

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ С ПРИТЯГИВАЮЩИМ ЭКРАНОМ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ ВНЕШНИМ КРУГОВЫМ СОЛЕНОИДОМ

*У статті представлений теоретичний аналіз просторово-часових розподілів індуктованих струмів і сил притягання в «індукторній системі з притягуючим екраном», що збуджується плоским круговим соленоїдом, розташованим із зовнішнього боку допоміжного екрана. Показана, досить висока ефективність системи, що дозволяє рекомендувати її як інструмент зовнішнього рихтування вм'ятин в кузовних покриттях автотранспорту. Бібл. 9, табл. 1, рис. 1.*

*Ключові слова:* магнітно-імпульсна обробка, притягання металів, індукторна система, круговий соленоїд, притягуючий екран.

*В статье представлен теоретический анализ пространственно-временных распределений индуцированных токов и сил притяжения в «индукторной системе с притягивающим экраном», возбуждаемой плоским круговым соленоидом, расположенным с внешней стороны вспомогательного экрана. Показана, достаточно высокая эффективность системы, что позволяет рекомендовать её как инструмент внешней рихтовки вмятин в кузовных покрытиях автотранспорта. Библ. 9, табл. 1, рис. 1.*

*Ключевые слова:* магнитно-импульсная обработка, притяжение металлов, индукторная система, круговой соленоид, притягивающий экран.

**Введение.** Разработки в сфере магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) находят все большее применение в современных технологиях производства и ремонта авиационной, автомобильной и другой техники, так как являются экологически чистыми и энергосберегающими, в сравнении с классическими подходами [1, 2]. Одной из основных составляющих устройств МИОМ является инструмент-индуктор или индукторные системы с притягивающим экраном (ИСПЭ). Для оценки эффективности работы ИСПЭ была взята система, описанная авторами работы [3].

**Анализ литературы.** Необходимые для анализа расчётные зависимости для возбуждаемых токов и электродинамических сил притяжения в исследуемой ИСПЭ выпишем из работы [4].

Отметим, что указанные соотношения получены для низкочастотного режима возбуждаемых полей, когда имеет место их существенное проникновение сквозь тонкостенный металл экрана и деформируемой заготовки. Как было ранее показано, данный режим является наиболее эффективным с точки зрения силового воздействия на объект обработки [5-9].

**Цель работы** – теоретический анализ пространственно-временных распределений индуцированных токов и сил притяжения в индукторной системе с притягивающим экраном, возбуждаемой плоским круговым соленоидом, расположенным с внешней стороны вспомогательного экрана.

**Расчётные зависимости.** Предполагается «электродинамическая тонкостенность» проводящих элементов исследуемой ИСПЭ, что соответствует ситуации, формально описываемой неравенством [9]:

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

где  $\omega$  – циклическая частота электромагнитных процессов,  $\tau = \mu_0 \gamma d^2$  – характерное время проникновения возбуждаемых полей сквозь немагнитный металлический слой с электропроводностью  $\gamma$  и толщиной  $d$ .

Экран и заготовка – листовые металлы одинаковой толщины  $d$  с одинаковой удельной электропроводностью  $\gamma$ .

Итак, исследуемая индукторная система представляет собой послойно расположенные параллельные плоские компоненты: возбуждающий круговой

экран, немагнитные металлические вспомогательный листовой экран и листовая заготовка.

В системе возбуждаются индуцированные токи с линейной плотностью:

а) в металле вспомогательного плоского экрана, расположенного на расстоянии  $-h$  от возбуждающего кругового соленоида (формула (34) из [4])

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

где  $j(t) = j_m \cdot j(t)$  – плотность возбуждающего тока в индукторе,  $j_m$  – амплитудное значение  $j(t)$  – временная

зависимость,  $f(\lambda) = \int_{R_3}^{R_4} r \cdot J_1(\lambda r) dr$  – Фурье-Бесселев

образ функции равномерного радиального распределения возбуждающего тока,  $h$  – расстояние от возбуждающего соленоида до экрана,  $d$  – толщина экрана.

б) в металле листовой заготовки, расположенной на расстоянии  $-(3h + d)$  от возбуждающего кругового соленоида (формула (35) из [4])

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

Формула для вычисления распределённой силы притяжения, которая при жёстко фиксированном экране будет притягивать листовую заготовку к его рабочей поверхности.

$$F_{attr}(t, r) = \mu_0 \cdot J_{\phi}^{(2)}(t, r) \cdot J_{\phi}^{(3)}(t, r) \cdot \frac{r}{(2h)}, \quad (4)$$

где  $J_{\phi}^{(2)}(t, r)$ ,  $J_{\phi}^{(3)}(t, r)$  – определены зависимостями (2) и (3), соответственно.

