

## СИЛЫ ПРИТЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ С ОДНОВИТКОВЫМ СОЛЕНОИДОМ, МАССИВНЫМ ЭКРАНОМ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ И ТОНКОСТЕННОЙ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКОЙ

*Стаття присвячена оцінці впливу товщини допоміжного екрану на збудження сил притягання в індукційній індукторній системі з одновитковим соленоїдом і тонкостінною листовою заготовкою. Показано, що в розглянутому діапазоні співвідношень товщини допоміжного екрану і величин ефективних глибин проникнення поля амплітуди збуджених сил притягання достатньо високі і практично незмінні.*

*Стаття посвящена оценке влияния толщины вспомогательного экрана на возбуждение сил притяжения в индукционной индукторной системе с одновитковым соленоидом и тонкостенной листовой заготовкой. Показано, что в рассматриваемом диапазоне соотношений толщин вспомогательного экрана и величин эффективных глубин проникновения поля амплитуды возбуждаемых сил притяжения достаточно высоки и практически неизменны.*

### ВВЕДЕНИЕ

**Постановка проблемы.** В последнее время возобновляется интерес к магнитно-импульсным технологиям. Особенно интенсивно развивается такое направление, как внешняя магнитно-импульсная рихтовка корпусов самолётов и автомобильных кузовов. Данная производственная операция привлекательна тем, что позволяет устранение вмятин с помощью силового воздействия извне без разборки корпуса или кузова и нарушения существующего защитного покрытия [1].

#### Анализ основных достижений и публикаций.

Основная проблема в применении магнитно-импульсных технологий состоит в том, что для внешнего устранения вмятин необходимы, в первую очередь, инструменты – индукторные системы, позволяющие преобразовать естественное отталкивание обрабатываемого проводника от источника поля в его притяжение. Известны разные пути решения этой проблемы. Среди них выделяется предложение, так называемых, индукционных индукторных систем, принцип действия которых основан на притяжении одинаково направленных индуцированных токов, и впервые выдвинутых авторами работы [2].

Конструктивно индукционная индукторная система состоит из вспомогательного проводящего экрана, обрабатываемого листового металла и расположенного между ними плоского индуктора – источника магнитного поля. Токи, индуцированные в экране и металле обрабатываемого объекта, согласно закону Ампера инициируют взаимное притяжение проводников. Поскольку экран зафиксирован и неподвижен, металл обрабатываемого объекта будет испытывать притяжение в направлении к индуктору [3].

Конструкции индукционных индукторных систем непрерывно совершенствуются. Весьма интересным представляется применение достаточно массивного проводящего вспомогательного экрана. Однако, его применение в качестве элемента индукционной индукторной системы вызывает ряд вопросов, поскольку нарушает её симметрию относительно индуктора. Среди них влияние толщины проводящего экрана на возбуждение индуцированных токов, и, в конечном итоге, на амплитуды сил притяжения.

В работах [4, 5] решена соответствующая электродинамическая задача. Автором были получены

аналитические выражения для основных характеристик электромагнитных процессов, проведены численные оценки индуцированных токов. Полученные зависимости позволили дать первые ответы на вопрос о влиянии толщины вспомогательного экрана на дееспособность предлагаемой конструкции индукционной индукторной системы.

**Цель работы** – оценка влияния толщины массивного вспомогательного экрана в индукционной индукторной системе с одновитковым соленоидом и тонкостенной листовой заготовкой на возбуждение электродинамических сил притяжения. Металлы – неферромагнитные и обладают одинаковой удельной электропроводностью –  $\gamma$  (рис. 1).

