

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УНИВЕРСАЛЬНОМ ИНСТРУМЕНТЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ КУЗОВОВ

**Ю.В. Батыгин, профессор, д.т.н., А.В. Гнатов, доцент, к.т.н.,  
С.А. Шиндерук, аспирант, ХНАДУ**

*Аннотация.* В рамках статьи проведен анализ электродинамических процессов в индукционной индукторной системе, как в универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки, с определением основных возбуждаемых сил Лоренца, сил притяжения Ампера и сил магнитного притяжения. Определены аналитические выражения для расчета возбуждаемых усилий. Полученные результаты проиллюстрированы численными оценками для реальных ситуаций в практике магнитно-импульсной рихтовки.

*Ключевые слова:* магнитно-импульсная рихтовка, индукторная система, силы Лоренца, электромагнитные процессы, кузовная панель.

## АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В УНІВЕРСАЛЬНОМУ ІНСТРУМЕНТІ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО РИХТУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ КУЗОВІВ

**Ю.В. Батигін, професор, д.т.н., А.В. Гнатов, доцент, к.т.н.,  
С.О. Шиндерук, аспірант, ХНАДУ**

*Анотація.* У рамках статті проведений аналіз електродинамічних процесів в індукційній індукторній системі, як в універсальному інструменті магнітно-імпульсного рихтування, з визначенням основних збуджуваних сил Лоренца, сил притягання Ампера і сил магнітного притягання. Визначено аналітичні вирази для розрахунку збуджуваних зусиль. Отримані результати проілюстровані чисельними оцінками для реальних ситуацій в практиці магнітно-імпульсного рихтування.

*Ключові слова:* магнітно-імпульсне рихтування, індукторна система, сили Лоренца, електромагнітні процеси, кузовна панель.

## ANALYSIS ELECTRODYNAMIC PROCESSES IN THE UNIVERSAL TOOL OF MAGNETIC PULSE STRAIGHTENING AUTOMOBILE BODY

**Yu. Batygin, professor, dr. eng. sc., A. Hnatov, assistant professor, cand. eng. sc.,  
S. Shinderuk, postgraduate, KhNAHU**

*Abstract.* The article analyzes the electrodynamic processes in the induction inductor system as a universal tool of magnetic pulse straightening, with determination excited the Lorentz forces, the Ampere attraction forces and magnetic attraction forces. Defined analytical expressions for the excited effort. The results are illustrated by numerical estimates for the real situations in practice of the magnetic pulse straightening.

*Key words:* a magnetic pulse straightening, an induction system, the Lorentz forces, the electromagnetic processes, a body panels.

## Введение

Как известно, практическая работоспособность любой индукторной системы, как инструмента магнитно-импульсной рихтовки кузовных панелей автомобилей, определяется её геометрией в целом, электрофизическими и геометрическими характеристиками отдельных элементов, а также амплитудно-временными параметрами токового импульса в их взаимосвязи [1,2].

Большой интерес представляют инструменты, позволяющие производить рихтовку кузовных панелей автомобилей выполненных, как из ферромагнитных так и неферромагнитных металлов. К таким инструментам относятся индукционные индукторные системы – универсальные инструменты внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки [1 – 4].

## Анализ публикаций

Индукционные индукторные системы впервые были предложены и описаны авторами работы [5]. Их первоначальное назначение состояло в создании сил магнитно-импульсного притяжения немагнитных металлов, а принцип действия основан на взаимодействии проводников с одинаково направленными токами (закон Ампера). Таковыми являются собственно объект обработки – тонкий металлический лист и дополнительный конструктивный элемент индукционной индукторной системы – проводящий вспомогательный экран.

В 2004г. учёными НГУ «ХПИ» при проведении экспериментов с тонкостенными стальными образцами был обнаружен эффект изменения направленности силового магнитно-импульсного воздействия при вариации рабочих частот действующих полей. При низких частотах (~2...2.5 кГц) – участок листовой заготовки испытывал притяжение, конечным результатом которого было образование вмятины. При достаточно высоких частотах (~7...8 кГц) имело место известное в практике магнитно-импульсной обработки металлов (аббревиатура – МИОМ) отталкивание участка листа с образованием выпуклости [6]. Объяснению этого эффекта с теоретическим и экспериментальным подтверждением достоверности посвящены многочисленные работы [1, 3, 4 – 14].