Отметим, что в принятой постановке решаемой задачи (низкие частоты действующих полей) на обрабатываемый объект будет действовать только сила электродинамического притяжения (закон Ампера). Интегральная во времени действенность сил отталкивания и радиального растяжения-сжатия, обусловленных взаимодействием возбуждающих и индуцированных токов (силы Лоренца), будет крайне малой и ими можно пренебречь [5-9].

Выражения (2 – 4) приведём к виду, удобному в вычислениях.

В несобственных интегралах зависимостей (2) и (3) введём новую переменную интегрирования  $x = \lambda \cdot d$ ,  $x \in [0; \infty)$ . Кроме того, положим, что ток в витке индуктора изменяется во времени по закону экспоненциально затухающей синусоиды, характерному для реальной магнитно-импульсной обработки металлов [5-9]:

$$j(t) = j_m \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t) = j_m \cdot e^{-\delta_0 \psi} \cdot \sin(\psi),$$

где  $j_m$  – амплитуда,  $\psi = \omega t$  – фаза,  $\delta$  и  $\delta_0$  – абсолютный и относительный декременты затухания.

В терминах новой переменной формулы с учётом формы плотности возбуждающего тока в витке индуктора выражения (2) и (3) принимают следующий вид:

а) экран

$$J_{\phi}^{(a)}(\psi, r) = -J_m \int_0^{\infty} f_1(x) \cdot \frac{e^{-x} \frac{h}{d} (1 - e^{-x})}{x} J_1\left(x \frac{r}{d}\right) dx, \quad (5)$$

где  $J_m = j_m \cdot \frac{\omega \tau}{2} \cdot \frac{dg(\psi)}{d\psi}$  – «условная» амплитуда сигнала,

$$g(\psi) = e^{-\delta_0 \psi} \cdot \sin(\psi),$$

$$f_1(x) = \frac{1}{x^2} \int_{x \frac{R_3}{d}}^{x \frac{R_4}{d}} y \cdot J_1(y) dy;$$

б) заготовка

$$J_{\phi}^{(b)}(\psi, r) = -J_m \cdot \int_0^{\infty} f_2(x) \cdot e^{-x \left(\frac{3h+1}{d}\right)} \cdot \frac{(1 - e^{-x})}{x} J_1\left(x \frac{r}{d}\right) dx. \quad (6)$$

**Численные оценки, результаты анализа.** Численные оценки и анализ выполним для экспериментальной модели ИСПЭ, возбуждаемой внешним витком с  $R_3 = 0,025$  м,  $R_4 = 0,03$  м.

На вход индуктора подаётся токовый импульс с рабочей частотой –  $\omega = 2\pi \cdot 1500$  Гц; относительным декрементом затухания –  $\delta_0 = 0,2$ ; амплитудой –  $I_m = 50$  кА.

Вспомогательный экран и листовая заготовка – нержавеющая сталь с толщиной  $d = 0,001$  м и удельной электропроводностью  $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$  1/Ом·м.

При ширине витков –  $\Delta R = R_2 - R_1 = R_4 - R_3 = 0,005$  м принятая амплитуда тока может соответствовать максимальной величине линейной плотности  $\sim j_{\max} = 10^7$  А/м.

Временные характеристики токового импульса и параметры листовой заготовки соответствуют требуемому уровню её «прозрачности» для действующих полей, а именно,

$$\omega \cdot \tau = (2\pi \cdot 1500) \cdot \tau = \left\| \tau = \mu_0 \gamma d^2 = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ с} \right\| = 0,015 \ll 1.$$

Результаты вычислений с помощью формул (4) – (6) приведены ниже.

Графическую зависимость для распределённой силы притяжения (рис. 1,б) (аналог давления при отталкивании) можно дополнить расчётными данными для интегральной силы притяжения, найденной интегрированием распределённых сил притяжения по площадям участков:  $\{r \leq 1,2, R_2 = 0,036$  м,  $\phi \in [0; 2\pi]\}$ .

