

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ЛИСТЕ

А.Ю. Бондаренко, к.т.н., ст. научн. сотр., НТУ «ХПИ»,  
Ю.В. Батыгин, профессор, д.т.н., Г.С. Сериков, аспирант, ХНАДУ

*Аннотация.* Описана методика экспериментального определения относительного распределения вихревых токов в металлическом листе, которая заключается в прямом измерении падения напряжения между двумя электродами, впаянными в него, при протекании вихревых токов, с последующим построением распределения их относительно любой, выбранной за базовую, точки. Полученные результаты хорошо согласуются с известными.

*Ключевые слова:* вихревые токи, разрядный ток, индукторная система, измерительные электроды, обрабатываемая заготовка, погрешность измерения.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОСНОГО РОЗПОДІЛУ ВИХРОВИХ СТРУМІВ У МЕТАЛЕВОМУ ЛИСТІ

О.Ю. Бондаренко, ст. наук. співр., к.т.н., НТУ «ХПІ»,  
Ю.В. Батигін, професор, д.т.н., Г.С. Серіков, аспірант, ХНАДУ

*Анотація.* Описано методику експериментального визначення відносного розподілу вихрових струмів у металевому листі, яка полягає у прямому вимірюванні падіння напруги між двома електродами, впаяними в нього, при протіканні вихрових струмів, з подальшою побудовою розподілу їх відносно будь-якої, обраної за базову, точки. Отримані результати добре узгоджуються з відомими.

*Ключові слова:* вихрові струми, струм розряду, індукторна система, вимірювальні електроди, заготовка для обробки, похибка вимірювання.

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF RELATIVE DISTRIBUTING OF VORTICAL CURRENTS IN METALLIC SHEET

A. Bondarenko, senior research worker, cand. eng. sc., NTU "KhPI", Y. Batygin, professor, dr. eng. sc., G. Serikov, post graduate student, KhNAHU

*Abstract.* The method of experimental determination of the relative distributing of vortical currents in sheet which consists in the direct measuring of tension falling between two electrodes soldered in it, at the flow line of vortical currents, with subsequent construction of their distributing in relation to any chosen of the base points is described. The results obtained coordinate well with the existing ones.

*Key words:* vortical currents, discharge current, inductor system, measuring electrodes, measurement error.

### Введение

Создание новых индукторных систем для магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) является актуальной задачей. В

настоящее время ведутся работы по созданию инструмента и магнитно-импульсных установок (МИУ) для выполнения технологической операции притяжения плоских листовых заготовок к индуктору. Это обуслов-

лено необходимостью рихтовки вмятин на корпусах автомобилей и самолетов, появляющихся на них в процессе эксплуатации [1], так как применение традиционных методов рихтовки требует доступа к внутренней поверхности стенки корпуса, что является трудоемкой операцией. Особенностью проведения технологической операции притяжения плоской заготовки к индуктору, по сравнению с классической МИОМ [2], является низкая частота разрядного тока МИУ, порядка нескольких килогерц [3], обычно 1,5 – 7 кГц. Кроме одновитковых индукторных систем, работающих в указанном частотном диапазоне, перспективными являются индукционные индукторные системы, принцип действия которых описан в работах [4, 5]. Конструктивно они отличаются от плоской одновитковой индукторной системы [2] тем, что содержат дополнительный элемент – экран.

Для расчета давления магнитного поля на заготовку и выбора оптимальной геометрии индуктора необходимо знать распределение напряженности магнитного поля в рабочем зазоре индукторной системы и распределение вихревых токов в обрабатываемой заготовке [2].

### Анализ литературы

Анализ литературы показал, что в случае простой геометрии индукторной системы и высокой частоты разрядного тока МИУ указанные картины поля и вихревых токов можно рассчитать [6, 12, 14]. В случае сложной геометрии индукторной системы и интенсивной диффузии магнитного поля в материал заготовки – расчет проводится с определенными допущениями, поэтому актуальным становится вопрос экспериментального определения токораспределения в обрабатываемой заготовке [3-5, 7].