## Цель и постановка задачи

Цель настоящей работы – анализ электродинамических процессов в индукционной индукторной системе с одинаковыми тонкостенными листовыми ферромагнетиками между которыми размещён круговой виток с током, как в универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовке.

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

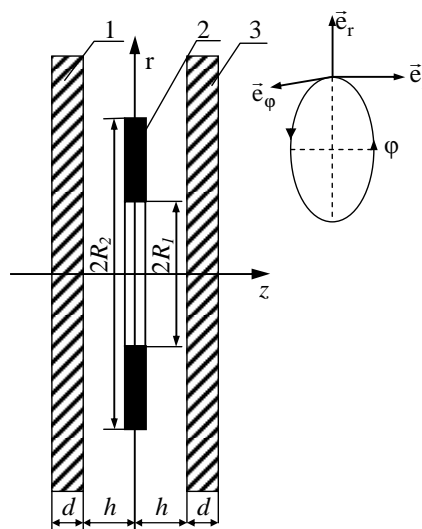


Рис. 1. Расчётная модель в цилиндрической системе координат ( $\vec{e}_r, \vec{e}_\phi, \vec{e}_z$  – направляющие орты), 1 – экран ( $d$  – толщина); 2 – виток ( $R_1, R_2$  – внутренний и внешний радиусы); 3 – заготовка ( $d$  – толщина);  $h$  – расстояние от витка до экрана или заготовки

Сформулируем следующие допущения:

– амплитудно-временные параметры тока индуктора  $I(t)$  таковы, что справедливо квазистационарное приближение по Ландау

$$-\frac{\omega}{c} \cdot \ell \ll 1 [15], \text{ где } \omega - \text{циклическая частота,}$$

$c$  – скорость света в вакууме,  $\ell$  – характерный размер системы;

– плоский виток индуктора имеет цилиндрическую форму ( $R_1, R_2$  – внутренний и внешний радиусы), его толщина пренебрежимо мала, так что металл витка не оказывает никакого влияния на протекающие электромагнитные процессы;

– имеет место аксиальная симметрия ( $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$ ,  $\varphi$  – азимутальный угол) и симметрия системы относительно плоскости витка индуктора  $z = 0$ ;  
 – экран и заготовка есть одинаковые листовые металлы с довольно большими поперечными размерами, достаточно малой толщиной –  $d$ , электропроводностью –  $\gamma$  и абсолютной магнитной проницаемостью –  $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$  ( $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума), они расположены на одинаковом расстоянии от витка индуктора –  $h$ .

### Анализ электродинамических процессов

Уравнения Максвелла ( $E_\varphi \neq 0, H_{r,z} \neq 0$ ) для возбуждаемых составляющих вектора электромагнитного поля, преобразованных по Лапласу с учётом нулевых начальных условий для расчетной модели рис. 1, имеют вид [1, 15, 16]:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z); \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_0 \cdot p \cdot H_z(p, r, z); \\ \frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 \cdot p \cdot H_r(p, r, z); \end{cases} \quad (1)$$

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;

$$\begin{aligned} E_\varphi(p, r, z) &= L\{E_\varphi(t, r, z)\}; \\ H_{r,z}(p, r, z) &= L\{H_{r,z}(t, r, z)\}; \\ j_\varphi(p, r, z) &= L\{j_\varphi(t, r, z)\}. \end{aligned}$$

В общем случае плотность тока в правой части уравнения (1) записывается в виде:

$$j_\varphi(p, r, z) = (p \cdot \epsilon_0 + \gamma) \cdot E_\varphi(p, r, z) + j_{\varphi_i}(p, r, z), \quad (2)$$

где  $j_{\varphi_i}(t, r, z)$  – плотность стороннего тока в индукторе,  $j_{\varphi_i}(p, r, z) = j(p) \cdot f(r) \cdot \delta(z)$ ;

$$j(p) = \frac{I(p)}{R_2 - R_1}; \quad I(p) = L\{I(t)\}, \quad I(t) - \text{ток};$$

