

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С ПОВЕРХНОСТЯМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

Инженеры ПАВЛЮЧЕНКО В. В., ДОРОШЕВИЧ Е. С.

Белорусский национальный технический университет

Электромагнитная волна, падающая на поверхность металлического образца, частично отражается от этой поверхности, а частично проходит в глубь образца. Коэффициент отражения от металлической поверхности зависит от частоты падающей электромагнитной волны, электропроводности металла, состояния поверхности образца и других факторов.

Процесс проникновения электромагнитного поля в электропроводящую среду для случая падения на поверхность проводящего полупространства плоских синусоидальных электромагнитных волн рассмотрен в [1–3]. Так, согласно [1], волновые числа k и s отраженной и проходящей электромагнитных волн с введением новых обозначений (СИ) представлены следующими выражениями:

$$k^2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu \omega^2}{2} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon \omega} \right)^2} + 1 \right\}; \quad (1)$$

$$s^2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu \omega^2}{2} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon \omega} \right)^2} - 1 \right\}, \quad (2)$$

где ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные соответственно; ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; ω – циклическая частота электромагнитных волн; σ – удельная электропроводность среды.

Далее, пренебрегая токами смещения для металлов, находят эффективную глубину проникновения тока в глубь образца

$$\Delta = \frac{1}{k} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu \sigma}}. \quad (3)$$

Используя эти формулы, можно по измеренным величинам напряженности магнитного поля, созданного на поверхности образца па-

дающей на него электромагнитной волной, определять электрические и магнитные свойства поверхностных слоев, бесконечно протяженных в глубину образцов. Однако для образцов конечной толщины они не могут дать точных результатов.

Целью настоящей работы является определение зависимостей максимальной напряженности магнитного поля на поверхности образцов из электропроводящих материалов от времени нарастания импульсов магнитного поля, толщины образцов и их электромагнитных свойств для контроля распределения по объему образца удельной электропроводности σ , магнитной проницаемости μ и дефектов сплошности.

Исследования проведены на тиристорной установке с записью импульсов тока источника электромагнитного поля на осциллограф с послесвечением. Датчики магнитного поля были изготовлены на основе магнитного носителя. Информацию, записанную на датчике, считывали с помощью индукционной магнитной головки, выход которой подключали на вход осциллографа. По амплитуде сигнала на экране осциллографа, зависящей от величины полей рассеяния на поверхности датчика и пропорциональной его остаточной намагниченности, определяли величину максимальной напряженности магнитного поля, которое было приложено к датчику. Датчики магнитного поля предварительно градуировали в магнитных полях с заданными величинами напряженности. Анизотропия свойств датчиков магнитного поля позволяла с большой точностью измерять тангенциальную составляющую H_t магнитного поля для образцов из диа- и парамагнитных материалов. На образцы воздействовали полями одиночных импульсов тока линейного токопровода. Форма импульсов – полусинусоида.

На рис. 1 представлены зависимости отношения максимальной величины тангенциальной составляющей магнитного поля H_{tm} на поверхности металлического образца к максимальной величине тангенциальной составляющей магнитного поля H_{0tm} в отсутствие образца H_{tm}/H_{0tm} от времени нарастания t_{max} импульса тока источника электромагнитного поля для образцов из алюминия толщиной: 1 – $6,7 \cdot 10^{-4}$ м; 2 – $2,3 \cdot 10^{-4}$ м; 3 – $7,0 \cdot 10^{-5}$ м. Измерения проведены на удалении $5 \cdot 10^{-5}$ м датчика от поверхности образца при максимальной величине тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в отсутствие образца $H_{0tm} = 1,73 \cdot 10^4$ А/м.

