

## ПРИМЕНЕНИЕ ПЛЕНОЧНЫХ ФЛЮКС-ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ И МАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2018 г. В.В. Павлюченко, Е.С. Дорошевич\*

*Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь, 220013 Минск,  
пр. Независимости, 65*

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

Поступила в редакцию 06.06.2017

Приведены оптические изображения магнитных полей, записанных на пленочные флюкс-детекторы, а также распределения электрического напряжения  $U(t)$ , снимаемого с индукционной магнитной головки при сканировании ею дискретного магнитного носителя с записями остаточных магнитных полей, полученных при воздействии на магнитный носитель с контролируемым объектом импульсным магнитным полем. Разработаны методики измерения распределений магнитных полей и контроля объектов из электропроводящих и магнитных материалов, повышающие точность определения их удельной электропроводности  $\sigma$ , магнитной проницаемости  $\mu$ , однородности распределения  $\sigma$  и  $\mu$ , толщины и параметров дефектов сплошности в них.

*Ключевые слова:* пленочный флюкс-детектор, оптическое изображение магнитного поля, напряженность магнитного поля, удельная электропроводность, магнитный носитель, индукционная магнитная головка.

Целью настоящей работы является разработка способов применения пленочных флюкс-детекторов, визуализирующих магнитные поля, для контроля удельной электропроводности  $\sigma$ , магнитной проницаемости  $\mu$ , однородности распределения  $\sigma$  и  $\mu$ , толщины и параметров дефектов сплошности в объектах из электропроводящих и магнитных материалов, а также методов и средств измерения магнитных полей с помощью пленочных флюкс-детекторов (ПФД).

Пленочные датчики магнитного поля являются одними из наиболее перспективных датчиков, применяемых для контроля электрических и магнитных свойств материалов и нарушений сплошности в них. Широко известны методы контроля объектов и измерения магнитных полей с применением магнитной ленты (и магнитооптической пленки) [1—4]. Имеются многочисленные разработки методов и средств магнитооптического контроля [5, 6]. Измерение магнитных полей рассеяния с помощью электронно-оптического муара с получением плоскостного изображения осуществлено в [7, 8]. Разрабатываются конструкции плоскостных датчиков в виде матриц различных преобразователей, например, преобразователей Холла. В [9] показано устройство магнитоиндукционного интроскопа для дефектоскопии металлических объектов, содержащего набор катушек малого размера, собранных в виде плоскостной матрицы.

Одно из первых применений пленочных флюкс-детекторов — в визуализации полей постоянных магнитов. Пленочные флюкс-детекторы представляют собой взвешенные в геле лепестки никеля, которые в приложенном параллельно поверхности пленки поле ориентируются вдоль поля и максимально отражают свет. Такое изображение является светлым. Наоборот, в поле, нормальном к плоскости пленки, изображение является темным, так как лепестки ориентируются перпендикулярно поверхности (плоскости) пленки и минимально отражают падающий на них свет.

Визуализация полей дефектов ферромагнитных объектов с помощью пленочных флюкс-детекторов осуществляется в [10—13].

Авторами настоящей работы проведены исследования свойств пленочных датчиков магнитного поля для контроля объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях [14—18]. В частности, разработаны методы и средства контроля с помощью магнитооптической пленки и магнитного носителя с использованием его гистерезисных свойств.

В данной работе представлены результаты исследования свойств пленочных флюкс-детекторов с целью применения их для контроля электрических и магнитных свойств объектов в магнитных полях совместно с другими датчиками магнитного поля.

Преобразователи магнитного поля из магнитного носителя (дискретный датчик магнитного поля) использованы для измерения напряженности магнитного поля вблизи разрядной дуги малой электрофорной машины (рис. 1). Длина дуги  $y = 2 \cdot 10^{-2}$  м. Преобразователь выполнен в виде полосы магнитного носителя шириной  $1,9 \cdot 10^{-3}$  м и ориентирован параллельно оси дуги. Расстояние от оси преобразователя до оси электрической дуги  $3 \cdot 10^{-3}$  м.

