

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ В «ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ С ПРИТЯГИВАЮЩИМ ЭКРАНОМ» И КРУГОВЫМ СОЛЕНОИДОМ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ РАБОЧИХ ЧАСТОТАХ

Чаплыгин Е.А., Еремина Е.Ф., Колесник В.А., ХНАДУ

Аннотация. Исследовано влияние частот действующих полей на распределение индуцированных токов в экране и в листовой заготовке. Показано, что практическое значение для проектирования индукторных систем с притягивающим экраном имеет вид фазовых и радиальных зависимостей индуцированных токов. Возбуждаемые силы магнитно-импульсного притяжения в ИСПЭ могут быть оценены с помощью коэффициентов трансформации.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка, индукторная система, тонкостенная заготовка, индуцированные токи.

Введение

Обоснование дееспособности любой технической идеи предполагает наглядную иллюстрацию принципа её действия с помощью, по возможности, достаточно простой и очевидной физической модели. Безусловно, выбранная идеализация должна быть адекватна реальной системе и достоверно отображать её свойства.

Последние условия требуют теоретического и экспериментального подтверждения. Как показали проведенные исследования, «индукторная система с притягивающим экраном» (ИСПЭ) оказывается дееспособной и в отсутствие витка во внутренней полости между экраном и листовой заготовкой, то есть при наличии только внешнего источника магнитного поля. Данный вывод позволяет предложить новый вариант её исполнения. А именно, ИСПЭ может включать в качестве источника магнитного поля только плоскую многовитковую катушку над дополнительным вспомогательным экраном. В этом случае взаимодействие индуцированных токов в экране и заготовке должно возбудить силы их взаимного притяжения.

Следует отметить, что данный вариант ИСПЭ может подключаться к магнитно-импульсной установке без согласующего устройства, поскольку конструктивная составляющая – «многовитковая катушка – вспомогательный экран» – уже представляет собой импульсный трансформатор тока (дискового типа).

Анализ публикаций

Целесообразность и перспективность магнитно-импульсных технологий для решения

практических задач по устранению вмятин в кузовных элементах автомобилей обоснованы в [1–3]. Показано, что для трансформации сил отталкивания, естественных для традиционной магнитно-импульсной обработки металлов, в силы притяжения необходимы индукторные системы, принцип действия которых основан на притяжении проводников с одинаково направленными токами, т.е. вихревыми токами, индуцированными в металле вспомогательного экрана обрабатываемого объекта.

Магнитно-импульсное притяжение тонкостенных листовых металлов может осуществляться с использованием различных индукторных систем. В [4, 5] для этой цели предлагается использовать цилиндрические конструкции, основным достоинством которых является аксиальная симметрия развиваемых сил притяжения. Принцип действия инструментов, описанных в [5–7], позволяет осуществлять притяжение как ферромагнитных, так и неферромагнитных листовых материалов. В работе [8] приведены обоснование и теоретические расчеты работоспособности индукторной системы с притягивающим экраном, возбуждаемой внешним плоским круговым соленоидом. В предлагаемой работе приводятся расчеты пространственно-временных зависимостей плотностей токов, индуцированных в металле экрана и листовой заготовке при различных рабочих частотах.

Цель и постановка задачи

Целью работы было обоснование дееспособности системы с помощью простой физической модели, адекватно отражающей свойства данного приспособления, и определение

характеристик электромагнитных процессов в ИСПЭ с внешним возбуждением при произвольных рабочих частотах действующих полей. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: принцип работы ИСПЭ, возбуждаемой внешним источником магнитного поля при интенсивном проникновении действующих полей, описать с привлечением наиболее иллюстративной физической идеализации; составить и решить систему дифференциальных уравнений, приведенных к виду, соответствующему постановке рассматриваемой электродинамической задачи.

