

УДК 620.130-179

## **УСТРОЙСТВА И СПОСОБЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОБЪЕКТОВ ИЗ МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ**

*Инженеры ПАВЛЮЧЕНКО В. В., ДОРОШЕВИЧ Е. С.*

*Белорусский национальный технический университет*

Распространение электромагнитного поля в электропроводящую среду рассмотрено в ряде теоретических работ [1, 2]. Изучению распространения импульсного магнитного поля и разработке способов и устройств неразрушающего контроля электрических и магнитных свойств материалов посвящен ряд экспериментальных работ [3, 4]. Однако все эти работы требуют

своего дальнейшего развития с точки зрения повышения качества неразрушающего контроля. Целью работы является повышение точности определения пространственно-временных распределений напряженности импульсного магнитного поля  $H$  и точности неразрушающего контроля физических свойств

материалов и изделий и дефектов сплошности в них.

Поставленная цель достигается разработкой и созданием новой экспериментальной установки, новых, более совершенных способов и устройств контроля электрических и магнитных свойств объектов в импульсных и магнитных полях, а также компьютерным обеспечением процесса нахождения пространственно-временных распределений составляющих напряженности импульсного магнитного поля  $H$  вблизи поверхности объектов из электропроводящих и магнитных материалов. Были проведены теоретические расчеты и экспериментальные исследования взаимодействия импульсного магнитного поля с электропроводящими и магнитными материалами. Для проведения измерений разработана экспериментальная установка (рис. 1), которая работает следующим образом.

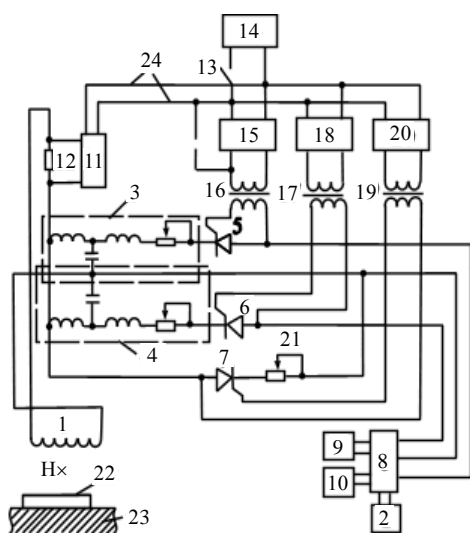


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования распространения импульсных магнитных полей: 1 – излучатель импульсного магнитного поля; 2 – источник питания; 3, 4 – формирующие линии; 5, 6, 7 – тиристоры; 8 – блок управления; 9, 10 – накопительные конденсаторы; 11 – измерительный прибор; 12 – измерительное сопротивление; 13 – электрический ключ; 14 – источник постоянного напряжения; 15 – электронная схема; 16, 17 – трансформаторы запуска тиристоров; 18 – электронная схема; 19 – трансформатор запуска тиристора; 20 – электронная схема; 21 – потенциометр; 22 – датчик магнитного поля; 23 – металлический образец; 24 – линия синхронизации

Зарядив накопительные конденсаторы 9 тиристора 5 от источника питания, переключают тумблер его управления в блоке управления и коммутации в положение «разряд» и замыкани-

ем электрического ключа осуществляют разряд этих конденсаторов на источник импульсного магнитного поля через тиристор 5 и формирующую линию 3. При этом параметры импульса тока источника импульсного магнитного поля определяются величиной напряжения на источнике питания, величиной электроемкости накопительных конденсаторов 9, величинами индуктивности, электроемкостей и активных сопротивлений потенциометров формирующей линии 3, а также линейными размерами, числом витков, толщиной и электрическим сопротивлением провода источника поля. С помощью цепи тиристора 5 можно формировать синусоидальные импульсы тока в полволны, импульсы тока, по форме близкие к треугольнику, а также квазилинейно нарастающие импульсы с экспоненциальным спадом. Цепь тиристора 6 служит для формирования импульсов тока более сложной формы следующим образом. Задают параметры формирующей линии 4 тиристора 6 и время задержки  $t_3$  его линии задержки в схеме 18, коммутируют цепь заряда накопительных конденсаторов 10 из положения «заряд» в положение «разряд».