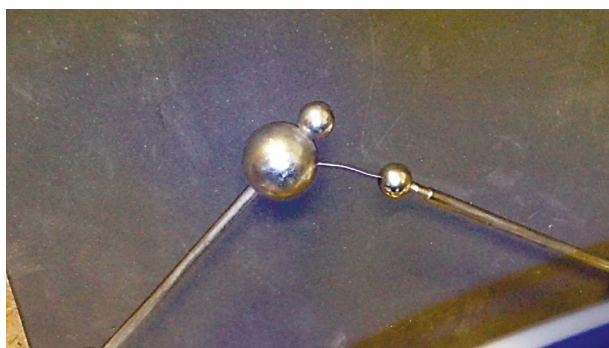


Рис. 1. Фотография разрядной дуги.

На рис. 2 изображена зависимость величины электрического напряжения  $U$ , снимаемого с индукционной магнитной головки (МГ), от времени  $t$ , полученная в результате сканирования преобразователя магнитной головкой перпендикулярно его оси. Величину напряженности магнитного

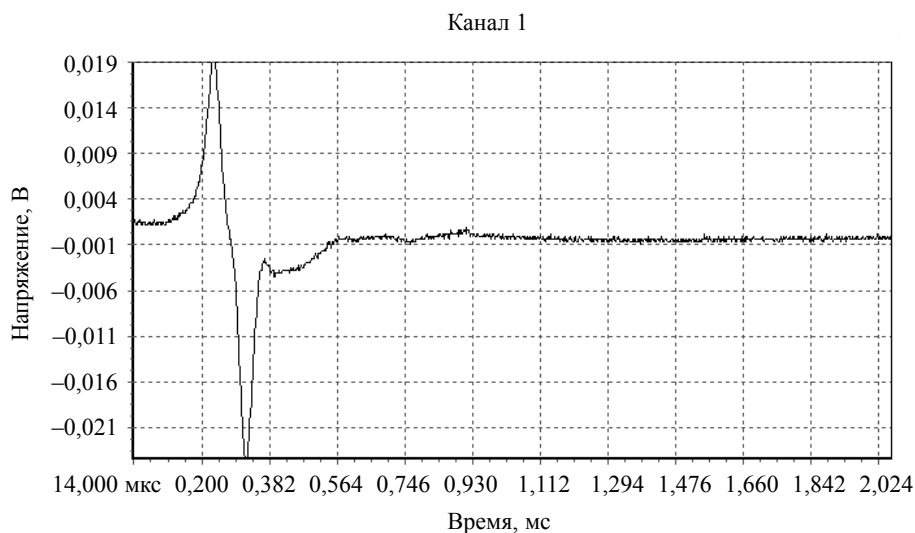


Рис. 2. Зависимость величины электрического напряжения от времени  $U(t)$ , снятая с индукционной МГ.

поля  $H$  определяли с помощью градуировочной характеристики  $U = U(H)$  по величине пиков  $U$  от двух границ магнитной полосы. Амплитуда сигнала составляет  $4,3 \cdot 10^{-2}$  В, что соответствует величине тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_t = 2 \cdot 10^4$  А/м.

Распределение напряженности магнитного поля разрядной дуги можно изучать также с помощью пленочных флюкс-детекторов. На рис. 3 представлена фотография электродов электрофорной машины (большой металлический шар 1, жестко скрепленный с ним малый шар 2, малый шар 4), а также ПФД с изображением магнитного поля разрядной дуги.

Разряд происходит между шарами 1 и 4. Плоскость ПФД при записи поля была ориентирована под углом  $45^\circ$  к оси дуги. Поскольку линии напряженности магнитного поля электрической дуги являются concentric окружностями, то на ПФД осуществляется запись тангенциальной составляющей магнитного

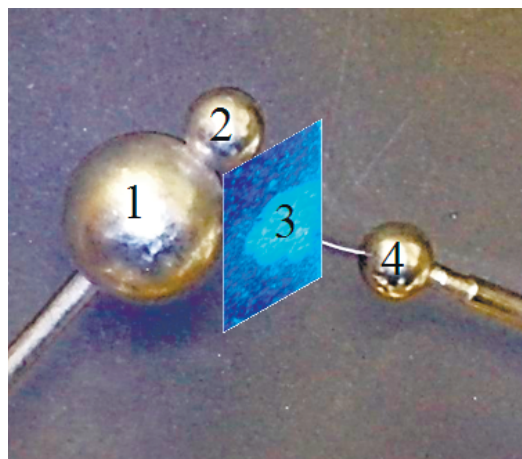


Рис. 3. Фотография пленочного флюкс-детектора с отпечатком магнитного поля разрядной дуги без перекрытия флюкс-детектором линии разряда.

