

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИМПУЛЬСНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ ТОКА – СОГЛАСУЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ ДИСКОВОГО ТИПА

И.С. Трунова, старший преподаватель ХНАДУ

Аннотация. В статье проведено моделирование электродинамических процессов в согласующих устройствах дискового типа для техники внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки. Построены графики радиального распределения плотности индуцированного тока во вторичной обмотке согласующего устройства и временной зависимости индуцированного тока в первичной и во вторичной обмотке совмещенного согласующего устройства дискового типа.

Ключевые слова: магнитно-импульсная рихтовка, согласующее устройство, импульсный трансформатор тока, электродинамические процессы

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ІМПУЛЬСНОМУ ТРАНСФОРМАТОРІ СТРУМУ – УЗГОДЖУВАЛЬНОМУ ПРИСТРОЇ ДИСКОВОГО ТИПУ

І.С. Трунова, старший викладач, ХНАДУ

Анотація. В статті проведено моделювання електродинамічних процесів в узгоджувальних пристроях дискового типу для техніки зовнішнього безконтактного магнітно-імпульсного рихтування. Побудовано графіки радіального розподілу густини індукованого струму у вторинній обмотці узгоджувального пристрою і часові залежності індукованого струму в первинній і у вторинній обмотці суміщеного узгоджувального пристрою дискового типу.

Ключові слова: магнітно-імпульсне рихтування, узгоджувальний пристрій, імпульсний трансформатор струму, електродинамічні процеси

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTRODYNAMICAL PROCESSES IN A PULSE CURRENT TRANSFORMER – MATCHING DEVICE OF DISK TYPE

I. Trunova, senior teacher, KhNAHU

Abstract. Modeling and analysis of electrodynamic processes in matching devices of disk type for external non-contact magnetic-pulse straightening technique have been carried out in the article. The graphs of radial-distribution of induced current density in secondary coil of matching device and time dependence of induced currents in primary and secondary coil of combined matching device of disc type have been constructed.

Keywords: magnetic-pulse straightening, matching device, pulse current transformer, electrodynamic processes

Введение

В настоящее время в современной промышленности особое значение приобретают про-

грессивные технологии, которые удовлетворяют требованиям экологической чистоты, высокой производительности и низкого энергопотребления [1].

К перспективным прогрессивным технологиям такого типа относится новейшая технология ремонта кузовных панелей автомобилей – внешняя бесконтактная магнитно-импульсная рихтовка.

Наиболее очевидной и привлекательной особенностью практического применения магнитно-импульсной рихтовки в транспортных отраслях является возможность устранения вмятин в кузовных панелях без каких-либо механических контактов и без нарушения существующего защитного лакокрасочного покрытия. Последний фактор приобретает особую значимость, если вмятина не глубока и покрытие не было повреждено [1].

В связи с этим возрастает необходимость в осуществлении различных технических разработок и усовершенствований всевозможных технических систем, устройств и конструкций инструментов, которые позволяют производить внешнюю бесконтактную магнитно-импульсную рихтовку кузовов легковых автомобилей.

Анализ публикаций

Эффективность процесса магнитно-импульсной рихтовки зависит от значения тока и его параметров (амплитудное значение, частота, форма разрядного импульса) в инструменте – индукторе [1]. Следовательно, вопросы, связанные с достижением необходимых параметров разрядного импульса тока в индукторной системе являются достаточно актуальными, и одним из способов их решения является включение в индукторные системы различных согласующих устройств.

Согласующее устройство по принципу работы представляет собой импульсный трансформатор тока [2]. Один из вариантов его возможного практического исполнения представляет собой конструкцию, состоящую из массивного металлического диска с радиальным разрезом (вторичная обмотка), с одной из сторон которого располагается многovitковая катушка (первичная обмотка). Первичная обмотка подключается к выходу источника мощности. Индукторная система подсоединяется к вторичной обмотке в области радиального разреза. Схематически согласующее устройство с подключённой индукторной системой показано на рисунке 1 [3].

В лаборатории электромагнитных технологий (ЛЭТ) Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (ХНАДУ) разработан ряд согласующих устройств, предназначенных для выполнения технологических операций по внешней рихтовке кузовных панелей автомобилей [4, 5].

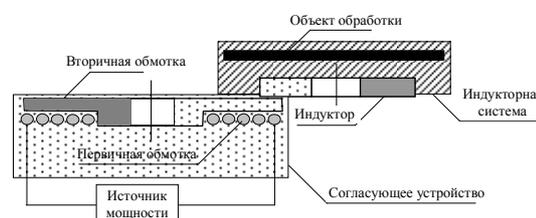


Рис. 1. Схема подключения согласующего устройства

Для повышения прочностных характеристик инструмента и исключения высоких переходных сопротивлений, которые возникают в местах подсоединения индуктора к согласующему устройству, предложена совмещенная конструкция согласующего устройства с индуктором, что означает их изготовление в виде единого целого – инструмента магнитно-импульсной рихтовки [6]. Результатом такого конструктивного решения является возможность значительно повысить уровень передачи энергии в рабочую зону инструмента.