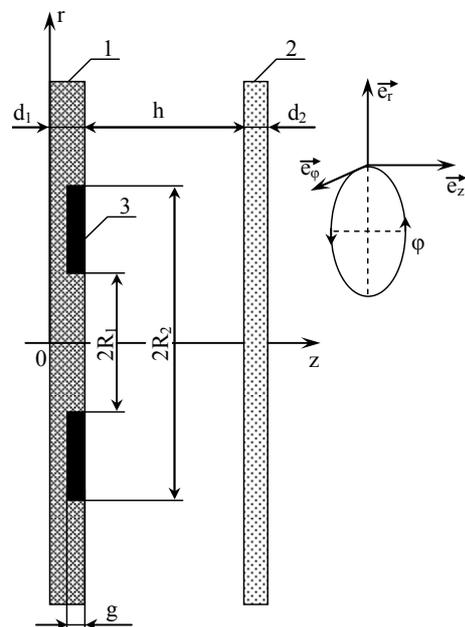


Рис. 1. Расчётная модель системы, 1 – вспомогательный экран, 2 – обрабатываемая листовая заготовка, 3 – одновитковый соленоид-индуктор  $\vec{e}_r$ ,  $\vec{e}_\phi$ ,  $\vec{e}_z$ , – направляющие орты цилиндрической системы координат

### ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В СИСТЕМЕ

Электродинамические силы, возбуждаемые в рассматриваемой индукторной системе, разделим по физическим признакам причинности и объектам взаимодействия.

Первая и наиболее интересная в рамках настоящего исследования – это распределённая сила притяжения между токами во вспомогательном экране и листовой заготовке. Она определяется законом Ампера и описывается зависимостью [3]:

$$P_{attr}^{(L)}(r, \varphi) = \mu_0 \cdot J_1(r, \varphi) \cdot J_2(r, \varphi) \cdot \left(\frac{r}{h}\right), \quad (1)$$

где  $J_{1,2}(r, \varphi)$  – индуцированные плотности вихревых токов, которые могут быть найдены, например, аналогично работе [4].

Следующие две силы – это силы магнитного давления со стороны поля индуктора на вспомогательный экран и листовую заготовку. Их характер действия, достаточно хорошо изучен при создании традиционных технологий в магнитно-импульсной обработке металлов [1]. Это силы отталкивания экрана и листовой заготовки от индуктора.

С физической точки зрения – это силы Лоренца. Для их определения следовало бы найти плотность тока и тангенциальную составляющую напряжённости магнитного поля в металле вспомогательного экрана и листовой заготовки. Векторное произведение этих величин будет пропорционально плотности возбуждаемых усилий. Последующее интегрирование по объёму объектов силового воздействия даст выражения для сил магнитного давления на экран и листовую заготовку со стороны поля витка индуктора.

Наконец, последняя группа сил, физической причиной появления которых могут быть как ферромагнитные свойства листовой заготовки, так и вспомогательного экрана.

Оставим вышеперечисленные силы вне нашего рассмотрения и перейдём к анализу электродинамических усилий притяжения между неферромагнитными вспомогательным экраном конечной толщины и листовой заготовкой. Последнюю будем считать достаточно тонкостенной ("прозрачной" для действующих полей [3, 4]), так, что

$$\omega \cdot \tau_2 \ll 1 \quad (\tau_2 = \mu_0 \cdot \gamma_2 \cdot d_2^2), \text{ а} \\ |\rho \mu_0 \gamma_2| \rightarrow 0 \text{ и } q_2(p, \lambda) \approx \lambda.$$

Воспользовавшись результатами, полученными в [4, 5], запишем выражения для плотностей вихревых токов.

Линейная плотность тока, возбуждаемого в металле вспомогательного экрана:

$$J_1(\varphi, r) = (8 \cdot d_1 \cdot j_m) \int_0^\infty f(x) \cdot x \cdot J_1\left(x \frac{r}{d_1}\right) \cdot \sum_{k=0}^\infty v_k \times \\ \times \frac{F_1(\beta_k, g, x) F_4(\beta_k, x)}{\beta_k^2 F_2(\beta_k, x)} \cdot F_5(\beta_k, x, \varphi) \cdot dx \quad (2)$$

