

А.В. ГНАТОВ, канд. техн. наук, доц., ХНАДУ, Харьков
М.А. БЕВЗА, магистрант, ХНАДУ, Харьков

СИЛОВОЙ ЭЛЕМЕНТ ИНСТРУМЕНТА БЕСКОНТАКТНОЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ КУЗОВОВ – ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ВИТОК ИНДУКТОРА С РАЗРЕЗОМ

Проведен расчет пространственно-временного распределения вихревых токов, возбуждаемых полем плоского "незамкнутого" кругового витка – силового элемента инструмента бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки. По полученным аналитическим соотношениям выполнены численные оценки и построены объемные эпюры амплитудно-пространственного распределения плотности индуцированного тока.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка металлов, индукторная система, электромагнитные процессы, тонкостенная листовая заготовка, вихревые токи.

Постановка проблемы. К настоящему времени разработки разного рода технических систем для ремонта и восстановления заданных участков на поверхности тонкостенных листовых металлов инициированы, в основном, спросом на производственные операции по рихтовке корпусов самолётов и кузовных панелей наземных транспортных средств, в частности автомобилей. И особое место в данных системах (комплексах) занимают инструменты, с помощью которых и производится бесконтактная рихтовка поврежденных металлических поверхностей кузовов [1].

В качестве силового элемента инструмента бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки применяются плоские одновитковые соленоиды [1-4].

Для существенного упрощения решения поставленной задачи по исследованию электромагнитных процессов, силовые элементы инструмента (соленоиды) представляются замкнутыми круговыми контурами. Это позволяет ввести условие аксиальной симметрии [5, 6].

В реальных условиях виток не может быть замкнутым круговым контуром, поскольку он является элементом цепи, последовательно включаемым с источником мощности. То есть, виток – "незамкнут", он имеет разрез и функция, описывающая азимутальное распределение возбуждающего тока, терпит разрыв второго рода. Поэтому в даль-

нейшем одинаково справедливы термины "виток с разрезом" или "виток с разрывом". Аксиальная симметрия нарушается тем больше, чем больше расстояние между электрическими выводами к источнику мощности. Следовательно, широко применяемые симметричные модели расчёта реальных систем "виток – проводящий объект", основанные на их аксиальной симметрии, являются не совсем адекватными протекающим в них электромагнитным процессам.

Анализ основных достижений и публикаций. В технике магнитно-импульсной обработке металлов (МИОМ), такие индукторные системы, как "одновитковый индуктор – проводящая среда", представляют собой типичные конструкции инструментов, например, как для раздачи и обжиму трубчатых заготовок, так и для плоской штамповки. Поскольку нарушение аксиальной симметрии формы источника поля – индуктора ведёт к искажению силового воздействия на обрабатываемый объект, то такое допущение ведёт к неадекватной формулировке задач проектирования инструментов [5]. Последний фактор объясняет многие неудачные применения электромагнитных полей для решения насущных технологических проблем [4]. Отметим, что в научной периодике описаны приближённые методы решения подобных задач прикладной электродинамики, например, [7]. Их достоинства и недостатки в сравнении с классическими подходами – предмет отдельной дискуссии. Что же касается рассматриваемых в данной работе вопросов, то в этих публикациях отсутствует необходимый для практики МИОМ анализ и выводы по изменению показателей действенности инструментов при нарушении аксиальной симметрии в их конструктивном исполнении.

Цель настоящей работы – анализ электромагнитных процессов, возбуждаемых силовым элементом инструмента бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки, расположенным над тонкостенной немагнитной панелью кузова автомобиля.

Анализ электромагнитных процессов. Принятая модель для проведения анализа электромагнитных процессов представлена на рис. 1, где $\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$ – направляющие орты.

Постановка задачи.

