



УДК 621.318

## РАСЧЕТ ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕННОСТЕЙ В СИММЕТРИЧНОМ УНИВЕРСАЛЬНОМ ИНСТРУМЕНТЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ

*Шиндерук С.А.*

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

*Проведенный анализ электромагнитных процессов в симметричном универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки позволил получить расчетные соотношения для радиальной зависимости возбуждаемого тока и компонент напряжённости магнитного поля в листовой заготовке рассматриваемой системы, а так же построены радиальные зависимости распределения плотности индуцированного тока и напряжённости магнитного поля.*

*Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка металлов, плотность индуцированного тока, напряженность магнитного поля, тонкостенный экран, индуктор.*

**Введение.** В 2004 г. 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 (МИОМ) отталкивание участка листа с образованием выпуклости [1].

Объяснению этого эффекта с теоретическим и экспериментальным подтверждением достоверности посвящены работы [2-5]. Физическая сущность заключается в том, что при понижении рабочих частот действующих полей падает действенность сил отталкивания – сил Лоренца (известны, как «силы магнитного давления на проводник») [2, 3, 6, 7]. Действенность сил притяжения, обусловленных магнитными свойствами стального объекта обработки, растёт и, несмотря на малое отличие относительной магнитной проницаемости его металла от единицы в реальном диапазоне амплитуд внешних полей, становится вполне достаточной для «вытягивания» вмятины [4, 5].

**Актуальность исследований.** Отличительной особенностью полевых методов воздействия является отсутствие непосредственного контакта с обрабатываемым материалом. В этом нет необходимости, поскольку трансформация энергии поля в механическую работу происходит собственно в материале заготовки подлежащей обработке [8, 9].

Принцип действия симметричного универсального инструмента магнитно-импульсной рихтовки основан на использовании закона Ампера, по которому проводники с одинаково направленными токами притягиваются друг к другу [3].

Отличительной особенностью универсальных инструментов (в отличии от индукторных систем, основанных на естественном притяжении ферромагнетиков при понижении рабочих частот действующих полей) – это возможность работы с металлами любой физической природы, как ферромагнетики, так и металлы не обладающие магнитными свойствами (алюминий и его сплавы). Эта возможность реализуется благодаря специальному техническому решению в универсальном инструменте – введению дополнительного (вспомогательного) экрана [1-3, 10].

**Цель работы** – анализ электромагнитных процессов в симметричном универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки. По полученным аналитическим соотношениям построение радиальных зависимостей распределения плотности индуцированного тока и напряжённости магнитного поля в листовой заготовке.

**Результаты исследований.** Расчет индуцированных токов и напряженностей в симметричном универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки начнем



с расчётной модели в цилиндрической системе координат (рис. 1). При решении примем допущения, аналогичные публикации [10].

Для расчётной модели, представленной на рис. 1 составляются уравнения Максвелла для возбуждаемых составляющих вектора электромагнитного поля ( $E_\phi \neq 0, H_{r,z} \neq 0$ ).

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

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;

$$E_\phi(p,r,z) = L\{E_\phi(t,r,z)\}; H_{r,z}(p,r,z) = L\{H_{r,z}(t,r,z)\}; j_\phi(p,r,z) = L\{j_\phi(t,r,z)\}$$

