

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ПРОШЕДШЕГО ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ ОБЪЕКТЫ

В. В. ПАВЛЮЧЕНКО, Е. С. ДОРОШЕВИЧ

*На основании проведенных экспериментальных исследований установлены правила пространственно-временного распределения нормальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_n$  в прошедшей через электропроводящие объекты полуволне в зависимости от положения края объекта относительно оси, проходящей через центр датчика магнитного поля и ось линейного токопровода. Установлены положения объекта, соответствующие максимуму  $H_n$  и моменты времени, при которых  $H_n$  меняет полярность.*

*Proceeding from the conducted experimental studies, rules were established for space-time distribution of the normal component of magnetic field intensity  $H_f$  in the half-waved, which has passed through electrically-conducting objects, depending on the position of the object edge relative to the axis passing through the center of the magnetic field sensor and axis of linear current conduit. Positions of the object corresponding to maximum  $H_f$  and moments of time, at which  $H_f$  changes its polarity, were established.*

Проникновение электромагнитных волн в электропроводящие среды и их отражение от поверхностей этих сред рассмотрено в ряде теоретических работ [1–6], в которых путем решения уравнений Максвелла найдены распределения величины напряженности магнитного поля по координате от поверхности вглубь бесконечного проводящего полупространства при воздействии на поверхность раздела сред плоских электромагнитных волн.

Для образцов конечных размеров и разной формы могут быть получены приближенные решения этих уравнений. Поэтому точные результаты можно получить только экспериментальными методами. При этом для решения задач дефектоскопии и других прикладных задач необходимо знать распределения 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 работах [7–9], в которых определены пространственно-временные зависимости величины тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля вблизи электропроводящих объектов.

Целью работы является определение закономерностей изменения нормальной составляющей напряженности магнитного поля при прохождении изменяющегося во времени магнитного поля через электропроводящие объекты, оси симметрии которых параллельны и расположены на

разных расстояниях от оси прямолинейного токопровода первичного источника поля.

Исследования проведены на тиристорной установке с записью импульсов тока линейного источника импульсного 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 пропускали 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 от толщины объекта и его плоскостных размеров и соотношения этих размеров с расстоянием от источника поля до поверхности объекта.

Методика эксперимента, приведенного на рис. 1, состояла в следующем. Между жестко укрепленными источниками магнитного поля в виде прямолинейного токопровода  $I$  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  $I$  и центр симметрии датчика  $2$ . Перемещение осуществляли с шагом сканирования  $h$  и для каждого положения образца относительно датчика, в качестве которого использовали датчик Холла, измеряли зависимость величины снимаемого с него напряжения  $U$  от времени  $t$ :  $U = U(t)$ . Отсчет координаты  $x$  перемещения края образца  $a$  в плоскости  $PP$  проводили от оси  $FF$

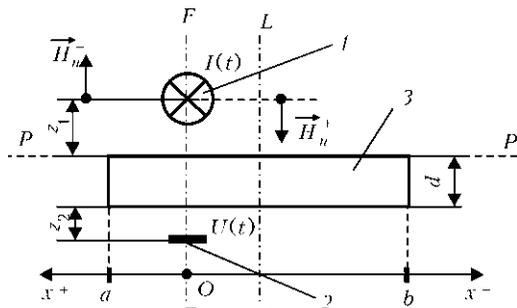


Рис. 1

(точка 0). При этом расстояние  $x$  от края образца  $a$  до оси  $FF$  в случае, если образец не дошел до оси  $FF$ , обозначали  $x^-$ , а если край образца перешел через ось, то расстояние до края образца обозначали  $x^+$ . Через  $z_1$  и  $z_2$  обозначены расстояния от поверхностей образца 3 соответственно до оси токопровода 1 и центра датчика 2.

Нормальная составляющая напряженности магнитного поля токопровода со стороны образца (или большей части образца) обозначена  $H_n^+$ , а с противоположной стороны  $H_n^-$ ;  $LL$  — плоскость симметрии образца;  $b$  — второй край образца.