Расчетная модель

В случае достаточно «прозрачных» экрана и заготовки в металле каждого из них индуцируются токи с временными зависимостями, пропорциональными производной $\sim \frac{dJ(t)}{dt}$, где $J(t)$ – ток индуктора. В свою очередь из закона Ампера следует, что сила притяжения будет прямо пропорциональна квадрату производной $\sim \left(\frac{dJ(t)}{dt}\right)^2$. Силы отталкивания, обусловленные взаимодействием индуцированных токов с возбуждаемыми магнитными полями, пропорциональны произведению $\sim J(t) \cdot \frac{dJ(t)}{dt}$. Интеграл по времени действия сил от этого произведения представляет собой их интегральный импульс. Очевидно, что для $t \in [0; \infty)$ величина этого импульса, определяющего результирующую действенность сил отталкивания, стремится к нулю [3]. Таким образом, в предложенной «индукторной системе с притягивающим экраном» должны возбуждаться только силы притяжения – силы отталкивания будут отсутствовать.

В цилиндрических координатах схематическое изображение предлагаемого инструмента представлено на рис. 1.

Возбуждаемые токи, поля и силы при произвольных рабочих частотах

Для определения характеристик электромагнитных процессов в ИСПЭ с внешним возбуждением при произвольных рабочих частотах действующих полей следует обратиться к системе дифференциальных уравнений, которую необходимо привести к виду, соответствующему постановке рассматриваемой электродинамической задачи [9].

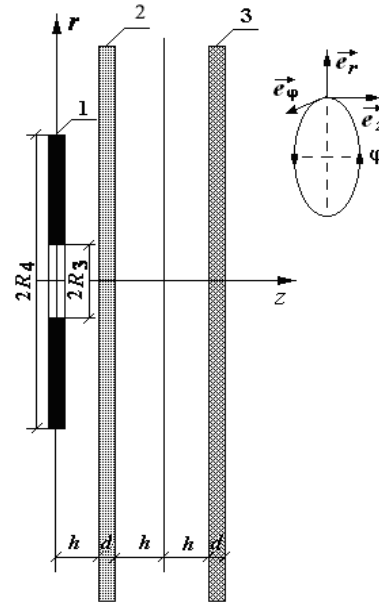


Рис. 1. Расчётная модель в цилиндрической системе координат ($\vec{e}_r, \vec{e}_\phi, \vec{e}_z$ – направляющие орты): 1 – многовитковый индуктор; 2 – экран; 3 – заготовка; d – толщина; h – расстояние от индуктора до экрана, $2 \cdot h$ – расстояние между экраном и листовой заготовкой; R_3, R_4 – внутренний и внешний радиусы

Напомним, что металлы экрана и заготовки полагаем немагнитными с относительной проницаемостью $\mu_r \approx 1$. В такой постановке можно получить оценки сил притяжения по минимуму, поскольку учитывается только закон Ампера и отсутствует составляющая, обусловленная возможными магнитными свойствами листовых металлов.

Выполнив обратное интегральное преобразование Фурье–Бесселя [9], после тождественных преобразований получим аналитические зависимости, необходимые для проведения численных оценок.

В металле вспомогательного экрана возбуждается ток с линейной плотностью

$$J_\phi^{(3)}(p, r) = -\gamma \mu_0 \cdot \int_0^\infty f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{p \cdot j(p)}{q(p, \lambda) \cdot (1 + \alpha(p, \lambda))} \times \\ \times \left[\left(1 - e^{-q(p, \lambda) \cdot d} \right) - \frac{G_3(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda) \cdot d}}{\Delta(p, \lambda)} \right] \times \\ \times J_1(\lambda \cdot r) d\lambda \quad (1)$$

где $G_3(p, \lambda) = (1 - \alpha(p, \lambda)) \cdot G_1(p, \lambda) \cdot e^{2\lambda h} - (1 + \alpha(p, \lambda)) \cdot G_2(p, \lambda) \cdot e^{-2\lambda h}$

Индукцированный ток в металле листовой заготовки описывается выражением

$$J_{\varphi}^{(3)}(p, r) = 2\gamma \cdot \mu_0 \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{\lambda} \cdot p \cdot j(p) \times \\ \times \frac{[1 - (ch(q(p, \lambda) \cdot d) + \alpha(p, \lambda) \cdot sh(q(p, \lambda) \cdot d))] }{\Delta(p, \lambda)} \times \\ \times J_1(\lambda r) d\lambda \quad (2)$$

Соотношение сил притяжения и отталкивания должно определять действенность исследуемой «индукторной системы с притягивающим экраном» и внешним возбуждением магнитного поля.

