

ГИСТЕРЕЗИСНАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ПОЛЕЙ ДЕФЕКТОВ

© 2025 г. В.В. Павлюченко¹, Е.С. Дорошевич^{1,*}

¹Белорусский Национальный Технический Университет, Беларусь 220013 Минск,
пр-т Независимости, 65
E-mail: *ess.doroshevich@gmail.com

Поступила в редакцию 15.01.2025; после доработки 15.01.2025
Принята к публикации 21.01.2025

Представлены расчетные начальные и гистерезисные ветви электрического напряжения $U(H)$ в импульсном магнитном поле напряженностью H , соответствующие ветвям намагниченности в действующем магнитном поле и остаточной намагниченности объекта из ферромагнитного материала, и аналогичные ветви используемого магнитного носителя (МН). Воздействие на объект с МН осуществляли импульсами магнитного поля с получением стационарных состояний намагниченности объекта с внутренним дефектом, поле которого моделировано полем линейного индуктора, построением пространственных распределений гистерезисных интерференций (HI) и созданием программ расчета HI , позволяющих повысить точность контроля свойств объектов.

Ключевые слова: гистерезисная интерференция, ферромагнитный материал, импульсное магнитное поле.

HYSTERESIS INTERFERENCE OF DEFECT FIELDS

© 2025 V.V. Pavlyuchenko¹, E. Doroshevich^{1,*}

¹Belarusian National Technical University,
Belarus 220013 Minsk, Nezavisimosti Ave., 65
E-mail: *ess.doroshevich@gmail.com

The calculated initial and hysteresis branches of the electric voltage $U(H)$ in a pulsed magnetic field of strength H are presented, corresponding to the branches of magnetization in the operating magnetic field and the residual magnetization of an object made of ferromagnetic material and similar branches of the used magnetic carrier (MC). The impact on an object with MN was carried out by magnetic field pulses to obtain stationary states of magnetization of an object with an internal defect, the field of which is modeled by the field of a linear inductor, the construction of spatial distributions of hysteretic interference (HI) and the creation of programs for calculating HI , which made it possible to increase the accuracy of monitoring the properties of objects.

Keywords: hysteresis interference, ferromagnetic material, pulsed magnetic field.

DOI: 10.31857/S0130308225020035

ВВЕДЕНИЕ

Гистерезисные интерференции, полученные авторами экспериментально и рассчитанные теоретически, представлены во многих работах, в частности в [1—6]. Полученные на основе разработанного нами дискретного датчика магнитного поля (ДДМП), состоящего из параллельных полос магнитного носителя (МН), экспериментальные гистерезисные интерференционные картины показаны в [1]. Там же представлены экспериментальные зависимости максимальной напряженности вторичного импульсного магнитного поля вблизи поверхности металлических пластин от их толщины.

В [2] приведены теоретические расчеты гистерезисной интерференции (HI) электрического напряжения, снимаемого с преобразователя магнитного поля, с использованием экспериментальных данных и аппроксимированием участков зависимости величины сигнала от толщины объекта. Гистерезисная интерференция магнитного поля, перемещаемого в пространстве линейного индуктора с перекрытием зон контроля, представлена в [3].

Толщину пластины из алюминия определяли с помощью серии импульсов магнитного поля, формирующих картины HI сигнала, снимаемого с магнитной головки (МГ) [4]. HI перекрывающихся во времени импульсов магнитного поля [5] учитывает переходные процессы распространения электромагнитных волн. Изученный авторами дифференциальный фон электрического сигнала [6] при считывании МГ позволяет выделять сигналы полей различных источников, записанных на магнитном носителе.

Расширение возможности HI может быть осуществлено по многочисленным направлениям. Одно из них состоит в том, что путем анализа построенных гистерезисных ветвей выделяют их участки, на которых может быть получена дополнительная информация о свойствах объекта с помощью других методов контроля. Например, магнитографический метод [7—9] может быть использован для уточнения параметров дефектов с оптимальным выбором участков гистерезис-

ных ветвей с дополнительными воздействиями на объекты магнитными полями с разными характеристиками. На различных участках ветвей можно применять и дорабатывать теоретические расчеты и экспериментальные данные полей дефектов [10—12].

Таким методом может быть также контроль с использованием скачков Баркгаузена. Отметим одни из основополагающих работ по изучению скачкообразного смещения доменных границ [13—18] и более позднюю работу [19]. Так, при применении указанного метода следует учитывать, что длительные скачки коррелируют с механическими напряжениями [14]. Особое внимание уделим связи между эффектом Баркгаузена и величиной остаточного намагничивания [18], что может быть использовано при построении картин HI в выбранных точках ветвей остаточной намагниченности и воздействии на объект в этих точках медленно изменяющимися во времени магнитными полями. Использование скачков Баркгаузена позволяет находить структурные неоднородности как сопутствующие дефектам сплошности, так и отдельно взятые. Повысить точность измерений позволит HI , дополненная вихретоковыми измерениями, описанными во многих работах, например, в [20—22], а также наша работа [23], где поля дефектов в импульсных магнитных полях записывали на МН.

Подчеркнем, что авторы применяли импульсное воздействие на МН с неферромагнитным объектом и определяли свойства объекта с использованием найденных ими ветвей (не петель) перемагничивания МН. Исходными точками всех этих ветвей являлись точки предшествующих остаточных ветвей.

