

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРОШЕДШЕГО ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ ОБЪЕКТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

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

*Белорусский национальный технический университет*

Распространение магнитного поля в электропроводящее полупространство может быть представлено диффузией магнитного поля в глубь материала [1]. Задачи диффузии магнитного поля решаются таким же образом, как и задачи распространения теплоты в теории теплопроводности [2].

В случае образцов конечных размеров и разной формы возможно получить только приближенные решения этих уравнений, а точные результаты – экспериментальными методами. При этом для решения задач дефектоскопии и других прикладных задач необходимо знать распределение импульсных магнитных полей локальных источников вблизи электропроводящих объектов с использованием датчиков, работающих в реальном масштабе времени, а также в режиме остаточного намагничивания.

Результаты экспериментальных работ по воздействию импульсным магнитным полем на объекты из электропроводящих материалов представлены в [3–6], здесь же определены пространственно-временные зависимости величины тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля вблизи электропроводящих объектов.

Цель настоящей работы – установить закономерности изменения нормальной составляющей напряженности магнитного поля при прохождении изменяющегося во времени магнитного поля через электропроводящие объекты, оси симметрии которых расположены параллельно на разных расстояниях от оси прямолинейного токопровода первичного источника поля.

Исследования проведены на тиристорной установке с записью импульсов тока источника магнитного поля на осциллограф с послесвечением. В качестве датчиков магнитного поля использовали магнитные носители и датчики Холла.

Источник импульсного магнитного поля – линейный токопровод, через который пропустили импульсы тока заданных конфигураций.

Величина напряженности импульсного магнитного поля, создаваемого электропроводящим объектом при воздействии на него импульсным магнитным полем первичного источника, зависит от удельной электропроводности материала объекта  $\sigma$ , его магнитной проницаемости  $\mu$ , а также толщины объекта и его плоскостных размеров и соотношения этих размеров с расстоянием от источника поля до поверхности объекта.

Определим максимальную величину напряженности магнитного поля  $H_{\tau m}$ , которая будет достигнута на поверхности электропроводящего материала при воздействии на него однополярным импульсом магнитного поля с максимальной напряженностью  $H_{\tau 0 m}$ . Здесь индекс  $\tau$  – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля.

Воздействие на электропроводящий материал импульсом магнитного поля вызывает в этом материале движение электронов проводимости, которое создает внутри материала и вне его магнитное поле, т. е. поле индукционных токов.

Таким образом, измеряемая на поверхности материала максимальная величина тангенциальной составляющей напряженности магнит-

ного поля  $\vec{H}_{\tau m}$  равна векторной сумме максимальных тангенциальных составляющих напряженностей магнитного поля  $\vec{H}_{\tau 0m}$  первичного источника и  $\vec{H}_{\tau Sm}$  поля индукционных токов

$$\vec{H}_{\tau m} = \vec{H}_{\tau 0m} + \vec{H}_{\tau Sm}. \quad (1)$$

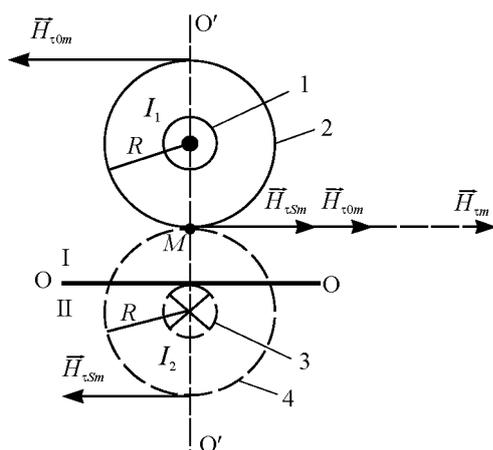


Рис. 1

Схема сложения магнитных полей первичного и вторичного (индукционных токов) источников показана на рис. 1, где 1 – направление  $\odot$  тока  $I_1$  первичного источника, ориентировано нормально плоскости листа бумаги на нас; 2 – линия напряженности магнитного поля первичного источника, проходящая через точку измерения  $M$ ; 3 – направление  $\otimes$  тока  $I_2$  вторичного источника, ориентировано нормально плоскости листа бумаги от нас; 4 – линия напряженности магнитного поля вторичного источника, проходящая через точку измерения  $M$ .