Затем замыкают ключ, осуществляя разряд конденсаторов 9 на источник поля и с момента времени  $t_3$  – разряд конденсаторов 10 через тиристор 6 и линию задержки 4. Цепь тиристора 6 позволяет формировать среднюю часть и задний фронт импульса тока. С помощью тиристора 7 осуществляют формирование заднего фронта импульса тока  $I$  на источнике. Момент его срабатывания задают временем задержки его линии задержки в схеме 20. Время спада тока в источнике поля определяется величиной активного сопротивления 21 в цепи тиристора 7, включенного параллельно излучателю поля 1. Знак « $\times$ » означает направление вектора напряженности магнитного поля  $H$ . В качестве измерительного прибора, подключенного к считывающему устройству с датчиков магнитного поля, использовали осциллограф с послесвечением С8–13, откалиброванный с помощью генератора стандартных сигналов, цифровой осциллограф С8–38 и цифровой USB-осциллограф, подключенный к компьютеру. Установка позволяет производить измерения в диапазоне напряженности магнитного поля  $1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^5$  А/м при минимальном времени нарастания напряженности магнитного поля  $1 \cdot 10^{-6}$  с.

Для измерения величины напряженности магнитного поля  $H$  из магнитного носителя (МН) (магнитной ленты) изготавливали датчики магнитного поля в виде одиночных полос разной ширины или набора параллельных полос равной ширины, укрепленных на жесткой подложке из немагнитного материала на одинаковом удалении друг от друга (дискретный датчик). На датчик магнитного поля производили запись величины максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_{\text{тн}}$ . Путем последующего сканирования датчика магнитного поля магнитной головкой, подключенной к входу измерительного прибора, находили величину индуцированного головкой электрического напряжения  $U$ , по которой в соответствии с градуировочными характеристиками МН определяли величину  $H_{\text{тн}}$ .

Результаты использования импульса магнитного поля с выбросом противоположного направления для контроля электрических свойств материалов и дефектов сплошности в них представлены на рис. 2, где показана зависимость амплитуды электрического напряжения  $U$ , снимаемого с индукционной магнитной головки при сканировании ею дискретного датчика магнитного поля, от расстояния  $x$ . Точка проекции оси излучателя поля на плоскость измерения соответствует координате  $x = 8 \cdot 10^{-3}$  м. Величина максимальной напряженности магнитного поля импульса  $H_{\tau 0} = 4,1 \cdot 10^4$  А/м, выброс в противоположном направлении  $-0,33H_{\tau 0}$ .

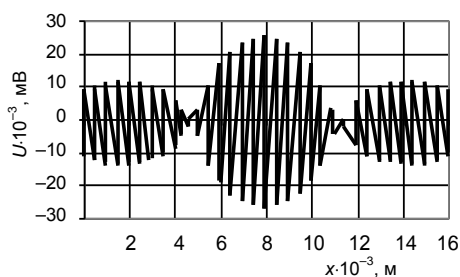


Рис. 2. Зависимость амплитуды электрического напряжения  $U$ , снимаемого с индукционной магнитной головки при сканировании ею дискретного датчика магнитного поля, от расстояния  $x$

По величине электрического напряжения  $U$  и форме получающихся фигур можно определять величину удельной электропроводности  $\sigma$  и наличие дефектов в объекте под каждой точкой его поверхности. Зависимость, представленная на рис. 2, получена для однородного

материала. Если в каком-то участке материала электропроводность  $\sigma$  будет отличаться от электропроводности  $\sigma$  остального материала, то и величина электрического напряжения  $U$ , снимаемого с преобразователя магнитного поля над этим участком, будет также другой.