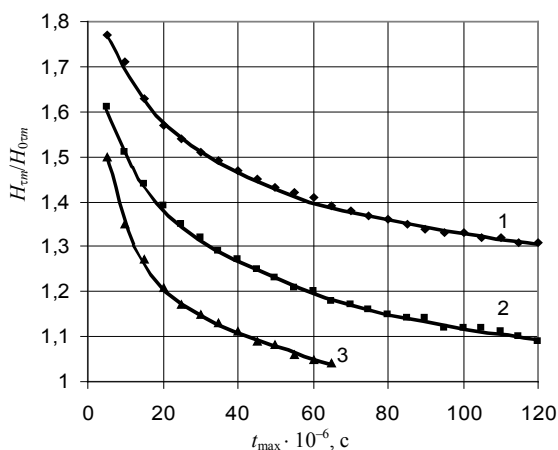


Рис. 1

Из рис. 1 видны временные диапазоны Δt контроля свойств образцов из алюминия разной толщины d : $(5-60) \cdot 10^{-6}$ с для $d = 7,0 \cdot 10^{-5}$ м; $(5-120) \cdot 10^{-6}$ с для $d = 2,3 \cdot 10^{-4}$ м; $(5-120) \cdot 10^{-6}$ с и далее до $250 \cdot 10^{-6}$ с из не вошедших в зависимость 1 на рис. 1 результатов измерений для $d = 6,7 \cdot 10^{-4}$ м. Зависимости 1–3 близки к обратно пропорциональным.

На рис. 2 представлены аналогичные зависимости H_{tm}/H_{0tm} от времени нарастания импульса t_{max} для следующих листовых образцов: 1 – медь, $d = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – свинец, $d = 2,0 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – сплав титана ВТ-2, $d = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; 4 – медь, $d = 5,0 \cdot 10^{-5}$ м; 5 – графит в виде трубы диаметром $1,0 \cdot 10^{-1}$ м, $d = 1,0 \cdot 10^{-2}$ м.

Полученная зависимость H_{tm}/H_{0tm} от t_{max} для листового образца из олова ($d = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м)

практически сливается с зависимостью 2 для свинца ($d = 2,0 \cdot 10^{-3}$ м).

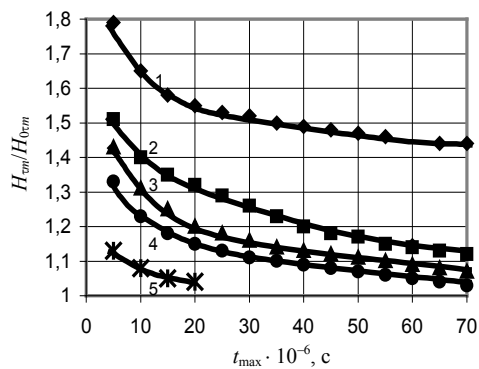


Рис. 2

Из рис. 2 следует, что временной диапазон для образца из меди толщиной $3,0 \cdot 10^{-3}$ м значительно превышает $70 \cdot 10^{-6}$ с и согласно результатам, не вошедшим в этот график, распространяется до $500 \cdot 10^{-6}$ с. Зависимость 3 (рис. 2) близка к зависимости 3 (рис. 1), т. е. изменение H_{tm}/H_{0tm} от времени нарастания импульса поля для образцов из свинца и олова толщиной соответственно $2,0 \cdot 10^{-3}$ и $2,5 \cdot 10^{-3}$ м приблизительно совпадает с аналогичной зависимостью для образца из алюминия толщиной $7,0 \cdot 10^{-3}$ м. Диапазон контроля образцов из меди толщиной $3,0 \cdot 10^{-3}$ м и сплава ВТ-2 толщиной $1,5 \cdot 10^{-3}$ м – $(3-30) \cdot 10^{-6}$ с, а свинца и олова толщинами соответственно $2,0 \cdot 10^{-3}$ и $2,5 \cdot 10^{-3}$ м несколько шире – до $50 \cdot 10^{-6}$ с. Для графита толщиной $1,0 \cdot 10^{-2}$ м этот диапазон составляет $(5-15) \cdot 10^{-6}$ с.