Формула для L -образа плотности тока, индуцированного в металле заготовки, в конечном итоге примет вид

$$j_{\varphi}^{(3)}(p, r, \zeta) = \gamma \cdot E_{\varphi}^{(3)}(p, r, \zeta) = 2 \left(\frac{\gamma \mu_0}{d} \right) \times \\ \times \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda) e^{-\lambda h}}{\lambda} J_1(\lambda r) \left(pj(p) \frac{Q(p, \lambda, \zeta)}{\Delta(p, \lambda)} \right) d\lambda, \quad (3)$$

где

$$Q(p, \lambda, \zeta) = (q(p, \lambda) d) \left[sh \left((q(p, \lambda) d) \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) \right) - \right. \\ \left. - \alpha(p, \lambda) ch \left((q(p, \lambda) d) \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) \right) \right].$$

Тангенциальная компонента напряжённости магнитного поля в металле листовой заготовки будет равна

$$H_r^{(3)}(p, r, \zeta) = 2 \cdot j(p) \cdot \int_0^{\infty} \frac{f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{\lambda} q^2(p, \lambda) \times \\ \times \frac{[ch(q(p, \lambda) \cdot (\zeta - d)) - \alpha(p, \lambda) \cdot sh(q(p, \lambda) \cdot (\zeta - d))] }{\Delta(p, \lambda)} \times \\ \times J(\lambda r) d\lambda. \quad (4)$$

Для выполнения численных оценок в полученных выражениях для возбуждаемых токов и полей следует выполнить обратное преобразование Лапласа.

Перейдя в пространство оригиналов и выполняя некоторые вычисления, получим

окончательное выражение для линейной плотности тока, индуцированного в металле вспомогательного экрана:

$$J_{\varphi}^{(3)}(t, r) = \int_0^{\infty} f(x) \cdot e^{-x \frac{h}{d}} J_1 \left(x \frac{r}{d} \right) \cdot \sum_{k=0}^{\infty} a(k) \cdot \times \\ \times F_4(x, \beta_k) \left[\frac{dj(t)}{dt} * e^{-\left(x^2 + \beta_k^2\right) \frac{t}{\tau}} \right] dx, \quad (5)$$

$$\text{где } a(k) = \begin{cases} 0,5, & k = 0; \\ 1,0, & k = 1, 2, \dots \end{cases}$$

Аналогичным образом найдём оригинал выражения для линейной плотности тока, индуцированного в металле листовой заготовки. После необходимых тождественных преобразований получим аналитическую зависимость для линейной плотности тока, индуцированного в металле листовой заготовки.

$$J_{\varphi}^{(3)}(t, r) = \int_0^{\infty} \frac{f(x)}{x} \cdot e^{-x \frac{h}{d}} J_1 \left(x \frac{r}{d} \right) \sum_{k=0}^{\infty} a(k) \times \cdot \\ \times \frac{\beta_k \cdot M(x, \beta_k)}{F_1(x, \beta_k)} \left[\frac{dj(t)}{dt} * e^{-\left(x^2 + \beta_k^2\right) \frac{t}{\tau}} \right] dx. \quad (6)$$

Оригинал выражения (4) будет описывать пространственно-временное распределение тангенциальной компоненты напряжённости магнитного поля, возбуждаемого в металле листовой заготовки. После необходимых тождественных преобразований получим аналитическую зависимость для тангенциальной компоненты напряжённости возбуждаемого магнитного поля.

$$H(t, r, \zeta) = \frac{1}{\tau} \int \frac{f(x)}{x} e^{-J \left(x \frac{r}{d} \right)} \sum a(k) \times \\ \times \frac{\beta N(x, \beta, \zeta)}{F(x, \beta)} [j(t) * e^{-}] dx. \quad (7)$$

Последнее, что необходимо для исследования силовых эффектов, – это оригинал выражения для двумерной плотности тока, индуцируемого в металле листовой заготовки. Сохранив все основные обозначения в предыдущих зависимостях, представим формулу (3) в виде, удобном для выполнения

обратного преобразования Лапласа. Сохраняя основные обозначения, получим формулу для объёмной плотности тока, индуцированного в металле листовой заготовки.