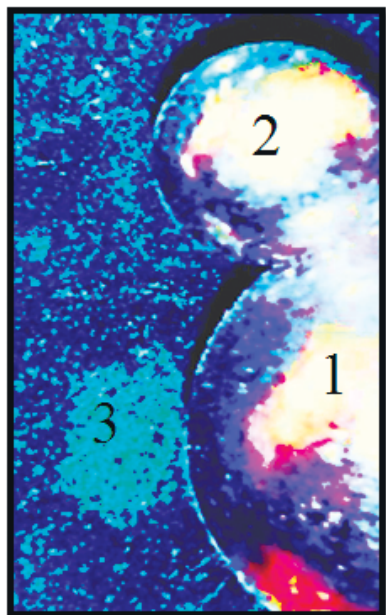


Рис. 4. Фотография пленочного флюкс-детектора с отпечатком магнитного поля разрядной дуги с перекрытием флюкс-детектором линии разряда.

поля. При этом металлические частицы в гелии ориентируются в плоскости ПФД и максимально отражают свет, образуя светлое пятно 3 на темном фоне, который предварительно создавали путем воздействия на ПФД магнитным полем с нормальной к его плоскости ориентацией  $H$ .

Аналогичная фотография представлена на рис. 4. Малый металлический шар 4, на который осуществляется разряд большого шара 1, расположен слева от него (фотография с противоположной по отношению к рис. 1 стороны) и закрыт пленочным флюкс-детектором. Отпечатком магнитного поля дуги на ПФД является эллиптическое пятно 3, расположенное слева от большого металлического шара.

Величины тангенциальной и нормальной составляющих напряженности магнитного поля в каждой точке флюкс-детектора можно определять по уровню серого в оптическом изображении. В соответствии с полученными результатами разработана методика измерений, позволяющая определять величину напряженности магнитного поля по распределению уровня серого в известных полях пленочных флюкс-детекторах.

С помощью пленочных флюкс-детекторов можно находить распределение напряженности магнитного поля вблизи металлических объектов при воздействии на них импульсным магнитным полем.

На рис. 5 показана фотография образца, состоящего из полос алюминия 1, установленных параллельно друг другу, и изображение накрывающей их алюминиевой пластины 2 (светлое изображение с темными бликами, расположенное слева от магнитных полос). Ширина полос  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м, толщина —  $1,8 \cdot 10^{-3}$  м, толщина пластины  $2 \cdot 10^{-5}$  м.

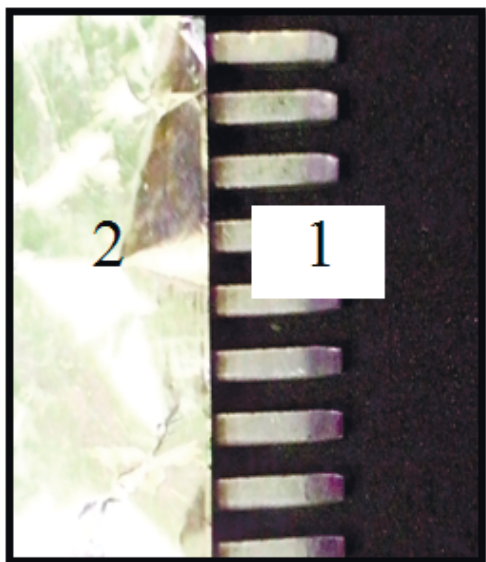


Рис. 5. Фотография образца из алюминиевых полос с алюминиевой фольгой.

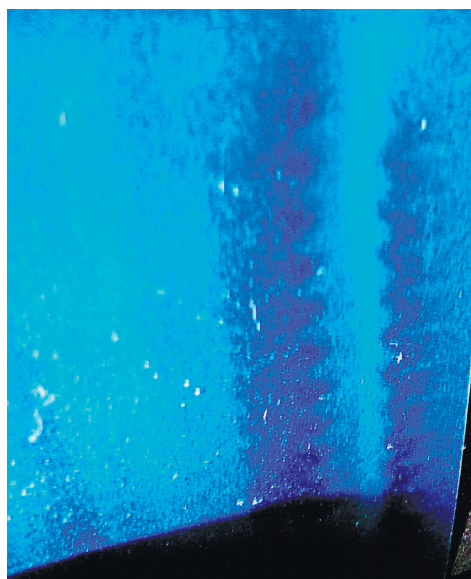


Рис. 6. Фотография пленочного флюкс-детектора с отпечатком магнитного поля алюминиевых полос.