В данной работе ставится задача нахождения оптимальных параметров импульсов магнитного поля для контроля дефектов ферромагнитного объекта с использованием ветвей перемагничивания МН и ветвей перемагничивания самого контролируемого объекта с формированием гистерезисных интерференций сигнала и созданием программ их расчета с целью повышения точности контроля дефектов и структурных неоднородностей объекта.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Сначала зададим свойства контролируемого объекта. Воздействуем на размагниченный объект из ферромагнитного материала импульсом магнитного поля и путем измерения магнитных полей и расчетов определим намагниченность материала объекта. Введем в соответствие величине намагниченности величину электрического напряжения U в прямой пропорции. В результате воздействия на объект импульсами магнитного поля одного направления и разной максимальной напряженности H получаем зависимость $U(H)$ в действующем поле и аналогичную остаточную зависимость, которые являются прямыми начальными ветвями объекта. Воздействуя на намагниченный объект импульсами магнитного поля, находим также гистерезисные ветви $U(H)$ в прямом направлении. Таким же образом получаем начальную и гистерезисные ветви напряжения при воздействии на объект полем в обратном направлении. Так находим прямые и обратные ветви сигнала в действующем поле и остаточные прямые и обратные начальные и гистерезисные ветви объекта. Пусть эти ветви описываются аналитическими функциями (1)—(8).

Прямая U_{01} и обратная U_{02} начальные ветви:

$$U_{01} = 14 + 29,4 \operatorname{Arctan}(0,04H_1 - 0,515), H_1 \geq 0; \quad (1)$$

$$U_{02} = -14 + 29,4 \operatorname{Arctan}(0,04H_1 + 0,515), H_1 \leq 0. \quad (2)$$

Прямая U_{03} и обратная U_{04} начальные остаточные ветви:

$$U_{03} = 9,5 + 20 \operatorname{Arctan}(0,04H_{11} - 0,515), H_{11} \geq 0; \quad (3)$$

$$U_{04} = -9,5 + 20 \operatorname{Arctan}(0,04H_{11} + 0,515), H_{11} \leq 0. \quad (4)$$

Обратная U_{05} и прямая U_{06} гистерезисные ветви:

$$U_{05} = -14 + 0,457U_{03} + (29,4 + 0,3U_{03}) \operatorname{Arctan}((0,04 + 0,00053U_{03})H_2 + 0,515 + 0,016U_{03}), H_2 \leq 0; \quad (5)$$

$$U_{06} = 14 + 0,457U_{03} + (29,4 - 0,3U_{03}) \operatorname{Arctan}((0,04 - 0,00053U_{03})H_2 - 0,515 + 0,016U_{03}), H_2 \geq 0. \quad (6)$$

Обратная U_{07} и прямая U_{08} гистерезисные остаточные ветви:

$$U_{07} = -9,5 + 0,457U_{03} + (20 + 0,3U_{03}) \operatorname{Arctan}((0,04 + 0,0007U_{03})H_{21} + 0,515 + 0,024U_{03}), H_{21} \leq 0; \quad (7)$$

$$U_{08} = 9,5 + 0,457U_{03} + (20 - 0,3U_{03}) \operatorname{Arctan}((0,04 - 0,0007U_{03})H_{21} - 0,515 + 0,024U_{03}), H_{21} \geq 0. \quad (8)$$

Здесь последовательности движения по ветвям следующие: $U_{01} \rightarrow U_{03} \rightarrow U_{05} \rightarrow U_{07}$ и $U_{02} \rightarrow U_{04} \rightarrow U_{06} \rightarrow U_{08}$.

Ветви $U(H)$ материала объекта представлены на рис. 1. Здесь кривым 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 соответствуют следующие зависимости: $U_{01}, U_{02}, U_{03}, U_{04}, U_{05}, U_{06}, U_{07}, U_{08}$. На рис. 1 обозначена также исходная точка 9 начальной прямой и обратной ветвей $U(H)$ в действующем поле и аналогичных остаточных ветвей. Здесь также обозначены исходные точки 10 (35,5 мВ) и 11 (-20 мВ) обратных и прямых гистерезисных ветвей. При этом в действующем поле напряженности 100 А/см соответствует величина электрического напряжения 52,5 мВ.

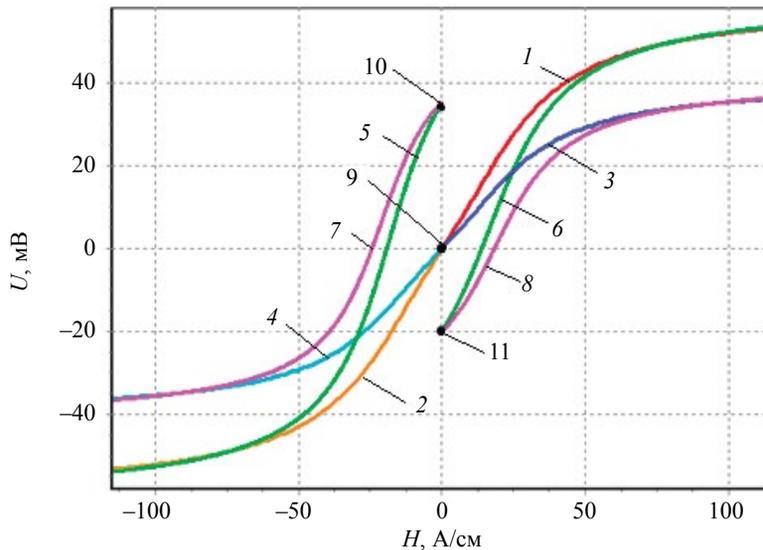


Рис. 1. Прямые и обратные ветви $U(H)$ материала объекта в действующем поле и в режиме остаточного намагничивания.

Теперь выберем модель поля дефекта. Исследуемый объект содержит внутренний дефект сплошности (или структурную неоднородность). Суммарное поле на поверхности объекта состоит из векторной суммы внешнего поля и поля дефекта, которое может быть описано различными функциями, полученными на основании экспериментальных данных или теоретических расчетов.

Пусть тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля дефекта на поверхности объекта соответствует полю линейного индуктора:

$$H = A / (x^2 + b^2), \quad (9)$$

где b — расстояние от этой оси до ее проекции на плоскость измерения. Расстояния x и b измеряются в см, величина H — в А/см и коэффициент A — в А·см. Пусть расстояние $b = 0,6$ см.