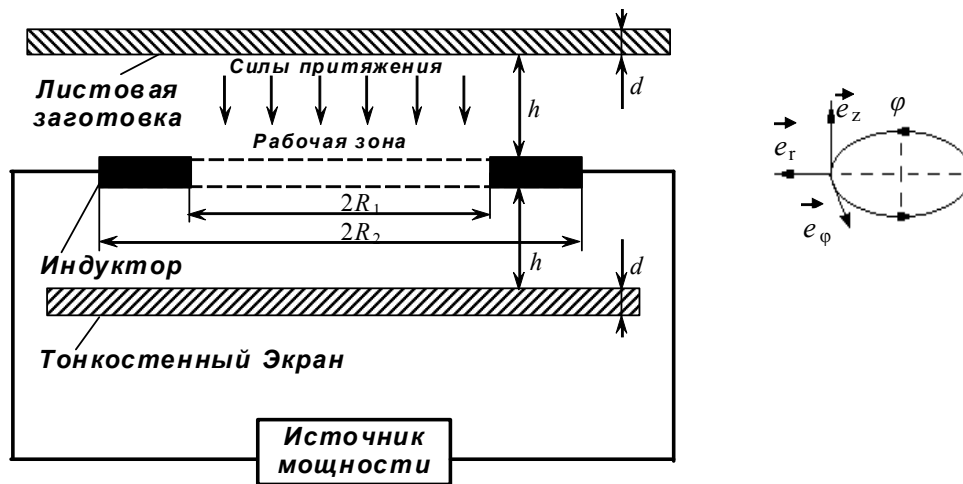


Рисунок 1 – Симметричный универсальный инструмент – расчётная модель

Решая составленные уравнения известными математическими методами [6], во избежание громоздкости в изложении, опустим промежуточные выкладки, и запишем окончательное выражение для радиальной зависимости возбуждаемого тока.

$$j_\phi(\phi,r,\zeta) = j_m \frac{dj(\phi)}{d\phi} \left( \frac{\omega\tau}{2d} \right) \int_0^\infty \frac{F(x) J_1\left(x \frac{r}{d}\right)}{x^2} \cdot \frac{\left( sh\left(x \frac{\zeta-d}{d}\right) - \frac{1}{\mu_r} ch\left(x \frac{\zeta-d}{d}\right) \right)}{sh(x) \left[ sh\left(x \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} ch\left(x \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} e^{\frac{xh}{d}} ch(x)} dx, \quad (2)$$

где  $\phi = \omega \cdot t$ ,  $j(\phi)$  – фаза и фазовая зависимость тока в индукторе,  $F(x) = \int_{\left(x \cdot \frac{R_2}{d}\right)}^{\left(x \cdot \frac{R_1}{d}\right)} y \cdot J_1(y) dy$  –

для равномерного радиального распределения тока в индукторе,  $\zeta = z - d, \zeta \in [0, d]$  – пространственная переменная по толщине,  $J_1\left(x \frac{r}{d}\right)$  – функция Бесселя первого порядка,

$\tau = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \gamma \cdot d^2$  – характерное время диффузии поля в металл с удельной электропроводностью –  $\gamma$  и относительной магнитной проницаемостью –  $\mu_r$ .



Результати вычислений для типичной экспериментальной индукторной системы [8, 9], выполненных с помощью (2) в относительных единицах (нормировка на соответствующий максимум) представлены на графиках, рис. 2-4.