$$j_{\varphi}^{(3)}(t, r, \zeta) = \frac{1}{d} \int_0^{\infty} \frac{f(x) e^{-x \frac{h}{d}}}{x} J_1 \left(x \frac{r}{d} \right) \times \\ \times \sum_{k=0}^{\infty} a(k) \frac{\beta_k Q(x, \beta_k, \zeta)}{F_1(x, \beta_k)} \left[\frac{dj(t)}{dt} * e^{-\left(x^2 + \beta_k^2\right) \frac{t}{\tau}} \right] dx, \quad (8)$$

где

$$Q(x, \beta_k, \zeta) = \beta_k \cdot \left[\begin{array}{l} \sin \left(\beta_k \cdot \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) \right) \\ - \left(\frac{\beta_k}{x} \right) \cdot \cos \left(\beta_k \cdot \left(\frac{\zeta}{d} - 1 \right) \right) \end{array} \right].$$

Численные оценки

Численные оценки проведём для следующих исходных данных:

– геометрия индукторной системы –

$R_3=0,005$ м, $R_4=0,05$ м, $h=0,005$ м;

– ток в индукторе – $I_m=10$ кА,

число витков – $W=12$,

рабочая частота – $\omega = 2\pi \cdot (100 \dots 5000)$ Гц,

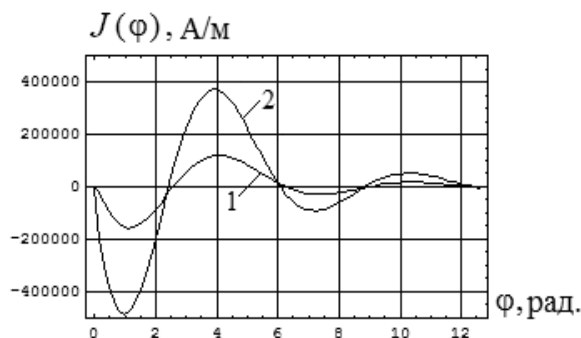
относительный декремент затухания

$\delta = 0,2 \dots 0,3$;

– листовые немагнитные металлы –

$d=0,001$ м, $\gamma=0,4 \cdot 10^7$ 1/(Ом·м) (сталь) и

$\gamma=3,75 \cdot 10^7$ 1/(Ом·м) (алюминий).



а

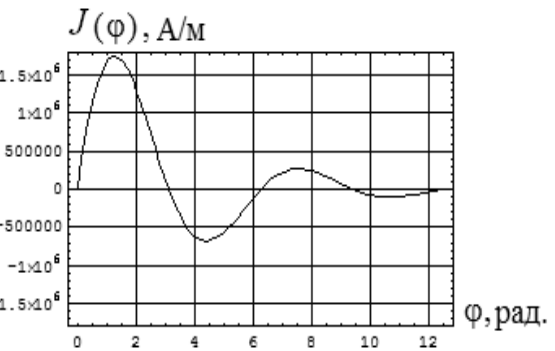
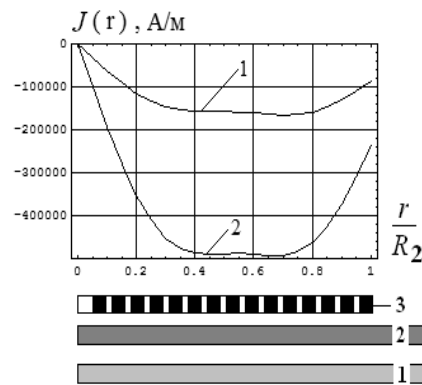


Рис. 2. Фазовая зависимость линейной плотности тока в индукторе, максимум $\sim 1,76 \cdot 10^6$ А/м; фаза максимума $\sim 1,256$ рад ($f=100 \dots 5000$ Гц, $\delta=0,3$)



б

Рис. 3. Распределение индуцированных токов в стальной заготовке и экране при частоте $f=5000$ Гц, $\varphi_{m1} = 1,099$ рад и $\varphi_{m2} = 0,942$ рад