Будем считать, что напряженность магнитного поля дефекта прямо пропорциональна намагниченности материала объекта на бездефектном участке, т.е. величине сигнала на этом участке, и составляет

$$H_d = 0,2mU, \quad (10)$$

где U — величина электрического напряжения, соответствующая намагниченности материала бездефектного участка объекта, в мВ; m — единичный коэффициент размерности, выраженный в А/см·мВ. Напряженность поля дефекта H_d измеряется в А/см. При этом величина сигнала U прямо пропорциональна намагниченности материала в действующем поле.

Найдем циклы перемагничивания объекта. Воздействуем на объект первым импульсом магнитного поля с максимальной напряженностью 100 А/см.

Из размагниченного состояния объекта 1 (рис. 2) по начальной прямой ветви 1—2 в действующем поле (1) при напряженности 100 А/см попадаем в точку 2 (52,5 мВ), а по окончании действия импульса поля в точку 4 начальной прямой остаточной ветви 1—4 (3) и далее в точку 6 на оси ординат.

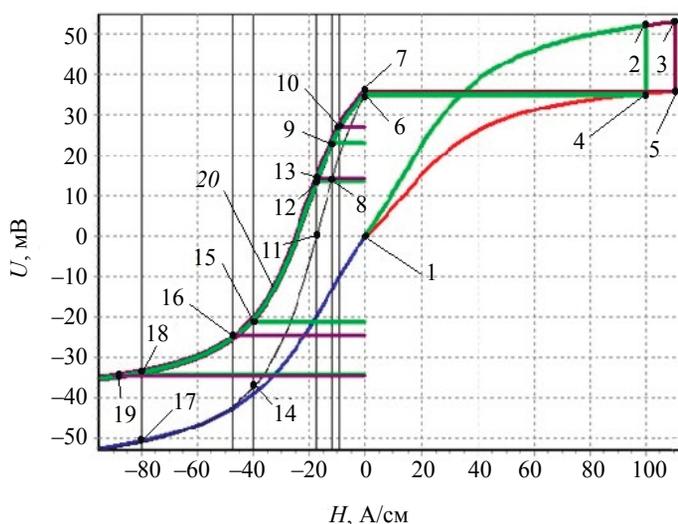


Рис. 2. Циклы напряжения $U(H)$ объекта в действующем поле и в режиме остаточного намагничивания.

Находим напряженность поля дефекта по (10) для бездефектного участка, равную 10,5 А/см, суммарную напряженность для дефектного участка — 110,5 А/см, попадаем в т. 3 (53 мВ) и по окончанию импульса перемещаемся в точки 5 и 7 (35,9 мВ). Сигнал бездефектного участка 35,3 мВ, максимальный сигнал поля дефекта 0,6 мВ.

Воздействуем на объект **вторым импульсом** магнитного поля с максимальной напряженностью -12 А/см и из состояния 6 (35,3 мВ) по обратной гистерезисной ветви в действующем поле (5) попадаем в 8 (13 мВ) и по окончании импульса — в 9 (23 мВ) обратной гистерезисной ветви 6—9 (7). Отсюда находим напряженность поля дефекта $-2,6$ А/см, вычитая которую из напряженности приложенного импульса, получаем $-9,4$ А/см и соответствующую ей величину сигнала в 10 (27 мВ). Сигнал бездефектного участка 23 мВ, максимальный сигнал поля дефекта 4 мВ. Если произвести воздействие на объект вторым импульсом с напряженностью $-17,4$ А/см, то попадаем в 11, где намагниченность объекта в бездефектной зоне равна нулю, а, значит, сигналы в остаточном режиме бездефектного и дефектного участков соответствуют точкам 12 (13,8 мВ) и 13 (14,2 мВ). Сигнал бездефектного участка 13,8 мВ, максимальный сигнал поля дефекта 0,4 мВ.

При **втором импульсе** -40 А/см получаем для бездефектного и дефектного участков соответственно $-21,2$ мВ (т. 15) и $-24,3$ мВ (т. 16; $-47,4$ А/см) с учетом сигнала -37 мВ в т. 14. Сигнал бездефектного участка $-21,2$ мВ, максимальный сигнал поля дефекта $-3,2$ мВ.

При **втором импульсе** -80 А/см получаем -34 мВ (т. 18) и $-34,5$ мВ (т. 19; -90 А/см) с учетом сигнала -50 мВ в т. 17. Сигнал бездефектного участка -34 мВ, максимальный сигнал поля дефекта $-0,5$ мВ.

Теперь найдем распределения сигнала по координате x в перпендикулярном к оси дефекта направлении. Используя формулу (9), получим зависимости, показанные на рис. 3 для разных полей импульсов: 1 — только прямой импульс 100 А/см, для всех последующих зависимостей воздействие двумя импульсами, первый из которых прямой 100 А/см, а вторые, обратные 2, — (-12 А/см), 3 — ($-17,4$ А/см), 4 — ($-28,4$ А/см), 5 является зеркальной зависимостью 4, 6 — (-40 А/см), 7 — (-80 А/см). Здесь также показано оптическое изображение 8, ограниченное кривыми 4 и 5 и соответствующее уровню белого.