Здесь через  $OO$  обозначена граница раздела двух сред I и II, являющихся соответственно вакуумом (или воздухом) и электропроводящим материалом, а ось  $O'O'$  проходит через оси реального внешнего токопровода 1, схематически изображенного токопровода 3 в материале. Величина напряженности магнитного поля первичного источника в точке  $M$  составляет

$$H = \frac{I_1}{2\pi R}, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус окружности, проходящей через точку  $M$ . Величина магнитной проницаемости среды  $\mu = 1$ . Направление напряженности магнитного поля линейного токопровода определяется по правилу буравчика или правого винта.

Схематическое изображение токопровода 3 в среде II является качественным, так как действительное распределение тока  $I_2$  более сложное. Однако принципиального влияния на главный вывод, вытекающий из рис. 1, это не оказывает.

Главный вывод такой: скалярная величина напряженности суммарного магнитного поля на поверхности электропроводящего материала  $H_{\tau m}$  в любой точке над материалом, лежащей на оси, перпендикулярной поверхности электропроводящего материала и проходящей через ось линейного токопровода, равна сумме скалярных напряженностей магнитных полей первичного  $H_{\tau 0m}$  и вторичного  $H_{\tau Sm}$  источников. Тогда выражение (1) принимает вид

$$H_{\tau m} = H_{\tau 0m} + H_{\tau Sm}. \quad (3)$$

Это выражение справедливо для всех точек, лежащих на оси  $O'O'$  над материалом вне токопровода 1.

Электрические и магнитные свойства материалов, а также наличие в них внутренних дефектов можно определять по распределениям не только тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_{\tau}$ , но и нормальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_n$ .

Методика эксперимента (рис. 2) состояла в следующем. Между жестко укрепленными источниками магнитного поля в виде прямолинейного токопровода 1 с током  $I = I(t)$  и датчиком магнитного поля 2 перемещали образец 3 из электропроводящего материала в плоскости  $PP$ , перпендикулярной оси  $FF$ , проходящей через ось токопровода 1 и центр симметрии датчика 2. Перемещение осуществляли с шагом сканирования  $h$  и для каждого положения датчика, в качестве которого использовали датчик Холла, находили зависимость величины снимаемого с него напряжения от времени  $U = U(t)$ . Отсчет координаты  $x$  перемещения края образца  $a$  в плоскости  $PP$  производили от

оси  $FF$  (точка 0). При этом расстояние  $x$  от края образца  $a$  до оси  $FF$  в случае, если он не достиг оси  $FF$ , обозначали через  $x^-$ , а если край образца находится за осью, то расстояние до края образца обозначали через  $x^+$ ,  $z_1$  и  $z_2$  – расстояния от поверхностей образца 3 соответственно до оси токопровода 1 и центра датчика 2.

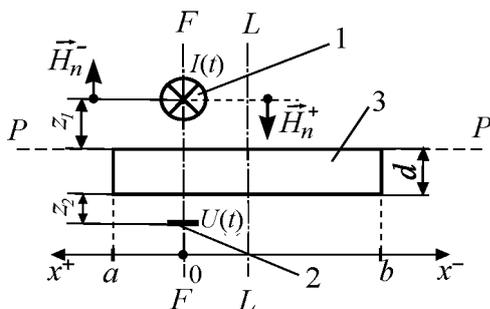


Рис. 2

Величина нормальной составляющей напряженности магнитного поля токопровода со стороны образца (или большей части образца) обозначена как  $H_n^+$ , а с противоположной стороны  $H_n^-$ . Здесь же показаны плоскость симметрии образца  $LL$  и второй край образца  $b$ .