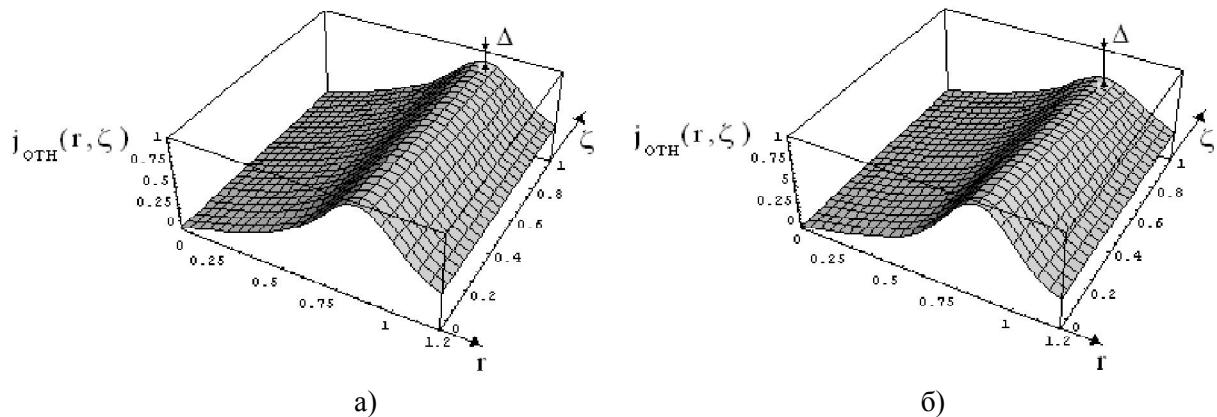


Рисунок 2 – Пространственное распределение плотности индуцированного тока ( $\Delta$  – величина, иллюстрирующая убывание по толщине листа), а)  $\mu_r = 1.0$ , б)  $\mu_r = 5.0$

В расчётах принято, что  $R_1 = 0.025$  м,  $R_2 = 0.0035$  м,  $h = 0.001$  м,  $d = 0.001$  м,  $\gamma = 0.4 \cdot 10^7$  1/Ом·м (сталь), ток в индукторе –  $j_i = j_m \cdot e^{-\delta_0 \cdot \phi} \cdot \sin \phi$ , где  $j_m$  – амплитуда,  $\phi = \omega \cdot t$  – фаза,  $\omega$  – частота, относительный декремент затухания –  $\delta_0 = 0.2$ .

В соответствии с предварительными оценками, выполненными в работах [3-5], примем, что  $\mu_r \in [1.0, 5.0]$ .

Следует отметить.

1. В диапазоне изменения величины относительной магнитной проницаемости условие низкочастотности режима [1-3] не нарушается,  $(\omega \cdot \tau) \in [0.01, 0.05]$ .
2. Расширение интервала изменения  $\mu_r$  значениями выше чем 1.5÷2.5 практически нецелесообразно с точки зрения адекватности реальным условиям [4, 5], но интересно для большей иллюстративности влияния магнитных свойств на протекающие электромагнитные процессы.

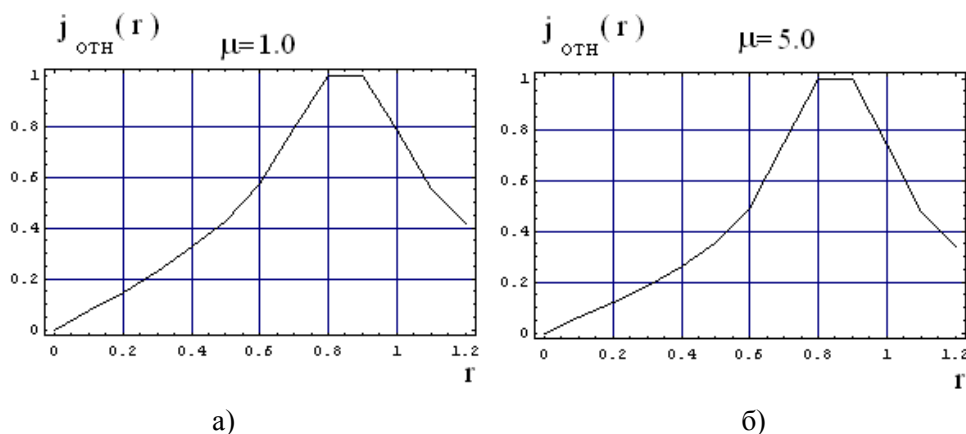


Рисунок 3 – Радиальное распределение плотности индуцированного тока на поверхности листа со стороны индуктора, а)  $\mu_r = 1.0$  ( $j_m = 3.66 \cdot 10^8$  А/м), б)  $\mu_r = 5.0$  ( $j_m = 4.74 \cdot 10^8$  А/м)

Из графических зависимостей следует, что:

- распределение индуцированного тока по радиусу практически не зависит от величины магнитной проницаемости листового металла;
- с увеличением  $\mu_r$  растёт неоднородность распределения по толщине листа, так при  $\mu_r \leq 2.5$  неоднородность изменяется ~ от 7% до 10%, а при  $\mu_r \leq 5.0$  имеет место рост ~ от 7% до 27%;



- фізически, рост неоднородности распределения индуцированного тока по толщине можно объяснить влиянием нормальной компоненты напряжённости магнитного поля в металле листа,
- с увеличением  $\mu_r$  растёт амплитуда индуцированного тока, для  $\mu_r \in [1, 5]$  величина  $j_m$  увеличивается на 30 %.