В качестве примера **приводим часть программы для расчета** кривой 7 на рис. 3 для первого импульса $H_1 = 100$ А/см и второго $H_2 = -80$ А/см:

$$H_1 = 100;$$

$$H_{11} = 100 + 0,072U_{011} / (x^2 + 0,36);$$

$$H_2 = -80;$$

$$U_{011} = 14 + 29,4 \operatorname{Arctan} (0,04 H_1 - 0,515);$$

$$U_{011m} = 52,5;$$

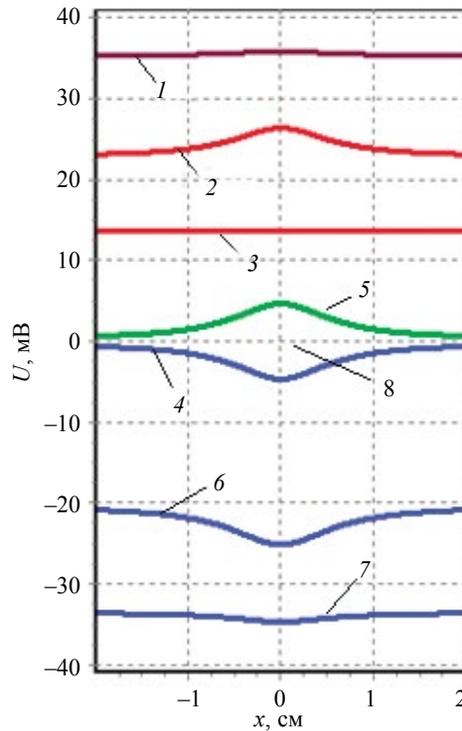


Рис. 3. Распределения сигнала $U(x)$ объекта 1 — 7 и оптическое изображение сигнала 8.

$$U_{03} = 9,5 + 20 \operatorname{Arctan} (0,04 H_{11} - 0,515);$$

$$U_{013} = -14 + 0,457 \cdot U_{03} + (29,4 + 0,3 U_{03}) \operatorname{Arctan} ((0,04 + 0,00053 U_{03}) H_2 + 0,515 + 0,0016 U_{03});$$

$$U_{013m} = -50;$$

$$H_{21} = -80 + 0,072 U_{013} / (x^2 + 0,36);$$

$$U_{03m} = 35,9;$$

$$U_{21} = -9,5 + 0,457 U_{03} + (20 + 0,3 U_{03}) \operatorname{Arctan} ((0,04 + 0,0007 U_{03}) H_{21} + 0,515 + 0,024 U_{03}),$$

где H_{11} и H_{21} — суммарные напряженности магнитного поля на поверхности объекта при первом и втором импульсах. Здесь U_{011} — прямая начальная ветвь для участка объекта без дефекта; $U_{011m} = 52,5$ — максимальная величина U_{011} ; U_{03} — прямая начальная остаточная ветвь для участка с дефектом; U_{013} — обратная гистерезисная ветвь для участка без дефекта; $U_{013m} = -50$ — минимальная величина U_{013} при $H_2 = -80$; U_{21} — обратная остаточная гистерезисная ветвь для участка с дефектом; U_{03m} — минимальная величина U_{03} при $H_2 = -80$; $U_{03m} = 35,9$ — максимальная исходная точка зависимости U_{21} .

При воздействии на объект прямым импульсом 100 А/см, а затем обратным импульсом, **остаточная намагниченность материала объекта на дефектном участке меняет полярность** с уменьшением напряженности магнитного поля при втором импульсе с $-17,4$ А/см, достигает максимальной величины в интервале полей от -30 А/см до -40 А/см (это оптимальные напряженности при контроле остаточной намагниченности объекта) и стремится к нулю в полях меньше -80 А/см.

Из рис. 3 следует, что **максимальная точность определения поля дефекта** по остаточной намагниченности материала объекта может быть достигнута в поле $-28,4$ А/см (зависимость 4), где сигнал на бездефектном участке близок к 0, т.е. материал размагничен. Относительная погрешность при этом определяется ценой деления измерительного прибора и диапазоном измерения.

Найдено, что при воздействии двумя импульсами, первый из которых прямой 100 А/см, а второй обратный $-17,4$ А/см, **поверхность остаточно намагниченного объекта не содержит информации о дефекте** (см. рис. 3, зависимость 3), так как величина сигнала не зависит от x и составляет приблизительно 14 мВ.

Найдем циклы $U(H)$ напряжения МН, соответствующие циклам его перемагничивания. На объект с МН воздействуем двумя импульсами магнитного поля, считаем информацию с МН и получим ветви $U(H)$ магнитного носителя.

Начальную остаточную ветвь применяемого МН для первого (прямого) импульса описываем найденной нами ранее [2] формулой:

$$U_{11} = 23,5 + 24,3 \operatorname{Arctan}(0,011H_1 - 1,45). \quad (11)$$

Здесь электрическое напряжение U_1 выражено в милливольтгах, а напряженность магнитного поля H_1 — в А/см.

При воздействии вторым (обратным) импульсом магнитного поля используем следующую остаточную гистерезисную ветвь [2]:

$$U_{21} = -23,5 + 0,61U_1 + (24,3 + 0,42U_1) \operatorname{Arctan}((0,011 + 0,000087U_1)H_2 + 1,45 - 0,0016U_1). \quad (12)$$

В результате воздействия на МН с объектом двумя импульсами, первый из которых 100 А/см, а вторые импульсы имеют разные параметры, получаем следующие циклы напряжения МН, изображенные на рис. 4 для бездефектного участка объекта: <1, 2, 3, 4> (второй импульс –12 А/см); <1, 2, 3, 5> (–17 А/см); <1, 2, 3, 6> (–40 А/см); <1, 2, 3, 7> (–80 А/см); <1, 2, 3, 8> (–100 А/см). Для участка с дефектом при первом суммарном импульсе 110,5 А/см получены следующие циклы: <1, 9, 10, 11> (второй импульс –9,4 А/см); <1, 9, 10, 12> (–17 А/см); <1, 9, 10, 13> (–47,4 А/см); <1, 9, 10, 14> (–90 А/см); <1, 9, 10, 15> (–110,5 А/см).