- Бесконечно протяжённый в поперечных направлениях лист толщиной – d выполнен из немагнитного металла с удельной электропроводностью – γ .
- Виток индуктора расположен над поверхностью пластины на расстоянии – h , его радиус – R , поперечные размеры настолько малы, что влияние металла витка на электромагнитные процессы несуществ-

венно, и, математически, расположение возбуждающего тока индуктора можно описать произведением дельта-функций Дирака $\sim \delta(z-h) \cdot \delta(r-R)$.

- В местах соединения витка (соответствующие токопроводы перпендикулярны к его плоскости) и источника мощности имеет место "разрыв" по азимуту, описываемый функцией

$$f(\varphi) = \eta(\varphi - \varphi_0) - \eta(\varphi - (2\pi - \varphi_0)), \quad (1)$$

где $\eta(\varphi)$ – ступенчатая функция Хевисайда,

$2\varphi_0$ – величина "разрыва" в витке, выраженная в терминах азимутального угла.

- По витку протекает азимутальный ток с плотностью – $j_{\varphi i}(t, r, \varphi, z)$,

$$j_{\varphi i}(t, r, \varphi, z) = j(t) \cdot \delta(r - R) \cdot \delta(z - h) \cdot f(\varphi), \quad (2)$$

где $j(t)$ – амплитудно-временная зависимость, t – время.

Временные характеристики возбуждающего тока таковы, что $\omega \cdot \tau \ll 1$, где ω – характерная циклическая частота сигнала, $\tau = \mu_0 \cdot \gamma \cdot d^2$ – характерное время диффузии в металлический лист [3-6, 9-11].

Примечание. Необходимо подчеркнуть, что допущение о форме возбуждающего тока с азимутальным разрывом первого рода исключает влияние токоподводов к витку, но не противоречит требованию непрерывности линий тока – $\text{div} j_{\varphi i}(t, r, \varphi, z) = 0$, формально следующему из системы уравнений Максвелла, записанной для нулевых начальных условий в [11]. Принятая модель расчёта предполагает их замкнутость в элементах разрядного контура (рис.1), частью которого является и виток, а не в пространстве между местами его подсоединения к источнику за счёт априори пренебрежимо малых токов смещения.

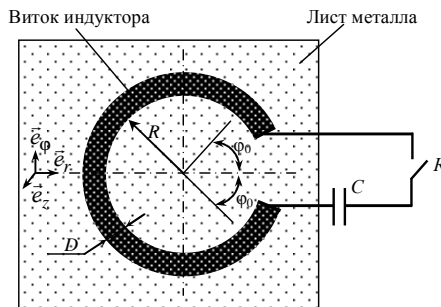


Рис. 1 – Плоский "незамкнутый" виток над тонкостенным листом металла.

В соответствии с постановкой задачи составим уравнения Максвелла в пространстве изображений по Лапласу для нулевых начальных условий $\mathbf{E}=\{E_r \neq 0, E_\varphi \neq 0, E_z \neq 0\}$ и $\mathbf{H}=\{H_r \neq 0, H_\varphi \neq 0, H_z \neq 0\}$:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \mathbf{H}(p, r, \varphi, z) = j_{\varphi i}(p, r, \varphi, z) + \gamma \cdot \mathbf{E}(p, r, \varphi, z); \\ \operatorname{rot} \mathbf{E}(p, r, \varphi, z) = -p \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H}(p, r, \varphi, z); \\ \operatorname{div} \mathbf{H}(p, r, \varphi, z) = 0; \operatorname{div} \mathbf{E}(p, r, \varphi, z) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где p – параметр преобразования Лапласа,

$$j_{\varphi i}(p, r, \varphi, z) = L\{j_{\varphi i}(t, r, \varphi, z)\},$$

$$\mathbf{H}(p, r, \varphi, z) = L\{\mathbf{H}(t, r, \varphi, z)\}, \quad \mathbf{E}(p, r, \varphi, z) = L\{\mathbf{E}(t, r, \varphi, z)\}.$$

Интегрирование уравнений Максвелла производилось аналогично тому, как это приведено в монографии [4]. Опуская промежуточные математические выкладки [8], запишем аналитическую пространственно-временную зависимость для линейной плотности азимутальной составляющей тока, индуцированного в тонкостенном листовом металле полем "разомкнутого" витка индуктора, полученную в [11].