Зависимости величины нормальной составляющей импульсного магнитного поля от времени при разных смещениях образца в виде пластины размерами  $0,8 \times 22 \times 60 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$  могут быть определены на основании экспериментальных данных, (рис. 3–6) [5]. На всех представленных ниже рисунках разность величин напряжения  $U$ , снимаемых с датчика Холла и содержащих и не содержащих полезный сигнал, прямо пропорциональна величине нормальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_n$ . На рис. 3 изображены зависимости величины напряжения  $U$ , снимаемого с датчика Холла, от времени  $t$  при расстоянии от оси датчика до оси токопровода  $3,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и до ближней поверхности образца  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  на расстояниях  $x^+$  от края образца до проекции оси токопровода: 1 –  $3,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 2 –  $4,0 \cdot 10^{-3}$ ; 3 –  $5,0 \cdot 10^{-3}$ ; 4 –  $6,0 \cdot 10^{-3}$ ; 5 –  $7,0 \cdot 10^{-3}$ ; 6 –  $8,0 \cdot 10^{-3}$ ; 7 –  $12,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , а также семейство кривых  $U = U(t)$  8 и 9, не содержащих полезный измеряемый сигнал, и зависимость 10 тока  $I$  источника магнитного поля от времени  $t$ .

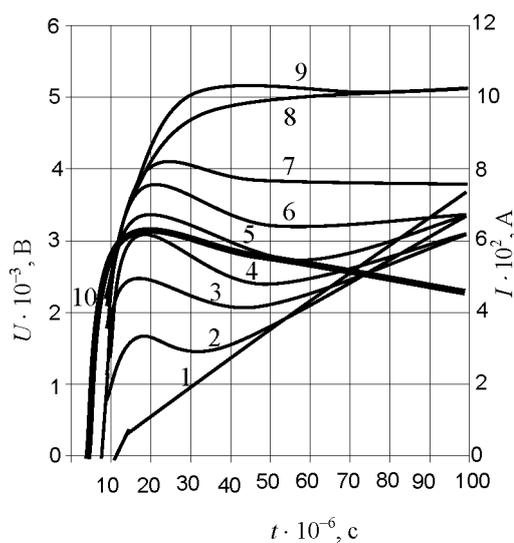


Рис. 3

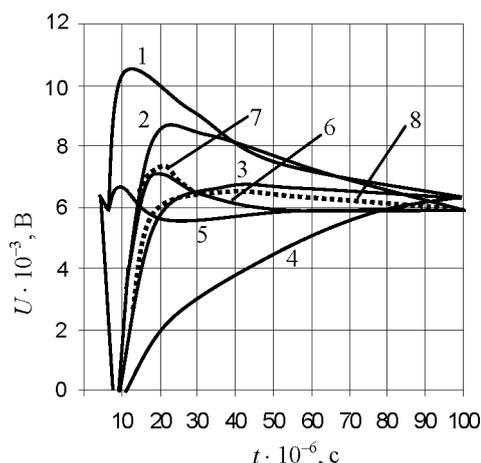


Рис. 4

На рис. 4 показана зависимость величины напряжения  $U$  полного сигнала, снимаемого с датчика Холла, от времени  $t$  при расстояниях  $x^+$  края образца до проекции оси токопровода: 1 – 0; 2 –  $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; 3 –  $1,0 \cdot 10^{-3}$ ; 4 –  $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , а также соответствующие им зависимости 5–8 величины напряжения  $U(t)$ , не содержащие полезный измеряемый сигнал. Расстояние от оси датчика до оси токопровода составляет  $2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и до ближней к датчику стороне образца –  $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

На рис. 5 изображены начальные участки зависимостей напряжения  $U$  полного снимаемого с датчика Холла сигналов 1, 2, 3 при смещениях  $x^+$  соответственно: 0;  $1,0 \cdot 10^{-3}$  и  $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,

а также соответствующие им зависимости 4, 5, 6 напряжения  $U = U(t)$ , снимаемого с датчика сигнала, не содержащие полезный измеряемый сигнал. Здесь же показана зависимость 7 тока  $I$  источника магнитного поля от времени  $t$ . Уровень отсчета сигнала зависимостей 1, 4 отличается от уровня отсчета сигнала зависимостей 2, 3, 5, 6, что позволяет разместить все эти зависимости на одном рисунке.