Зависимости нормальной составляющей импульсного магнитного поля от времени при разных смещениях образца в виде пластины размерами  $0,8 \times 22 \times 60 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup> могут быть определены на основании данных, представленных на рис. 2 — рис. 5 [9]. На всех представленных ниже рисунках разность значений напряжений  $U$ , снимаемых с датчика Холла и содержащих и не содержащих полезный сигнал, прямо пропорциональна величине нормальной составляющей магнитного поля  $H_n$ . На рис. 2 показаны зависимости напряжения  $U$ , снимаемого с датчика Холла, от времени  $t$  при расстоянии от оси датчика до оси токопровода

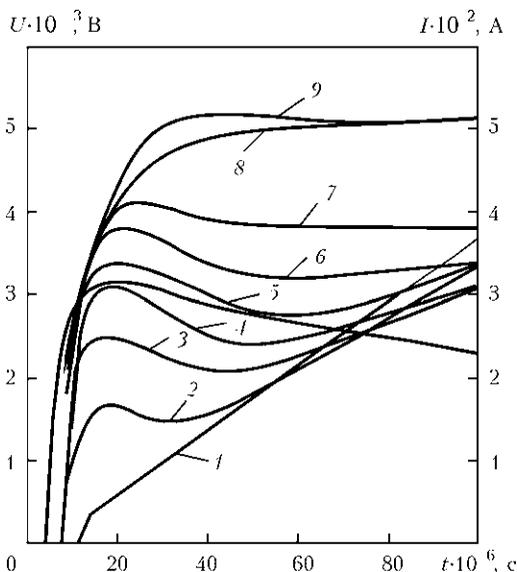


Рис. 2

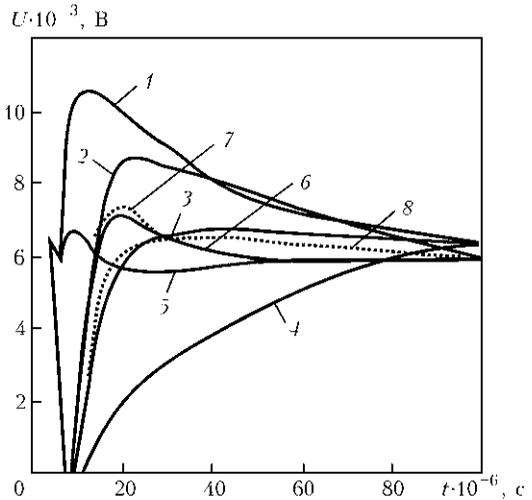


Рис. 3

вода  $3,1 \cdot 10^{-3}$  м и до ближней поверхности образца  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м на расстояниях  $x^+$  от края образца до проекции оси токопровода: 1 —  $3,0 \cdot 10^{-3}$ ; 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 —  $12,0 \cdot 10^{-3}$  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  $t$ .

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

На рис. 4 изображены начальные участки зависимостей напряжения  $U$  полного снимаемого с датчика Холла сигнала от времени  $t$  1–3 при смещении  $x^+$  соответственно: 0;  $1,0 \cdot 10^{-3}$  и  $2,0 \cdot 10^{-3}$  м, а также соответствующие им зависимости 4–6  $U = U(t)$ , снимаемого с датчика сигнала, не содержащие полезный измеряемый сигнал. Здесь же показана зависимость 7 тока  $I$  источника магнитного поля от времени  $t$ . Для удобства изображения зависимостей на одном рисунке нулевые уровни напряжения для них выбраны разные.

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

Анализ данных, представленных на рис. 2–5, позволяет заключить следующее. При  $x = 0$ , т. е. при совпадении края образца с проекцией оси токопровода, нормальная составляющая  $H_n$  в начальный момент времени совпадает по направле-

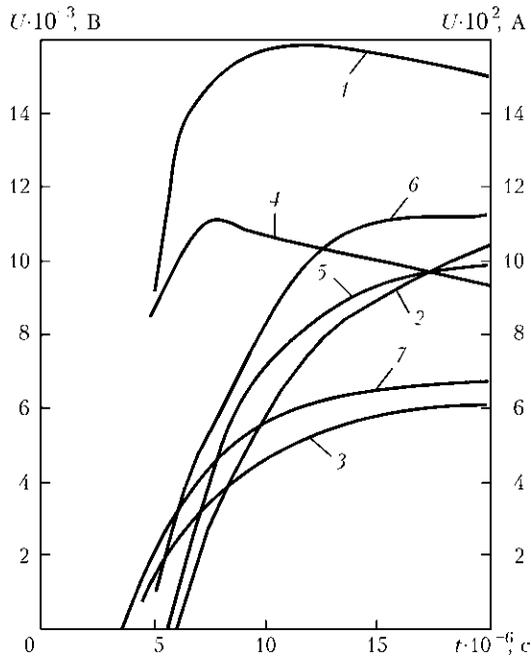


Рис. 4

нию с  $H_n^+$ , а на некотором расстоянии  $x_p^+$ , которое назовем расстоянием изменения полярности, меняет направление на противоположное, быстро достигая максимальной величины, после чего плавно убывает с расстоянием и при совпадении края образца с проекцией оси токопровода становится близкой нулю.