Цель и постановка задачи

Цель настоящей работы – моделирование электродинамических процессов в согласующих устройствах дискового типа для техники внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки.

Проведем моделирование электродинамических процессов для двух вариантов конструктивного исполнения инструментов магнитно-импульсной рихтовки:

- с отдельным согласующим устройством дискового типа;
- с совмещенным согласующим устройством дискового типа.

Моделирование электродинамических процессов в согласующих устройствах дискового типа

Согласующим устройством дискового типа является импульсный трансформатор тока,

первичная обмотка которого выполнена в виде плоского многovitкового соленоида, размещённого между двумя идентичными проводящими дисками с одинаковыми радиальными разрезами. Диски являются вторичной обмоткой, к которой на краях разрезов подключается нагрузка (рис. 2).

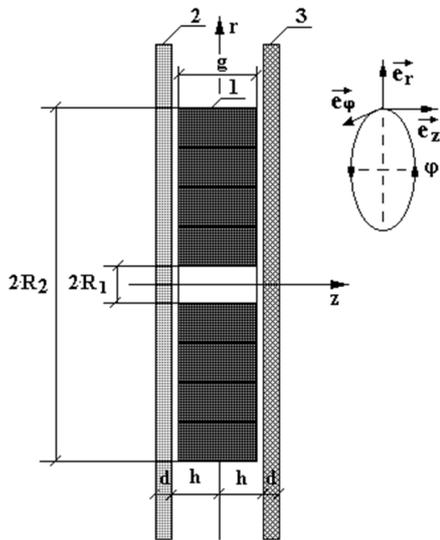


Рис. 2. Расчётная модель: 1 – первичная обмотка, плоский многovitковый соленоид; 2,3 – вторичная обмотка

На основании расчетной модели, представленной на рисунке 2, были составлены уравнения Максвелла [7]. Решая полученные уравнения известными математическими методами [8] и опуская промежуточные выкладки, запишем выражение для определения величины индуцированного тока в диске «условного» радиуса R :

$$I_{\varphi}(R, p) = -\frac{\mu_0 \gamma}{2} \int_0^{\infty} \frac{p \cdot j(p) \cdot A_1(p, \lambda)}{q(p, \lambda) \cdot G(p, \lambda)} \cdot f(\lambda) \cdot \frac{(1 - J_0(\lambda \cdot R))}{\lambda} d\lambda, \quad (1)$$

$$\text{где } A_1(p, \lambda) = \left[1 - (\text{ch}((q(p, \lambda) \cdot d)) + \frac{(q(p, \lambda) \cdot d)}{(\lambda \cdot d)} \cdot \text{sh}((q(p, \lambda) \cdot d))) \right].$$

После необходимых тождественных преобразований находим оригинал для индуцированного тока:

$$I_{\varphi}(R, t) = -\left(\frac{I_m \cdot w \cdot d}{R_2 - R_1} \right) \cdot \int_0^{\infty} \frac{F_1(\beta_k, x)}{F_2(\beta_k, x, h)} \cdot$$

$$\cdot f(x) \frac{\left(1 - J_0 \left(x \cdot \frac{R}{d} \right) \right)}{x} \cdot f_k(x, \varphi) \cdot dx, \quad (2)$$

$$\text{где } f(x) = \frac{1}{x^2} \int_{x \cdot \frac{R_1}{d}}^{x \cdot \frac{R_2}{d}} y \cdot J_1(y) \cdot dy;$$

$$F_1(\beta_k, x) = 1 - \left(\cos(\beta_k) - \frac{\beta_k}{x} \cdot \sin(\beta_k) \right);$$

$$F_2(\beta_k, (\lambda d), h) = \cos(\beta_k) \left[\text{sh} \left(x \frac{h}{d} \right) - \left(\frac{\beta_k}{x} \right)^2 \cdot$$

$$\cdot \text{ch} \left(x \frac{h}{d} \right) + \frac{e^{\left(x \frac{h}{d} \right)}}{x} \right] - \sin(\beta_k) \cdot \left(\frac{\beta_k}{x} \right) \cdot$$

$$\left[e^{\left(x \frac{h}{d} \right)} + \frac{2 \text{ch} \left(x \frac{h}{d} \right)}{x} \right].$$

Радиальное распределение индуцированного тока, найдено из выражения (1):

$$J_{\varphi}(r, t) = -\left(\frac{I_m \cdot w}{R_2 - R_1} \right) \cdot \int_0^{\infty} \frac{F_1(\beta_k, x)}{F_2(\beta_k, x, h)} f(x) \cdot J_1 \left(x \cdot \frac{r}{d} \right) \cdot f_k(x, \varphi) \cdot dx. \quad (3)$$

Полученные результаты были промоделированы численными оценками для ситуаций, реальных в практике магнитно-импульсной обработки металлов [1, 2].