$f(r)$  – функция радиального распределения тока в витке индуктора;

$\delta(z)$  – дельта-функция Дирака;

$\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Решая составленные уравнения Максвелла (1) известными методами из математического анализа [1, 3, 16], во избежание громоздкости в изложении, опустим промежуточные выкладки, и запишем окончательное выражение для возбуждаемых усилий в рассматриваемом универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки:

Силы притяжения Ампера

$$F_A(\varphi, r) = F_{Am}(\varphi) \cdot \left( \int_0^\infty \Phi_3(x) \cdot J_1\left(x \frac{r}{d}\right) \cdot dx \right)^2, \quad (3)$$

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

$$\Phi_3(x) = \frac{F(x) \cdot \left( (1 - ch(x)) - \frac{1}{\mu_r} \cdot sh(x) \right)}{x^3 \left( sh(x) \left[ sh\left(x \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch\left(x \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} e^{\frac{xh}{d}} ch(x) \right)}$$

Сила притяжения, обусловленная магнитными свойствами металла заготовки, описывается зависимостью:

$$F_M(\varphi, r) = -F_{Mm}(\varphi) \times \left( \mu_r [Y_1(r) - Y_2(r)] + [Y_3(r) - Y_4(r)] \right). \quad (4)$$

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

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

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

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

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

**Численные оценки**

Зададимся геометрическими и электромагнитными параметрами индукционной индукторной системы – универсального инструмента магнитно-импульсной рихтовки, которые соответствуют реальным условиям при выполнении операции рихтовки кузовных панелей автомобилей.  $R_1 = 0,025$  м,  $R_2 = 0,035$  м,  $h = 0,001$  м,  $f = 1150 \div 2000$  Гц,  $\delta = 0,3$ ,  $I_m = 50$  кА,  $d = 0,00075$  м,  $\gamma = 0,2 \cdot 10^7$  1/Ом·м. Вычисление возбуждаемых сил Лоренца проведем в соответствии с аналитическими зависимостями, представленными в монографиях [1, 3]. Проведенные численные оценки в виде графических зависимостей представлены на рис. 2 и рис. 3.

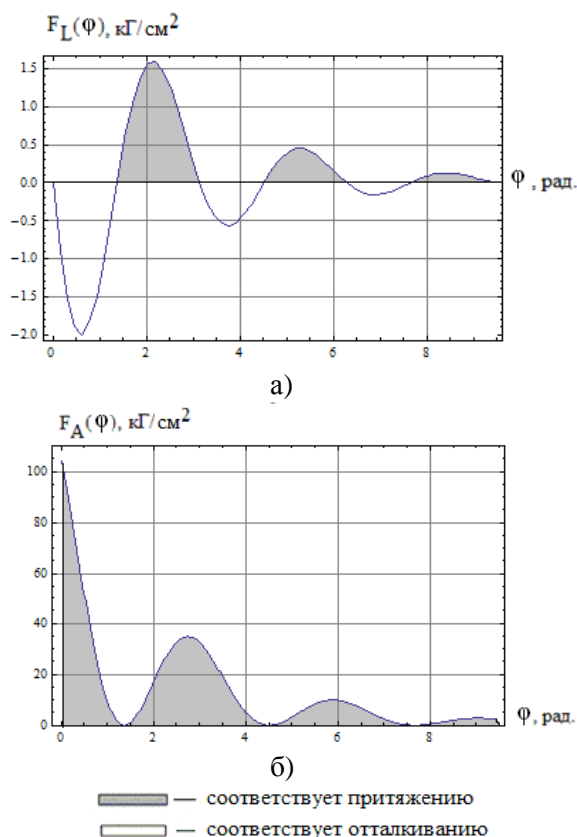


Рис. 2. Фазовые зависимости возбуждаемых сил для  $r = R_1$ , а) нормальная компонента силы Лоренца, б) сила притяжения – Ампера

