

УДК 621.7.044.7

Ю.В. Батыгин¹, А.Ю. Бондаренко¹, Е.А. Чаплыгин²¹ *Национальный технический университет**«Харьковский политехнический институт», Украина*² *Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина***ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК**

Проведен анализ электродинамических процессов в цилиндрической индукционной индукторной системе, по результатам которого построены графики изменения плотности индуцированного тока и распределенных сил притяжения, действующих на обрабатываемую заготовку и экран для различной геометрии индукторной системы.

магнитно-импульсное притяжение, электродинамические процессы, цилиндрическая индукционная индукторная система, плотность тока, экран, листовая заготовка, магнитно-импульсная установка

Впервые индукционные индукторные системы, работающие на притяжение заданных участков поверхности тонкостенных металлических объектов, были предложены для осуществления операций магнитно-импульсной рихтовки автомобильных кузовов [1, 2].

Конструктивно (рис. 1), такая система должна включать плоский одновитковый цилиндрический соленоид-индуктор – 1, дополнительный элемент, обеспечивающий возникновение сил притяжения, например, экран – 2 и листовую заготовку – 3, определённый участок которой следует деформировать в направлении к поверхности индуктора. Все три составляющие укладываются параллельными слоями: экран – индуктор –

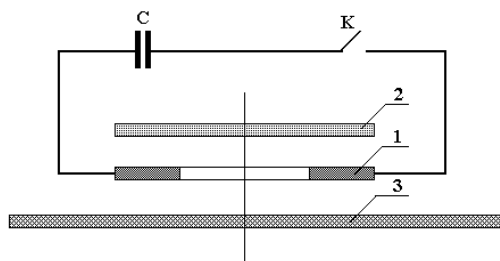


Рис. 1. Индукционная индукторная система

листовая заготовка. Последняя размещается так, чтобы участок, подлежащий деформированию, находился в рабочей зоне системы.

Протекание тока в витке индуктора возбуждает вихревые токи в экране и листовой заготовке. Направления этих токов одинаковы. В соответствии с законом Ампера, при фиксированном положении индуктора и экрана заготовка должна притягиваться в направлении к рабочей поверхности индуктора.

Если, например, требуется устранить вмятину в металлическом листе, её следует расположить в области под витком 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.

Как показали эксперименты, условием практической работоспособности индукционных индукторных систем является интенсивное проникновение поля индуктора сквозь экран и листовую заготовку.

Феноменологическое объяснение данного положения состоит, во-первых, в пространстве между экраном и заготовкой (вне областей непосредственно под витком индуктора) напряжённости полей, возбуждаемых одинаково направленными вихревыми токами, будут равны между собой, но направлены противоположно. Их суперпозиция обращает в нуль магнитный поток во внутренней полости системы. Электродинамические силы, вызывающие притяжение обрабатываемой заготовки к экрану, обусловлены электромагнитным полем, прошедшим во вне сквозь металл экрана и листовой заготовки. Они направлены извне и обуславливают притяжение листовой заготовки к экрану, т.е. возможность её деформирования в направлении к поверхности индуктора.

Во-вторых, в зоне под витком ток индуктора и индуцированные токи направлены противоположно.

Их взаимодействие приводит к известному эффекту отталкивания, что снижает действенность сил притяжения. Очевидно, что конечный результат, а именно, отталкивание или притяжение заготовки, подлежащей деформированию, будет определяться соотношением отмеченных определяющих факторов.

При решении поставленной задачи будем считать, что листовая заготовка тонкостенная [3], т.е.

$$\omega \cdot \tau \ll 1, \quad (1)$$

где ω – циклическая частота действующего поля;

$\tau = \mu_0 \gamma d^2$ – характерное время диффузии в проводящий слой с удельной электропроводностью γ и толщиной d .

Для анализа протекающих электродинамических процессов воспользуемся методикой расчета, приведенной в работах [3 – 5].