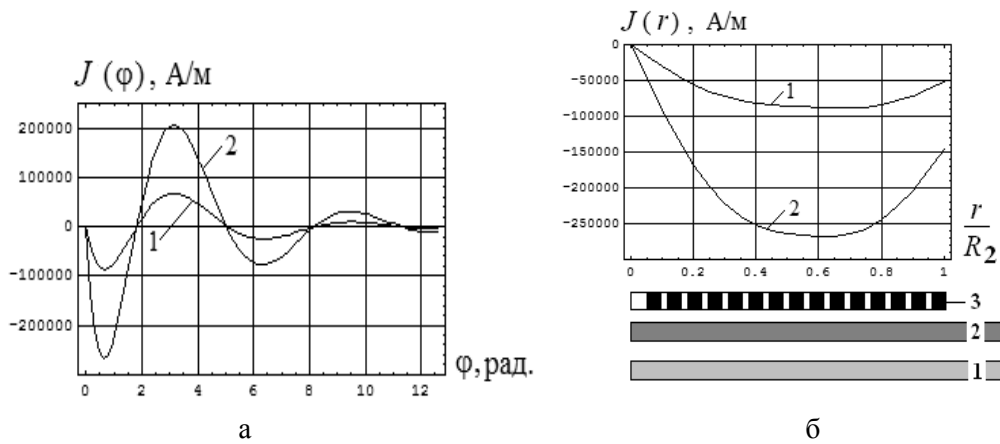


Рис. 4. Распределение индуцированных токов в стальной заготовке и экране при частоте $f=1000$ Гц, $\varphi_{m1}=0,628$ рад и $\varphi_{m2}=0,628$ рад

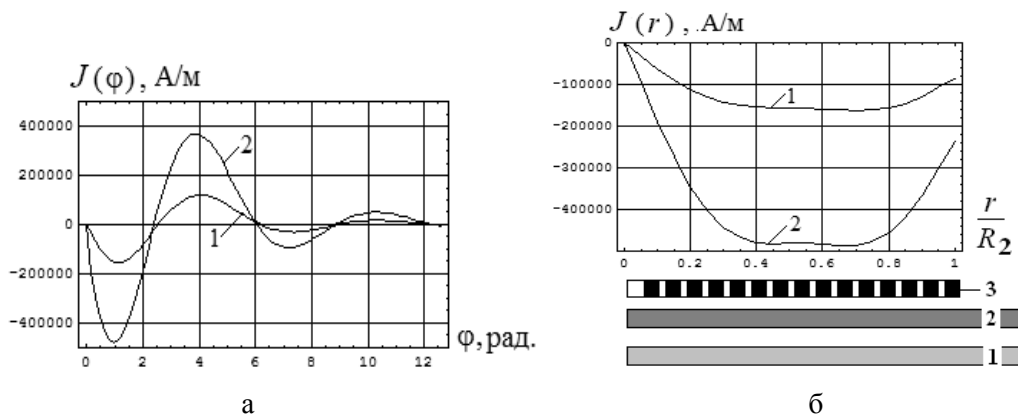


Рис. 5. Распределение индуцированных токов в алюминиевых заготовке и экране при частоте $f=500$ Гц, $\varphi_{m1}=1,099$ рад и $\varphi_{m2}=0,942$ рад