Известно, что на поверхности образцов из ферромагнитных металлов величина тангенциальной составляющей H_t постоянного магнитного поля линейного токопровода значительно меньше, чем величина H_t в этой точке в отсутствие образца, так как линии напряженности магнитного поля стремятся войти в образец нормально к его поверхности вследствие большой величины магнитной проницаемости μ таких образцов. При высоких частотах, т. е. при малом времени нарастания импульсов поля, μ уменьшается во много раз и становится порядка десятков и даже единиц. Несмотря на это и анизотропию свойств используемых датчиков магнитного поля, выделить из полного сигнала, снимаемого с датчика, сигнал, соответствующий

щий H_{τ} , не просто. Поэтому при исследовании взаимодействия образцов из ферромагнитных металлов с импульсными электромагнитными полями линейного токопровода нами измерялась величина полного сигнала U , снимаемого с датчика магнитного поля. На рис. 3 изображены зависимости сигнала U от времени нарастания t_{\max} одиночного импульса тока локального токопровода на поверхности ферромагнитных металлических образцов: 1 – упаковочное железо, $d = 1,6 \cdot 10^{-4}$ м; 2 – кровельное оцинкованное железо, $d = 5,0 \cdot 10^{-4}$ м; 3 – сталь 3, $d = 2,0 \cdot 10^{-4}$ м; 4 – трансформаторная сталь, $d = 3,5 \cdot 10^{-4}$ м. Величина действующего поля $H_{0\tau m} = 4,0 \cdot 10^4$ А/м.

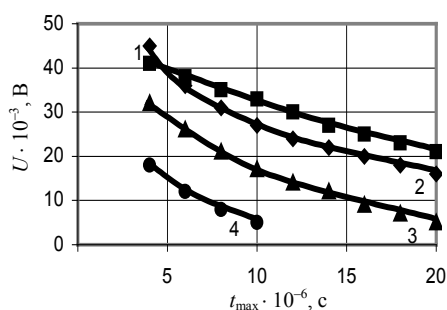


Рис. 3

Представленные на рис. 3 зависимости 1–4 характеризуют временные зависимости сигнала U , а также позволяют определить величины удельной электропроводности σ и магнитной проницаемости μ материала образца на данной частоте (времени нарастания импульса). На основании этих данных, как и данных, представленных на рис. 1, 2, можно контролировать внутренние дефекты в образцах. Однако дополнительные исследования показали, что контролируемая толщина образцов в данном случае меньше, чем для ферромагнитных. Если для образцов из диа- и парамагнитных металлов достаточно большой толщины (вплоть до бесконечного полупространства) границей применения данного метода контроля является время нарастания импульса электромагнитного поля порядка одной или нескольких миллисекунд, то для образцов из ферромагнитных материалов диапазон измерений во много раз больше. Применяя датчики магнитного поля с низкими коэрцитивными силами, можно определять свойства и разрешать их по глубине об-

разца вплоть до низких частот, т. е. до времени нарастания импульса порядка нескольких секунд.

На рис. 4 представлены: 1 – зависимость максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля $H_{\tau m}$ на поверхности образца из алюминия от толщины образца для импульса тока в виде полусинусоиды со временем нарастания $t_{\max} = 5 \cdot 10^{-6}$ с, шкалы измерений $(0-0,7) \cdot 10^{-3}$ м и $(150-275) \times 10^2$ А/м; 2 – то же, что и 1 для времени нарастания $t_{\max} = 140 \cdot 10^{-6}$ с, шкалы измерений $(0-3,5) \cdot 10^{-3}$ м и $(150-275) \cdot 10^2$ А/м; 3 – зависимость максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля источника в отсутствие образца $H_{0\tau m}$ от расстояния x до оси источника поля, шкалы $(0-0,7) \times 10^{-3}$ м и $(50-175) \cdot 10^2$ А/м; 4 – то же, что и 3 для шкал $(0-3,5) \cdot 10^{-3}$ м и $(50-175) \cdot 10^2$ А/м.

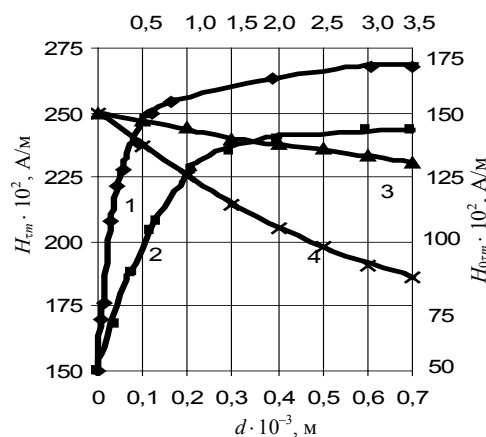


Рис. 4

Уровень отсчета на рис. 4 $x_0 = 4 \cdot 10^{-3}$ м от оси токопровода.

