

## РАСЧЕТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ГИСТЕРЕЗИСНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

© 2018 г. В.В. Павлюченко, Е.С. Дорошевич, В.Л. Пивоваров

Белорусский национальный технический университет, 220013 Минск, пр-т Независимости, 65  
e-mail: es\_doroshevich@mail.ru

Поступила в редакцию 06.06.2017

Представлены расчеты распределений электрического напряжения  $U(x)$ , снимаемого с преобразователя магнитного поля, соответствующие распределениям остаточных магнитных полей магнитного носителя, возникающих при воздействии на него импульсными магнитными полями линейного индуктора разной полярности. Графики получены с помощью программного языка Delphi. Явление гистерезисной интерференции магнитного поля ( $HI$ ) для магнитного носителя с петлями гистерезиса, описываемыми зависимостями в виде арктангенса, использовано для контроля объектов из электропроводящих материалов и позволяет повысить в несколько раз точность контроля.

*Ключевые слова:* напряженность магнитного поля, удельная электропроводность, арктангенс, магнитный носитель, гистерезисная интерференция.

Все явления природы в большей или меньшей степени обладают гистерезисными свойствами, которые в одних случаях приводят к негативным последствиям (например, создавая задержку измерений во времени), а в других могут быть использованы для создания точных методов контроля свойств объектов.

Авторы стремились показать, какие существенные результаты могут быть достигнуты при контроле свойств объектов и измерении распределений магнитных полей путем использования гистерезисных свойств материалов на примере магнитных носителей.

Цель настоящей работы — дальнейшая разработка методов гистерезисной интерференции ( $HI$ ) на магнитном носителе с петлями гистерезиса остаточного намагничивания, описываемыми зависимостями с использованием функции арктангенс для контроля объектов из электропроводящих и магнитных материалов, повышающих точность определения их удельной электропроводности  $\sigma$ , магнитной проницаемости  $\mu$ , однородности распределения  $\sigma$  и  $\mu$ , толщины и параметров дефектов сплошности в них.

Из современных методов и средств контроля электрических и магнитных свойств объектов, а также дефектов сплошности в них отметим работы с использованием магнитодинамического метода [1], магнитоиндукционного интроскопа [2] и работы по расчету поля магнитной ленты, намагниченной полем проводника с током [3].

Методы и устройства неразрушающего контроля объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях разработаны авторами в [4—9] и позволяют повысить точность контроля удельной электропроводности, дефектности и толщины объектов с использованием полученного нами явления гистерезисной интерференции магнитного поля, заключающегося в возникновении упорядоченных максимумов и минимумов распределений остаточной намагниченности магнитного носителя в результате воздействия на него разнополярными импульсами магнитного поля. Для повышения точности контроля проведены теоретические расчеты с помощью программного языка Delphi [10] распределений остаточных магнитных полей при гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля [11].

Теоретические расчеты сравнивали с экспериментальными результатами, полученными с помощью дискретных датчиков магнитного поля (ДДМП), представляющих собой параллельные магнитные полосы равной ширины, укрепленные на гибкой диэлектрической немагнитной основе на одинаковом расстоянии друг от друга.

Преимущественное направление намагничивания магнитного носителя находилось в его плоскости, так что на ДДМП производили запись максимальной величины тангенциальной составляющей  $H_{tm}$ , а сканирование ДДМП индукционной МГ осуществляли в направлении, перпендикулярном осям магнитных полос. Выход МГ был подключен к входу цифрового осциллографа, соединенного с монитором. В указанных экспериментах измеряли величину электрического напряжения  $U$ , индуцированного магнитной головкой. Величину  $H_{tm}$  находили по градуировочным характеристиками ДДМП, то есть зависимостям напряжения на выходе МГ от величины напряженности приложенного магнитного поля.

Экспериментальная установка, описанная в [7—9], позволяет создавать импульсы следующего вида: импульс длиной полволны, импульс длиной четверть волны — экспонента, импульс длиной полволны с одним обратным выбросом  $H$ , импульс длиной полволны с несколькими обратными выбросами  $H$ , линейно нарастающий импульс, трапециевидный импульс, импульс, состоящий из трех линейных участков с разными углами наклона, и другие виды импульсов.