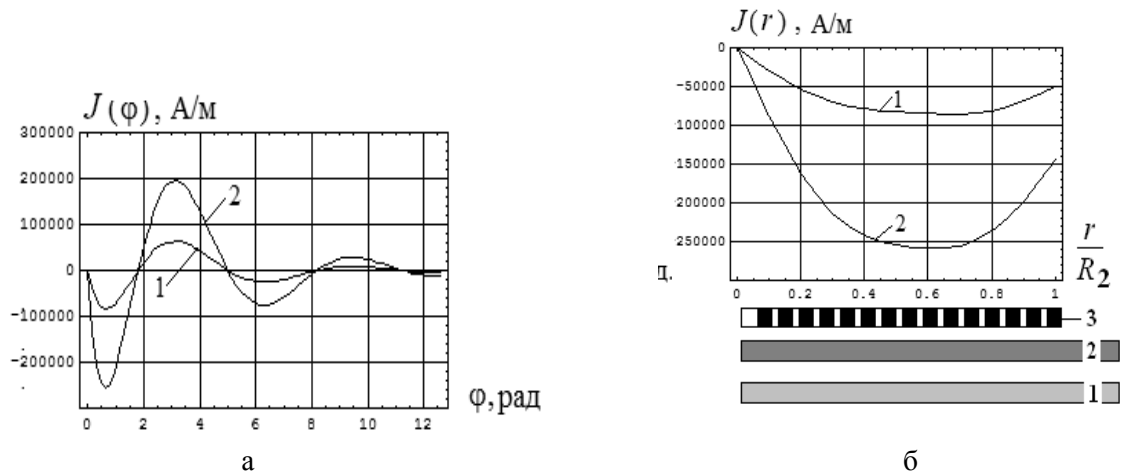


Рис. 6. Распределение индуцированных токов в алюминиевых заготовке и экране при частоте $f=100$ Гц, $\varphi_{m1}=0,628$ рад и $\varphi_{m2}=0,628$ рад

Вид фазовых и радиальных зависимостей индуцированных токов представляет практический интерес, поскольку, в конечном итоге, первые будут определять амплитуды возбуждаемых сил притяжения, а вторые – их пространственные распределения.

Сравнение кривых на рис. 3, а – 4, а с графической зависимостью на рис. 2 показывает, что при понижении частот действующих полей временные формы индуцированных токов, как в экране, так и в листовой заготовке, претерпевают значительные изменения.

Выводы

Значение высокой или низкой частоты для металлов экрана и заготовки в рассматриваемой индукторной системе количественно определяется величиной их удельной электропроводности. Приближённое равенство отношения частот и удельных электропроводностей имеет практическое значение при проектировании индукторных систем с притягивающими экранами для оценки соответствия частотных диапазонов действующих полей электрофизическим параметрам металлов экрана и заготовки.

Полученные результаты позволяют ориентироваться в практических оценках амплитуд индуцированных токов, определяющих возбуждаемые силы магнитно-импульсного притяжения в ИСПЭ.

Литература

1. Батыгин Ю.В. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, Л.Т. Хименко // *Електротехніка і електро-механіка*. – 2004. – №2. – С.80–84.
2. Batygin Yu. V. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinsky, L.T. Khimenko // *Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming*. March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany. – P. 157–160.
3. Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т.3: Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов; под ред. проф. Ю.В. Батыгина. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 248 с.
4. Батыгин Ю.В. Цилиндрическая индукционная индукторная система для притяжения тонкостенных листовых металлов / Ю.В. Батыгин, А.Ю. Бондаренко, Е.А. Чаплыгин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – №11 (47). – С. 109–117.
5. Патент України №70055. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів одновитковою індукторною системою з тонким екраном. (заявл. 14.11.2011); заявник і патентовласник Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Аргун Щ.В., Чаплыгин С.О., Гопко А.В., Дробінін О.М., Бюл. №10. 25.05.2012.
6. Batygin Yuriy V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications / Yu. V. Batygin, S.F. Golovashchenko, A.V. Gnatov // *Journal of Materials Processing Technology*. Elsevier. – 2013. – no. 213 (3). – P. 444–452.
7. Batygin Yu.V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals / Yu.V. Batygin, S.F. Golovashchenko, A.V. Gnatov // *Journal of Materials Processing Technology*. Elsevier. – 2014. – no. 214 (2). – P. 390–401.
8. Батыгин Ю.В. Обоснование работоспособности «индукторной системы с притягивающим экраном», возбуждаемой внешним плоским круговым соленоидом / Ю.В. Батыгин, Е.А. Чаплыгин, Е.Ф. Еремина, А.Р. Вакуленко // *Автомобиль и электроника*. – 2017. – №11. – С. 85–90.
9. Гнатов А.В. Универсальный инструмент бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки – симметричная индукционная индукторная система / А.В. Гнатов, С.А. Шиндерук, Д.П. Петренко // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2013. – №51. – С. 106–116.