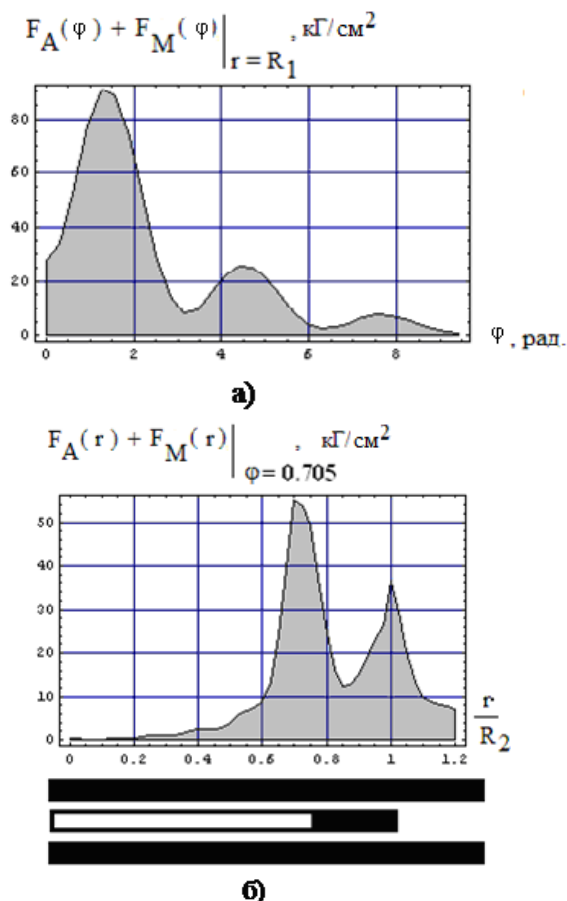


Рис. 3. Графические зависимости суммарной силы притяжения в системе с магнитными экраном и заготовкой,  $\mu_r = 2,5$ , а) фазовая зависимость для  $r = R_1$ , б) радиальное распределение в момент  $\varphi = 0,705$  рад.

Первое, что следует отметить ещё до проведения вычислений, это неизменность временных характеристик исследуемых процессов. В рамках принятой идеализации достаточно низких рабочих частот они не зависят от магнитной проницаемости конструктивных элементов рассматриваемой индукторной системы и остаются теми же, что и в первых вычислениях с немагнитной сталью.

Второе, силовые показатели изменятся, поскольку помимо сил Лоренца и сил притяжения Ампера появляется сила, обусловленная магнитными свойствами экрана и заготовки, которая в дальнейшем может быть названа «силой магнитного притяжения».

Вычисления для немагнитных экрана и листовой заготовки показали, что: – возбуждаемые силы любой природы (силы Лоренца и силы Ампера) концентрируются в

зоне под витком индуктора;  
 – под центром витка направление тангенциальных сил Лоренца изменяется на противоположное;  
 – силы притяжения Ампера знакопостоянны в течение всего импульса силы, их действие во времени имеет кумулятивный характер;  
 – силы Лоренца имеют осциллирующий характер, их интегральное действие во времени стремится к нулю,

$$\int_0^{\infty} F(\varphi) d\varphi \Rightarrow \int_0^{\infty} j(\varphi) \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} d\varphi = \frac{j^2(\varphi)}{2} \Big|_0^{\infty} = 0;$$

– амплитуды сил притяжения Ампера значительно выше амплитуд сил Лоренца, последние не могут оказать существенного влияния на пространственные (радиальные) распределения усилий, действующих на металл заготовки;  
 – искажение фазовой зависимости сил притяжения за счёт влияния сил Лоренца весьма незначительно и может проявляться лишь в начальной стадии процесса.

Для иллюстративности помимо амплитудных значений следует привести усредненные силовые показатели. При расчёте последних в качестве границ интервалов усреднения примем значения радиальных координат, в пределах которых сосредоточены возбуждаемые силы. Подчеркнём, что оценка границ производится чисто визуально из графиков соответствующих распределений.

Так, среднее значение силы притяжения Ампера на интервале  $\frac{r}{R_2} \in [0,5; 2,5]$  составляет  $\sim 78 \text{ кГ/см}^2$ .

Усреднение силы магнитного притяжения на интервале  $\frac{r}{R_2} \in [0,5; 1,2]$  даёт в результате  $\sim 98 \text{ кГ/см}^2$ .