На рис. 6 показана фотография ПФД с изображением магнитных полей алюминиевых полос в результате воздействия на образец, накрытый алюминиевой пластиной, импульсом магнитного поля линейного индуктора. Ось индуктора перпендикулярна осям полос. Изображения полос (см. рис. 5) и их полей (см. рис. 6) выполнены в одном масштабе. При воздействии на образец импульсом магнитного поля алюминиевые полосы были полностью закрыты алюминиевой пла-

стиной. Проекция оси индуктора на ПФД соответствует вертикальной светлой полосе с зигзагообразными краями. Темные участки изображения обусловлены нормальной составляющей напряженности магнитного поля и соответствуют участкам ПФД вне полос.

При использовании методов контроля с осуществлением гистерезисной интерференции [16] магнитного поля определяют также амплитуду и порядок максимумов или минимумов в зависимости от того, сколько раз на соответствующем участке магнитного носителя произошло перемагничивание, считая, что под осью линейного излучателя находятся нулевые максимум или минимум. Так, на рис. 7:  $I_0^3$  — нулевой максимум третьего порядка,  $U = 3$  мВ;  $I_{1a}^2$  — первый максимум второго порядка, левый,  $U = 11,5$  мВ;  $I_{1b}^2$  — второй максимум первого порядка, правый,  $U = 16$  мВ.

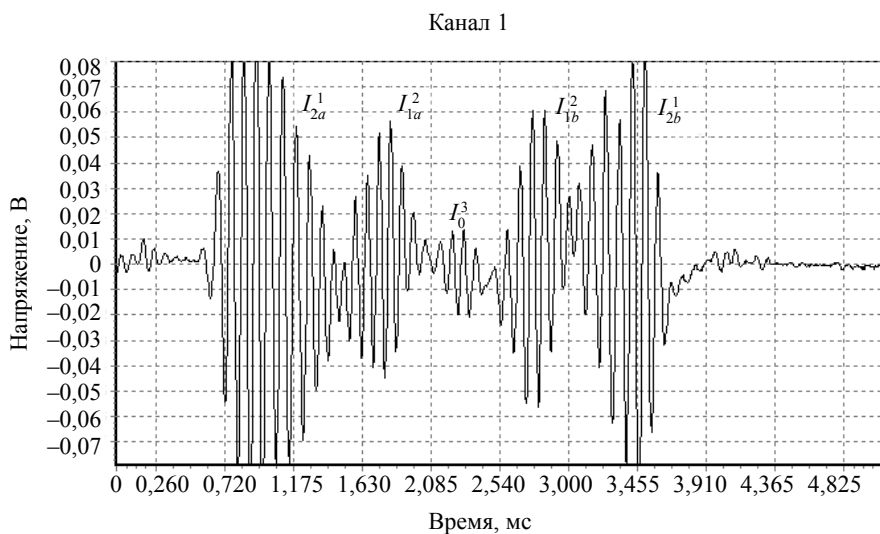


Рис. 7. Определение максимумов электрического напряжения при использовании гистерезисной интерференции магнитного поля.

По параметрам интерференционной картины можно определять свойства контролируемых объектов не только с помощью магнитного носителя, но и других преобразователей магнитного поля, например, пленочных флюкс-детекторов.

Таким образом, проведенные эксперименты по использованию пленочных флюкс-детекторов для дефектоскопии электропроводящих объектов позволили разработать методику контроля объектов с получением оптических изображений магнитных полей объектов за экраном в виде электропроводящей фольги. Свойства объектов предложено определять по уровню серого оптического изображения пленочного преобразователя относительно установленного уровня.

В случае воздействия на магнитный носитель одним импульсом магнитного поля линейного индуктора получается один максимум зависимости электрического напряжения  $U$ , снимаемого с индукционной магнитной головки, от времени  $t$ , полученной в результате сканирования дискретного преобразователя магнитной головкой перпендикулярно осям его полос. Оптическое изображение магнитного поля на пленочном флюкс-детекторе представляет собой одну светлую полосу на темном фоне, положение которой соответствует проекции оси индуктора.

На рис. 8 показана зависимость величины электрического напряжения  $U$ , снимаемого с индукционной МГ, от времени  $t$ , полученная в результате сканирования дискретного датчика магнитного поля магнитной головкой перпендикулярно его оси, а на рис. 9 — соответствующее оптическое изображение поля пленочного флюкс-детектора.