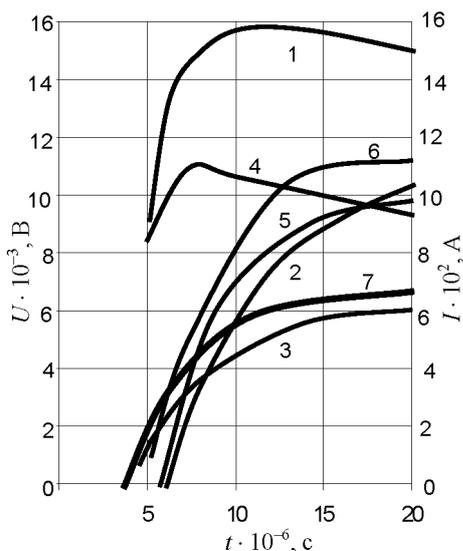


Рис. 5

На рис. 6 показаны зависимости величины напряжения  $U$  полного, снимаемого с датчика сигнала, от времени  $t$ : 1 – в отсутствие образца; 2, 3 – при смещениях края образца  $x^+ = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м и  $x^+ = 4,0 \cdot 10^{-3}$  м и соответствующие им зависимости 4, 5 и 6 напряжения  $U = U(t)$ , снимаемого с датчика сигнала, не содержащие полезный измеряемый сигнал.

На основании данных, представленных на рис. 3–6, приходим к следующему выводу. При  $x = 0$ , т. е. при совпадении края образца с проекцией оси токопровода, нормальная составляющая  $H_n$  в начальный момент времени совпадает по направлению с  $H_n^+$ , а на некотором расстоянии  $x_p^+$ , которое назовем расстоянием изменения полярности, меняет направление на противоположное, быстро достигая максимальной величины при смещении образца, после чего плавно убывает с расстоянием и при совпадении оси симметрии с проекцией оси токопровода становится равной нулю.

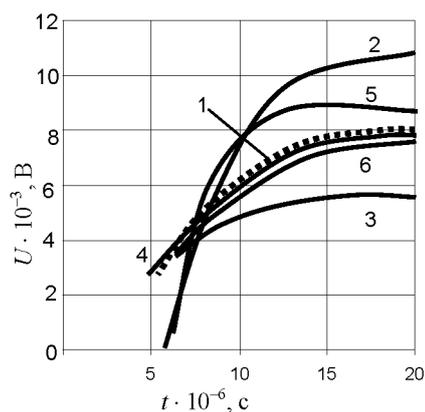


Рис. 6

На основании полученных результатов определены пространственно-временные закономерности изменения величины нормальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_n$  с расстоянием до оси линейного источника магнитного поля.

На рис. 7 представлены зависимости величины напряжения  $U$ , снимаемого с датчика Холла, от времени  $t$  при расстояниях  $x^+$  края образца до проекции токопровода: 1 – 0; 2 –  $1 \cdot 10^{-3}$  м; 3 –  $3 \cdot 10^{-3}$  м; 4 –  $5 \cdot 10^{-3}$  м, а также не содержащие измеряемый сигнал зависимости 5 ( $U = U(t)$  (образец отсутствует) и 6 (при наличии образца) и 7 силы тока источника первичного поля от времени.