Данные о свойствах дискретных датчиков магнитного поля, параметрах используемых импульсов магнитного поля и сравнение полученных теоретических расчетов применения гистерезисной интерференции с экспериментальными результатами измерений описаны в [7—9, 11].

Использование ДДМП позволяет определять абсолютную величину напряженности магнитного поля, которая пропорциональна амплитуде импульсов электрического напряжения на выходе МГ от краев полос ДДМП. Ширина магнитных полос используемых ДДМП составляла от  $1,5 \times 10^{-4}$  до  $5 \times 10^{-4}$  м. ДДМП могут быть изготовлены из разных магнитных материалов, обладающих гистерезисными свойствами (разные типы магнитных лент, магнитооптические пленки, пленочные флюкс-детекторы).

Благодаря большой крутизне начального участка обратной зависимости  $U(H)$  магнитного носителя и аналогичным характеристикам для других материалов, обладающих гистерезисными свойствами, использование  $HI$  позволяет повысить на порядок и больше точность контроля свойств объектов. Применение ДДМП позволяет удваивать величину измеряемого напряжения  $U$  за счет получения сигнала от обеих сторон магнитных полос и получать распределения электрического напряжения с автоматически устанавливаемым нулевым уровнем сигнала.

Экспериментальные зависимости тока линейного индуктора от времени определяли путем измерения электрического напряжения, снимаемого с измерительного сопротивления источника магнитного поля. Максимальная напряженность магнитного поля импульсов равна  $4,0 \cdot 10^4$  А/м, а их время нарастания было в пределах от  $5 \times 10^{-6}$  до  $2 \times 10^{-4}$  с. Ось линейного излучателя импульсного магнитного поля параллельна магнитным полосам ДДМП.

Используя импульсы магнитного поля с разными амплитудами и полярностями, получали распределения электрического напряжения, по которым находили гистерезисные распределения остаточных магнитных полей, соответствующие распределениям свойств объекта. Свойства объекта находили путем сравнения временных распределений  $U(t)$  с переводом их в распределения  $U(x)$ , где  $x$  — координата вдоль линии замера. Рассчитаем  $HI$  для магнитного носителя с петлями гистерезиса, описываемыми зависимостями с использованием функции арктангенс. Пусть восходящая и нисходящая ветви (рис. 1) петли гистерезиса остаточных магнитных полей, записанных на магнитном носителе и выраженных в виде зависимостей электрического напряжения  $U$  от напряженности магнитного поля  $H$ , соответствуют формулам:

$$U_1 = \arctg(y_1 + 6); \quad (1)$$

$$U_2 = \arctg(0,25y_1 + 6). \quad (2)$$

При этом зависимость величины тангенциальной составляющей  $H_t$  напряженности магнитного поля (обозначенной в расчетах через  $y_1$ ) от расстояния  $x$  до оси проекции индуктора на МН определяется по формуле

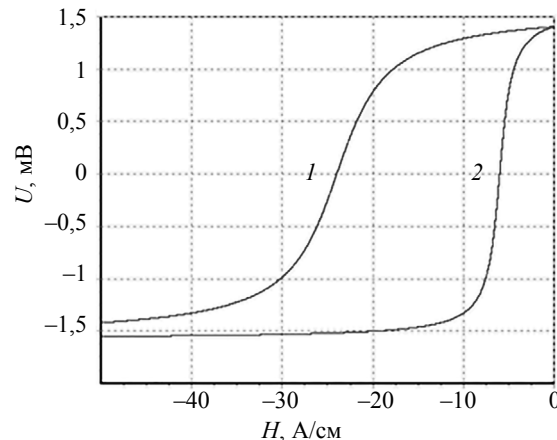


Рис. 1. Расчетная зависимость величины электрического напряжения, снимаемого с магнитной головки, от напряженности воздействующего магнитного поля  $U(H)$ : 1 — левая ветвь; 2 — правая.

$$y_1 = -36 / (x^2 + 0,36), \tag{3}$$

где  $x$  измеряется в см, а  $y_1$  — в А/см. Линейный индуктор находится на расстоянии 0,6 см от МН параллельно плоскости носителя.

Расчеты и построения графиков произведены с помощью программного языка Delphi. График функции воздействующего магнитного поля показан на рис. 2.