$$J_\varphi^{(2)}(t, r, \varphi) = -\frac{\tau R}{(8d^2)} \frac{dj(t)}{dt} \times \int_0^\infty \sum_{n=0}^\infty F_n(\varphi_0) [J_{n+1}(\lambda R) - J_{n-1}(\lambda R)] \times \\ \times [J_{n+1}(\lambda r) - J_{n-1}(\lambda r)] e^{-\lambda h} \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} \cos(n\varphi) d\lambda. \quad (4)$$

$$\text{где } F_n(\varphi_0) = \begin{cases} \left(-\frac{2 \sin(n\varphi_0)}{\pi n} \right), & n \neq 0, \\ \left(1 - \frac{\varphi_0}{\pi} \right), & n = 0. \end{cases}$$

$J_n(\lambda r)$ – функция Бесселя n -ого порядка,

λ – параметр преобразования.

Достоверность выражения (4) можно установить предельным переходом к зависимости, которая может быть получена из формул авторской работы для поля аксиально-симметричного витка над тонкостенным проводящим листом.

Так, для "замкнутого" витка с $\varphi_0 \approx 0$ зависимость (4) принимает вид:

$$J_\varphi^{(2)}(t, r, \varphi) = -\frac{\tau R}{(2d^2)} \frac{dj(t)}{dt} \int_0^\infty J_1(\lambda R) J_1(\lambda r) e^{-\lambda h} \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} d\lambda. \quad (5)$$

Результат (5) с точностью до обозначений совпадает с выражением для азимутальной компоненты вихревого тока, возбуждаемой тонким (ширина стремится к нулю) аксиально-симметричным витком [4, 5].

Следует обязательно подчеркнуть, что временная зависимость индуцированного тока, так же, как и в случае витка без разреза, остаётся равной первой производной от возбуждающего тока индуктора.

Зависимость (5) преобразуем к виду, удобному для проведения численных оценок.

Введём новую переменную интегрирования $x = \lambda R$, $\lambda = x/R$, $d\lambda = 1/R$, $x \in [0, \infty]$.

Результат после необходимых преобразований запишем в виде

$$J_{\text{отн}} = -\frac{J_{\Phi}^{(2)}(t, r, \varphi)}{\left(\frac{\tau \cdot R}{2d^2}\right) \cdot \frac{dj(t)}{dt}} \int_0^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} F_n(\varphi_0) [J_{n+1}(x) - J_{n-1}(x)] e^{-x \frac{h}{R}} \frac{\left(1 - e^{-x \frac{d}{R}}\right)}{x} \times \\ \times \left[J_{n+1}\left(x \frac{r}{R}\right) - J_{n-1}\left(x \frac{r}{R}\right) \right] \cos(n\varphi) dx. \quad (6)$$

Для выполнения конкретных оценок примем те же исходные данные, что и ранее: $R=0,025$ м, $h=0,0025$ м, $d=0,001$ м.

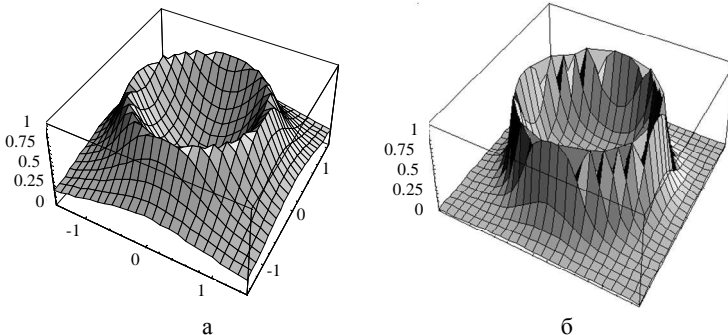


Рис. 2. Объёмные эпюры амплитудно-пространственного распределения плотности тока, индуцированного аксиально-симметричным витком (без "разрыва"): а – в металле тонкостенного листа; б – на поверхности идеального проводника.