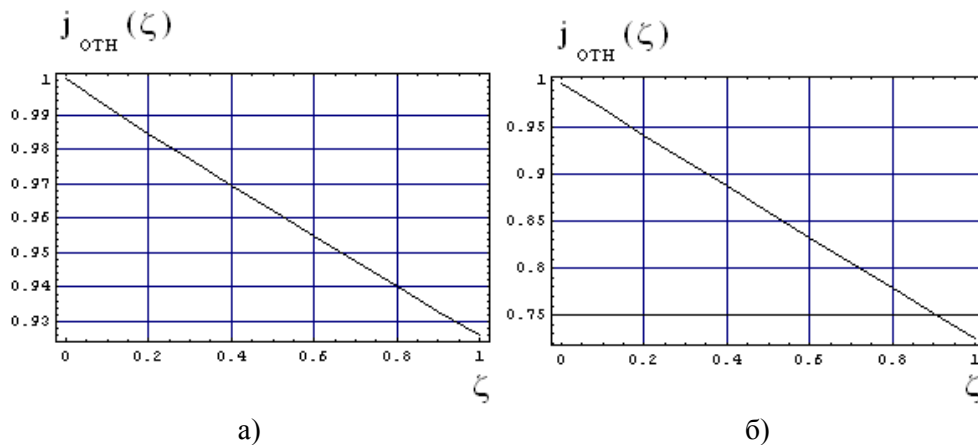


Рисунок 4 – Распределение плотности индуцированного тока по толщине листа под центром витка индуктора –  $r = \frac{R_1 + R_2}{2 \cdot R_2}$ , а)  $\mu_r = 1.0$  ( $j_m = 3.66 \cdot 10^8$  А/м), б)  $\mu_r = 5.0$  ( $j_m = 4.74 \cdot 10^8$  А/м).

Опуская промежуточные математические выкладки, в соответствии с [1, 3, 10], запишем окончательные выражения для компонент напряжённости магнитного поля.

$$H_r^{(2)}(\phi, r, \zeta) = \frac{j(\phi)}{2\mu_r} \cdot \int_0^\infty \frac{F(x) \cdot J_1\left(x \frac{r}{d}\right)}{x} \cdot \frac{\left( \operatorname{ch}\left(x \cdot \frac{\zeta - d}{d}\right) - \frac{1}{\mu_r} \cdot \operatorname{sh}\left(x \cdot \frac{\zeta - d}{d}\right) \right)}{\operatorname{sh}(x) \cdot \left[ \operatorname{sh}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} \operatorname{ch}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} \cdot e^{\frac{x \cdot h}{d}} \cdot \operatorname{ch}(x)} \cdot dx; \quad (3)$$

$$H_z^{(2)}(\phi, r, \zeta) = \frac{j(\phi)}{2\mu_r} \cdot \int_0^\infty \frac{F(x) \cdot J_0\left(x \frac{r}{d}\right)}{x} \cdot \frac{\left( \operatorname{sh}\left(x \cdot \frac{\zeta - d}{d}\right) - \frac{1}{\mu_r} \cdot \operatorname{ch}\left(x \cdot \frac{\zeta - d}{d}\right) \right)}{\operatorname{sh}(x) \cdot \left[ \operatorname{sh}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) + \frac{1}{\mu_r^2} \operatorname{ch}\left(x \cdot \frac{h}{d}\right) \right] + \frac{1}{\mu_r} \cdot e^{\frac{x \cdot h}{d}} \cdot \operatorname{ch}(x)} \cdot dx. \quad (4)$$

На рис. 5 приведены отдельные графические зависимости в относительных единицах (нормировки на максимум), иллюстрирующие характерные пространственные распределения компонент вектора напряжённости магнитного поля в листовых металлах.

