

УДК 621.318.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИММЕТРИЧНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ

А.В. Гнатов, профессор, д.т.н., ХНАДУ

Аннотация. В статье проведено моделирование электродинамических процессов в симметричной индукционной индукторной системе – инструменте бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки. По полученным аналитическим зависимостям проведены численные оценки и построены объёмные эпюры амплитудно-пространственного распределения возбуждаемых сил притяжения.

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

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИМЕТРИЧНИХ ІНДУКЦІЙНИХ ІНДУКТОРНИХ СИСТЕМАХ

А.В. Гнатов, профессор, д.т.н., ХНАДУ

Анотація. У статті проведено моделювання електродинамічних процесів в симетричній індукційній індукторній системі – інструменті безконтактного магнітно-імпульсного рихтування. За отриманими аналітичними залежностями проведені чисельні оцінки і побудовані об'ємні епюри амплітудно-просторового розподілу сил тяжіння, які збуджуються.

Ключові слова: Магнітно-імпульсна обробка металів, індукторна система, електромагнітні процеси, тонкостінна листова заготівка, вихрові струми.

THE MODELING OF ELECTRODYNAMICAL PROCESSES IN A SYMMETRICAL INDUCTION INDUCTOR SYSTEM

A. Hnatov, Professor, Doctor of Technical Science, KhNAHU

Abstract. In this article the modeling of electrodynamical processes in symmetrical induction inductor system – tool for non-contact magnetic-pulse straightening has been carried out. According to obtained analytical dependence, the numerical estimates was conducted and three-dimensional diagrams of amplitude-space distribution of excited attractive forces was constructed.

Key words: magnetic pulse metal working, inductor system, electromagnetic processes, thin-walled sheet workpiece, eddy-currents.

Введение

Индукционные индукторные системы представляю собой универсальные инструменты для притяжения (рихтовки) тонкостенных металлов. Принцип их действия основан на законе Ампера для проводников с одинаково направленными токами [1, 2]. Следует отметить, что силовое взаимодействие между

плоскими проводящими листами, в металле которых возбуждаются одинаково направленные индуцированные токи, возможно лишь в режиме интенсивного проникновения поля индуктора сквозь эти листы. Только в этом случае при нулевом поле между ними возникают силы магнитного давления извне, обуславливающие их взаимное притяжение [3 - 6].

Если, например, требуется устранить вмятину в металлическом листе, её следует расположить под витком в области индуктора, которая в дальнейшем будет называться рабочей зоной системы. Тогда силовое взаимодействие индуцированных токов позволит притянуть соответствующий участок этого листа к плоскости жёсткой поверхности индуктора и устранить вмятину.

Анализ публикаций

Особое место среди мировых производителей использующих полевые технологии занимают корпорация Boeing Company [7] и мировые бренды, что ответвились от нее: Electroimpakt [8], Fluxtronic [9]. Данные компании занимаются созданием магнитно-импульсных технологий для внешнего устранения вмятин в корпусах самолетов. Общими недостатками их систем являются: наличие двух источников энергии; сложность требуемой сильноточной электроники; необходимость в высокоточной синхронизации высокочастотного и низкочастотного сигнала; большие затраты на требуемые комплектующие; низкая надёжность в эксплуатации и высокая себестоимость конечного продукта.

Совершенно новые возможности для создания устройств по внешнему устранению вмятин на корпусных (кузовных) элементах транспортных средств открывает явление, экспериментально обнаруженное профессорами Ю.В.Батыгиным, В.И. Лавинским и Л.Т. Хименко [4, 10,] и зафиксированное в Национальном техническом университете «ХПИ». Его суть состоит в том, что при частотах действующих полей ниже 2 кГц имело место притяжение металла образца к поверхности индуктора-инструмента. При увеличении частоты до 7 кГц и выше образец отталкивался согласно традиционным представлениям о процессах при МИОМ. Индукторные системы являются исполнительными органами – инструментами, посредством которых проводится рихтовка металлических поверхностей.

Цель настоящего рассмотрения – моделирование электродинамических процессов в индукционной индукторной системе с одинаковыми тонкостенными листовыми ферромагнетиками, между которыми размещён круговой виток индуктора.

Анализ электродинамических процессов

Для анализа электромагнитных процессов примем расчётную модель в цилиндрической системе координат, показанную на рис.1.