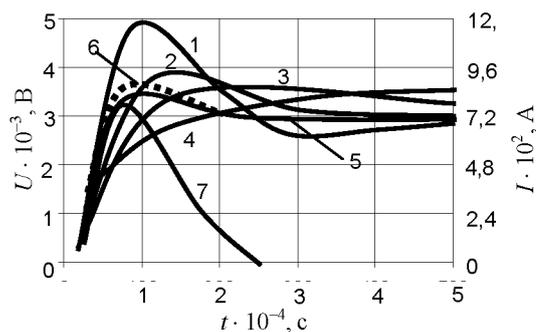


Рис. 7

Расстояние от оси датчика до оси токопровода составляет  $7,9 \cdot 10^{-3}$  м и до ближайшей поверхности образца –  $0,7 \cdot 10^{-3}$  м.

Размеры образца из алюминия –  $3,0 \times 30 \times 50 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>.

Величина разности напряжений  $U$ , содержащих и не содержащих измеряемый сигнал,

прямо пропорциональна величине нормальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_m$ .

На рис. 8 представлены зависимости величины напряжения  $U$ , снимаемого с датчика Холла, от времени  $t$  при расстояниях  $x^-$  края образца до проекции токопровода: 1 – 0; 2 –  $1 \cdot 10^{-3}$  м; 3 –  $2 \cdot 10^{-3}$ ; 4 –  $3 \cdot 10^{-3}$ ; 5 –  $5 \cdot 10^{-3}$ ; 6 –  $8 \cdot 10^{-3}$ ; 7 –  $12 \cdot 10^{-3}$  м, а также не содержащий измеряемый сигнал зависимости  $U = U(t)$  8 (образец отсутствует) и 9 (при наличии образца) и зависимость 10 силы тока источника первичного поля от времени. Из рис. 7 и 8 следует, что при приближении края образца к проекции оси токопровода в прошедшей волне возникает нормальная составляющая  $H_n^+$  напряженности магнитного поля, совпадающая с направлением  $H_n$  токопровода со стороны образца. При этом увеличение максимума  $H_n^+$  происходит до расстояния  $x_k^-$ , которое назовем критическим. Для решения прикладных задач важно определить, в какой момент времени  $t$  после достижения максимума напряженности магнитного поля первичного источника нормальная составляющая напряженности магнитного поля становится равной нулю  $H_n = 0$ . Это можно определить исходя из данных, представленных на рис. 9, 10, где показано, как импульс магнитного поля в полволны с экспоненциально спадающим задним фронтом проходит через электропроводящие образцы.

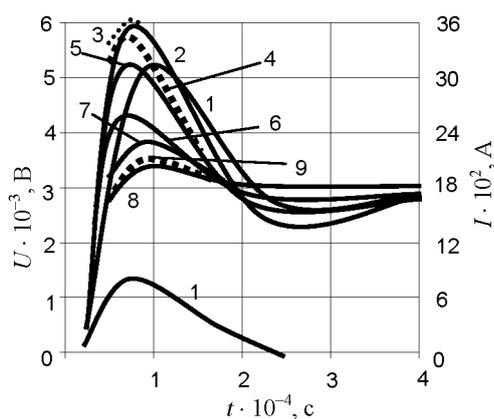


Рис. 8

На рис. 9 изображены зависимости величины напряжения  $U$ , снимаемого с датчика Холла, от времени  $t$  для случаев: 1 – толщина образца  $d = 3,0 \cdot 10^{-3}$  м, полный сигнал  $U$ ; 2 – то же, что

и 1, при отсутствии полезного сигнала; 3 – толщина образца  $d = 2,3 \cdot 10^{-4}$  м, полный сигнал  $U$ ; 4 – то же, что и 3, при отсутствии полезного сигнала; 5 – зависимость силы тока  $I$  первичного источника поля от времени  $t$ .