Выражение для плотности вихревых токов, индуцированных в металле экрана и листовой заготовки при принятом предположении, что экран и обрабатываемая листовая заготовка абсолютно идентичны и расположены симметрично относительно индуктора на расстоянии h от него, имеет вид:

$$j_{\varphi}(t, \zeta, r) \Big|_{q(p, \lambda) \approx \lambda} \approx -\frac{\mu_0 \gamma}{2} \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot (h + \zeta)} J_1(\lambda r) \cdot d\lambda, \quad (2)$$

где $j(t)$ – плотность стороннего тока в индукторе; $f(\lambda)$ – Фурье-образ функции, поперечного распределения плотности тока в индукторе; $J_1(\lambda r)$ – функция Бесселя первого порядка; p – параметр преобразования Лапласа; $\zeta \in [0, d]$ – пространственная переменная, определяющая зависимость плотности вихревых токов по толщине листовой заготовки; $q(p, \lambda) = \sqrt{\lambda^2 + p\mu_0\gamma}$ – волновое число в металле заготовки.

Радиальное распределение индуцированных токов находится из формулы (2) интегрированием по толщине листа – $\zeta \in [0, d]$.

$$J_{\varphi}(t, r) = -\frac{\mu_0 \gamma}{2} \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (3)$$

Нормальная составляющая распределённой силы (давление) притяжения проводников, с индуцированными токами, формула (3), размещённых на расстоянии $2h$ друг от друга, определяется с помощью закона Ампера.

После тождественных преобразований и введения обозначений, удобных для проведения численных оценок, получаем:

$$P_{attr}(t, r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{J_\varphi^2(t, r) \cdot (2\pi \cdot r)}{(2h)} = \frac{\mu_0(\omega \cdot \tau)^2}{8h} \times$$

$$\times \left(\frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \right)^2 \left(\int_0^\infty F(\lambda, R_{1,2}) \cdot e^{-\lambda h} \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} J_1(\lambda r) d\lambda \right)^2 \times$$

$$\times r \cdot [\eta(r) - (\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2))], \quad (4)$$

где $F(\lambda, R_{1,2}) = \int_{(\lambda \cdot R_1)}^{(\lambda \cdot R_2)} f(x) \cdot x \cdot J_1(x) \cdot dx$; $\varphi = \omega \cdot t$ фаза действующего поля;

$\eta(r)$ – ступенчатая функция Хевисайда; R_1 – радиус внутреннего отверстия витка индуктора; R_2 – внешний радиус витка индуктора.

Интеграл по площади круга с радиусом R_1 от выражения (4) даёт формулу для вычисления нормальной составляющей силы притяжения листовой заготовки к экрану в области внутреннего отверстия витка индуктора.

$$F_{attr}(t, r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{0}{(2h)} =$$

$$= \frac{\mu_0 \pi \cdot (\omega \cdot \tau)^2}{(4 \cdot h)} \left(\frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \right)^2 \cdot \int_0^{R_1} \left(\int_0^\infty F(\lambda, R_{1,2}) \cdot e^{-\lambda h} \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} J_1(\lambda r) d\lambda \right)^2 \cdot r^2 dr. \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) следует, что

– временная зависимость силы (давления) притяжения определяется квадратом производной тока индуктора;

– постоянство знака силы притяжения во времени означает постоянство её направленности по отношению к обрабатываемому объекту;

– вычисление импульса силы показывает, что

$$S_{attr} = \int_0^\infty P_{attr}(t, r) dt \sim \int_0^\infty \left(\frac{dj(t)}{dt} \right)^2 dt > 0,$$

что в свою очередь означает кумулятивный характер деформаций в период действия импульса;

– в рассмотренном низкочастотном режиме действующих полей ам-

плитуда силы притяжения прямо пропорциональна квадрату рабочей частоты и удельной электропроводности экрана и листовой заготовки;

– силы притяжения действуют вне области витка индуктора, где $r \in [0, R_1) \cup (R_2, \infty)$;

– в зоне витка, где $r \in [R_1, R_2]$, должны существовать только силы отталкивания, что объясняется взаимодействием тока, протекающего в индукторе, и индуцированных в заготовке токов противоположной направленности.