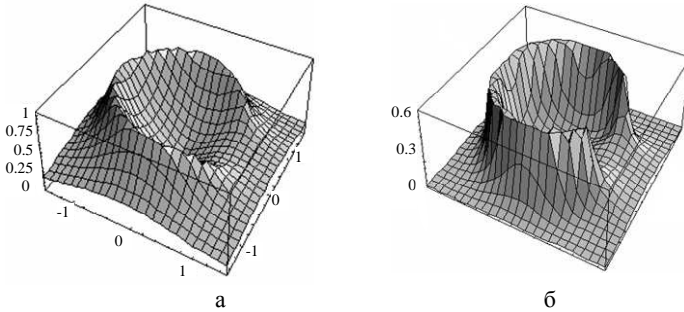


Рис. 3. Объёмные эпюры амплитудно-пространственного распределения плотности тока, индуцированного витком с "разрывом", $\Theta=0,2$: а – в металле тонкостенного листа; б – на поверхности идеального проводника.

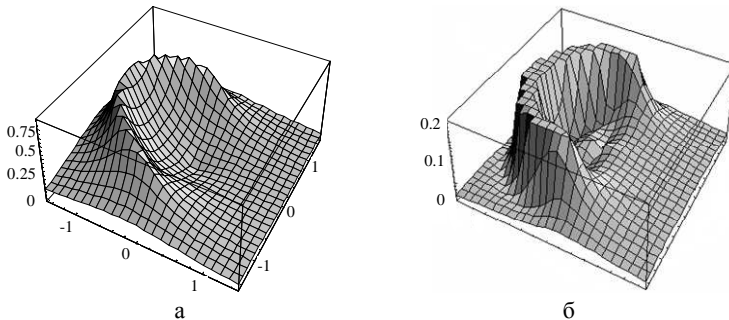


Рис. 4. Объёмные эпюры амплитудно-пространственного распределения плотности тока, индуцированного витком с "разрывом", $\Theta=0,5$: а – в металле тонкостенного листа; б – на поверхности идеального проводника.

Результаты настоящих вычислений оформлены в виде объёмных эпюр, рис. 2 – рис. 4, где Θ – угол "разрыва" в витке в относительных единицах. Здесь же для сравнения приведены аналоги, полученные ранее для идеально проводящей среды. Графические зависимости даны в относительных единицах с нормировкой на амплитуду индуцированного тока в аксиально-симметричной системе. "Провалы" на эпюрах соответствуют "разрывам" в витке.

Следует отметить, что при увеличении ширины "разреза" в случае тонкостенного листового металла амплитуда индуцированного тока непосредственно под витком индуктора падает существенно меньше, чем в случае идеального проводника. Это объясняется тем, что с ростом электропроводности индуцированный ток всё более концентрируется под витком, и нарушение его аксиальной симметрии отражается

на амплитуде вихревых токов более значимо, чем в случае низкой электропроводности, когда снижение этой амплитуды уже имело место за счет диффузионных процессов и сопровождающего "растекания" тока в поперечных направлениях.

Выводы: 1. Проведен анализ электромагнитных процессов, возбуждаемых силовым элементом инструмента бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки, расположенным над тонкостенной немагнитной панелью кузова автомобиля. 2. Показано, что растекание индуцированного тока в поперечном направлении от области непосредственно под витком индуктора – силового элемента инструмента, обусловлено диффузией поля сквозь металл тонкостенного листа кузовной панели автомобиля. 3. Проведены численные оценки, как для двух крайних противоположных идеализаций: "абсолютно прозрачный" проводник и "абсолютно не прозрачный" проводник, так и для различных значений величины "разрыва" в силовом элементе инструмента бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки. 4. Определено, что при увеличении ширины "разреза" в случае "прозрачного" проводника амплитуда индуцированного тока непосредственно под витком силового элемента инструмента падает существенно меньше, чем в случае идеального проводника.