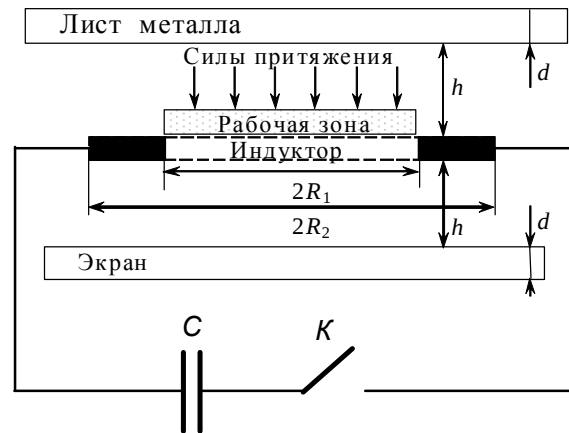


Рис. 1. Расчётная модель индукционной индукторной системы

Для расчётной модели, представленной на рис. 1 составляются уравнения Максвелла для возбуждаемых составляющих вектора электромагнитного поля ($E_\varphi \neq 0, H_{r,z} \neq 0$). Решая составленные уравнения известными математическими методами [11, 12], во избежание громоздкости в изложении, опустим промежуточные выкладки, и запишем окончательное выражение для искомых величин возбуждаемых сил.

Силы притяжения листовых металлов с индуцированными токами (закон Ампера) описываются соотношением [2, 4, 6]:

$$F_A(\varphi, r) = F_{Am}(\varphi) \cdot \left(\int_0^\infty \Phi_3(x) \cdot J_1\left(x \frac{r}{d}\right) dx \right)^2, \quad (1)$$

$$\text{где } F_{Am}(\varphi) = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{r}{h} \left(j_m \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \cdot \frac{(\omega \cdot \tau)}{2} \right)^2,$$

$$\begin{aligned} \Phi_3(x) = & \left(F(x) \cdot \left((1 - ch(x)) - \frac{1}{\mu_r} \cdot sh(x) \right) \right) / \\ & / \left(x^3 \left(sh(x) \cdot sh\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) \right) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{\mu_r} \cdot e^{x \frac{h}{d}} \cdot ch(x) \right) \end{aligned}$$

$$F(x) = \int_{\left(x \frac{R_1}{d}\right)}^{\left(x \frac{R_2}{d}\right)} y \cdot J_1(y) dy \quad - \text{ для равномерного}$$

радиального распределения тока в индукторе;

$J_1\left(x \frac{r}{d}\right)$ – функция Бесселя 1-го порядка.

Сила притяжения, обусловленная магнитными свойствами металла заготовки, описывается зависимостью [2, 4]:

$$F_M(\varphi, r) = -F_{Mm}(\varphi) \times (\mu_r [Y_1(r) - Y_2(r)] + [Y_3(r) - Y_4(r)]) \quad (2)$$

где $F_{Mm}(\varphi) = \frac{\mu_0}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\mu_r}\right) \cdot j_m^2 \cdot j^2(\varphi)$,

$$Y_1(r) = \left(\int_0^\infty \frac{F(x) \left(sh(x) + \frac{1}{\mu_r} ch(x) \right) J_0\left(x \frac{r}{d}\right)}{x \left(sh(x) \cdot A + \frac{1}{\mu_r} e^{x \frac{h}{d}} ch(x) \right)} dx \right)^2,$$

$$A = \left[sh\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) \right],$$

$$Y_2(r) = \left(\frac{1}{\mu_r} \int_0^\infty \frac{F(x) \cdot J_0\left(x \frac{r}{d}\right)}{x \left(sh(x) \cdot A + \frac{1}{\mu_r} e^{x \frac{h}{d}} ch(x) \right)} dx \right)^2,$$

$$Y_3(r) = \left(\int_0^\infty \frac{F(x) \left(ch(x) + \frac{1}{\mu_r} sh(x) \right) J_1\left(x \frac{r}{d}\right)}{x \left(sh(x) \cdot A + \frac{1}{\mu_r} e^{x \frac{h}{d}} ch(x) \right)} dx \right)^2,$$

$$Y_4(r) = \left(\int_0^\infty \frac{F(x) \cdot J_1\left(x \frac{r}{d}\right)}{x \left(sh(x) \cdot A + \frac{1}{\mu_r} e^{x \frac{h}{d}} ch(x) \right)} dx \right)^2.$$

Проведем численные оценки возбуждаемых усилий (рис. 2). Как следует из феноменологических соображений, в магнитных полях с напряженностями, достаточными для ощутимого силового воздействия ($\sim 10^5 \dots 10^7$ А/м), относительная магнитная проницаемость должна стремиться к единице. Справедливость такого предположения обоснована авторами работы [1-6]. Для определённости примем, что $\mu_r = 2,5$.

Выполним численные оценки для следующих условий и параметров ИИС: $R_1 = 0,025$ м, $R_2 = 0,035$ м, $h = 0,001$ м, $f = 1150$ Гц, $\delta = 0,2$, $I_m = 50$ кА, $d = 0,00075$ м, $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$ 1/(Ом·м).