При проведении измерений на тиристорной установке авторами обнаружен эффект возникновения колебаний напряженности магнитного поля  $H$  вблизи линейных источников импульсного магнитного поля при пропускании через них одиночного импульса тока. На рис. 3 изображена зависимость амплитуды электрического сигнала  $U$ , считываемого с дискретного магнитного носителя от времени  $t$ . Излучатель магнитного поля выполнен в виде катушки и установлен так, что его плоскость перпендикулярна плоскости поверхности находящейся под ним пластины из алюминия толщиной  $d = 6,7 \cdot 10^{-4}$  м.

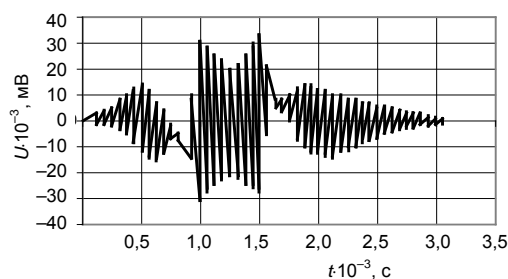


Рис. 3. Изображение на экране индикатора зависимости напряжения  $U$ , снимаемого с дискретного носителя от времени  $t$ , полученное в результате воздействия на датчик с пластиной из алюминия толщиной  $d = 6,7 \cdot 10^{-4}$  м импульсом магнитного поля со временем нарастания  $t_{\text{max}} = 1,1 \cdot 10^{-5}$  с

Использовали синусоидальный импульс тока в полволны с временем нарастания  $t_{\text{max}} = 1,1 \cdot 10^{-5}$  с. Время развертки  $t$  пропорционально расстоянию  $x$  до проекции оси излучателя поля на плоскость датчика так, что  $1 \cdot 10^{-3}$  с соответствует  $1,32 \cdot 10^{-2}$  м, причем проекции оси излучателя соответствует момент времени  $t = 1,25 \cdot 10^{-3}$  с. На датчик воздействовали одним импульсом поля. Поэтому на экране индикатора должна была появиться зависимость  $U(x)$  с одной огибающей в виде синусоиды. Однако форма сигнала  $U(x)$  содержит три огибающие с чередующейся полярностью. Исходя из полученных экспериментальных данных, сделан вывод о том, что при размыкании цепи разряда емкости на индуктивность в момент времени, когда ток разряда, пройдя максимум, становится

ся равным нулю, на индуктивности и в исследуемом объекте продолжают затухающие электромагнитные колебания, амплитуда которых тем больше, чем ближе форма кривой разряда к форме идеальной синусоиды. Эффект может быть использован при контроле электрических и магнитных свойств материалов.

**Разработанные способы и устройства контроля электрических и магнитных свойств материалов объектов и дефектов сплошности в них.** Устройство контроля качества изделий из магнитных электропроводящих материалов [5] разработано с целью повышения точности контроля за счет увеличения контрастности изображений доменной структуры

магнитооптической пленки (МОП) и компенсации изображения источника света. Наличие ребристой поверхности зеркала из белого металла в форме концентрических окружностей с ориентацией оптических осей падающего и отраженного света, проходящих через центр этих окружностей, а также компенсаторов, расположенных между линзами соответствующих изображениям источников оптических помех, и за счет покрытий на них со стороны приемника излучений, позволяет получать на экране видеоконтрольного устройства равномерно освещенное распределение доменной структуры всей МОП без оптических помех и оптических изображений источников излучения. По распределению доменной структуры МОП определяют наличие внутренних дефектов в изделии, электромагнитные свойства материала изделия и его толщину. При этом участкам с дефектами соответствуют локальные неоднородности доменной структуры МОП. Электромагнитные свойства (удельная электропроводность  $\sigma$ , магнитная проницаемость  $\mu$ ) и толщину изделия определяют по величине тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_t$ , измеренной с помощью МОП, в зависимости от параметров, воздействующих на изделие с МОП электромагнитных полей. Применение устройства позволяет повысить точность контроля на 10 % и более за счет увеличения контрастности изображения доменной структуры магнитооптической пленки в 2 и более раз и увеличения интенсивности отраженного подложкой света более чем в 2 раза.