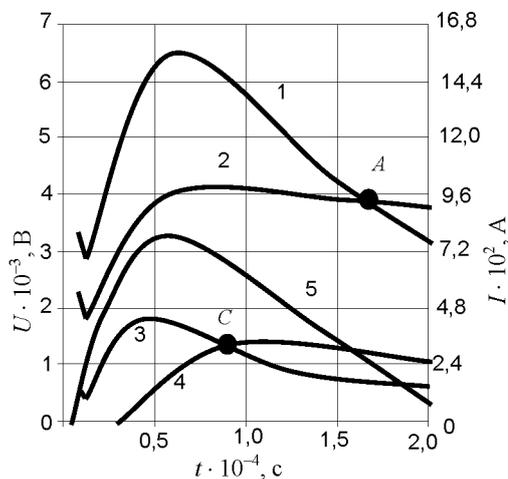


Рис. 9

Разность напряжений  $U$  зависимостей 1, 2, 3 и 4 прямо пропорциональна величине нормальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_m$ .

Расстояние от оси датчика до оси токопровода составляет  $9,2 \cdot 10^{-3}$  м и до ближайшей поверхности образца –  $0,7 \cdot 10^{-3}$  м.

Размеры образцов из алюминия в плоскости –  $30 \times 50 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>.

Край образца находится на расстоянии  $x^- = 2 \cdot 10^{-3}$  м от проекции оси токопровода на плоскость перемещения образца, т. е. не доходит до оси.

Через  $A$  и  $C$  обозначены точки, в которых  $H_m$  меняют полярность, причем соответствующее им время:  $t_A = 1,6 \cdot 10^{-4}$  с;  $t_C = 0,9 \cdot 10^{-4}$  с.

На рис. 10 показаны зависимости величины напряжения  $U$ , снимаемого с датчика Холла, от времени  $t$  для случаев: 1 – толщина образца  $d = 8,0 \cdot 10^{-4}$  м, полный сигнал  $U$ ; 2 – то же, что и 1, при отсутствии полезного сигнала; 3 – толщина образца  $d = 7 \cdot 10^{-5}$  м, полный сигнал  $U$ ; 4 – то же, что и 3, при отсутствии полезного сигнала; 5 – зависимость силы тока  $I$  первичного источника поля от времени  $t$ .

Разность напряжений  $U$  зависимостей 1, 2, 3 и 4 прямо пропорциональна величине нормальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_m$ .

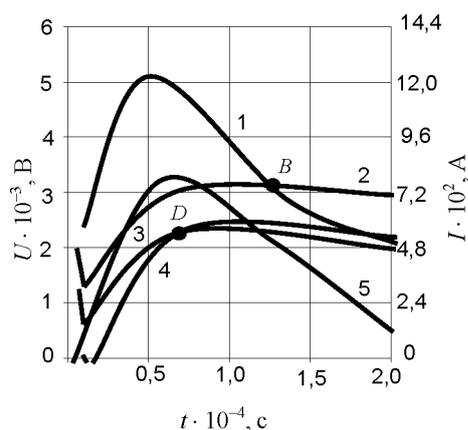


Рис. 10

Расстояние от оси датчика до оси токопровода –  $9,2 \cdot 10^{-3}$  м и до ближайшей поверхности образца –  $0,7 \cdot 10^{-3}$  м.

Размеры образцов из алюминия в плоскости –  $30 \times 50 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>.

Край образца находится на расстоянии  $x^- = 2 \cdot 10^{-3}$  м от проекции оси токопровода на плоскость перемещения образца, т. е. не доходит до оси.

Через *B* и *D* обозначены точки, в которых  $H_m$  меняют полярность, причем соответствующее им время:  $t_B = 1,2 \cdot 10^{-4}$  с;  $t_D = 0,7 \cdot 10^{-4}$  с.

Все зависимости, изображенные на рис. 3–10, получены путем копирования с экрана запоминающего осциллографа, предварительно откалиброванного стандартными сигналами генератора. На основании данных, представленных на рис. 3–10, найдены закономерности изменения нормальной составляющей напряженности магнитного поля для прошедшей через электропроводящие объекты полуволны. Эти результаты могут быть применены для изучения прохождения импульсов магнитного поля другой формы через образцы, а также любых изменяющихся во времени магнитных полей. Эти закономерности названы нами правилами.

### ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных экспериментальных исследований авторами установлены правила распределения нормальной составляющей напряженности прошедшего через электропроводящие объекты магнитного поля ли-

нейного первичного источника, которые выполняются при следующих условиях. Прямолинейный токопровод расположен параллельно плоскости листа из электропроводящего материала. Местоположение листа отсчитывается от проекции оси токопровода на плоскость перемещения листа. По токопроводу пропускают изменяющийся во времени ток. В первый момент времени он создает магнитное поле с нарастающей по абсолютной величине напряженностью. Величину и направление нормальной составляющей магнитного поля измеряют непосредственно под осью прямолинейного токопровода ниже уровня плоскости перемещения электропроводящего листа. В отсутствие электропроводящих объектов вблизи источника первичного магнитного поля величина нормальной составляющей магнитного поля под ним равна нулю.

Правила распределения нормальной составляющей напряженности прошедшего через электропроводящие объекты магнитного поля линейного первичного источника:

а) при воздействии нарастающим магнитным полем на электропроводящую полуплоскость конечной толщины, край которой не доходит до проекции оси токопровода на плоскость перемещения полуплоскости, в прошедшей волне возникает нормальная составляющая напряженности магнитного поля  $H_n$ , направление которой в начальный момент действия поля совпадает с направлением нормальной составляющей напряженности магнитного поля токопровода со стороны электропроводящей полуплоскости;

б) при воздействии нарастающим магнитным полем на электропроводящую полуплоскость конечной толщины, край которой перешел через проекцию оси токопровода на плоскость перемещения полуплоскости, в прошедшей волне возникает нормальная составляющая напряженности магнитного поля  $H_n$ , направление которой в начальный момент действия поля противоположно направлению нормальной составляющей напряженности магнитного поля токопровода со стороны электропроводящей полуплоскости;

в) под бесконечно протяженной плоскостью, а также под осью симметрии электропроводящего листа конечных размеров нормальная

составляющая напряженности магнитного поля  $H_n$  равна нулю;

г) при переходе импульса магнитного поля из возрастающего в убывающий нормальная составляющая напряженности магнитного поля  $H_n$  меняет свою полярность на противоположную;

д) время  $t_p$ , через которое нормальная составляющая напряженности магнитного поля  $H_n$  меняет свою полярность на противоположную, исчисляемое от момента максимума напряженности магнитного поля первичного источника, зависит от толщины электропроводящего объекта;

е) величина напряженности магнитного поля достигает максимума при расстоянии от края полуплоскости до проекции оси токопровода  $x_k^-$ , которое назовем критическим. Величина  $x_k^-$  зависит от толщины материала;

ж) величина напряженности магнитного поля становится равной нулю при расстоянии от края полуплоскости до проекции оси токопровода  $x_p^-$ , которое назовем расстоянием изменения полярности. Величина  $x_p^-$  пропорциональна толщине материала.

2. Полученные результаты могут быть использованы в дефектоскопии, при разработке конструкции индукционных нагревательных приборов и в системах управления магнитными полями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Кнопфель, Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972 – 260 с.
2. **Карслоу, Г.** Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964.
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.** Законы распределения напряженности импульсного магнитного поля вблизи электропроводящих материалов / В. В. Павлюченко // Вестник БНТУ. – 2007. – № 3. – С. 66–71.
5. **Павлюченко, В. В.** Взаимодействие электропроводящего объекта с локальным источником импульсного магнитного поля / В. В. Павлюченко, Е. С. Дорошевич // Материалы V междунар. науч.-техн. конф. БНТУ. – Минск, 2007. – Т. 2. – С. 434–437.
6. **Павлюченко, В. В.** Прохождение импульсов магнитного поля через препятствия / В. В. Павлюченко // Материалы V междунар. науч.-техн. конф. БНТУ. – Минск, 2007. – Т. 2. – С. 437–441.

Поступила 08.08.2008