Прокомментируем основные результаты расчётов напряжённости:

- с увеличением магнитной проницаемости убывание величины нормальной компоненты вектора  $\vec{H}$  по толщине листа более существенно, чем радиальной;
- с ростом магнитной проницаемости падает амплитуда напряжённости магнитного поля, так в диапазоне  $\mu_r \in [1, 5]$  отмечено падение на  $\sim 20 \div 25$  %.

Общий вывод анализа процессов возбуждения токов и магнитных полей в индукторной системе с идентичными листовым вспомогательным экраном и обрабатываемым объектом сводится к заключению: в диапазоне значений относительной магнитной проницаемости  $\mu_r \in [1.0, 2.5]$  её влияние на рассмотренные электромагнитные процессы практически не существенно.

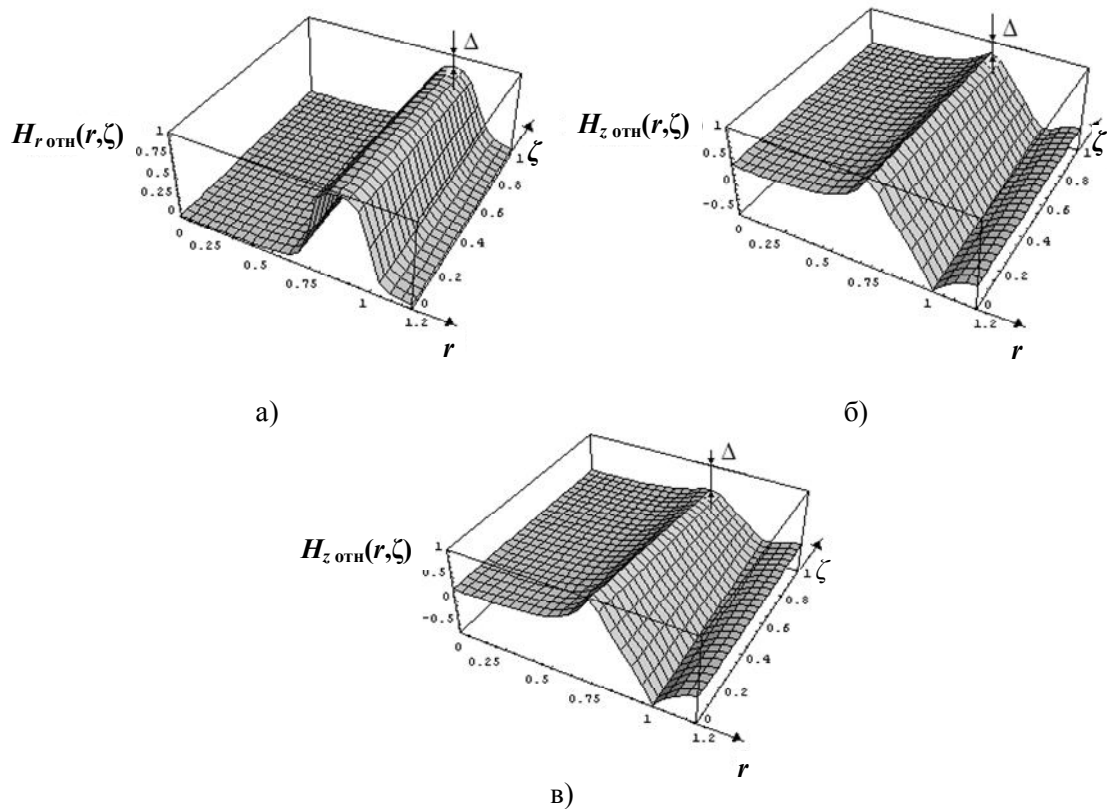


Рисунок 5 – Пространственное распределение компонент вектора напряжённости магнитного поля ( $\Delta$  – величина, иллюстрирующая убывание по толщине листа), а)  $\mu_r = 1.0, H_r$ ; б)  $\mu_r = 1.0, H_z$ ; в)  $\mu_r = 5.0, H_z$

Уменьшение ширины витка в рассматриваемой индукционной индукторной системе с ферромагнитными экраном и заготовкой, так же, как и в случае выполнения их из немагнитных металлов, позволяет значительно повысить силовые показатели системы [3]. Физически, этот факт объясняется ростом плотности тока в индукторе, вследствие чего увеличиваются амплитуды возбуждаемых электромагнитных полей и индуцированных токов.