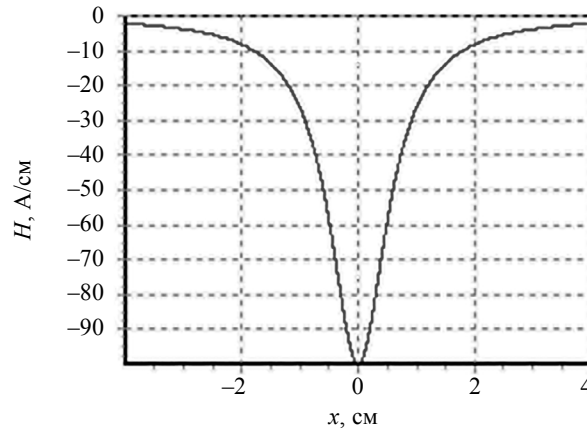


Рис. 2. Зависимость величины тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля от расстояния  $x$  до проекции оси линейного излучателя.

Если ветви гистерезиса магнитного носителя при каждом воздействии изменяются путем их смещения и изменения амплитуды воздействующих импульсов и установлены в последовательности  $y_1, 0,7y_1, 0,5y_1, 0,25y_1, 0,125y_1, 0,0625y_1$ , тогда для соответствующих функций получаем интерференционные картины  $U(x)$ , изображенные на рис. 3—6.

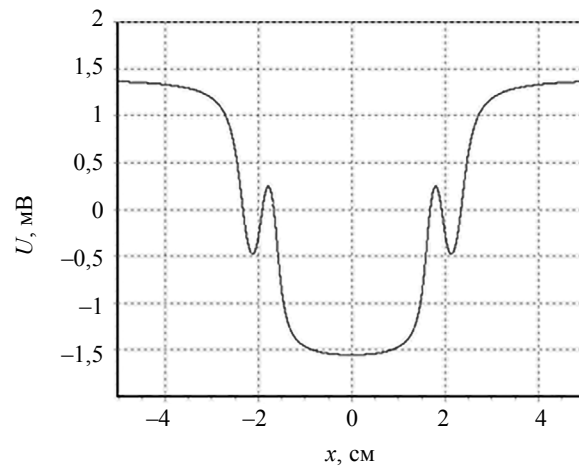


Рис. 3. Рассчитанная по формуле (4) гистерезисная интерференционная картина  $U(x)$ .

$$U_3 = \text{arctg}(y_1+6) - \text{arctg}(0,7y_1+6) + \text{arctg}(0,5y_1+6); \tag{4}$$

$$U_4 = \text{arctg}(y_1+6) - \text{arctg}(0,7y_1+6) + \text{arctg}(0,5y_1+6) - \text{arctg}(0,25y_1+6); \tag{5}$$

$$U_5 = \text{arctg}(y_1+6) - \text{arctg}(0,7y_1+6) + \text{arctg}(0,5y_1+6) - \text{arctg}(0,25y_1+6) + \text{arctg}(0,125y_1+6); \tag{6}$$

$$U_6 = \text{arctg}(y_1+6) - \text{arctg}(0,7y_1+6) + \text{arctg}(0,5y_1+6) - \text{arctg}(0,25y_1+6) + \text{arctg}(0,125y_1+6) - \text{arctg}(0,9y_1+6); \tag{7}$$

$$U_7 = \operatorname{arctg}(y_1+6) - \operatorname{arctg}(0,7y_1+6) + \operatorname{arctg}(0,5y_1+6) - \operatorname{arctg}(0,25y_1+6) + \operatorname{arctg}(0,125y_1+6) - \\ - \operatorname{arctg}(0,09y_1+6) + \operatorname{arctg}(0,07y_1+6). \quad (8)$$

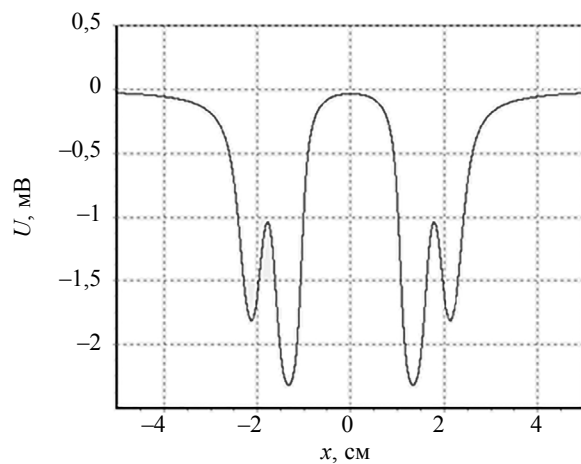


Рис. 4. Рассчитанная по формуле (5) гистерезисная интерференционная картина  $U(x)$ .