Результаты моделирования индуцированных токов приведены на рис. 3.

Краткие комментарии по проведенным исследованиям:

1. Максимальная величина коэффициента трансформации по току в рассмотренной конструкции согласующего устройства «дискового» типа с двумя дисками в качестве вторичной обмотки составляет $\sim 12 \div 13$, что составляет $(0,6 \div 0,7) \cdot w$, w – число витков первичной обмотки.

2. Из графической зависимости на рис. 3 следует, что местом наиболее эффективного токосъема сигнала со вторичной обмотки является окружность по центру первичной

обмотки согласующего устройства ($r/R \approx 0,6$).

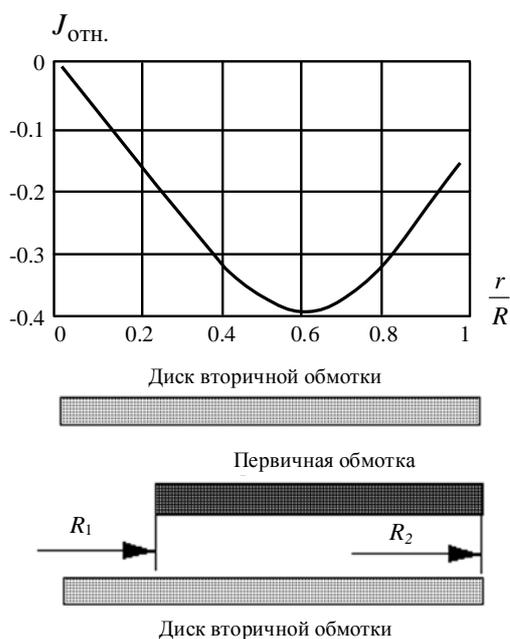


Рис. 3. Радиальное распределение плотности тока, индуцированного в металле диска, в отношении к максимуму плотности тока первичной обмотки

Устройство с вторичной обмоткой в виде диска, выполняющего функции инструмента магнитно-импульсной рихтовки в специальной литературе получило название – совмещённое согласующее устройство дискового типа [1, 3–6].

Как показано на рис. 4, в совмещённом согласующем устройстве дискового типа вторичная обмотка выполнена в виде массивного плоского одновиткового индуктора с развитой поверхностью, размеры которой должны соответствовать поперечным размерам катушки первичной обмотки.

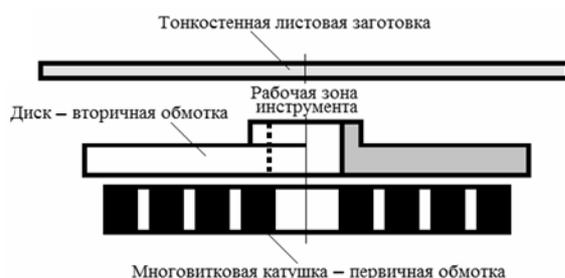


Рис. 4. Схематическое изображение совмещённого согласующего устройства дискового типа

Внутреннее отверстие витка со стороны, обрабатываемой листовой заготовки ограничено цилиндрическим выступом. Область над его верхним основанием – рабочая зона инструмента.

Для дальнейшего исследования совмещённого согласующего устройства дискового типа, в соответствии с поставленной целью обобщим результаты работ [1, 5]. Опуская промежуточные выкладки при решении уравнений, запишем окончательный результат: – зависимость для радиального распределения линейной плотности индуцированного тока:

$$J_{\varphi}(r, \varphi) = 2 \cdot j_m \cdot \int_0^{\infty} f(x) \cdot e^{-x \cdot \frac{h}{d}} \cdot J_1(x \cdot \frac{r}{d}) \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{F_{2k}(\mu_r \cdot x)}{\Phi_k(\mu_r \cdot x)} \cdot f_{1k}(x, \varphi) \cdot dx, \quad (4)$$

где $F_{2k}(\mu_r, x) = (\mu_r \cdot x) \cdot (1 - \cos(\beta_k)) + \beta_k \cdot \sin(\beta_k)$;

– интегральная величина тока, индуцированного в металлическом диске радиуса R_0 :

$$I_{\varphi}(R_0, \varphi) = 2(j_m \cdot d) \int_0^{\infty} f(x) \cdot e^{-x \cdot \frac{h}{d}} \cdot \left(1 - J_0\left(x \cdot \frac{R_0}{d}\right)\right) \left(\sum_{k=0}^{\infty} \frac{F_{2k}(\mu_r \cdot x)}{\Phi_k(\mu_r \cdot x)} \cdot f_{1k}(x, \varphi)\right) dx, \quad (5)$$