Далее, пространственно-временная зависимость для тангенциальной компоненты напряжённости магнитного поля записывается в виде:

$$H_r(r, \zeta, t) \approx \frac{j(t)}{2} \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot (h+\zeta)} \cdot \lambda \cdot J_1(\lambda \cdot r) d\lambda. \quad (6)$$

Нормальную компоненту магнитного давления на экран и листовую заготовку найдём как интеграл векторного произведения плотности тока (2) на радиальную составляющую напряжённости магнитного поля (6) по переменной $\zeta \in [0, d]$, умноженный на магнитную проницаемость вакуума.

С учётом знака, находим, что

$$P_{rep}(r, t) = \mu_0 \cdot \frac{(\omega \cdot \tau)}{(4 \cdot d^2)} \cdot j(\varphi) \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \cdot [\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)] \times \\ \times \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(\lambda_1) \cdot f(\lambda_2) \cdot e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot h} \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot d}}{(\lambda_1 + \lambda_2)} \cdot \lambda_1 \cdot J_1(\lambda_1 r) \cdot J_1(\lambda_2 r) d\lambda_1 d\lambda_2. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что:

– в рассматриваемом низкочастотном режиме действующих полей временная зависимость силы магнитного давления определяется произведением временной функции тока индуктора и её первой производной,

– сила отталкивания есть осциллирующая функция времени, что означает переменную направленность этой силы в течение периода действия,

– импульс силы

$$S_{rep} = \int_0^{\infty} P_{rep}(t, r) dt \sim \int_0^{\infty} \left(j(t) \cdot \frac{dj(t)}{dt} \right) dt = \frac{j^2(t)}{2} \Big|_0^{\infty} = \frac{j(\infty) - j(0)}{2} = 0,$$

что в конечном итоге означает отсутствие отталкивания в зоне витка индуктора либо достаточно малую амплитуду действующих сил.

Численную иллюстрацию полученных результатов приведём на примерах выполнения технологической операции притяжения плоской листовой заготовки к индукционной индукторной системе при использовании оборудования, созданного в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт".

Источник мощности — магнитно-импульсная установка МИУ-15: рабочая частота $f = 2$ кГц, относительный декремент затухания $\delta_0 = 0,3$, рабочее напряжение $U = 5$ кВ. Амплитуда тока в индукторе при проведении экспериментов составляла $\sim 39,2$ кА, при запасаемой энергии ёмкостного накопителя $W = 12,5$ кДж.

Источники поля — плоские цилиндрические индукторы из латуни с различными размерами внутреннего окна и разной шириной витка. Экран и заготовка — плоские металлические листы толщиной $d = 0,001$ м из электротехнической стали с удельной электропроводностью $\gamma = 0,2 \cdot 10^7$ (Ом·м)⁻¹.

На рис. 2 ÷ 5 приведены наиболее значимые результаты вычислений, выполненные по формулам (4) и (5). Металлические листы расположены симметрично относительно плоскости витка индуктора на расстоянии $h = 0,002$ м друг от друга. Изменение радиального распределения плотности вихревых токов в экране и листовой заготовке проиллюстрировано на рис. 5.

Основные результаты проведенных вычислений сводятся к следующим положениям:

- наибольшая концентрация распределённых сил (давления) притяжения имеет место в области краёв витка индуктора (рис. 2);
- в рассмотренной индукторной системе возможно получение достаточно высоких амплитуд сил притяжения, так распределённые силы могут достигать величин 70 ÷ 80 Атм. (рис. 2, г), а интегральные на площади круга $12,5\pi$ см² соответственно 400 кГ (рис. 3);
- амплитуды сил притяжения существенно зависят от размера внутреннего окна индуктора, ширины витка и расстояния между экраном и заготовкой.

1. При изменении радиуса в диапазоне $R_1 \in [0,015 \text{ м}, 0,035 \text{ м}]$ распределённые силы притяжения возрастают более чем в 1,5 раза, интегральные

– более чем в 20 раз, что физически можно объяснить увеличением площадей взаимодействия индуцированных токов (рис. 2, 3).