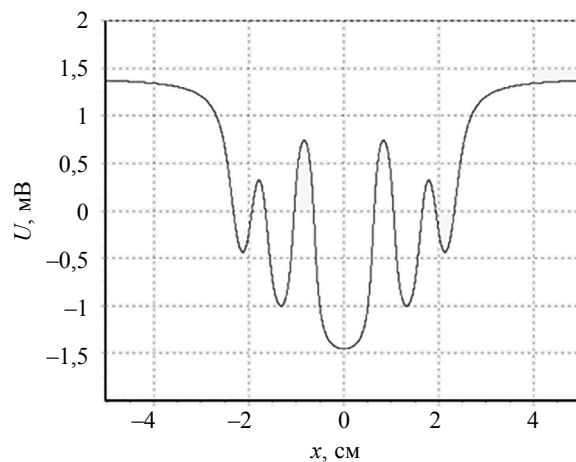


Рис. 5. Рассчитанная по формуле (6) гистерезисная интерференционная картина  $U(x)$ .

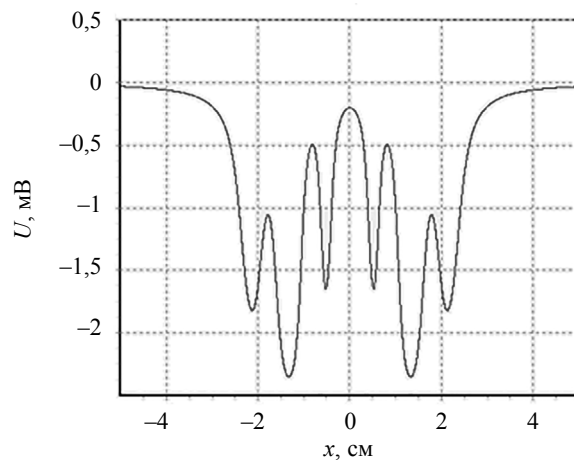


Рис. 6. Рассчитанная по формуле (7) гистерезисная интерференционная картина  $U(x)$ .

Покажем, как с помощью разработанной методики можно определять свойства объектов. При воздействии импульсами магнитного поля на электропроводящий объект величина напряженности

суммарного магнитного поля на его поверхности увеличивается за счет поля индукционных токов. Начальный участок зависимости величины напряженности вторичного магнитного поля от толщины объекта является квазилинейным [7—9]. Таким образом, по гистерезисной интерференционной картине  $U(x)$  можно определять  $\sigma$  материала объекта, его толщину, разнотолщинность, неоднородность распределения  $\sigma$  и  $\mu$ .

Пусть в момент времени, соответствующий действию седьмого импульса поля, величина напряженности этого поля увеличилась на 0,14 от начальной величины, тогда вместо члена  $0,07y_1$  запишем  $0,08y_1$ . Полученное расчетное распределение

$$U_8 = \operatorname{arctg}(y_1+6) - \operatorname{arctg}(0,7y_1+6) + \operatorname{arctg}(0,5y_1+6) - \operatorname{arctg}(0,25y_1+6) + \operatorname{arctg}(0,125y_1+6) - \operatorname{arctg}(0,09y_1+6) + \operatorname{arctg}(0,08y_1+6) \quad (9)$$

изображено на рис. 8.