Среднее значение суммарной силы притяжения (сила Ампера плюс сила магнитного притяжения) за время её действия составляет ~ 110 кГ/см².

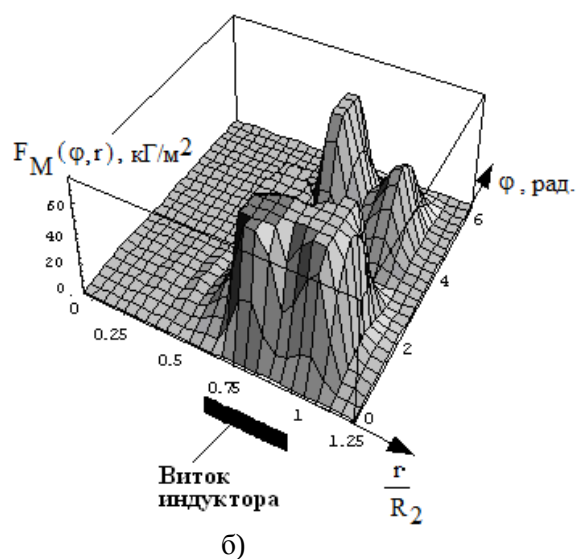
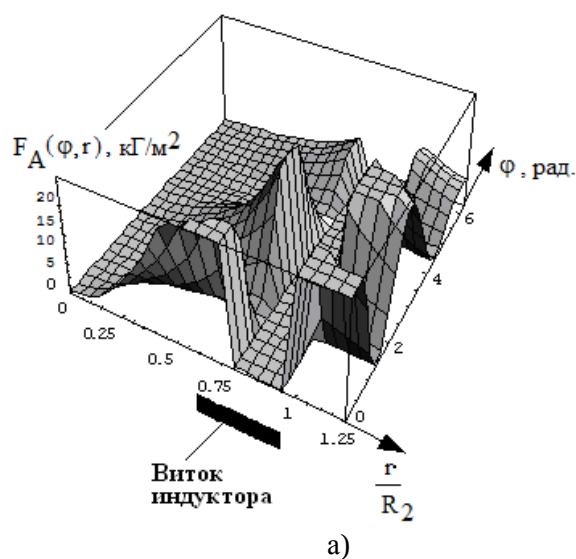


Рис. 2. Объёмные эпюры фазово-пространственного распределения временных максимумов возбуждаемых сил притяжения для магнитных металлов, $\mu_r = 2,5$, а) сила притяжения Ампера, б) сила магнитного притяжения

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Проведено моделирование электродинамических процессов в симметричной индукционной индукторной системе с одинаковыми тонкостенными листовыми ферромагнетиками.

Выполненные численные оценки показали, что влияние магнитных свойств экрана и заготовки проявляется в появлении мощных сил магнитного притяжения.

В целом, притяжение ферромагнетика в рассматриваемой индукционной индукторной системе, как универсальном инструменте бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки оказывается достаточно эффективным.

Литература

1. 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.
2. 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. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012 – 242 с.
3. Батыгин Ю. В. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Щиголева // *Электричество*. – М., 2011. – № 4. – С. 55–62.
4. Туренко А.Н. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3 Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: Монография – Х: ХНАДУ, 2009. – 240с.
5. Гнатов А. В. Силы притяжения в системе с одновитковым соленоидом, массивным экраном конечной толщины и тонкостенной листовой заготовкой / А. В. Гнатов // *Електротехніка і електромеханіка*. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2010. – № 4. – С. 49–51.
6. 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.
7. Electromagnetic Dent Removal: onsite repairs in minutes [Электронный ресурс] – 2013. – Режим доступа: http://www.boeing.com/commercial/aviationservices/brochures/34241_ElectDentRemoval04-05.pdf.
8. Electromagnetic Dent Removal [Электронный ресурс] – 2013. – Режим доступа: <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp>.
9. Need an electromagnetic dent remover on hand. Fluxtronic offers the best: the Portable Flux 3 dent remover [Электронный ресурс] – 2013. – Режим доступа: <http://www.fluxtronic.com/product.php>.
10. Батыгин Ю. В. Магнитно-импульсные технологии для восстановления корпусных элементов транспортных средств. Часть 1 Актуальность и перспективность направления МИОМ. Пути решения / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, И. С. Трунова // *Науковий вісник ХДМА*. – Херсон : ХДМА. –2013. – № 1 (8). – С. 104–111.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., *Электродинамика сплошных сред*. – М: Наука. 1982. – 620с.
12. Дж.Мэтьюз, Р.Уокер, *Математические методы физики*. Пер. с англ. Крайнова В.П. – М: Атомиздат. 1972. – 399с.