– формула для оценки коэффициента трансформации:

$$K(R_0) = 2 \left(\frac{d \cdot w}{(R_2 - R_1) \cdot (e^{-\delta_0 \cdot \varphi_{1\max}} \sin \varphi_{1\max})} \right) \cdot \int_0^{\infty} f(x) \cdot e^{-x \cdot \frac{h}{d}} \left(1 - J_0\left(x \cdot \frac{R_0}{d}\right)\right) \cdot \left(\sum_{k=0}^{\infty} \frac{F_{2k}(\mu_r \cdot x)}{\Phi_k(\mu_r \cdot x)} \cdot f_{1k}(x, \varphi_{2\max})\right) dx, \quad (6)$$

где $\varphi_{1\max}$ – значение фазы максимума тока в индукторе; $\varphi_{2\max}$ – значение фазы максимума индуцированного тока.

По полученным расчетным соотношениям проведено численное моделирование, для

ситуаций, реальных в практике магнитно-импульсной обработки металлов, результаты которого представлены на рис. 5.

Коэффициент трансформации для алюминиевого диска составил $K_{Al}(R_0) \approx 5,16$, для стального – $K_{St}(R_0) \approx 3,97$.

Проведенное моделирование показало, что временная форма тока, индуцированного в металле диска (вторичной обмотке), практически повторяет временную форму тока в первичной обмотке согласующего устройства (с точностью до знака) независимо от электрофизических свойств металла диска.

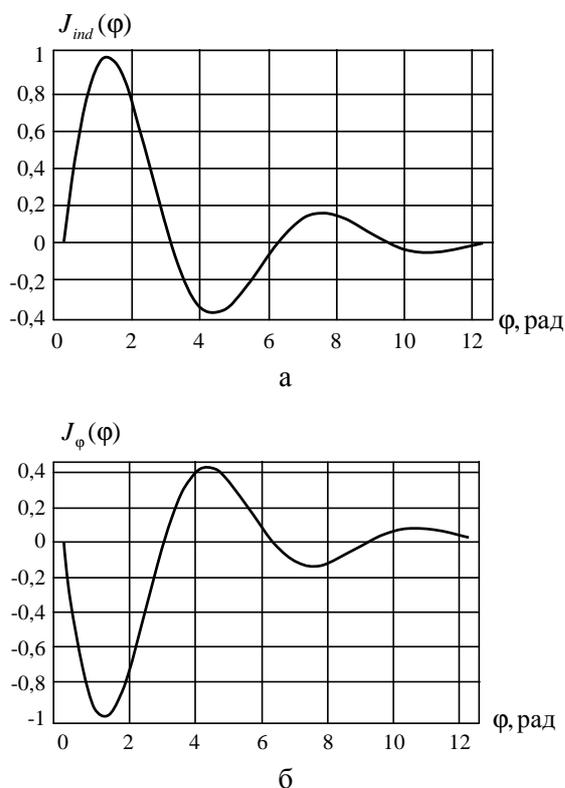


Рис. 5. Временная зависимость токов в относительных единицах: фаза $\varphi = \omega \cdot t$; а – возбуждающий ток в первичной обмотке; б – ток, индуцированный в металле диска – вторичной обмотке

Выводы

Проведено моделирование электродинамических процессов в согласующих устройствах дискового типа для техники внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки.

Рассмотрены два варианта конструктивного исполнения инструментов магнитно-импульсной рихтовки на основе согласую-

щего устройства дискового типа.

Построены графические зависимости радиального распределения плотности индуцированного тока во вторичной обмотке согласующего устройства.

Определено, что местом наиболее эффективного токосяема сигнала со вторичной обмотки является окружность по центру первичной обмотки согласующего устройства $r/R=0,6$.

Смоделирована временная зависимость возбуждающего тока в первичной обмотке совмещенного согласующего устройства и временная зависимость тока, индуцированного в металле диска (вторичной обмотке).

Литература

1. Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии бесконтактной рихтовки кузовных элементов автомобиля: монография / А. В. Гнатов, Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 – 242 p.
2. Белый И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. Х.: Вища школа. 1977. – 168 с.
3. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т.3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов. – Х.: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
4. Лаборатория электромагнитных технологий [Электронный ресурс]. – Материалы сайта – 2012. – Режим доступа: <http://electromagnetic.comoj.com>.
5. Батыгин Ю.В. Согласующее устройство "дискового" типа / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, И.С. Трунова // Электротехника и электромеханика. – Харьков. – 2012. – №2. – С. 69-73.
6. Пат. 68745 Україна, МПК В21D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю. В., Гнатов А. В., Аргун Щ. В., І. С. Трунова, Чаплигін Є. О.; заявник та патентовласник ХНАДУ. – № u 201111225 ; заявл. 21.09.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7.