При осуществлении магнитооптического способа контроля электропроводящего материала [6] на контролируемый материал периодически воздействуют импульсными магнитными по-

лями, визуализируют их взаимодействие со структурой материала и по полученным изображениям идентифицируют физико-механические свойства материала по заранее выявленным корреляционным зависимостям. Для визуализации используют МОП, которую прикладывают к контролируемому материалу и воздействуют на него одиночными импульсами магнитного поля  $H_0$  в полволны, характеризующимися разными временами нарастания импульсов  $t_{imax}$  и разными максимальными величинами напряженности магнитного поля  $H_{i0m}$ .

Способ магнитоимпульсного контроля дефектности, электрических и магнитных свойств объекта из магнитного или немагнитного электропроводящего материала [7] позволяет находить распределения свойств объекта по глубине. Воздействуют на объект импульсами магнитного поля  $H_0$  в полволны со временами нарастания  $t_{imax}$ , находят распределение максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_{itm}$  по выбранной линии замера и для каждого импульса на поверхности объекта формируют полосу растра, из которых затем формируют полный растр. При этом ширину каждой полосы устанавливают прямо пропорциональной эффективной глубине проникновения магнитного поля в объект  $\Delta$ .

Способ магнитного контроля дефектности и электрических свойств изделия из электропроводящего материала [8] позволяет вести контроль свойств объекта в прошедшей электромагнитной полуволне линейно нарастающим магнитным полем  $H_0$  за время не более  $1 \cdot 10^{-5}$  с до постоянной величины напряженности  $1 \cdot 10^2$  А/м и более. Такое время нарастания позволяет определять свойства изделия в слоях толщиной  $1 \cdot 10^{-4}$  м и меньше. Одновременно с прохождением электромагнитного поля через изделие считывают информацию с датчика и получают распределения напряженности магнитного поля на поверхности изделия в разные моменты времени  $t$ .

Устройство для контроля качества изделий из магнитных и электропроводящих материалов содержит источник света [9] со светофильтром, объектив с устройством изменения фокусного расстояния, преобразователь оптического изображения в электрический сигнал, предварительный усилитель, видеоусилитель, синхрогенератор, генераторы строчной развертки и кадровой развертки с управляемым блоком задержки формирования напряжения,

электронный ключ, блок компараторов, блок управляемых усилителей, видеоусилитель индикатора, монитор, процессор, а также преобразователь Холла, магнитооптическую пленку с поляризатором и анализатором, управляемые первичные источники магнитного поля и светодиодные индикаторы для учета пространственного расположения объектов и средств измерения. Устройство позволяет значительно повысить точность контроля магнитных и электрических свойств материалов объектов и дефектов сплошности в них за счет оптимального управления параметрами магнитных полей первичных источников  $H_0 = H_0(t)$ , получения информации об изменении во времени тангенциальной  $H_t$  и нормальной  $H_n$  составляющих напряженности магнитного поля, разрешения электрических и магнитных свойств объектов и дефектов сплошности по глубине объекта, а также за счет значительного увеличения информативной емкости о распределении импульсных магнитных полей на поверхности контролируемого объекта и ее компьютерной обработке.

**Компьютерное обеспечение измерения напряженности магнитного поля.** Компьютерное обеспечение измерений осуществляли с помощью цифрового USB-осциллографа. Разрядность АЦП составляет 10 бит (1024 уровня).