где

$$f(x) = \frac{1}{x^2} \cdot \int_{x \frac{R_1}{d_1}}^{x \frac{R_2}{d_1}} y \cdot J_1(y) dy, \quad v_k = \begin{cases} 1, & k = 0, \\ 2, & k \neq 0, \end{cases}$$

$$F_1(\beta_k, g, x) = \sin\left(\frac{\beta_k \cdot g}{2d_1}\right) \left[ \sin\left(\frac{\beta_k \cdot g}{2d_1}\right) + \left(\frac{\beta_k}{x}\right) \cos\left(\frac{\beta_k \cdot g}{2d_1}\right) \right],$$

$$F_2(\beta_k, x) = \cos(\beta_k) \left[ \frac{2}{x} + \left(1 - \left(\frac{\beta_k}{x}\right)^2\right) \right] - \sin(\beta_k) \times \\ \times \frac{2\beta_k}{x} \cdot \left(1 + \frac{1}{x}\right),$$

$$F_4(\beta_k, x) = \sin\left(\frac{\beta_k}{2}\right) \left[ \sin\left(\frac{\beta_k}{2}\right) + \left(\frac{\beta_k}{x}\right) \cos\left(\frac{\beta_k}{2}\right) \right],$$

$j_m = \frac{J_m}{(R_2 - R_1) \cdot g}$  – амплитуда плотности тока в индукторе,

$$F_5(\beta_k, x, \varphi) = e^{-\delta_0 \cdot \varphi} \cdot \sin \varphi - \frac{\left(\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau_1}\right)}{\left(1 + \left(\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau_1} - \delta_0\right)^2\right)} \times \\ \times \left[ e^{-\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau_1} \cdot \varphi} + e^{-\delta_0 \cdot \varphi} \left( \left(\frac{\beta_k^2 + x^2}{\omega \tau_1} - \delta_0\right) \sin \varphi - \cos \varphi \right) \right]$$

Линейная плотность тока в металле листовой заготовки:

$$J_2(\varphi, r) = (4d_1 j_m) \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1}\right) \cdot \int_0^\infty f(x) \left(1 - e^{-x \frac{d_2}{d_1}}\right) e^{-x \frac{h}{d_1}} \times \quad (3)$$

$$\times J_1\left(x \frac{r}{d_1}\right) \sum_{k=0}^\infty v_k \frac{F_1(\beta_k, g, x) F_3(\beta_k, x)}{\beta_k \cdot F_2(\beta_k, x)} F_5(\beta_k, x, \varphi) dx,$$

где  $F_3(\beta_k, x) = \left[ \sin(\beta_k) + \left(\frac{\beta_k}{x}\right) \cos(\beta_k) \right]$ .

Уравнение для определения величины  $\beta_k$  было получено в [4] и имеет вид:

$$\frac{1}{2} \left( \left(\frac{\beta_k}{x}\right)^2 - 1 \right) \cdot \sin(\beta_k) = \left(\frac{\beta_k}{x}\right) \cdot \cos(\beta_k). \quad (4)$$

Если подставить зависимости (2) и (3) в формулу (1), то можно легко получить аналитическое выражение для распределённой силы притяжения между токами во вспомогательном экране и листовой заготовке. Опустим этот результат, поскольку он довольно громоздок и не иллюстративен.

Перейдём к численным оценкам.

Примем, что  $R_1 = 0,03$  м,  $R_2 = 0,04$  м,  $h = 0,0005$  м, металл экрана и листовой заготовки – сталь  $\gamma \approx 0,2 \cdot 10^7$  1/Ом·м,  $d_1 = 0,004$  м и  $d_2 = 0,016$  м – толщина экрана, толщина заготовки  $d_2 = 0,0008$  м.

Ёмкость, рабочая частота, относительный декремент затухания, напряжение на ёмкостном накопителе, ток в разрядном контуре, ток в индукторе на выходе согласующего устройства с коэффициентом усиления  $\sim 5$  составляют, соответственно:  $C = 1000$  мкФ;  $f = 2$  кГц;  $\delta_0 = 0,3$ ;  $U = 0,5$  кВ;  $J_m = 3922$  А – ток в разрядном контуре;  $J_{im} = 19610$  А – ток в индукторе на выходе согласующего устройства.

Результаты расчётов приведены на рис. 2 и 3, где

геометрическая толщина экрана дана в сравнении с эффективной глубиной проникновения магнитного поля в его металл  $\Delta_1 = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma_1}}$ . В первом случае (рис. 2,а) экран в два раза тоньше, во втором (рис. 2,б) – в два раза толще эффективной глубины.