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

На рис. 6 представлены зависимости напряжения  $U$ , снимаемого с датчика Холла, от времени  $t$  при расстояниях  $x^+$  края образца до проекции оси токопровода: 1 — 0; 2 —  $1 \cdot 10^{-3}$ ; 3 —  $3 \cdot 10^{-3}$ ; 4 —  $5 \cdot 10^{-3}$  м, а также не содержащий измеряемый сигнал

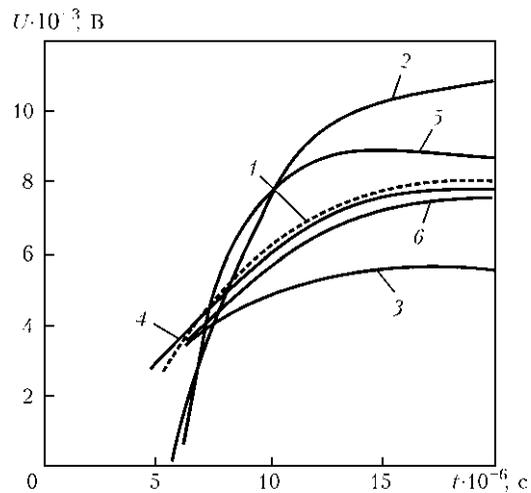


Рис. 5

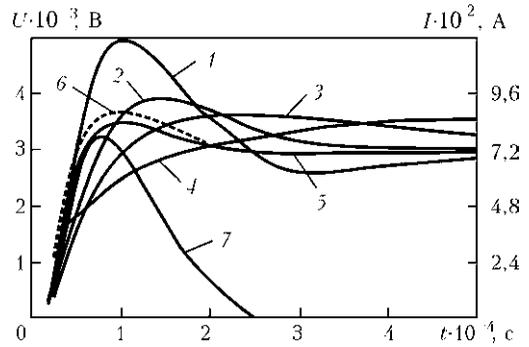


Рис. 6

сигнал зависимости  $U = U(t)$  5 (образец отсутствует) и 6 (при наличии образца) и зависимость 7 силы тока источника первичного поля от времени  $t$ .

Расстояние от оси датчика до оси токопровода  $7,9 \cdot 10^{-3}$  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  $H_n$ .

На рис. 7 представлены зависимости напряжения  $U$ , снимаемого с датчика Холла, от времени  $t$  при расстояниях  $x^-$  края образца до проекции токопровода: 1 — 0; 2 —  $1 \cdot 10^{-3}$ ; 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  $t$ . Из рис. 6 и 7 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

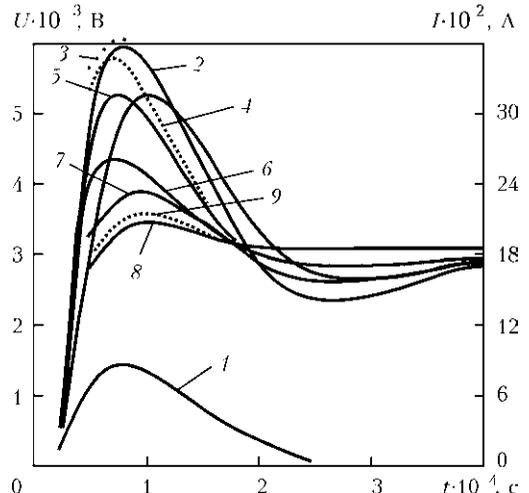


Рис. 7

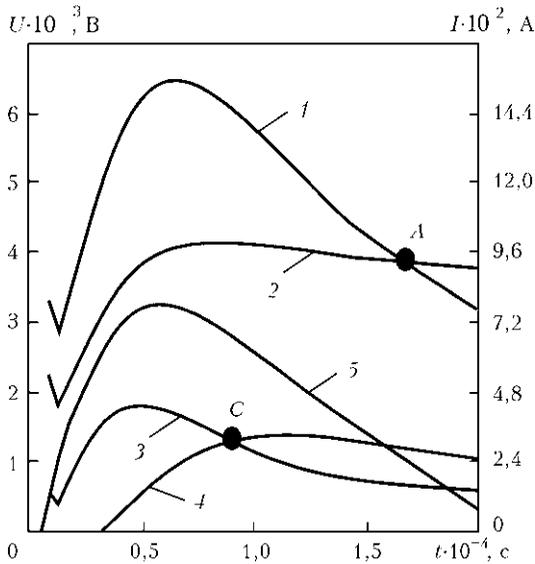


Рис. 8

до расстояния  $x_{к}^-$ , которое назовем критическим.