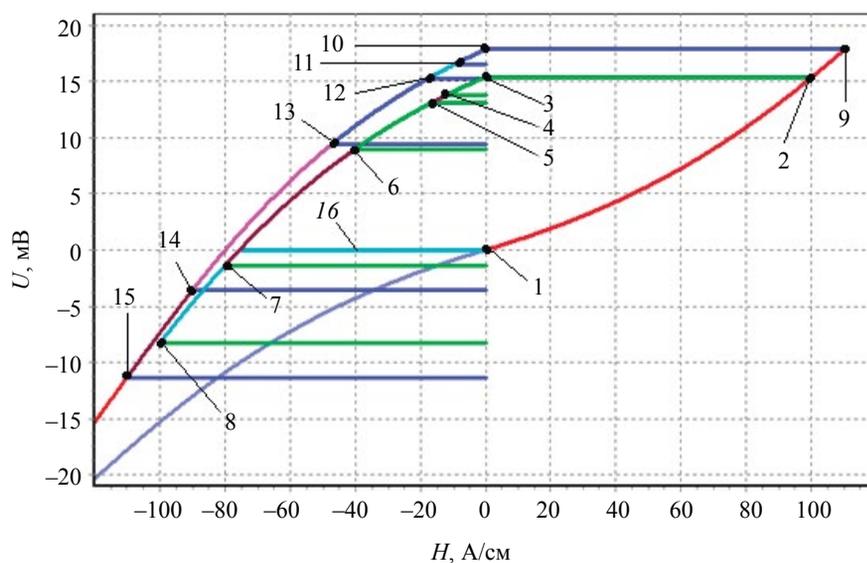


Рис. 4. Циклы напряжения $U(H)$ МН в режиме остаточного намагничивания.

Найдем распределения сигнала $U(x)$ МН вдоль координаты x . На рис. 5 показаны $U(H)$, полученные при воздействии на объект с МН первым прямым импульсом полем I суммарной напряженностью 110,5 А/см, а также последующими вторыми импульсами с указанными суммарными напряженностями: 2 (–9,4 А/см), 3 (–17,4 А/см), 4 (–47,4 А/см), 5 (–75 А/см), 6 (–90 А/см), 7 (–110,5 А/см). Здесь же показано оптическое изображение распределения $U(x)$, состоящее из двух частей 9 и 10, соответствующее распределению остаточной намагниченности и построенное на распределении 5 и зеркальном к нему относительно оси $U = 0$ распределении 8.

В случае прямо пропорциональной зависимости между величиной сигнала магнитной головки и величиной остаточной намагниченности МН изображение 9 — 10 соответствует получаемому распределению сигнала с дискретного датчика магнитного поля [1], построенному по огибающим линиям дискретной зависимости $U(x)$.

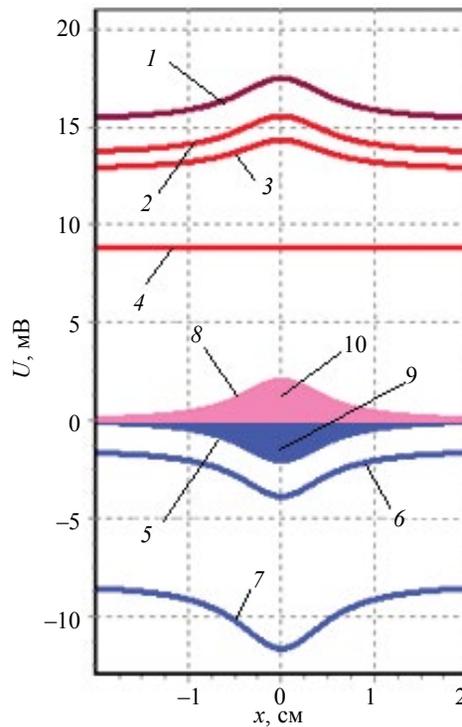


Рис. 5. Распределения сигнала $U(x)$ МН 1 — 8 и оптическое изображение сигнала 9, 10.

Приводим часть программы для расчета кривой 6 на рис. 5:

$$H_1 = 100;$$

$$H_{11} = 100 + 0,072 U_{011} / (x^2 + 0,36);$$

$$H_2 = -80;$$

$$U_{011} = 14 + 29,4 \operatorname{Arctan}(0,04H_1 - 0,515);$$

$$U_{03} = 9,5 + 20 \operatorname{Arctan}(0,04H_{11} - 0,515);$$

$$U_{11} = 23,5 + 24,3 \operatorname{Arctan}(0,011H_{11} - 1,45);$$

$$U_{013} = -14 + 0,457 U_{03} + (29,4 + 0,3U_{03}) \operatorname{Arctan}((0,04 + 0,00053U_{03})H_2 + 0,515 + 0,0016U_{03});$$

$$H_{21} = -80 + 0,072 U_{013} / (x^2 + 0,36);$$

$$U_{21} = -23,5 + 0,61U_{11} + (24,5 + 0,40U_{11}) \operatorname{Arctan}((0,011 + 0,000087U_{11})H_{21} + 1,45 - 0,0016U_{11}).$$

Величины $H_1, H_{11}, H_2, H_{21}, U_{011}, U_{03}, U_{013}$ те же, что в программе для расчета кривой 7 на рис. 3.

Величины U_{11} и U_{21} характеризуют свойства МН и соответствуют (11) и (12). Заметим, что при построении графиков на рис. 5 использована зависимость $U_{011} = 14 + 23,4 \operatorname{Arctan}(0,04H_1 - 0,515)$, т.е. с измененным коэффициентом во втором члене, что не привело ни к каким принципиальным изменениям графиков.

Из рис. 5 следует, что остаточная намагниченность МН на дефектном участке **меняет полярность с уменьшением напряженности магнитного поля** при втором импульсе с $-47,4$ А/см для МН и растет, достигая максимума в поле напряженностью около -100 А/см.

Максимальная точность определения поля дефекта по остаточной намагниченности МН может быть достигнута в поле -75 А/см (рис. 5, зависимость 5), где сигнал на бездефектном участке близок к 0, т.е. магнитный носитель размагничен.

В случае записи полей на МН поле дефекта не может быть выделено на магнитном носителе при импульсах 100 А/см и $-47,4$ А/см (см. рис. 5, зависимость 4). Величина сигнала при этом

не зависит от x и составляет около 8 мВ, т.е. остаточная намагниченность участка поверхностного слоя материала объекта, обусловленная полем дефекта, отлична от намагниченности остальной части поверхности, а на МН записи поля дефекта нет.

Вместо зависимости 10 поля дефекта от величины напряжения, соответствующего намагниченности материала объекта, могут быть использованы другие зависимости, взятые из литературных источников или рассчитанные теоретически, или полученные экспериментально.

Далее в решение задачи следует внести формулы, связывающие распределения магнитных полей с размерами, формой и глубиной залегания дефектов.

Все представленные в работе зависимости соответствуют реальным распределениям полей. Например, оптическое изображение 9 — 10 на рис. 5 соответствует распределению напряженности магнитного поля дефекта без сигнала приложенного поля. Так, при сканировании дискретного датчика магнитного поля [1] с записанным на нем распределением на экране визуализатора (например, осциллографа) получается дискретное изображение сигнала с нижней и верхней огибающими, которые совпадают с кривыми 5 и 8 на рис. 5.

В работе предложена аддитивная методика расчета полей дефекта, при которой исходными данными являются магнитные свойства ферромагнитного объекта, представленные аналитическими выражениями или в табличном виде, а также выбранная модель поля дефекта. Свойства объекта описаны ветвями перемангничивания в импульсном магнитном поле с исходными точками ветвей остаточной намагниченности и записью полей дефектов на магнитный носитель в действующем поле. Характеристики МН, представленные аналогичными ветвями перемангничивания, используются только в режиме остаточного намагничивания. Параметры ветвей объекта и магнитного носителя, а также модели поля дефекта вносят в программу расчетов и получают записи суммарного действующего поля и поля дефекта на МН. Затем находят параметры импульсов магнитного поля, позволяющие обеспечить необходимое выделение поля дефекта. Последующее построение оптических изображений магнитных полей дает возможность вести обработку полученной информации путем автоматического анализа плоскостных изображений полей.

Изменение напряженности магнитного поля импульсов должно быть плавным, без выбросов, а их длительность существенно больше постоянной времени переходного процесса перемангничивания в объекте.

Связь скачков Баркгаузена с ветвями перемангничивания объекта, исходящими из состояний остаточного намагничивания. Построим зависимость $U(H)$ величины электрического напряжения U , прямо пропорционального числу скачков Баркгаузена объекта, от напряжения магнитного поля H (рис. 6). Эта зависимость $\langle 10, 14 \rangle$ соответствует прямой начальной ветви $\langle 1, 2 \rangle$ в действующем поле (1). При этом участок $\langle 10, 11 \rangle$ описывается формулой:

$$U_{10,11} = -0,5 + 20\exp(-0,01(x - 23)^2), \quad (13)$$

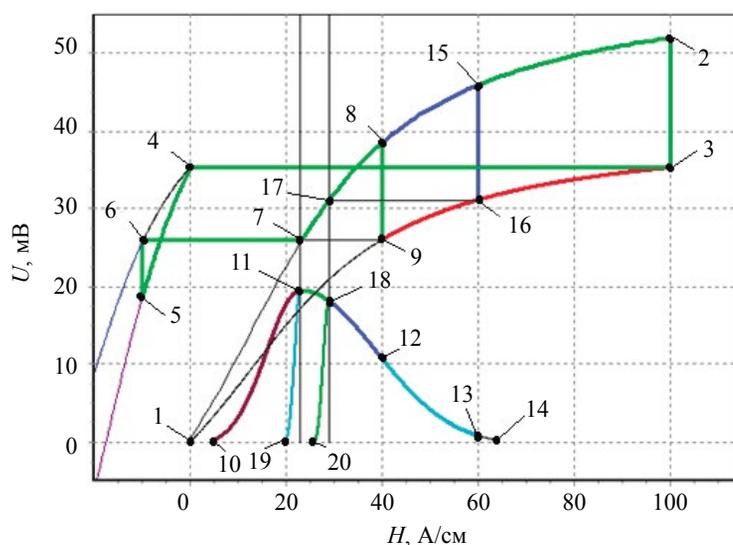


Рис. 6. Циклы напряжения $U(H)$ объекта и зависимости числа скачков Баркгаузена от H .

а участок $\langle 11, 14 \rangle$ — формулой:

$$U_{11,14} = -0,5 + 20 \exp(-0,002 (x - 23)^2). \quad (14)$$

Здесь максимуму числа СБ соответствует напряжение 20 мВ. При этом выполнены следующие условия. Максимум числа скачков соответствует области необратимых смещений доменных границ, где максимальная крутизна зависимости $U(H)$. Поле старта скачков 10 не исходит из начала координат, а поле их финиша 14 не распространяется в область парапроцесса. Зависимость $\langle 10, 14 \rangle$ получена при напряженности магнитного поля 64 А/см (и больше). Напряженностям поля 40 А/см и 60 А/см соответствуют зависимости $\langle 10, 12 \rangle$ и $\langle 10, 13 \rangle$.

Воздействуем на объект тремя импульсами магнитного поля напряженностью 100 А/см, -10 А/см и 40 А/см и получим цикл перемагничивания объекта $\langle 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 \rangle$, проходящей через точки прямой начальной ветви в действующем поле 1, 2, начальной остаточной ветви 3 (3), обратной гистерезисной ветви в действующем поле 4, 5 (5), обратной остаточной гистерезисной ветви 4, 6 (7), снова прямой начальной ветви 7, 8 (1) и снова прямой начальной остаточной ветви 9 (3).

Рассмотрим получение СБ при действии третьего импульса 40 А/см с исходным состоянием объекта в точке 6. Полярность остаточной намагниченности совпадает с полярностью первого импульса (положительные значения U). Магнитное состояние в т. 6 соответствует состоянию в т. 9. Для того, чтобы увеличить остаточную намагниченность выше т. 9 надо воздействовать на объект полем с напряженностью больше 40 А/см. Однако этой остаточной намагниченности соответствует такая же намагниченность в действующем поле, достигаемая в т. 7 зависимости $\langle 1, 2 \rangle$ (1). Значит, возрастание намагниченности объекта будет происходить в поле с напряженностью, превышающей 23 А/см, которая найдена на пересечении схематической горизонтальной линии $\langle 6, 9 \rangle$ с ветвью $\langle 1, 2 \rangle$. Таким образом, в результате воздействия третьим импульсом 40 А/см получаем скачки Баркгаузена на участке зависимости $\langle 11, 12 \rangle$. Для третьего импульса 60 А/см получаем участок $\langle 18, 13 \rangle$.

Установим связь СБ с ветвями перемагничивания объекта для случая, когда направление приложенного поля совпадает с направлением остаточной намагниченности объекта. Дальнейший анализ показывает, что параметры перемагничивания, в том числе зависимости СБ, зависят от предшествующего намагничивания объекта. Так, одиночная доменная граница (ДГ) в виде стенки Блоха со 180-градусным соседством доменов имеет разные распределения потенциальных энергетических барьеров при ее движении с разных от нее сторон. Это вызвано статистическими разбросами микродефектов по размерам, разными плотностями их распределений в пространстве и разными условиями охвата микродефектов стенкой в зависимости от направления ее движения и соседства с другими доменными структурами с разных сторон. Кроме того, ДГ находится в разных условиях при установлении ее равновесного положения при переходе из состояния в действующем поле в состояние остаточной намагниченности и при движении ДГ в нарастающем поле, а в общем случае — от всех условий предшествующего намагничивания. Из вышеизложенного следует, что СБ при третьем импульсе 40 А/см и 60 А/см появляются не в точках 11 и 18, а в некоторых точках старта 19 и 20 с изменением параметров последующих участков зависимости $\langle 11, 14 \rangle$. Все это, с одной стороны, вносит дополнительные погрешности в процесс контроля свойств объекта, а, с другой стороны, при учете всех указанных факторов позволяет наоборот повысить точность контроля.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных расчетов зависимости величины электрического напряжения объекта $U(x)$, прямо пропорционального намагниченности материала объекта, от координаты x на его поверхности с заданным на этой поверхности распределением поля дефекта, моделированным полем линейного индуктора, и аналогичной зависимости напряжения $U(x)$ магнитного носителя, полученных при воздействии на объект двумя импульсами магнитного поля, сделаны следующие выводы.

Установлено, при каких параметрах прямого и обратного импульсов поле дефекта может быть выделено на поверхности объекта с максимальной точностью в режиме остаточного намагничивания объекта.

Показаны параметры импульсов, позволяющие определять оптимальные условия контроля объекта на разных ветвях перемагничивания объекта.

Показаны параметры обратного импульса, при которых обеспечивается максимальная точность определения остаточной намагниченности материала объекта над дефектом из начального состояния, близкого к насыщению, а также параметры обратного импульса, при котором поле дефекта на поверхности объекта не может быть выявлено.

Установлено, при каких параметрах прямого и обратного импульсов поле дефекта может быть выделено с максимальной точностью при записи на магнитный носитель и при каких параметрах импульсов поле дефекта не может быть выявлено с помощью МН.

На основании анализа циклов электрического напряжения, соответствующего намагниченности материала объекта с заданными ветвями его перемагничивания в импульсном магнитном поле, и построенных схематически зависимостей числа скачков Баркгаузена от напряженности магнитного поля третьего импульса магнитного поля установлено, что в случае совпадения направлений напряженности приложенного магнитного поля и вектора намагниченности материала объекта следует учитывать отличие распределений потенциальных энергетических барьеров с двух сторон от доменных границ и отличие взаимодействия ДГ с микродефектами при возрастании действующего поля и при переходе объекта в состояние остаточного намагничивания, и тем самым повышать точность контроля объекта.

Показано, как следует составлять программы контроля объектов с использованием предложенного метода и находить их алгоритмы для определения свойств объектов с поиском оптимальных параметров магнитных полей и характеристик магнитных носителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Nondestructive control of objects made of electroconductive materials in pulsed magnetic fields // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2010. V. 46. No. 1. P. 810—818.
2. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S., Pivovarov V. L.* Calculation of residual magnetic-field distributions upon hysteretic interference of a pulsed magnetic field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. V. 51. No. 1. P. 8—16.
3. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Hysteretic Interference of Magnetic Field of a Moving Linear Inductor // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 1. P. 49—57.
4. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Imaging Electric Signals of a Magnetic Field Transducer with Hysteretic Interference for Testing Metals in Pulsed Magnetic Fields // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 11. P. 907—914.
5. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Hysteretic Interference of Time-Overlapping Magnetic Field Pulses // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 12. P. 949—956.
6. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Differential Background of Electric Signal Read from an Induction Magnetic Head // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 8. P. 706—716.
7. *Фалькевич А.С.* Магнитографический контроль сварных соединений М.: Машиностроение, 1966. 176 с.
8. *Козлов В.С.* Техника магнитографической дефектоскопии. Мн.: Вышэйшая школа, 1976. 256 с.
9. *Михайлов С.П., Щербинин В.Е.* Физические основы магнитографической дефектоскопии. М.: Наука, 1992. 238 с.
10. *Мужижцкий В.Ф.* Модель поверхностного дефекта и расчет топографии его магнитоэстетического поля // Дефектоскопия. 1987. № 3. С. 24—30.
11. *Шлеенков А.С.* Определение геометрических параметров дефектов по восстановленному магнитному полю рассеяния // Дефектоскопия. 1991. № 10. С. 49—55.
12. *Щербинин В.Е.* Поля дефектов на внутренней и наружной поверхности труб при циркулярном намагничивании // Дефектоскопия. 1972. № 2. С. 11.
13. *Харитонов Ю.Н.* Интегрирование импульсов с распределением по их длительности // Приборы и техника эксперимента. 1966. № 5. С. 227—228.
14. *Харитонов Ю.Н.* Длительные скачки Баркгаузена, вызванные механическими напряжениями // Физика металлов и металловедение. 1968. Т. 25. № 5. С. 245—246.
15. *Рудяк В.М.* Эффект Баркгаузена в ферромагнетиках // Ученые Записки Калининградского гос. пед. инст. им. М.М. Калинина. 1966. Т. 40. С. 49.
16. *Ивлев В.Ф., Прокопенко В.С.* Эффект Баркгаузена в цилиндрических пленках железа // Известия ВУЗов. 1962. № 1. С. 154—158.
17. *Ивлев В.Ф., Ильюшенко В.Л., Асеева Л.И.* Исследование необратимых скачков перемагничивания в ферромагнетиках // Известия Академии Наук. 1957. Т. 21. № 9. С. 75.
18. *Рудяк В.М.* О связи между эффектом Баркгаузена и величиной остаточного намагничивания // Доклады Академии Наук. 1965. Т. 164. № 4. С. 782.
19. *Венгринович В.Л.* Магнитошумовая структуроскопия. Мн.: Навука і тэхніка, 1991. 285 с.
20. *Астахов В.И., Данилина Э.М., Ершов Ю.К.* К вопросу о диагностике пластины с трещиной вихретоковым методом // Дефектоскопия. 2018. № 3. С. 39—49.
21. *Печенков А.Н., Щербинин В.Е.* Вихревые токи и поля проводящих и намагничивающихся шаровых включений в немагнитную среду // Дефектоскопия. 2016. № 4. С. 48—55.
22. *Новослугина А.П., Смородинский Я.Г.* Расчетный способ оценки параметров дефектов в стали // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 13—19.
23. *Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S.* Testing for Defects in Pulsed Magnetic Field Transmitted Through Metal // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 10. P. 856—864.

REFERENCES

1. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Nondestructive control of objects made of electroconductive materials in pulsed magnetic fields // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2010. V. 46. No. 1. P. 810—818.
2. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S., Pivovarov V.L. Calculation of residual magnetic-field distributions upon hysteretic interference of a pulsed magnetic field // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. V. 51. No. 1. P. 8—16.
3. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Hysteretic Interference of Magnetic Field of a Moving Linear Inductor // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 1. P. 49—57.
4. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Imaging Electric Signals of a Magnetic Field Transducer with Hysteretic Interference for Testing Metals in Pulsed Magnetic Fields // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 11. P. 907—914.
5. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Hysteretic Interference of Time-Overlapping Magnetic Field Pulses // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 12. P. 949—956.
6. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Differential Background of Electric Signal Read from an Induction Magnetic Head // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 8. P. 706—716.
7. Falkevich A.S. Magnetographic inspection of welded joints. M.: Mashinostroenie, 1966. 176 p.
8. Kozlov V.S. Magnetic flaw detection technique. Mn.: Vyshaychay shkola, 1976. 256 p.
9. Mikhailov S.P., Shcherbinin V.E. Physical basis of magnetic flaw detection. M.: Nauka, 1992. 238 p.
10. Muzhitsky V.F. Model of a surface defect and calculation of the topography of its magnetostatic field // Defektoskopiya. 1987. No 3. P. 24—30.
11. Shleenkov A.S. Determination of geometric parameters of defects from the reconstructed magnetic stray field // Defektoskopiya. 1991. No 10. P. 49—55.
12. Shcherbinin V.E. Fields of defects on the inner and outer surfaces of pipes under circular magnetization // Defektoskopiya. 1972. No. 2. P. 11.
13. Kharitonov Yu.N. Integration of pulses with distribution over their duration // Instruments and experimental technique. 1966. No 5. P. 227—228.
14. Kharitonov Yu.N. Long-term Barkhausen jumps caused by mechanical stresses // Physics of metals and metallurgy. 1968. V. 25. No 5. P. 245—246.
15. Rudyak V.M. Barkhausen effect in ferromagnets // Scientific Notes of Kaliningrad State Pedagogical University. 1966. V. 40. P. 49.
16. Ivlev V.F., Prokopenko V.S. Barkhausen effect in cylindrical iron films // News of Higher Education Institutions. 1962. No 1. P. 154—158.
17. Ivlev V.F., Ilyushenko V.L., Aseeva L.I. Study of irreversible jumps of magnetization reversal in ferromagnets // Bulletin of the Academy of Sciences. 1957. V. 21. No. 9. P. 75.
18. Rudyak V.M. On the relationship between the Barkhausen effect and the magnitude of residual magnetization // Reports of the Academy of Sciences. 1965. V. 164. No. 4. P. 782.
19. Vengrinovich V.L. Magnetic noise structuroscopy. Minsk: Science and Technology, 1991. 285 p.
20. Astakhov V.I., Danilina E.M., Ershov Yu.K. On the issue of diagnostics of a plate with a crack using the eddy current method // Defektoskopiya. 2018. No. 3. P. 39—49.
21. Pechenkov A.N., Shcherbinin V.E. Eddy currents and fields of conducting and magnetizable spherical inclusions in a non-magnetic medium // Defektoskopiya. 2016. No. 4. P. 48—55.
22. Novoslugina A.P., Smorodinsky Ya.G. Calculation method for assessing the parameters of defects in steel // Defektoskopiya. 2017. No. 11. P. 13—19.
23. Pavlyuchenko V.V., Doroshevich E.S. Testing for Defects in Pulsed Magnetic Field Transmitted Through Metal // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 10. P. 856—864.