Рассмотрим распределения электрического напряжения  $U$ , получающиеся на экране монитора при сканировании индукционной магнитной головкой магнитного носителя, на который воздействовали импульсом магнитного поля с двумя выбросами поля противоположной и прямой полярности. Максимальная величина напряженности магнитного поля импульса  $H_{0m} = 2,3 \cdot 10^4$  А/м, обратного выброса –  $9 \cdot 10^3$  А/м и последующего прямого выброса –  $2 \cdot 10^3$  А/м. Время нарастания  $t_{max}$  импульса поля –  $8 \cdot 10^{-6}$  с, а выбросов соответственно –  $2 \cdot 10^{-6}$

и  $5 \cdot 10^{-7}$  с. Зависимости амплитуды электрического напряжения  $U$ , снимаемого с индукционной магнитной головки от времени  $t$ , при сканировании ею дискретного магнитного носителя МН с записями остаточных магнитных полей в результате воздействия на него указанным импульсом магнитного поля, показаны на рис. 4–7. Из рисунков следует, что точность определения свойств материала объекта при использовании дискретного магнитного носителя по сравнению со сплошным увеличивается в несколько раз. Если в случае сплошного маг-

нитного носителя максимальная величина электрического напряжения  $U_{max}$  для пластины толщиной  $7 \cdot 10^{-5}$  м по сравнению с максимальной величиной электрического напряжения в отсутствие объекта увеличивается в 1,2 раза, а для пластины толщиной  $3 \cdot 10^{-3}$  м – в 1,8 раза, то при использовании дискретного магнитного носителя амплитуда центрального минимума  $U$  в отсутствие объекта составляет 0,05 В, а для пластины толщиной  $3 \cdot 10^{-5}$  м соответствующая ему амплитуда максимума  $U$  равна 0,35 В, т. е. происходит увеличение  $U_{max}$  в 7 раз. Кроме того, точность контроля значительно возрастает за счет получения дополнительной информации в виде разных геометрических фигур, получающихся благодаря выбросам магнитного поля, что видно из рис. 4–7.

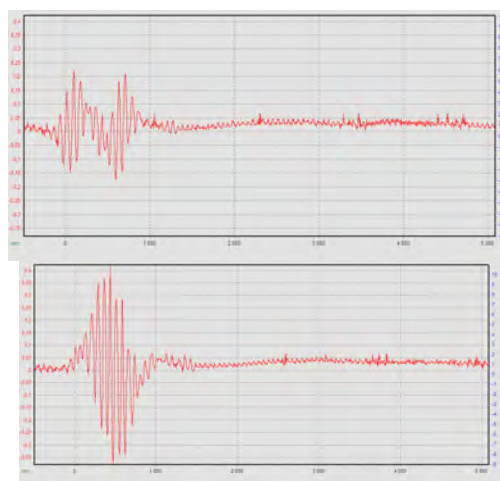


Рис. 4. Зависимость величины электрического напряжения, снимаемого с индукционной магнитной головки, от времени (объект отсутствует)

Рис. 5. Зависимость величины электрического напряжения, снимаемого с индукционной магнитной головки, от времени (пластина толщиной  $1,5 \cdot 10^{-5}$  м)

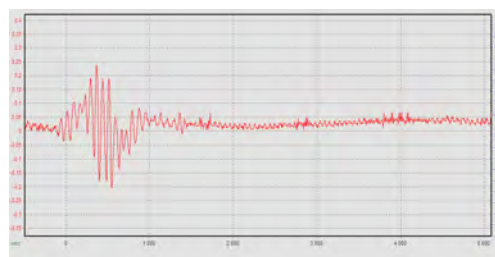


Рис. 6. Зависимость величины электрического напряжения, снимаемого с индукционной магнитной головки, от времени (пластина из алюминия толщиной  $3 \cdot 10^{-5}$  м)

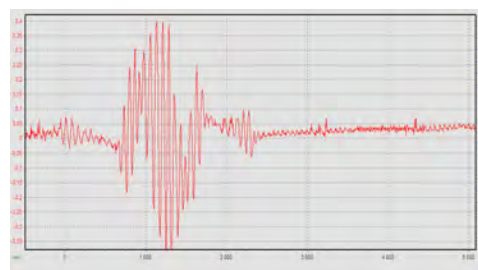


Рис. 7. Зависимость величины электрического напряжения, снимаемого с индукционной магнитной головки, от времени (пластина толщиной  $3 \cdot 10^{-3}$  м)