### Постановка задачи

Целью работы является обоснование и экспериментальное подтверждение методики измерения относительного распределения вихревых токов в плоском металлическом листе при низких частотах возбуждающего электромагнитного поля, создаваемого разрядным током МИУ в индукторе.

Для исследования распределения вихревых токов в плоской листовой заготовке при вы-

сокой частоте разрядного тока МИУ может быть использована методика, описанная в работе [6], основанная на применении индукционных преобразователей, измеряющих напряженность магнитного поля на поверхности заготовки. Такой подход допустим, т. к. при высокой частоте практически весь индуцированный ток протекает в тонком поверхностном слое материала заготовки. При низких частотах, т. е. при интенсивной диффузии магнитного поля в металл заготовки, применить такой метод исследования нельзя. В этом случае возможны следующие варианты проведения измерений. В заготовке просверливаются отверстия, в которые устанавливается пояс Роговского, таким образом, чтобы он охватывал переемычку между двумя соседними отверстиями, по которой протекает вихревой ток. Сигнал, снимаемый с пояса Роговского, после интегрирования пропорционален общему току, протекающему через переемычку между отверстиями. Просверлив серию отверстий в обрабатываемой заготовке, можно, с помощью вышеописанной методики, определить распределение вихревых токов [7]. Недостатком такой методики проведения измерений являются, во-первых, искажения, вносимые в распределение плотности вихревых токов за счет появления отверстий с минимальным диаметром ~3 мм в модели обрабатываемой заготовки, и, во-вторых, погрешности, вносимые поясом Роговского в результаты измерений [8]. Второй вариант проведения исследований заключается в использовании методики, описанной в [9, 10] и заключающейся в том, что лист металла, моделирующий обрабатываемую заготовку, просверливается насквозь, и в образовавшиеся отверстия впаиваются измерительные электроды. При протекании вихревого тока в заготовке напряжение, снимаемое с двух смежных измерительных электродов, равно

$$U = E \cdot l, \quad (1)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля в металле заготовки;  $l$  – расстояние между измерительными электродами.

Согласно закону Ома

$$j = \gamma \cdot E, \quad (2)$$

где  $j$  – плотность тока;  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость материала заготовки.

Следовательно, для определения относительного распределения плотности вихревых токов в заготовке можно воспользоваться соотношением

$$\frac{U_i}{U_\delta} = \frac{j_i}{j_\delta}, \quad (3)$$

где  $U_i, j_i$  – падение напряжения между измерительными электродами и плотность тока в  $i$ -ой точке наблюдения;  $U_\delta, j_\delta$  – падение напряжения между измерительными электродами и плотность тока в точке, принятой за базовую.

Для подтверждения правильности выбранной методики измерения было использовано физическое моделирование. При этом в качестве моделей индуктора и заготовки были взяты образцы, которые использовались в экспериментах, описанных в работе [7]. Модель индуктора включалась в разрядную цепь низковольтного генератора импульсных токов (НГИТ), схемное и конструктивное исполнение которого описано в работе [11]. Конструкция НГИТ предусматривает возможность регулирования частоты (дискретно) и амплитуды разрядного тока, измерения его амплитудно-временных параметров с помощью встроенного шунта, а также работы в одиночном режиме разряда либо в непрерывном (с регулировкой частоты повторения импульсов), при котором на экране осциллографа получают устойчивые для визуального наблюдателя картины исследуемых процессов. Материалы, из которых изготовлены модели индуктора, заготовки и экрана, – неферромагнитные.

Измерительные электроды впаивались в отверстия диаметром 0,8 мм, просверленные в металле заготовки таким образом, чтобы со стороны, обращенной к индуктору, они находились на одном уровне с поверхностью заготовки. Всего установлено три электрода так, что образованная ими плоская фигура представляет равнобедренный прямоугольный треугольник, в углах которого они расположены, с размерами катетов 2,5 мм. Такое расположение электродов необходимо для одновременного измерения двух компонент вектора вихревых токов. На рис. 1 представлена фотография поверхности модели обрабатываемой заготовки, обращенная к индуктору с установленными измерительными электродами. С обратной стороны к электро-

дам припаяны измерительные кабели, оплетка и жила которых располагались на поверхности заготовки, изолированно от нее [12], что необходимо для уменьшения площади паразитных контуров. Размер модели заготовки намного превышает размер индуктора, чтобы исключить влияние краевых эффектов. Между индуктором и заготовкой устанавливался тонкий лист диэлектрика с нанесенной на него координатной сеткой, что позволяет в процессе измерений устанавливать измерительные электроды в заданную точку исследуемой индукторной системы.