Среднее значение суммарной силы притяжения (сила Ампера плюс сила магнитного притяжения) за время её действия составляет  $\sim 110 \text{ кГ/см}^2$ .

### Выводы

Обобщая результаты проведенных вычислений, основные выводы можно сконцентрировать в следующих положениях.

1. Проведен анализ электродинамических процессов в индукционной индукторной системе с одинаковыми тонкостенными листовыми ферромагнетиками между которыми размещён круговой виток с током.
2. Влияние магнитных свойств экрана в универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки и кузовной панели автомобиля проявляется в появлении мощных сил магнитного притяжения.
3. Все возбуждаемые силы имеют различные фазовые зависимости, вследствие чего их максимумы разнесены во времени, и суммарное действие возбуждаемых сил не определяется простым суммированием амплитудных значений.
4. Оценка усредненных силовых показателей показала, что среднее значение суммарной силы притяжения (сила Ампера плюс сила магнитного притяжения) за время её действия может составить  $\sim 110 \text{ кГ/см}^2$ .

### Литература

1. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / Туренко А. Н., Батыгин Ю. В., Гнатов А. В.; монография. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
2. Лаборатория электромагнитных технологий // Матеріали сайту – 2013. – Режим доступа: <http://electromagnetic.comoj.com>.
3. 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.
4. Моделирование электродинамических процессов в симметричной индукционной индукторной системе : матеріали Міжнар. науково-практичної Інтернет-конференції ["Математичне моделювання прикладних задач математики, фізики, механіки"], (Харків, 10–25 травня, 2013 р.) / А. В. Гнатов // Ред. Рада: Тропіна А. А. та ін. – Х. : Екограф, 2013. – 256 с. (С. 232–234).
5. Батыгин Ю. В. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных

- металлов / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Л. Т. Хименко // *Электротехніка і електромеханіка.* – Харків, 2004. – № 2. – С. 80-84.
6. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field : proceedings of the 1-st International Conference [«High Speed Metal Forming»], (Dortmund, March 31/April 1, 2004) / Yu. V. Batygin, V. I. Lavinsky, L. T. Khimenko. – Dortmund, Germany. 2004. – P. 157–160.
  7. Batygin Yuri V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications / Yuri V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov // *Journal of Materials Processing Technology.* – Elsevier. – 2013. – № 213 (3). – P. 444–452.
  8. Батыгин Ю. В. Особенности токов, индуцированных низкочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах. / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Е. А. Чаплыгин // *Электротехніка і електромеханіка.* – 2005.– №3, – С. 69-73.
  9. Батыгин Ю. В. Вихревые токи в плоских листовых заготовках / Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин // *Электротехніка і електромеханіка.* – 2006. – №5, – С. 54-59.
  10. Батыгин Ю. В. Вихревые токи в тонких металлических листах при магнитно-импульсной обработке металлов. / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, А. Ю. Бондаренко // *Электричество.* – М., 2009. – №9, – С. 61-65.
  11. Батыгин Ю. В. Силы, действующие на тонкостенный проводник, в проникающем поле плоского одновиткового соленоида. / Ю. В. Батыгин, А. Ю. Бондаренко // *Техн.электродинамика.* – 2010. – №1, – С. 9-14.
  12. 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.
  13. Батыгин Ю. В. Особенности возбуждения электромагнитных сил при магнитно-импульсной обработке листовых ферромагнетиков / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов // *Техн. электродинамика.* – К., 2012. – №1, – С. 9-14.
  14. Батыгин Ю. В. Экспериментальные исследования магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов / Ю. В. Батыгин, С. Ф. Головащенко, А. В. Гнатов, Д. О. Смирнов // *Электротехніка і електромеханіка.*– Харків. – 2010. – № 3. – С. 39 – 41.
  15. Ландау Л. Д. *Электродинамика сплошных сред* / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1982. – 620 с.
  16. Мэтьюз Дж. *Математические методы физики* / Дж. Мэтьюз, Р. Уокер ; пер. с англ. В. П. Крайнова. – М. : Атомиздат, 1972. – 399 с.
- Рецензент: В.Б. Финкельштейн, профессор, д.т.н., ХНУГХ.
- Статья поступила в редакцию 15 октября 2013 г.