References

1. Batygin, Yu.V., Lavinsky, V.I., Khimenko, L.T. (2004). Fizicheskiye osnovy vozmozhnykh na-pravleniy razvitiya magnitno-impul'snoy obrabotki tonkostennykh metallov [Physical bases of possible directions for the development of magnetic-pulse processing of thin-walled metals]. *Elektrotehnika i elektro-mekhanika - Electrical Engineering & Electromechanics*, 2, 80-84 [in Russian].
2. Batygin, Yu.V., Lavinsky, V.I., Khimenko, L.T. (2004). Direction Change in the Force Action on Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field. *Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming*. March 31/April 1, Dortmund, Germany, 157-160.
3. Turenko, A.N., Batygin, Yu.V., Gnatov, A.V. (2009). Impulsnyye magnitnyye polya dlya progressivnykh tekhnologiy [Pulsed magnetic fields for advanced technologies]. *Teoriya i eksperiment prityazheniya tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi polyami - Theory and experiment of attraction of thin-walled metals by pulsed magnetic fields*. prof. Yu.V. Batygin (Ed.). Kharkov: KhNAHU [in Russian].
4. Batygin, Yu. V., Bondarenko, A. Yu., Chaplygin, E.A. (2007). Tsilindricheskaya induktsionnaya indukturnaya sistema dlya

- prityazheniya tonkostennykh listovykh metallov [Cylindrical induction inductor system for attraction of thin-walled sheet metals.]. *Aviation and space technology and technology - Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologija*, 11 (47), 109-117 [in Russian].
5. Batigin, Yu.V., Gnatov, AV, Argun, Sh.V., Chaplygin, E.O., Gopko, A.V., Drobinin, O.M. (2011). Spisib magnitno-impulsnogo prityagannya metalevikh obektiv odnovitkovoyu induktornoyu sistemoyu z tonkim yekranom [The process of magnetically-momentum attracting metal objects in single-screw inductor system with a thin shield.] Patent of Ukraine no. 70055 [in Ukrainian].
 6. Batygin, Yu. V., Golovashchenko, S.F., Gnatov, A.V. (2013). Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals - Fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (3), 444-452.
 7. Batygin, Yu. V., Golovashchenko, S.F., Gnatov, A.V. (2014). Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 214 (2), 390-401.
 8. Batygin, Yu.V., Chaplygin, E.A., Yeryomina, E.F. Vakulenko, A.R. (2017). Obosnovaniye rabotosposobnosti «induktornoy sistemy s prityagivayushchim ekranom», vzbuzhdayemoy vneshnim ploskim krugovym solenoidom [Substantiation of the operability of the «inductor system with an attracting screen», excited by an external plane circular solenoid]. *Automobile and Electronics - Avtomobil i electronica*, 11, 85-90 [in Russian].
 9. Gnatov, A.V., Shinderuk, S.A., Petrenko, D.P. (2013). Universalnyy instrument beskontaktnoy magnitno-impulsnoy rikhtovki – simmetrichnaya induktsionnaya induktornaya sistema [A universal tool for non-contact magnetic-pulse alignment is a symmetrical induction inductor system]. *Vestnik NTU «KPI» - Bulletin of NTU «KHPI»*, 51, 106-116 [in Russian].

Чаплыгин Евгений Александрович, к.т.н.,
доцент, тел. +380509559560,
chaplygin.e.a@gmail.com

Еремина Елена Федоровна, к.т.н., доцент,
тел. 0662485275
elenf.yerymina@gmail.com

Колесник Владислав Александрович, студент, тел. +308063589-57-83
vladvolk1007@gmail.com
кафедра физики,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (ХНАДУ),
61002, г. Харьков, Украина, ул. Ярослава Мудрого, 25,

**DISTRIBUTION OF CURRENTS IN THE
«INDUCTOR SYSTEM WITH AN
ATTRACTING SCREEN» AND A CIRCULAR
SOLENOID UNDER DIFFERENT WORKING
FREQUENCIES**