Из рис. 4 видно что, зависимости 1 и 2 поля $H_{\tau m}$ на поверхности образца от его толщины соответственно для $t_{\max} = 5 \cdot 10^{-6}$ с и $t_{\max} = 140 \cdot 10^{-6}$ с хотя и схожи, но дают информацию об образце в разных диапазонах его толщин. Так, толщину образца из алюминия при воздействии на него импульсом поля с $t_{\max} = 5 \cdot 10^{-6}$ с можно определить до $d = 1 \cdot 10^{-4}$ м с достаточно высокой точностью. При этом разрешение толщины не менее $H/d = 4,6 \cdot 10^5$ А/м². Толщину образца из алюминия можно определять с помощью данного импульса с меньшей точностью до $d = 7 \cdot 10^{-4}$ м.

Воздействие на образец из алюминия импульсом поля $t_{\max} = 140 \cdot 10^{-6}$ с позволяет контролировать его толщину до $d = 3,5 \cdot 10^{-3}$ м, причем с высоким разрешением не менее $H/d = 5 \cdot 10^4$ А/м² до $d = 1 \cdot 10^{-3}$ м.

Таким образом, вводя в соответствие длительности воздействующего импульса поля число строк разложения телевизионного индикатора (монитора), на экране можно получать изображение образца в сечении с определением его толщины, а также с получением другой информации об образце, например об объемных или локальных неоднородностях электропроводности и магнитной проницаемости образца и дефектах сплошности в нем.

Данные, представленные на рис. 4, позволяют определить зависимость коэффициента отражения $k_{\text{отр}}$ магнитного поля от толщины образца d , что имеет практическое значение при разработке средств обнаружения объектов, защитных экранов от электромагнитных полей в разных частотных диапазонах, а также индукционных нагревательных устройств.

Принимая во внимание, что в точке контроля $x = 0$ в отсутствие образца $H_{\text{тм}} = 150 \cdot 10^2$ А/м (зависимости 3 и 4), для образца из алюминия с $d = 1,0 \cdot 10^{-4}$ м получаем следующие коэффициенты отражения: $k_{\text{отр}} = 0,65$ при $t_{\max} = 5 \cdot 10^{-6}$ с; $0,06$ при $140 \cdot 10^{-6}$ с. Это соответствует коэффициентам увеличения поля $k_y = 1,65$ и $k_y = 1,06$.

С увеличением толщины образца коэффициенты отражения $k_{\text{отр}}$ растут и стремятся к своим предельным значениям для бесконечно протяженного материала. Такие коэффициенты равны: $k_{\text{отр max}} = 0,78$ при $t_{\max} = 5 \cdot 10^{-6}$ с и $0,62$ при $140 \cdot 10^{-6}$ с. Величины $H_{\text{тmax}}$, равные $(1 - 1/e) H_{\text{тmax пред}}$, соответствуют $H_{\text{тmax5}} = 74 \cdot 10^2$ А/м и $H_{\text{тmax140}} = 59 \cdot 10^2$ А/м и толщинам образца $2,5 \cdot 10^{-5}$ и $7,0 \cdot 10^{-4}$ м.

Зависимости 1 и 2, представленные на рис. 4, достаточно точно описываются эмпирическими формулами:

$$H_{\text{тmax5}} = 118 \cdot 10^2 (1 - e^{-18200d}); \quad (4)$$

$$H_{\text{тmax140}} = 93 \cdot 10^2 (1 - e^{-1390d}). \quad (5)$$

Эти формулы можно обобщить и привести к следующему выражению:

$$H_{\text{тmax}} = H_0 (1 - e^{-bd}), \quad (6)$$

где b – коэффициент; H_0 – предельное поле вторичного источника, т. е. металлического образца, бесконечно протяженного в глубину:

$$H_0 = k_{\text{отрmax}} H_{\text{тmax}}. \quad (7)$$

Величина H_0 зависит от удельной электропроводности и магнитной проницаемости среды, а также времени нарастания импульса поля, b – от толщины образца.