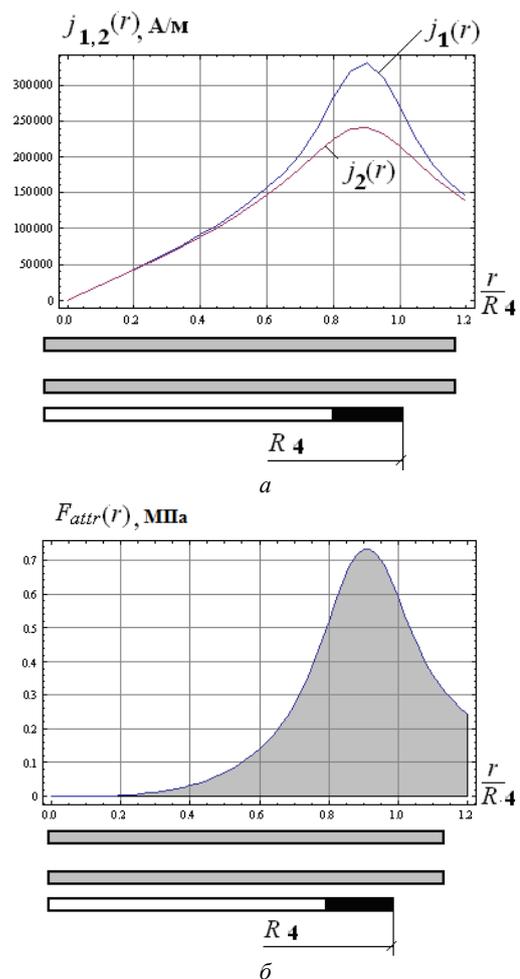


Рис. 1. Радиальные распределения возбуждаемых токов и сил: а – плотности токов, индуцированных в экране –  $j_1(t)$  и заготовке –  $j_2(t)$ , б – распределённая сила притяжения заготовки

Для наглядности в восприятии результаты вычислений оформим в виде табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	Площадь участка, м <sup>2</sup>	Сила притяжения, Н	Среднее значение распределённой силы притяжения, МПа
1	0,004072	1400,25	0,344

Проведенные вычисления показали, что индуцированные токи, как в экране, так и заготовке, однонаправлены и их взаимодействие в соответствии с законом Ампера определяет амплитуды возбуждаемых сил притяжения (рис. 1). Особо следует отметить эффективную действенность рассмотренной индукторной системы, возбуждаемой внешним круговым соленоидом. Здесь при достаточной простоте конструктивного исполнения имеют место довольно высокие значения развиваемых сил притяжения и их средних величин (табл. 1). Физически, более высокая силовая эффективность системы с «внешним» витком в сравнении с системой, где виток расположен во внутренней полости, объясняется отсутствием «провала» в радиальном распределении возбуждаемых сил. Данный «провал» в конструкции с витком между листовыми металлами обусловлен его экранирующим действием в отношении сил притяжения между индуцированными токами [7, 8].

## Выводы.

1. Проведен теоретический анализ пространственно-временных распределений индуцированных токов и сил притяжения в «индукторной системе с притягивающим экраном», возбуждаемой плоским круговым соленоидом, расположенным с внешней стороны вспомогательного экрана.

2. Показано, что «индукторная система с притягивающим экраном» при возбуждении внешним круговым соленоидом с током ~50 кА обеспечивает силовые показатели притяжения до ~1400 Н на площади листового металла ~ 0,004 м<sup>2</sup>.

3. Достаточно высокая эффективность предложенного варианта индукторной системы позволяет рекомендовать её как инструмент внешней рихтовки вмятин в кузовных покрытиях автотранспорта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Welcome to BETAG Innovation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.betaginnovation.com](http://www.betaginnovation.com).
2. Лаборатория электромагнитных технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electromagnetic.comoj.com>.
3. Пат. 77579 Україна, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих заготовок одновитковим круговим індуктором, розташованим над допоміжним екраном / Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Чапльгін Є.О., Трунова І.С., Гопко А.В., Сабокар О.С.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u2012 07542 заявл. 22.06.2012; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4.
4. Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А. Расчет полей и токов в индукторной системе с притягивающим экраном и дополнительным витком как инструмента рихтовки // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – № 1. – С. 57-62.
5. Yuriy V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – fundamentals and perspective applications // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – vol.213. – no.3. – pp. 444-452.
6. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Магнитно-импульсное притяжение и отталкивание тонкостенных листовых ферромагнетиков // *Электричество*. – 2012. – №8. – С. 58-65.
7. Batygin Yuri V., Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals // *Journal of Materials Processing Technology*. – vol.214. – iss.2. – 2014. – pp. 390-401.
8. Батыгин Ю.В., Головащенко С.Ф., Чаплыгин Е.А. Магнитно-импульсное притяжение немагнитных металлов // *Электричество*. – 2014. – №2. – С. 40-52.
9. Batygin Yu.V. Experimental test of the tool for the external EMF removing dents on a car body // *International Journal of Energy and Power Engineering*. – 2014. – vol.3. – no.4. – pp. 204-208.