На рис. 8 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  $t$ .

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

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>.

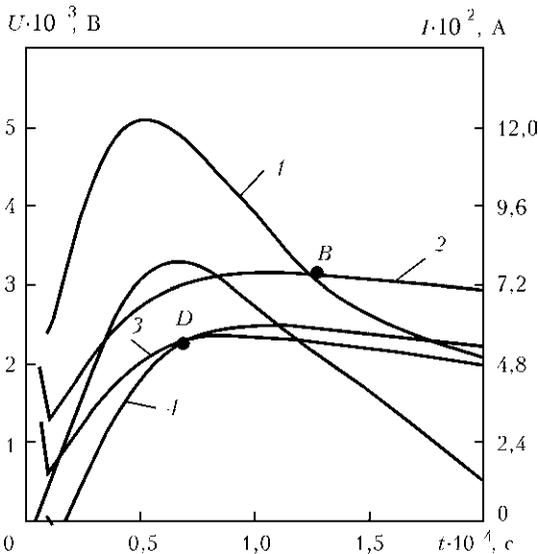


Рис. 9

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.

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

На рис. 9 показаны зависимости 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 и 2, а также зависимостей 3 и 4 прямо пропорциональна величине нормальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_m$ .

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.

Буквами  $B$  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. 2–9, получены копированием с экрана запоминающего осциллографа предварительно откалиброванного стандартными сигналами генератора.

На основании данных, представленных на рис. 2–9, найдены закономерности поведения нормальной составляющей напряженности магнитного поля для прошедшей через электропроводящие объекты полуволны, которые могут быть применены для импульсов магнитного поля другой формы, а также любых изменяющихся во времени магнитных полей. Эти закономерности названы нами правилами.

### Выводы

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 напряженности магнитного поля измеряют непосредственно под осью прямолинейного токопрово-



да ниже уровня плоскости перемещения электропроводящего листа. В отсутствие электропроводящих объектов вблизи источника первичного магнитного поля величина нормальной составляющей напряженности магнитного поля под ним равна нулю.

1. 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.

2. 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.

3. Под бесконечно протяженной плоскостью, а также под осью симметрии электропроводящего листа конечных размеров нормальная составляющая напряженности магнитного поля  $H_n$  равна нулю.

4. При переходе импульса магнитного поля из возрастающего в убывающий нормальная составляющая напряженности магнитного поля  $H_n$  меняет свою полярность на противоположную.

5. 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.

6. Величина напряженности магнитного поля достигает максимума при расстоянии от края полуплоскости до проекции оси токопровода на расстоянии  $x_k$ , которое назовем критическим. Вели-

чина  $x_k$  зависит от толщины материала.

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

Таким образом, воздействуя на объект одиночными импульсами магнитного поля линейного токопровода с разными временами нарастания и измеряя величину нормальной составляющей магнитного поля  $H_n$  в прошедшей полуволне, можно получать информацию о магнитных и электрических свойствах материала объекта, его размерах и наличии в нем дефектов сплошности путем сравнения полученных распределений  $H_n$  с эталонными распределениями  $H_n$  для известных материалов. В силу того, что полученные распределения  $H_n$  несут огромный объем информации, указанные параметры объекта можно определять однозначно и с высокой точностью.

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

1. Тамм И. Е. Основы теории электричества. — М.: Наука, 1976. — 410 с.
2. Установки индукционного нагрева / Под ред. А. Е. Слухоцкого. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 180 с.
3. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. — М.: Мир, 1972. — 260 с.
4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высш. шк., 1967. — 263 с.
5. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. — М.-Л.: Энергоиздат, 1949. — 420 с.
6. Поливанов К. М. Ферромагнетики. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. — 256 с.
7. Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С. Взаимодействие импульсных электромагнитных полей с поверхностями металлических образцов // Вестник БНТУ. — Минск, 2006. — № 4. — С. 89–95.
8. Павлюченко В. В. Законы распределения напряженности импульсного магнитного поля вблизи электропроводящих материалов // Там же. — 2007. — № 3. — С. 66–71.
9. Павлюченко В. В., Дорошевич Е. С. Взаимодействие электропроводящего объекта с локальным источником импульсного магнитного поля // Материалы V междунар. науч.-техн. конф. БНТУ, Минск. — 2007. — Т.2. — С. 434–437.