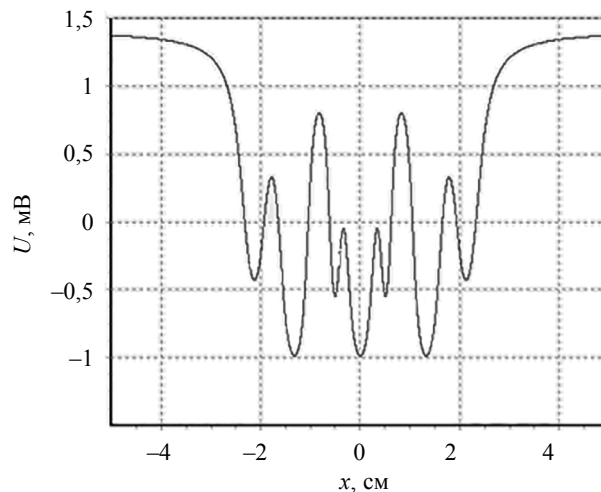


Рис. 7. Рассчитанная по формуле (8) гистерезисная интерференционная картина  $U(x)$ .

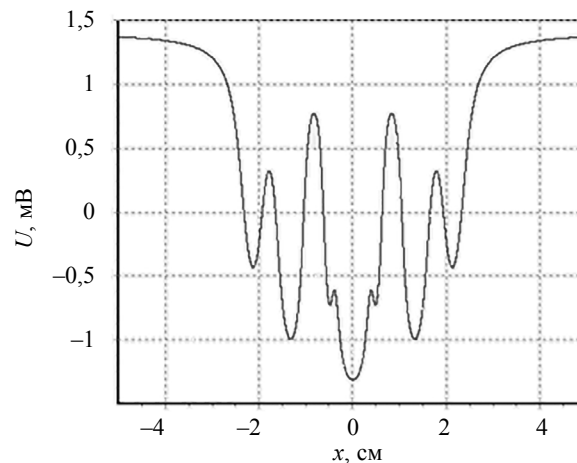


Рис. 8. Рассчитанная по формуле (9) гистерезисная интерференционная картина  $U(x)$ .

Сравнение графиков на рис. 7 и 8 показывает, что увеличению  $H$  на 0,14 соответствует уменьшение главного максимума интерференционной картины при  $x = 0$  в полтора раза (0,95 и 0,65 мВ).

Пусть в момент времени, соответствующий действию шестого импульса поля, величина напряженности этого поля уменьшилась на 0,11 от начальной величины, тогда вместо члена  $0,09y_1$  запишем  $0,08y_1$ . Полученное расчетное распределение

$$U_9 = \arctg(y_1+6) - \arctg(0,7y_1+6) + \arctg(0,5y_1+6) - \arctg(0,25y_1+6) + \arctg(0,125y_1+6) - \\ - \arctg(0,08y_1+6) + \arctg(0,07y_1+6) \quad (10)$$

изображено на рис. 9.

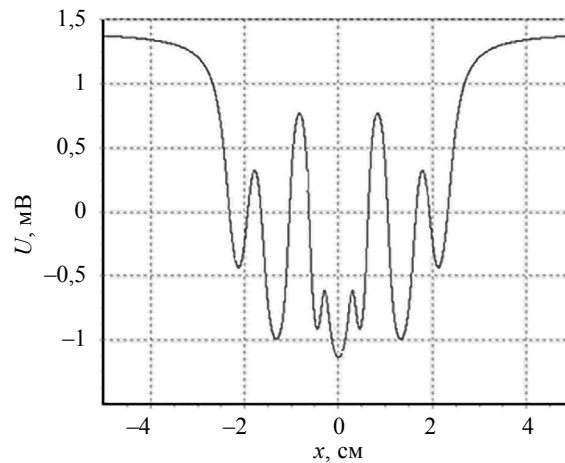


Рис. 9. Рассчитанная по формуле (10) гистерезисная интерференционная картина  $U(x)$ .

Сравнение графиков на рис. 7 и 9 показывает, что уменьшению  $H$  на 0,11 соответствует уменьшение главного максимума интерференционной картины при  $x = 0$  в 2,1 раза (0,95 и 0,45 мВ).

Определяя разработанным методом величину вторичного магнитного поля и применяя при расчетах указанные квазилинейные зависимости напряженности магнитного поля вторичного источника от толщины объекта, находим толщину этого объекта из электропроводящего материала с точностью на порядок выше, чем при измерениях без использования  $HI$ . Точность контроля может быть еще значительно повышена. Из рис. 2 [5] следует, что для импульса со временем нарастания  $t_{\max} = 4,2 \times 10^{-6}$  с уменьшению напряженности вторичного поля с  $20 \times 10^2$  до  $17,8 \times 10^2$  А/м, то есть на 11 %, соответствует уменьшение толщины алюминиевой пластины с  $1,5 \times 10^{-5}$  до  $1,35 \times 10^{-5}$  м, что составляет 10 %. Как указано выше, при использовании гистерезисных свойств МН произошло уменьшение главного максимума интерференционной картины в 2,1 раза.