## REFERENCES

1. Welcome to BETAG Innovation. Available at: [www.betaginnovation.com](http://www.betaginnovation.com) (accessed 16 June 2014).
2. Laboratoriia elektromagnitnykh tekhnologii (Laboratory of Electromagnetic Technology) Available at: <http://electromagnetic.comoj.com> (accessed 10 July 2014). (Rus).
3. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Chaplygin E.O., Trunova I.S., Gopko A.V., Sabokar O.S. *Sposib magnitno-impul'snogo prityagannya metalivih zagotivok odnovitkovim krugovim induktorom, roztashovanim nad dopomizhnim ekranom* [Method of the magnetic-pulse attraction metal workpieces single-turn circular inductor located on the auxiliary screen]. Patent UA, no.77579, 2013. (Ukr).
4. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A. Calculation of fields and currents in the induction system with the attractive screen and the additional coil as a tool for the straightening. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.1, pp. 57-62. (Rus).

5. Yuriy V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol.213, no.3, pp. 444-452. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003.

6. Batygin Yu.V., Gnatov A.V. Magnetic-pulse attraction and repulsion of thin-walled sheet ferromagnetics. *Electrichestvo – Electricity*, 2012, no.8, pp. 58-65. (Rus).

7. Batygin Yuri V., Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol.214, iss.2, pp. 390-401. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.09.018.

8. Batygin Yu.V., Golovashchenko S.F., Chaplygin E.A. Magnetic-pulse attraction of nonmagnetic metals. *Electrichestvo – Electricity*, 2014, no.2, pp. 40-52. (Rus).

9. Batygin Yu.V. Experimental test of the tool for the external EMF removing dents on a car body. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2014, vol.3, no.4, pp. 204-208. doi: 10.11648/j.ijep.20140304.14.

Поступила (received) 28.05.2015

Чапльгин Евгений Александрович, к.т.н., доц.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,  
61002, Харьков, ул. Петровского, 25,  
тел/phone +38 057 7073727, e-mail: chaplygin\_e\_a@mail.ru

E.A. Chaplygin

Kharkov National Automobile and Highway University,  
25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

**Analysis of the processes in an inductor system with an attracting screen excited by the external circular solenoid.**

**Introduction.** Developments in the field of magnetic-pulse treatment of metals (MPTM) are increasingly used in the modern technologies of production and repair of the aviation, automotive and other machinery, as they are environmentally friendly and energy-efficient in comparison with classical approaches. One of the main components of the device MPTM is a tool – inductor or the inductor system with an attractive screen (ISAS). The calculated dependences to calculate the inductor system with an attractive screen were taken from previous works. The ratios were obtained for the low-frequency mode of the excited fields, when is place their significant penetration through a thin-walled metal screen and a deformed workpiece. As it was shown earlier this mode is the most efficient from point of view of a force action on the object of a processing. **Purpose.** The theoretical analysis of the spatial-temporal distributions of the induced currents and forces of an attraction in the inductor system with an attractive screen excited by a flat circular solenoid located on the outside of the auxiliary screen. **Methodology.** The calculations are shown that the induced currents both in the screen and the workpiece are unidirectional and their interaction, in accordance with the law of Ampere determines the amplitudes of excited forces of attraction. Let's note the effective validity of the considered inductor system excited by an external circular solenoid. With sufficient simplicity of the design take place rather high values of the developed forces of attraction and their averages. **Results.** Physically, a higher power efficiency of the system with an «external» coil in comparison with a system where coil is located in the internal cavity, can be accounted for lade of «failure» in the radial distribution of the excited forces. This «failure» in the design with a coil between the sheet metal is caused by its screening action against the forces of attraction between the induced currents. **Practical value.** It is shown that the inductor system with an attractive screen when it is excited by outer circular solenoid with a current of 50 kA ~ provides attractive power rates to about 1400 N on an area of sheet metal ~ 0.004 m<sup>2</sup>. The sufficiently high efficiency of the proposed options of an inductor system allows us to recommend it as a tool of the external straightening dents in the bodycar surfaces of vehicles. References 9, table 1, figure 1. **Key words:** magnetic pulse treatment, attractive of metals, inductor system, the circular solenoid, attractive screen.