, 1976. – 256 с.

2. Суханов, Д. Я. Магнитоиндукционная томография электрических схем и приборов / Д. Я. Суханов, Е. С. Совпель // Известия высших учебных заведений. – 2015. – Т. 58. – № 10/3. – С. 73–75.

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

4. Pavlyuchenko, V. V. Using Film Flux Detectors to Determine Properties of Conducting and Magnetic Objects / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. – vol. 54. – no. 1. – P. 70–76.

5. Павлюченко, В. В. Компьютерные методы нахождения распределений импульсных магнитных полей вблизи объектов из электропроводящих материалов / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич, В. Л. Пивоваров // Дефектоскопия. – 2016. – № 3. – С. 48–56.

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

7. Pavlyuchenko, V. V. Calculation of residual magnetic-field distributions upon hysteretic interference of a pulsed magnetic field / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich, V. L. Pivovarov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – vol. 51. – no. 1. – P. 8–16.

8. 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.

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

УДК 620.130

### Влияние параметров преобразователей магнитного поля на результаты контроля свойств объектов

Дорошевич Е. С., Павлюченко В. В., Зыков Г. Л.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь