

6. Pavlyuchenko, V. V. Differential Background of Electric Signal Read from an Induction Magnetic Head / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2021. – Vol. 57, № 8. – P. 706–716.

7. Pavlyuchenko, V.V. Testing for Defects in Pulsed Magnetic Field Transmitted Through Metal / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2021. – Vol. 57, № 10. – P. 856–864.

8. Pavlyuchenko, V. V. Pulsed Magnetic Field near Metal Surface/ V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Vol. 58, № 11. – P. 983–991.

9. Суханов, Д. Я. Магнитоиндукционный интроскоп для дефектоскопии металлических объектов / Д. Я. Суханов, Е. С. Совпель // Дефектоскопия. – 2015. – № 5. – С. 56–62.

10. Шлеенков, А. С. Оценка возможности обнаружения микродефектов сварных соединений прямошовных электросварных труб, изготовленных стыковой высокочастотной сваркой, магнитным методом контроля / А. С. Шлеенков, В. Г. Бычков, О. А. Булычев, Н. М. Лядова, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 2010. – № 2. – С. 23–29.

11. Pavlyuchenko, V. V. Hysteretic Interference Algorithms / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing, – 2023. – Vol. 59, №5. – P. 537–546.

12. Печенков, А. Н. Вихревые токи и поля проводящих и намагничивающихся шаровых включений в немагнитную среду / А. Н. Печенков, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 2016. – № 4. – С. 48–55.

УДК 620.130

### **Циклы напряжения датчика, соответствующие циклам перемагничивания объектов**

Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Представлены циклы электрического напряжения датчика  $U(H)$ , соответствующие циклам перемагничивания объекта из ферромагнитного материала. Циклы  $U(H)$ , содержащие начальные и гистерезисные остаточные ветви, получены в импульсных магнитных полях с чередующейся полярностью. Воздействие на объект осуществляли полями двух источников. Построены распределения  $U(x)$  по координате  $x$  и картины гистерезисной интерференции, позволяющие повысить точность определения структурных и магнитных свойств объекта.*

Гистерезисной интерференции магнитных полей, а также методам измерения и расчета магнитных полей посвящено значительное количество работ авторов. Так, в [1] приведены расчеты гистерезисной интерференции (НИ) 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 [2], экспериментальные гистерезисные интерференционные картины показаны в [3]. Поля дефектов в импульсных магнитных полях записывали на МН в [4]. Обработку сигналов полей, записанных на магнитном носителе, производили в соответствии с изученным нами дифференциальным фоном электрического сигнала [5]. Источниками вторичных магнитных полей являются, в частности, поля дефектов. В этой связи выделим работы [6–9], в которых изучены поля дефектов и сигналы преобразователей полей.

В данной работе и при дальнейшем развитии метода используется анализ алгоритмов метода [10] и результаты изучения распределений импульсных магнитных полей вблизи поверхности металлов [11]. Здесь также учтены вопросы, возникающие при разработке магнитоиндукционного интроскопа [12].

Использование нескольких внешних источников магнитного поля и внутренних источников вторичных магнитных полей может значительно повысить уровень информации о свойствах объектов.

Целью работы является получение гистерезисных интерференций электрических сигналов, характеризующих ветви намагничивания объекта при одновременном воздействии на объект однородным импульсным магнитным полем и полем локального источника для повышения точности контроля на заданных участках объекта.

Воздействуем на размагниченный объект из ферромагнитного материала импульсами магнитного поля разной максимальной напряженности с измерениями максимальной намагниченности материала в действующем поле и получим зависимость намагниченности от напряженности поля  $J(H)$ . Намагниченность материала прямо пропорциональна величине электрического напряжения  $U$  на выходе прибора, с помощью которого мы определяем намагниченность. В результате получаем зависимость  $U(H)$  электрического напряжения от величины напряженности магнитного поля 2, которую мы назовем прямой начальной ветвью. На рис. 1 эта ветвь, исходящая из точки 1, обозначена цифрой 2 и описывается следующей формулой

$$U_{01} = 14 + 29,4 \operatorname{arctg}(0,04H_1 - 0,515),$$

где  $U_{01}$  – величина электрического напряжения, мВ;  $H_1$  – величина напряженности магнитного поля, А/см.

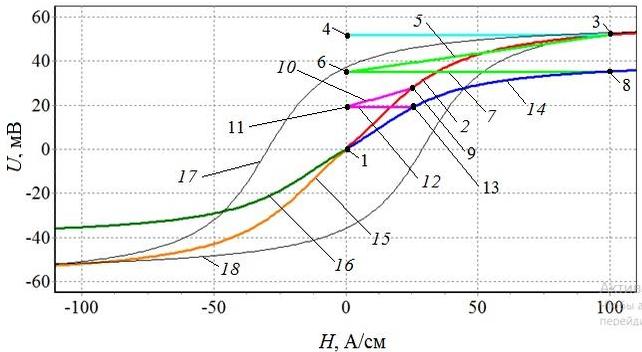


Рис. 1. Прямые и обратные начальные ветви  $U(H)$  материала объекта в действующем поле и в режиме остаточного намагничивания

Намагниченности насыщения  $J_s$  соответствует величина 59,7 мВ. Для обратного направления поля напряженностью  $H_2$  получаем обратную начальную ветвь 15:

$$U_{02} = -14 + 29,4 \operatorname{arctg}(0,04H_2 + 0,515).$$

Воздействуем на размагниченный объект импульсом магнитного поля с максимальной напряженностью 100 А/см. При этом в действующем поле достигнута намагниченность, соответствующая сигналу 52 мВ. Объект переходит из состояния 1 по кривой 2 в состояние 3, которому на оси ординат соответствует точка 4 (рис. 1).

Параметры импульса (время нарастания и длительность) таковы, что процесс намагничивания можно считать установившимся (десятые, сотые доли секунды, единицы секунд), то есть весь объект должен быть намагничен до постоянной величины в конце действия импульса.

По окончании действия первого импульса в прямом направлении объект переходит из состояния 3 по ветви 5 в состояние 6 с остаточной намагниченностью, соответствующей 35 мВ.

На рис. 1 показана также нижняя 18 ветвь частной статической петли гистерезиса с вершиной в точке 3.

Далее из точки 6 проводим горизонтальный отрезок 7 и находим положение точки 8, соответствующее напряженности магнитного поля 100 А/см.

Воздействуем на размагниченный объект импульсом магнитного поля с максимальной напряженностью 25 А/см и перейдем из 1 в 9 с намагниченностью, соответствующей 28 мВ. После окончания действия импульса объект переходит по ветви 10 в состояние 11. Отсюда по отрезку 12 находим положение точки 13 с напряженностью 25 А/см.

По точкам 1, 13 и 8 (в действительности по большему числу найденных точек) строим прямую остаточную начальную ветвь 14 (рис. 1), соответствующую величине остаточной намагниченности материала объекта при намагничивании в прямом направлении поля

$$U_{03} = 9,5 + 20 \operatorname{arctg}(0,04H - 0,515), \quad (1)$$

где  $H$  – величина напряженности магнитного поля, А/см.

Для обратного направления поля получаем обратную остаточную начальную ветвь 16:

$$U_{04} = -9,5 + 20 \operatorname{arctg}(0,04H + 0,515).$$

В качестве обратной гистерезисной ветви  $U_{05}$  будем использовать найденную нами функцию:

$$U_{05} = -14 + 0,457U_{03} + (29,4 + 0,3U_{03}) \times \\ \times \operatorname{arctg}((0,04 + 0,00053U_{03})H_2 + 0,515 + 0,016U_{03}),$$

где  $H_2$  – величина напряженности второго импульса противоположного направления, А/см.

Прямая гистерезисная ветвь  $U_{06}$  и последующие гистерезисные ветви также описываются функциями вида  $U_{05}$  с соответствующими знаками и коэффициентами.

Далее осуществим воздействие на объект одновременно тремя импульсами источника однородного поля и источником локального магнитного поля. Суммарное поле на поверхности объекта состоит из векторной суммы полей этих двух источников. Поле локального второго источника может быть описано разными функциями, полученными на основании экспериментальных данных или теоретических расчетов.

Пусть локальным источником поля является линейный индуктор. Будем определять поле в точке максимума напряженности индуктора на проекции его оси на поверхность объекта. Зададим следующие величины и

направления напряженности магнитного поля трех импульсов локального источника 10,5 А/см, -4,5 А/см и 1,5 А/см и импульсов источника однородного поля, направленных в те же стороны, соответственно 100 А/см, -35,5 А/см и 20 А/см.

Воздействуем на размагниченный объект сериями из двух и трех импульсов магнитного поля и получим ветви  $U(H)$ , соответствующие циклам перемангничивания объекта и изображенные на рис. 2.

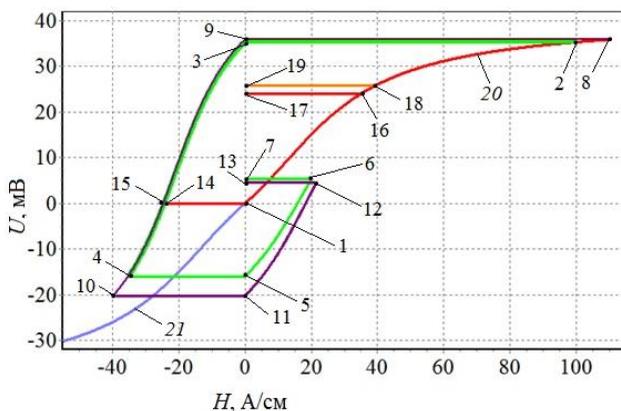


Рис. 2. Ветви  $U(H)$ , соответствующие циклам перемангничивания материала объекта

Цикл напряжения  $\langle 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \rangle$  объекта получен при напряженности импульсов источника однородного поля 100 А/см, -35,5 А/см и 20 А/см.

Цикл напряжения  $\langle 1, 8, 9, 10, 11, 12, 13 \rangle$  объекта построен при напряженности импульсов поля двух источников 110,5 А/см, -40 А/см и 21,5 А/см.

На рис. 2 показана также часть цикла  $\langle 15, 1 \rangle$  при напряженности поля второго импульса -25 А/см. На этом рисунке изображены прямая 20 и обратная 21 начальные остаточные ветви материала объекта. Здесь представлены части цикла  $\langle 16, 17 \rangle$  и  $\langle 18, 19 \rangle$ , построенные на начальной остаточной ветви 20 для первых импульсов соответственно одного 35,5 А/см и двух источников 40 А/см.

В результате воздействия на объект импульсами магнитного поля, циклы которых изображены на рис. 2, получаем зависимости  $U(x)$ , где  $x$  – расстояние до проекции оси индуктора на плоскость измерения. На основании

полученных зависимостей формируем оптические изображения сигнала, показанные на рис. 3. Линейный индуктор находится на расстоянии 0,6 см над объектом, его ось параллельна поверхности объекта.

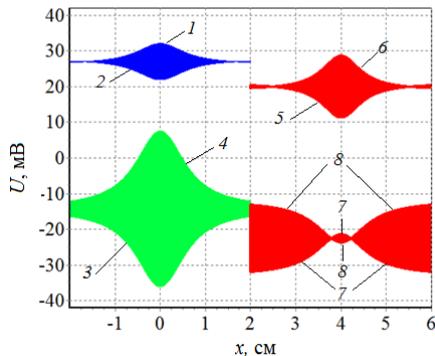


Рис. 3. Оптические изображения сигналов  $U(x)$  с огибающими линиями 1-2, 3-4, 5-6 и 7-8

В результате воздействия на объект первым импульсом однородного магнитного поля напряженностью 100 А/см и амплитудой поля индуктора 10,5 А/см получаем зависимость  $U_1(x)$  (огибающая линия 1), где  $x$  – расстояние от проекции оси индуктора на плоскость измерения, соответствующую (1)

$$U_1 = 10U_{03} - 327 \quad (2)$$

и зависимость  $U_2(x)$  (огибающая линия 2)

$$U_2 = -10U_{03} + 381. \quad (3)$$

Здесь величины напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , а также последующие величины напряжений  $U_3$ – $U_8$  измеряются в мВ. Как видно из (6) и (7) при построении оптических изображений производим увеличение сигнала и его смещение.