Компьютерное обеспечение измерения величины напряженности магнитного поля преобразователями магнитного поля с помощью цифрового USB-осциллографа позволяет значительно повысить точность контроля электрических и магнитных свойств объектов и дефектов сплошности в них за счет высокого уровня разрядности АЦП осциллографа, уменьшения погрешности установки нуля и погрешности, возникающей при калибровке осциллографа генератором стандартных сигналов, более полного учета влияния помех и наводок в электрических цепях, а также за счет высокой точности компьютерной обработки информации.

### ВЫВОДЫ

В результате проведенных теоретических расчетов, экспериментальных исследований и технических разработок авторами получены следующие результаты:

1. Разработана экспериментальная установка для исследования распространения импульсных магнитных полей в электропроводящих и магнитных средах, позволяющая производить измерения в диапазоне напряженности магнитного поля  $1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^5$  А/м при минимальном времени нарастания напряженности магнитного поля  $1 \cdot 10^{-6}$  с.

2. Получены экспериментальные зависимости изменения величины электрического напряжения, снимаемого с индукционной магнитной головки, сканирующей магнитный носитель при воздействии на электропроводящий объект импульсным магнитным полем. Использование этих зависимостей свойств объектов значительно повышает точность и надежность контроля свойств объектов.

3. Осуществлено компьютерное обеспечение измерения величины напряженности магнитного поля преобразователями магнитного поля с помощью цифрового USB-осциллографа, позволяющее повысить точность контроля электрических и магнитных свойств материалов и наличия в них дефектов сплошности.

4. Представлены разработанные магнитографические, магнитооптические и холловские способы и устройства контроля физических свойств объектов из электропроводящих и магнитных материалов в импульсном магнитном поле, позволяющие значительно повысить точность контроля. Разработанные способы и устройства дают возможность находить распределение электрических и магнитных свойств материалов объектов и дефектов сплошности в них в плоскости поверхности объектов и по глубине.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Поливанов, К. М. Ферромагнетики / К. М. Поливанов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957.
2. Кнопфель, Г. Сверхсильные импульсные поля / Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972.
3. Павлюченко, В. В. Взаимодействие импульсных электромагнитных полей с поверхностями металлических образцов / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Вестник БНТУ. – 2006. – № 4. – С. 89–95.
4. Павлюченко, В. В. Закономерности изменения напряженности прошедшего через электропроводящие объекты магнитного поля / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Вестник БНТУ. – 2009. – № 2. – С. 76–82.
5. Устройство контроля качества изделий из магнитных или электропроводящих материалов: пат. 9872 Респ. Беларусь, МПК С2 ВУ, G 01 N 27/82 / Е. С. Дорошевич, В. В. Павлюченко; заявитель БНТУ. – № а 20050658; заявл. 30.06.2005; опубл. 30.10.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 5. – С. 134.
6. Способ магнитооптического контроля магнитного электропроводящего материала: пат. 10440 Респ. Беларусь, МПК С2 ВУ, G 01 N 27/00 / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич; заявитель БНТУ – № а 20060200; заявл. 09.03.2006; опубл. 30.04.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 2. – С. 97.
7. 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 – № а 20060201; заявл. 09.03.2006; опубл. 30.04.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 2. – С. 97–98.
8. Способ магнитного контроля дефектности и электрических свойств изделий из электропроводящего материала: пат. 11265 Респ. Беларусь, МПК С2 ВУ, G 01 N 27/84, G 01 R 33/82 / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич; заявитель БНТУ – № а 20060244; заявл. 20.03.2006; опубл. 30.10.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 5. – С. 127–128.
9. Устройство для контроля качества изделий из магнитных и электропроводящих материалов: пат. 12743 Респ. Беларусь, МПК С1 ВУ, G 01 N 27/72 / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич; заявитель БНТУ. – № а 20071583;