На магнитный носитель и на ПФД воздействовали двумя импульсами магнитного поля линейного индуктора. В результате получены три светлые полосы оптического изображения ПФД, соответствующие трем максимумам электрического напряжения на рис. 8.

Таким образом, проведенные эксперименты по использованию пленочных флюкс-детекторов для определения электрических и магнитных свойств электропроводящих объектов с применением метода гистерезисной интерференции магнитного поля позволили получить интерференционные полосы на пленочном флюкс-детекторе. Распределения вторичных и суммарных магнитных полей, а значит, и их интерференционные картины на поверхности объектов зависят от электриче-

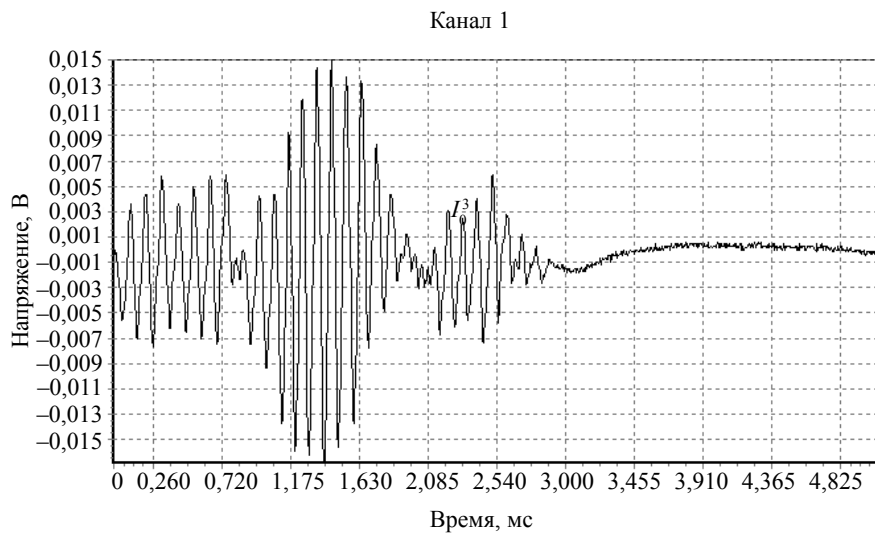


Рис. 8. Зависимость  $U(t)$ , воспроизведенная МГ (воздействие на дискретный датчик магнитного поля двумя разнополярными импульсами).

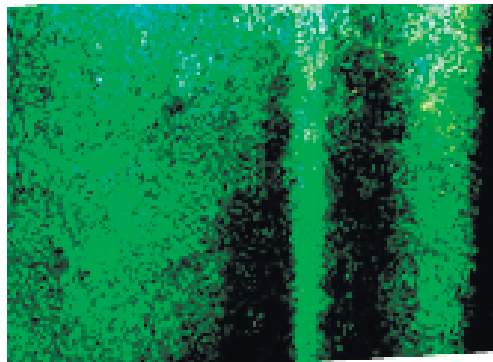


Рис. 9. Оптическое изображение магнитного поля на пленочном флюкс-детекторе.

ских и магнитных свойств объектов, их геометрических размеров и наличия нарушений сплошности. Поэтому свойства объектов предложено определять по относительному уровню серого вдоль заданного направления пленочного преобразователя в сравнении с эталонными изображениями, по ширине светлых (темных) интерференционных полос и расстояниям между их осями, а также путем сравнения оптических изображений магнитных полей для разных объектов.

## ВЫВОДЫ

1. Представлены экспериментальные данные измерения мгновенных распределений импульсных магнитных полей с помощью пленочных флюкс-детекторов. Получены оптические изображения распределений магнитных полей, созданных разрядной дугой электрофорной машины. Разработана методика измерений, позволяющая определять величину напряженности магнитного поля по распределению уровня серого в оптическом изображении.

2. Представлены результаты исследований по использованию пленочных флюкс-детекторов для дефектоскопии электропроводящих объектов. Получены оптические изображения магнитных полей полос алюминия за экраном в виде алюминиевой фольги. Свойства объектов предложено определять по уровню серого оптического изображения пленочного преобразователя относительно установленного уровня.

3. Показано использование пленочных флюкс-детекторов для определения электрических и магнитных свойств электропроводящих объектов с применением метода гистерезисной интерференции магнитного поля. Представлена фотография интерференционных полос на пленочном флюкс-детекторе, полученная при воздействии на него двумя разнополярными импульсами.