2. Уменьшение ширины витка индуктора от 0,2 до 0,1 его внешнего размера (т.е. R_2) приводит к росту сил притяжения в 2÷3 раза (рис. 3). Физически, это можно объяснить увеличением напряжённости возбуждаемого магнитного поля за счёт его концентрации при меньшей ширине витка, а также увеличением площадей взаимодействия между индуцированными токами. Данное объяснение иллюстрируется графическими зависимостями на рис. 5.

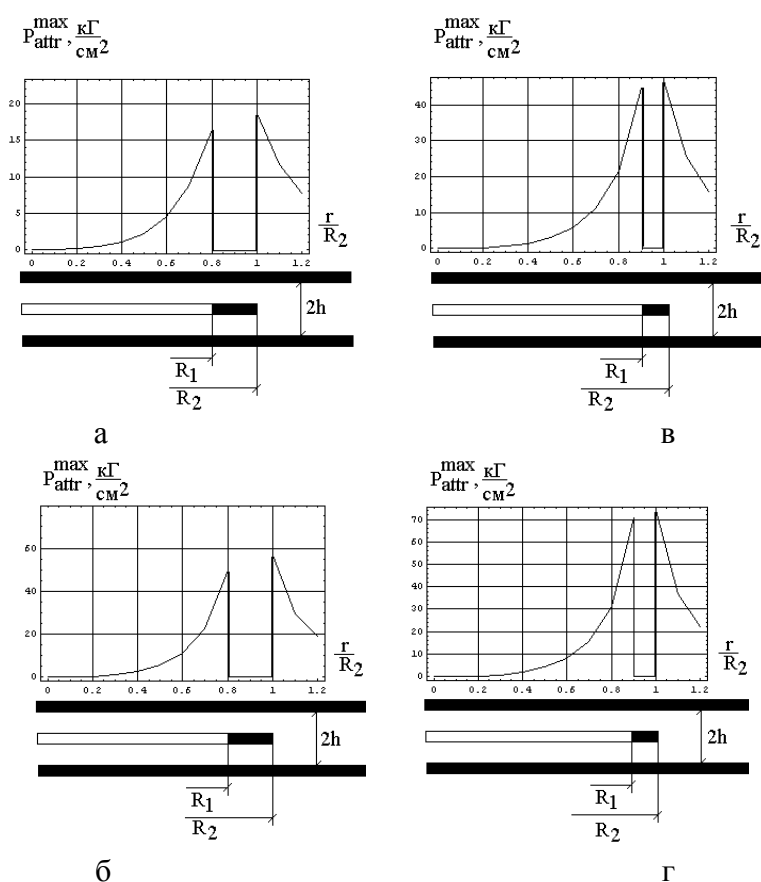


Рис. 2. Радиальное распределение сил притяжения (давления) в симметричной индукционной индукторной системе при вариации её геометрических параметров:

- а – $R_1 = 0,015$ м, $R_2 = 0,8^{-1} \cdot R_1$; б – $R_1 = 0,015$ м, $R_2 = 0,9^{-1} \cdot R_1$;
 в – $R_1 = 0,035$ м, $R_2 = 0,8^{-1} \cdot R_1$; г – $R_1 = 0,035$ м, $R_2 = 0,9^{-1} \cdot R_1$

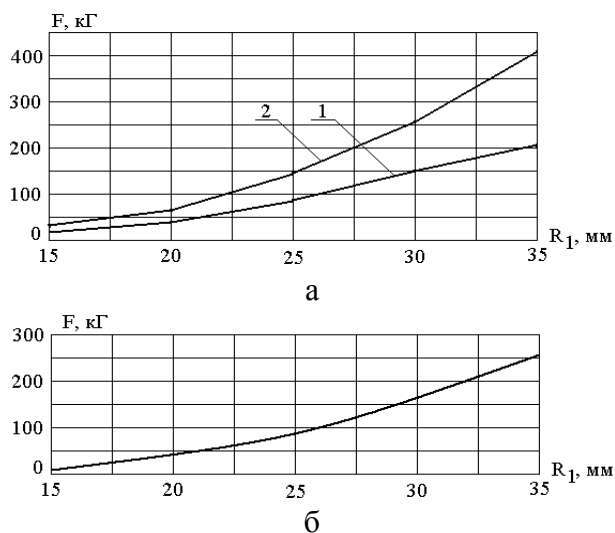


Рис. 3. Зависимость интегральной силы притяжения в симметричной индукционной индукторной системе от размера внутреннего отверстия витка индуктора:
 а – $2h = 0,002$ м, 1 – $R_2 = 0,8^{-1} \cdot R_1$; 2 – $R_2 = 0,9^{-1} \cdot R_1$;