Такое конструктивное исполнение измерительного тракта позволило упростить подготовительные работы перед проведением эксперимента и минимизировать погрешности, вносимые измерительными электродами в распределение вихревых токов в заготовке.

Для регистрации сигналов использовался двухлучевой осциллограф RIGOL DS1042CD, рабочая погрешность измерения амплитудно-временных параметров импульса которого равна 4 %. В процессе измерений осциллографировался разрядный ток и падение напряжения между измерительными электродами. Частота разрядного тока НГИТ составляла 33 кГц и 1,33 кГц.



Рис. 1 Часть поверхности модели заготовки с тремя измерительными электродами

Заготовка перемещалась относительно индуктора на заданное расстояние, для чего использовалась координатная сетка на диэлектрике между индуктором и экраном, и

измерения повторялись в другой точке системы. Измерения были проведены на тех же частотах, что и в экспериментах, описанных в работе [7]. Общая относительная погрешность определения распределения вихревых токов в заготовке по предложенной методике, с учётом некоррелированности её составляющих [13], составляет 8 %.

Результаты проведенных измерений сравнивались с результатами, полученными для аналогичной индукторной системы, в которой для измерения распределения плотности вихревых токов использовался пояс Роговского [7]. Различие между результатами измерений не превышает 10 %, что говорит о том, что данная методика измерений может применяться как при физическом моделировании, так и непосредственно при измерениях вихревых токов в заготовках, при обработке их на МИУ.

### Литература

1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов // *Электротехника і електромеханіка*. Харків НТУ «ХПІ». – 2004. – №2. – С.80–84.
2. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с.
3. Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А. Особенности токов, индуцированных низкочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах // *Электротехніка і електромеханіка*. Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – №3. – С.69–73.
4. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Сериков Г.С. Электродинамические процессы в индукционной индукторной системе с прямоугольной формой рабочей зоны // *Авиационно-космическая техника и технология*. Харьков: «ХПИ». – 2008. – №2 (49). – С. 45–50.
5. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю., Чаплыгин Е.А. Электродинамические процессы в цилиндрической индукционной индукторной системе для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок // *Авиационно-космическая техника и технология*. Харьков: «ХПИ». – 2007. – №11 (47). – С. 109–117.
6. Михайлов В.М. Импульсные электромагнитные поля. – Харьков: Вища школа, 1979. – 140 с.
7. Батыгин Ю.В., Сериков Г.С., Бондаренко А.Ю. Индукционная индукторная система с двойным витком // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – №1. – С.59–61.
8. Окунь И.З. Измерение разрядных токов поясами Роговского // *Приборы и техника эксперимента*. М.: Наука – 1968. – №6. – С. 120–126.
9. P. Earl Burke, Robert T. H. Alden. Current Density Probes // *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*. – 1969. – Vol. Pas-88. – № 2. – P. 181–185.
10. P. Earl Burke, John D. Lavers. The Use of Modeling Methods in the Design of Electroheating Equipment // *IEEE Transaction on Industry Application*. – 1983. – Vol. IA – 19. – №1. – P. 57–63.
11. Бондаренко А.Ю., Сериков Г.С., Чаплыгин Е.А. Низковольтный генератор импульсов тока широкого частотного диапазона для физического моделирования // *Электротехніка і електромеханіка*. Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №6. – С. 66–69.
12. Болотин И.Б., Эйдель Л.З. Измерения в переходных режимах короткого замыкания. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1981. – 192 с.
13. Касандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. – М.: Наука, 1970. – 104 с.

Рецензент: А.М. Пятак, профессор, д.ф.-м.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 7 сентября 2009 г.