Таким образом, при воздействии на объект (с приложенным к нему магнитным носителем) импульсным магнитным полем, состоящим из серии импульсов с чередующейся полярностью, можно значительно повысить точность измерения распределения магнитных полей и точность контроля свойств электропроводящих объектов. Для этого воздействуют дополнительным импульсным магнитным полем, позволяющим определить параметры объекта в моменты действия одного и двух конечных импульсов, выражаемых функцией арктангенс указанной серии. Это дополнительное поле вместе с полем соответствующего импульса позволяет разрешать свойства объекта по глубине.

Разработанные методики могут быть использованы не только для исследования магнитных явлений, но и для расчета любых процессов. Это относится к распределениям магнитных, электрических и других полей, в том числе и упругих, а также явлений разной природы. Для этого необходимо использовать любые носители гистерезисных свойств и с их помощью определять характеристики объектов, чьи гистерезисные свойства пренебрежимо малы.

## ВЫВОДЫ

1. Приведены результаты расчетов распределений электрического напряжения  $U(x)$ , снимаемого с преобразователя магнитного поля по линии замера, при гистерезисной интерференции импульсного магнитного поля ( $HI$ ). Используются гистерезисные свойства остаточных магнитных полей магнитного носителя, описываемые зависимостями в виде арктангенса. Графики рассчитаны с помощью программного языка Delphi.

2. Показано, что при воздействии на объект с приложенным к нему магнитным носителем, гистерезисные свойства которого могут быть описаны функцией арктангенс, импульсным магнитным полем, состоящим из серии импульсов с чередующейся полярностью, точность измерения распределения магнитных полей и точность контроля свойств электропроводящих объектов могут быть повышены при измерениях напряженности воздействующего на объект дополнительного магнитного поля в моменты действия одного и двух конечных импульсов указанной серии.

3. Полученные теоретические расчеты явления  $HI$  позволяют повысить точность контроля толщины электропроводящих объектов, определения их удельной электропроводности  $\sigma$  и магнитной проницаемости  $\mu$ , однородности распределения  $\sigma$  и  $\mu$ , а также параметров дефектов сплошности в объектах.

4. Разработанные методики могут быть использованы для расчета любых процессов, гистерезисные свойства которых выражены зависимостями в виде арктангенса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лухвич А.А., Шарандо В.И., Шукевич А.К., Янушкевич К.И. Выявление ферромагнитной составляющей в нержавеющей стали магнитодинамическим методом // Дефектоскопия. 2015. № 3. С. 3—10.
2. Суханов Д.Я., Совпель Е.С. Магнитоиндукционный интроскоп для дефектоскопии металлических объектов // Дефектоскопия. 2015. № 5. С. 56—62.
3. 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.
4. 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.
5. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях // Дефектоскопия. 2010. № 11. С. 29—40.
6. Дорошевич Е.С., Павлюченко В.В. Способ магнитоимпульсного контроля дефектности, а также электрических и магнитных свойств объекта из магнитного или немагнитного электропроводящего материала. Патент 17626 Респ. Беларусь, МПК С1 ВУ, G 01 N 27/72; заявитель БНТУ, № а20111027; заявл. 22.07.2011; опубл. 30.10.2013 // Афіцыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2013. № 5. С. 127,128.
7. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Одним импульсом. LAP LAMBERT Academic Publishing: Saarbrücken, 2013. 174 с.
8. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Неразрушающий контроль объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях // Дефектоскопия. 2010. № 11. С. 29—40.
9. Павлюченко В.В., Дорошевич Е.С. Использование магнитного гистерезиса при контроле объектов из электропроводящих материалов в импульсных магнитных полях // Дефектоскопия. 2013. № 6. С. 53—68.
10. Фленов М. Библия Delphi. СПб: БХВ-Петербург, 2011. 688 с.
11. 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.