Список литературы: 1. *Гнатов А.В.* Экспериментальные исследования индукторов – инструментов для МИОМ / А.В. Гнатов, Е.А. Чаплыгин // Вісник НТУ "ХПІ". – Х.: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 49. – С. 79-84. 2. Экспериментальный комплекс для бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки корпусных элементов транспортных средств. Міжнародна всеукраїнська науково-практична конференція ["Сучасні енергетичні усунування на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування"] СЕУТТОО – 2012]. (Херсон, Україна 10-12 жовтня 2012 р.) / А.В. Гнатов. – Херсон: Херсонський державний морський інститут, 2012. – 280с. – С. 14-19. 3. *Батыгин Ю.В.* Цилиндрический виток индуктора с разрезом как инструмент для магнитно-импульсной обработки металлов / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов // Электричество. – М., 2011. – № 12. – С. 53-59. 4. *Туренко А.Н.* Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монографія / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов. – Харків: ХНАДУ, 2009 – 240 с. 5. *Батыгин Ю.В.* Вихревые токи в тонких металлических листах при магнитно-импульсной обработке металлов / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, А.Ю. Бондаренко // Электричество. – М.: 2009. – №9 – С 61-65. 6. *Гнатов А.В.* Расчет электромагнитных процессов в индукционной индукторной системе с массивным экраном конечной толщины / А.В. Гнатов // Електротехніка і електромеханіка. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2009. – № 5. – С. 59-62. 7. *Васецкий Ю.М.* Приближённая модель для расчёта переменного магнитного поля произвольного контура с учётом вихре-

вых токов в проводящем полупространстве./ Ю.М. Васецкий, Л.В. Городжа И.Л. Мазуренко – К.: Технічна електродинаміка, Тематичний випуск [Модельювання електронних, енергетичних та технологічних систем]. – 1999. – Ч.1. – С. 83-99. **8.** Мэтьюз Дж. Математические методы физики / Дж. Мэтьюз, Р. Уокер. Пер. с англ. канд. физ.-мат наук В.П. Крайнова. М: Атомиздат, 1972. – 399 с. **9.** Гнатов А.В. Электромагнитные процессы в индукционной индукторной системе с одновитковым соленоидом, массивным экраном и тонкостенной листовой заготовкой / А.В. Гнатов // Електротехніка і електромеханіка. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2009. – № 6. – С. 46-49. **10.** Батыгин Ю.В. Цилиндрический виток конечной ширины с разрезом над идеально проводящим массивным проводником / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Д.О. Смирнов // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: 2011. – № 2. – С. 56-60. **11.** Гнатов А.В. Электромагнитные процессы в индукторной системе с тонким круговым витком с разрезом над тонкостенным листом металла / А.В. Гнатов // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: 2012. – № 5. – С. 51-55.

Поступила в редколлегию 29.03.2013

УДК 621.318.4

Силовой элемент инструмента бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки кузовов – цилиндрический виток индуктора с разрезом / Гнатов А.В., Бевза М.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 15 (988). – С. 131-138. Бібліогр.: 11 назв.

Проведено розрахунок просторово-часового розподілу вихрових струмів, збуджених полем плоского "незамкнутого" кругового витка – силового елемента інструменту безконтактного магнітно-імпульсного рихтування. За отриманими аналітичними співвідношеннями виконані чисельні оцінки і побудовані об'ємні епюри амплітудно-просторового розподілу щільності індукованого струму.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка металів, індукторних система, електромагнітних по-нітних процеси, тонкостінна листова заготівля, вихрові струми.

Calculation of the spatial and temporal distribution of eddy currents induced by the field of a plane "open" circular turn – a power element of the instrument for contactless magnetic-impulse flattening is carried out. By obtained analytical dependences numerical assessments are carried out and spatial diagrams of the amplitude-spatial distribution of the induced current density are built.

Keywords: magnetic-impulse processing of metals, inductor system, electromagnetic processes, thin-walled parent sheet, eddy currents.