$$\text{б} - 2h = 0,003 \text{ м, } R_2 = 0,9^{-1} \cdot R_1$$

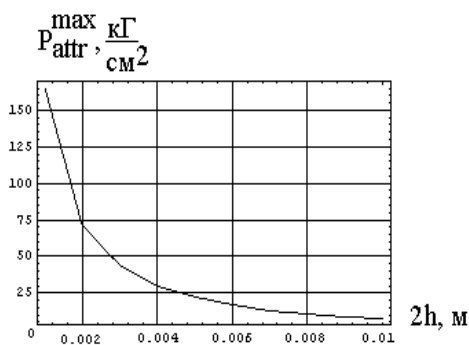


Рис. 4. Зависимость максимума распределённой силы притяжения (давления) притяжения от величины зазора между экраном и листовой заготовкой:

$$R_1 = 0,035 \text{ м;}$$

$$R_2 = 0,9^{-1} \cdot R_1$$

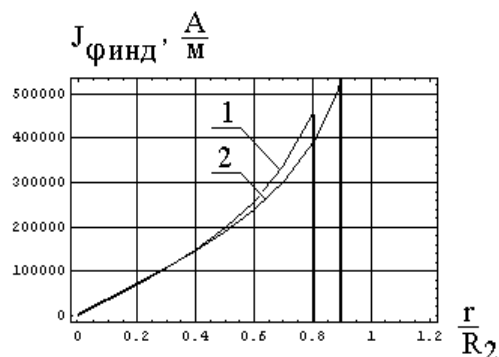


Рис. 5. Радиальные зависимости индуцированных токов в пространстве внутреннего окна индуктора ($r \leq R_1 = 0,025$ м, $2h = 0,002$ м):
 1 (2) – $R_1 = 0,8 \cdot R_2$ ($R_1 = 0,9 \cdot R_2$),
 интегральная величина индуцированного тока составляет 3066 (3896) А

3. При увеличении зазора между экраном и листовой заготовкой резко падают как распределённые (рис. 4), так и интегральные (рис. 3) силы притяжения.

4. Особенно резко снижаются распределённые силы притяжения при относительно малых величинах зазора, так в интервале $2h \in [0,001 \text{ м}; 0,002 \text{ м}]$ амплитуда усилий падает более чем в два раза, от 165 до 75 атм (рис. 4).

Изменение сил притяжения при вариации радиальных размеров витка индуктора или его ширины объясняется увеличением или уменьшением области, занимаемой индуцированными токами, а вариация величины зазора между экраном и листовой заготовкой означает изменение уровня электромагнитной связи между этими элементами, что, как известно, ведёт к росту или падению сил электродинамического взаимодействия.

Литература

1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хищенко Л.Т. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов // *Электротехника і електромеханіка*. – 2004. – № 2. – С. 80-84.

2. Батигін Ю.В., Лавінський В.І., Хавін В.Л. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок. – Патент України № 74909. 15.02.2006. – Бюл. №2.

3. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов. – Х.: МОСТ-Торнадо, 2002. – 288 с.

4. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Чаплыгин Е.А. Особенности токов, индуцированных низкочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах // *Электротехника і електромеханіка*. – 2005. – № 3. – С. 69-73.

5. Чаплыгин Е.А. Магнитное поле в тонкостенной листовой заготовке при низких значениях рабочих частот // *Электротехника і електромеханіка*. – 2006. – № 6. – С. 71-74.

Поступила в редакцию 12.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Ф. Болюх, Национальный политехнический университет «ХПИ», Харьков.