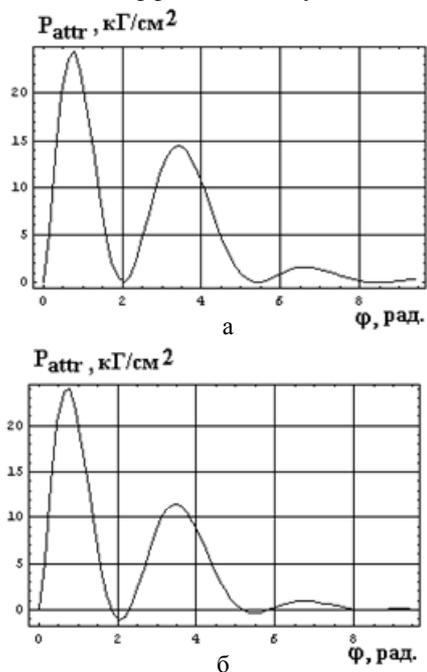


Рис. 2. Распределённые силы притяжения как функция фазы на внутренней границе витка,  $r = R_1$ , а – толщина вспомогательного экрана,  $d_1 = 0,004 \text{ м} \approx 0,5 \cdot \Delta_1$ ; б – толщина вспомогательного экрана  $d_1 = 0,016 \text{ м} \approx 2 \cdot \Delta_1$

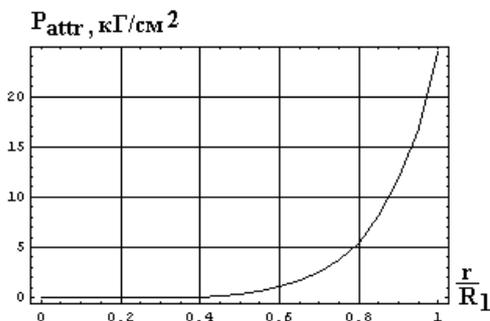


Рис. 3. Распределённые силы притяжения как функция радиуса во внутреннем окне витка

В данной системе, помимо сил притяжения, возбуждаются и силы отталкивания, однако, при работе системы на низких частотах действующих полей ими можно пренебречь [3].

### ВЫВОДЫ

Проведенные вычисления показали, что:

- в рассмотренном диапазоне соотношений толщин вспомогательного экрана и величин эффективных глубин проникновения поля ( $0,5 \div 2 \cdot \Delta_1$ ) амплитуды возбуждаемых сил притяжения достаточно высоки и практически неизменны;
- увеличение толщины экрана приводит к более быстрому затуханию сил притяжения во времени и появлению их отклонений в область отрицательных

значений (то есть, отталкиванио!);

- радиальное распределение сил притяжения показывает, что наибольшее воздействие будут испытывать участки листовой заготовки у краёв внутреннего окна индуктора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий // Винахідник та раціоналізатор. – Київ. – 2007. – № 5. – С. 8-11.
2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов // Електротехніка і електромеханіка. – Харків. – 2004. – № 2, С. 80-84.
3. 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. – 240 с.
4. Гнатов А.В. Электромагнитные процессы в индукционной индукторной системе с одновитковым соленоидом, массивным экраном и тонкостенной листовой заготовкой // Електротехніка і електромеханіка. – Харків. – 2009. – № 6. – С. 46-49.
5. Гнатов А.В. Расчет электромагнитных процессов в индукционной индукторной системе с массивным экраном конечной толщины // Електротехніка і електромеханіка. – Харків. – 2009. – № 5. – С. 59-62.

Поступила 20.01.2010

Гнатов Андрей Викторович, к.т.н., с.н.с.  
Харьковский национальный  
автомобильно-дорожный университет  
кафедра "Автомобильная электроника"  
61002, Харьков, ул. Петровского, 25  
тел. (057) 700-38-52, e-mail: kalifus@yandex.ru

A.V. Gnatov  
**Attractive forces in the system with an single-turn solenoid, massive screen of finite thickness and thin-walled sheet work-piece.**

The article is devoted to the thickness influence evaluations of auxiliary screen on excitation of attractive forces in the induction inductor system with a single-turn solenoid and thin-walled sheet work-piece. It is shown, that in the considered correlations range of the auxiliary screen thicknesses and the skin-layer the excited attractive powers amplitudes are enough high and the same practically.

**Key words – induction inductor system, massive screen, sheet thin-walled work-piece.**