В результате воздействия вторым импульсом с напряженностями магнитного поля источников  $-35,5$  А/см и  $-4,5$  А/см получаем соответственно зависимости сигнала

$$U_3 = 5U_{05} + 65,$$
$$U_4 = -5U_{05} - 93,5.$$

После воздействия третьим импульсом с напряженностями 20 А/см и 1,5 А/см получаем соответственно

$$U_5 = -5U_{06} + 46,$$

$$U_6 = 5U_{06} - 6,$$

где зависимость  $U_{06}$  получена из  $U_{05}$  с корректировкой знаков и величин коэффициентов.

В случае воздействия импульсами двух источников на размагниченный объект с параметрами полей источников 35,5 А/см и 4,5 А/см получаем зависимость  $U_7(x)$  (огibaющая линия 7), соответствующую (1)

$$U_7 = 3U_{03} - 105$$

и зависимость  $U_8(x)$  (огibaющая линия 8)

$$U_8 = -3U_{03} + 60.$$

Таким образом, в работе найдены аналитические выражения начальных и гистерезисных ветвей электрического напряжения датчика, а также циклы, соответствующие циклам перемагничивания объекта из ферромагнитного материала. Разработана методика использования полей двух источников при контроле свойств объектов, позволяющая повысить точность определения свойств объекта на его участках за счет вариации поля локального индуктора и получения картин гистерезисной интерференции электрических сигналов в разных точках начальных и гистерезисных ветвей сигналов в импульсных магнитных полях.

### Литература

1. Pavlyuchenko, V. V. Calculation of residual magnetic-field distributions upon hysteretic interference of a pulsed magnetic field / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich, and V. L. Pivovarov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51, № 1. – P. 8–16.
2. Pavlyuchenko, V. V. Hysteretic Interference of Magnetic Field of a Moving Linear Inductor / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2020. – Vol. 56, № 1. – P. 49–57.

3. Pavlyuchenko, V. V. Imaging Electric Signals of a Magnetic Field Transducer with Hysteretic Interference for Testing Metals in Pulsed Magnetic Fields / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2020. – Vol. 56, № 11. – P. 907–914.
4. Pavlyuchenko, V.V. Testing for Defects in Pulsed Magnetic Field Transmitted Through Metal / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2021. – Vol. 57, № 10. – P. 856–864.
5. Pavlyuchenko, V.V. Differential Background of Electric Signal Read-from an Induction Magnetic Head / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2021. – Vol. 57, № 8. – P. 706–716.
6. Фалькевич, А. С. Магнитографический контроль сварных соединений / А. С. Фалькевич, М. Х. Хусанов. – М.: Машиностроение, 1966. – 176 с.
7. Козлов, В. С. Техника магнитографической дефектоскопии / В. С Козлов. – Мн.: Вышэйшая школа, 1976. – 256 с.
8. Михайлов, С. П. Физические основы магнитографической дефектоскопии / С. П. Михайлов, В. Е. Щербинин. – М.: Наука, 1992. – 238 с.
9. Астахов, В. И. К вопросу о диагностике пластины с трещиной вихретоковым методом / В. И. Астахов, Э. М. Данилина, Ю. К. Ершов // Дефектоскопия. – 2018. – № 3. – С. 39–49.
10. Pavlyuchenko, V. V. Hysteretic Interference Algorithms / V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2023. – Vol. 59, № 5. – P. 537–546.
11. Pavlyuchenko, V. V. Pulsed Magnetic Field near Metal Surface/ V. V. Pavlyuchenko, E. S. Doroshevich // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Vol. 58, № 11. – P. 983–991.
12. Суханов, Д. Я. Магнитоиндукционный интроскоп для дефектоскопии металлических объектов / Д. Я. Суханов, Е. С. Совпель // Дефектоскопия. – 2015. – № 5. – С. 56–62.

УДК 551.461

### **Стандарты на атмосферу на современном этапе развития авиации**

Кириленко А. И., Листопад А. И.  
Белорусская государственная академия авиации  
Минск, Республика Беларусь

*В работе проводится анализ ситуации в приземном слое атмосферы в современных реалиях с целью внесения изменений в будущие стандарты атмосферы. Подчеркивается расширяющееся многообразие потребности*