**Chaplygin E., Yeryomina O., Kolesnyk V.,
KhNAHU**

Abstract. Problem. The action principle of the «inductor system with an attractive screen» (ISAS), excited by an external source of the magnetic field, is explained with the use of the most illustrative physical idealization, which takes place with intensive penetration of operating fields. It is shown that in the proposed ISAS only attraction forces should be excited, the repulsive forces will be absent. **Goal.** The purpose of the work is to justify the system's ability with a simple physical model that adequately reflects the properties of this device and determine the characteristics of electromagnetic processes in ISPE with external excitation at arbitrary frequencies of the operating fields. **Methodology.** A system of equations was used, given in the form corresponding to the formulation of the electrodynamics' problem under consideration. The screen and billet metals were assumed to be nonmagnetic. In this formulation, it was possible to obtain estimates of the minimum values of the attractive forces, since only Ampere's law was taken into account and the component due to the possible magnetic properties of the sheet metals was not taken into account. **Results.** The influence of the acting fields' frequencies on the distribution of the induced currents in the screen and in the blank is investigated. It is shown that the practical value for the design of inductor systems with an attractive screen has the form of phase and radial dependences of induced currents. This is due to the fact that the phase dependences will determine the amplitudes of the excited forces of attraction, and the radial - their spatial distributions. **Originality.** Numerical estimates of the space-time distribution of the linear current density in the screen and sheet billet metal at various operating frequencies and spatial-temporal distribution of the bulk current density induced in the metal of the sheet billet are numerically estimated. Comparison of the distribution curves of currents induced in the workpiece and the screen with the phase dependence of the linear current density in the inductor allows to conclude that when the frequencies of the acting fields decrease, the temporal forms of the induced currents, both in the screen and in the

sheet billet, undergo significant changes. **Practical value.** It is shown that the value of high or low frequency for the metals of the screen and workpiece in the considered inductor system is quantitatively determined by the value of their specific electrical conductivity. The approximate ratio equality of frequencies and specific electrical conductivities is of practical importance in the design of inductor systems with attracting screens to assess the correspondence of the frequency ranges of the operating fields to the electro physical parameters of screen and billet metals.

Key words: magnetic-pulse processing, inductor system, thin-walled billet, induced currents.

РОЗПОДІЛ СТРУМІВ В «ІНДУКТОРНІЙ СИСТЕМІ З ПРИТЯГУВАЛЬНИМ ЕКРАНОМ» ТА КРУГОВИМ СОЛЕНОЇДОМ ЗА ДОВІЛЬНИХ РОБОЧИХ ЧАСТОТ

Чаплигін Є.О., Ерьоміна О.Ф., Колесник В.О., ХНАДУ

Анотація. Принцип дії «індукторної системи з притягувальним екраном» (ІСПЕ), яка збуджується зовнішнім джерелом магнітного поля, пояснений із залученням найбільш ілюстративної фізичної ідеалізації, що має місце при інтенсивному проникненні діючих полів. Показано, що в запропонованій ІСПЕ повинні порушуватися лише сили тяжіння – сили відштовхування будуть відсутні. Метою роботи було обґрунтування дієздатності системи за допомогою простої фізичної моделі, що адекватно відображає властивості наведеного пристрою, та визначення характеристик електромагнітних процесів в ІСПЕ із зовнішнім збудженням за довільних робочих частот діючих полів. Використовувалася система рівнянь, приведена до виду, відповідного постановці розглянутої електродинамічної задачі. Мета-

ли екрану і заготовки вважали немагнітними. У такій постановці можна було отримати оцінки мінімальних значень сил тяжіння, оскільки враховувався тільки закон Ампера і була відсутня складова, зумовлена можливими магнітними властивостями листових металів. Досліджено вплив частот діючих полів на розподіл індукованих струмів в екрані та в листовій заготовці. Показано, що практичне значення для проектування індукторних систем із притягувальним екраном має вигляд фазових і радіальних залежностей індукованих струмів. Це зумовлено тим, що фазові залежності визначатимуть амплітуди порушуваних сил тяжіння, а радіальні – їх просторовий розподіл. Проведено чисельні оцінки просторово-часового розподілу лінійної густини струму в металі екрану і листовій заготовці за різних робочих частот, а також просторово-часового розподілу об'ємної густини струму, індукованого в металі листовій заготовці. Порівняння кривих розподілу індукованих у заготовці її екрані струмів із фазовою залежністю лінійної густини струму в індукторі дозволяє зробити висновок, що за зниження частот діючих полів часові форми індукованих струмів, як в екрані, так і в листовій заготовці, зазнають значних змін. Показано, що значення високої або низької частоти для металів екрану і заготовки в розглянутій індукторній системі кількісно визначається величиною їх питомої електропровідності. Наближена рівність відношення частот і питомих електропровідностей має практичне значення при проектуванні індукторних систем із притягувальними екранами для оцінки відповідності частотних діапазонів діючих полів електрофізичних параметрів металів екрану і заготовки.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка, індукторна система, тонкостінна заготовка, індуковані струми.