Зависимости 1 и 2 (рис. 4) имеют наибольшее отклонение от экспоненциальных на начальных участках. До величины напряженности $H_{\text{тmax}} = \frac{1}{e} H_{\text{тmax пред}}$ эти зависимости могут

быть с большой точностью описаны линейными функциями. Введем понятие тангенса α характеристического угла нарастания величины максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля (α – величина максимальной напряженности магнитного поля на поверхности металлического образца, созданная вторичным источником поля, т. е. индукционными токами в образце, и отнесенная к единице его толщины (в СИ на 1 м) при воздействии на образец изменяющимся во времени магнитным полем). Величина α пропорциональна усредненной по толщине образца плотности индукционных токов. Расчеты этого тангенса для начальных участков зависимостей 1 и 2, полученных соответственно при временах нарастания импульсов тока источника поля $5 \cdot 10^{-6}$ и $140 \cdot 10^{-6}$ с, приводят к следующим результатам: $\alpha_5 = 1,9 \cdot 10^6$ А/м²; $\alpha_{140} = 9,0 \cdot 10^4$ А/м², т. е. $\alpha_5 = 21\alpha_{140}$. Эффективные глубины проникновения магнитного поля в образец из алюминия, рассчитанные по (3) для указанных времен нарастания тока, равны: $\Delta_5 = 3,6 \cdot 10^{-4}$ м; $\Delta_{140} = 1,9 \cdot 10^{-3}$ м, т. е. $\Delta_{140} = 5,3\Delta_5$. Исходя из полученных результатов, находим взаимосвязь между эффективными глубинами проникновения магнитного поля в образец из алюминия Δ_1 и Δ_2 на частотах f_1 и f_2 (времена нарастания импульсов t_{max1} и t_{max2}) и соответствующими им тангенсами α_1 и α_2 характеристических углов:

$$\alpha_1 = 0,75 \left(\frac{\Delta_2}{\Delta_1} \right)^2 \alpha_2 = 0,75 \frac{t_{\max 2}}{t_{\max 1}} \alpha_2 = 0,75 \frac{f_1}{f_2} \alpha_2. \quad (8)$$

ВЫВОДЫ

1. Получены экспериментальные зависимости отношения максимальной величины тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности металлических образцов разной толщины, изготовленных из алюминия, меди, олова, свинца и сплава титана, к максимальной величине тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля в отсутствие образцов от времени нарастания одиночных импульсов тока в виде полусинусоиды линейного токопровода в интервале времени $(5-250) \cdot 10^{-6}$ с, а также зависимости величины сигнала, пропорционального тангенциальной и нормальной составляющим напряженности магнитного поля, для образцов из ферромагнитных металлов: упаковочное железо, кровельное оцинкованное железо, сталь 3 и трансформаторная сталь. Определены временные диапазоны разрешения электрических и магнитных свойств, а также дефектов сплошности по глубине и коэффициенты отражения электромагнитной волны от образцов.

2. Получены зависимости максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности образцов из алюминия от толщины образцов при воздейст-

вии на них электромагнитным полем импульса тока в виде полусинусоиды, созданного линейным токопроводом со временем нарастания импульсов $5 \cdot 10^{-6}$ и $140 \cdot 10^{-6}$ с. Найдены эмпирические формулы в виде экспонент зависимости величины максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности образцов из алюминия от их толщины для их времен нарастания электромагнитного поля. Начальные участки данных зависимостей представлены линейными функциями, введено понятие тангенса характеристического угла нарастания величины максимальной тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля и найдена его связь с эффективной глубиной проникновения магнитного поля в металл.

3. Полученные результаты могут быть использованы при расчете электромагнитных полей, а также в дефектоскопии, медицине и при разработке конструкций индукционных нагревательных приборов и экранов для защиты от электромагнитных полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тамм, И. Е.** Основы теории электричества / И. Е. Тамм. – М.: Наука, 1976. – С. 483–487.
2. **Кнопфель, Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972. – С. 65–76.
3. **Установки** индукционного нагрева / под ред. А. Е. Слохцкого. – Л.: Энергоиздат, 1981. – С. 12–14.

Поступила 10.10.2005