4. Свойства объектов предложено определять по относительному уровню серого вдоль заданного направления пленочного преобразователя в сравнении с эталонными изображениями и по ширине светлых (темных) интерференционных полос и расстоянием между их осями, а также путем сравнения оптических изображений для разных объектов.

5. Полученные результаты могут быть использованы для определения удельной электропроводности  $\sigma$  и однородности ее распределения, толщины и разнотолщинности электропроводящих объектов, параметров дефектов сплошности в них, а также для измерения мгновенных распределений магнитных полей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В.С. Техника магнитографической дефектоскопии. Минск.: Высшая школа, 1976. 256 с.
2. Михайлов С.П., Щербинин В.Е. Физические основы магнитографической дефектоскопии. М.: Наука, 1992. 238 с.
3. Новиков В.А., Кушнер А.В., Шилов А.В. Магнитографический контроль объектов при их намагничивании перемещаемым постоянным магнитом через магнитноситель. Схемы намагничивания // Дефектоскопия. 2010. № 6. С. 30—35.
4. Кушнер А.В., Шилов А.В., Новиков В.А. Программно-аппаратный комплекс для магнитографического контроля ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. 2010. № 6. С. 36—40.
5. Афонин А.М., Киселев В.Н., Вахромеев Ю.И., Пухов И.К. Магнитооптический преобразователь / Авт. свид. СССР № 832443. Бюл. изобр. 1981. № 19.
6. Залысин С.П., Червоненкис А.Я., Балбахов А.М., Рыбак В.Н. Способ измерения магнитных полей / Авт. свид. СССР № 842653. Бюл. изобр. 1981. № 24.
7. Печагин Е.А., Калинин В.Ф., Иванов В.М., Иванов В.П. Измерение магнитных полей рассеяния с помощью электронно-оптического муара // Труды ТГТУ. Тамбов, 1998. Вып. 2. С. 206—211.
8. Калинин В.Ф., Иванов В.М., Иванов В.П., Печагин Е.А. Измерение магнитных полей рассеяния сложных конфигураций с помощью электронно-оптического муара // Вестник ТГТУ. 1999. Т. 5. Вып. 3. С. 416—421.
9. Суханов Д.Я., Совпель Е.С. Магнитоиндукционный интроскоп для дефектоскопии металлических объектов // Дефектоскопия. 2015. № 5. С. 56—62.
10. Новиков В.А., Шилов А.В., Кушнер А.В. Визуализация полей дефектов ферромагнитных объектов с помощью пленки "Flux-detector" // Контроль. Диагностика. 2010. № 5. С. 18—22.
11. Новиков В.А., Шилов А.В. Расчет коэффициента отражения визуализирующей магнитные поля пленки в зоне дефекта при контроле ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. 2014. № 2. С. 25—33.
12. Новиков В.А., Шилов А.В. Экспериментальное определение глубины залегания и величины цилиндрического дефекта в ферромагнитной пластине с использованием визуализирующей магнитные поля пленки // Дефектоскопия. 2014. № 4. С. 25—30.
13. Новиков В.А., Шилов А.В. Экспериментальные исследования коэффициента отражения визуализирующей магнитные поля пленки в зоне дефекта при контроле ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. 2014. № 3. С. 40—49.
14. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Устройства и способы для контроля качества объектов из магнитных и электропроводящих материалов // Вестник БНТУ. 2011. № 3. С. 42—47.
15. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Способ магнитооптического контроля магнитного электропроводящего материала / Пат. 10440 Респ. Беларусь, МПК С2 ВУ, G 01 N 27/00; заявитель БНТУ. № а 20060200; заявл. 09.03.2006; опубл. 30.04.08. Афіцыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. Уласнасці, 2008, № 2, с. 97.
16. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С., Пивоваров В.Л. Расчет распределений остаточных магнитных полей при гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 11—20.
17. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S., Pivovarov V.P. Computer-Assisted Methods for Finding Pulsed Magnetic-Field Distributions near Current-Conducting Object // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52. № 3. P. 166—174. Pleiades Publishing, Ltd. 2016.
18. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Методы дискретизации магнитного поля при контроле параметров объектов из магнитных и электропроводящих материалов / Приборостроение-2016: Матер-лы 9-й Международной научно-технической конференции БНТУ, Минск, 23—25 ноября 2016 г.