Даже при незначительном увеличении магнитной проницаемости металла экрана и заготовки существенно растёт амплитуда сил Лоренца. Влиянием последней нельзя пренебрегать, её действие может исказить картину деформирования листовой заготовки в области витка индуктора.

**Выводы.** Основные результаты проведенных вычислений сводятся к следующим положениям:

1. Проведен анализ электромагнитных процессов в симметричном универсальном инструменте магнитно-импульсной рихтовки.
2. Получены расчетные соотношения для радиальной зависимости возбуждаемого тока и компонент напряжённости магнитного поля в листовой заготовке рассматриваемой системы.
3. Построены радиальные зависимости распределения плотности индуцированного тока и напряжённости магнитного поля в листовой заготовке для универсального инструмента магнитно-импульсной рихтовки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.



2. Батыгин Ю. В. Силы, действующие на тонкостенный проводник, в проникающем поле плоского одновиткового соленоида / Ю. В. Батыгин, А. Ю. Бондаренко // Техническая электродинамика. – 2010. – № 1. – С 9-14.
3. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов : монография. – Харьков : ХНАДУ, 2009. – 240 с.
4. Батыгин Ю. В. Направление сил, действующих на листовой ферромагнетик, в зависимости от временных характеристик при МИОМ / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С. А. Щиголева // Електротехніка і електромеханіка. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 3. – С. 56-61.
5. Пат. US 2008/0163661 A1 USA (США). Dent removing method and device / Meichtry Ralph, Kouba Ivan ; заявитель и патентообладатель Ostrolenk faber gerb & soffent, New York. – № 11/910,788; заявл. 11.05.2006; опубл. 10.07.2008.
6. Ландау Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц – М. : Наука, 1982. – 620 с.
7. Подольцев А. Д. Элементы теории и численного расчёта электромагнитных процессов в проводящих средах / А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – К. : Институт электродинамики НАНУ, 1999. – 362 с.
8. Белый И. В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И. В. Белый, С. М. Фертик, Л. Т. Хименко – Харьков : Вища школа, 1977. - 189 с.
9. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский , Л. Т. Хименко. – Харьков : МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.
10. Батыгин Ю. В. Электромагнитные процессы в симметричных индукционных системах с идентичными ферромагнитными тонкостенными экраном и листовой заготовкой / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, Щ. В. Аргун [и др.] // Електротехніка і електромеханіка. – Х. : НТУ «ХПІ». – № 4 – С. 50-53.

**Шиндерук С.О. РОЗРАХУНОК ІНДУКОВАНИХ СТРУМІВ І НАПРУЖЕНОСТЕЙ У СИМЕТРИЧНОМУ УНІВЕРСАЛЬНОМУ ІНСТРУМЕНТІ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО РИХТУВАННЯ**

*Проведений аналіз електромагнітних процесів у симетричному універсальному інструменті магнітно-імпульсного рихтування дозволив отримати розрахункові співвідношення для радіальної залежності збуджуваного струму і компонент напруженості магнітного поля в листовій заготовці розглянутої системи, а також побудовані радіальні залежності розподілу щільності індукованого струму і напруженості магнітного поля.*

*Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка металів, щільність індукованого струму, напруженість магнітного поля, тонкостінний екран, індуктор.*

**Shinderuk S.A. CALCULATION INDUCED CURRENTS AND INTENSITIES IN A SYMMETRIC MULTI-PURPOSE TOOL OF MAGNETIC PULSE STRAIGHTENING**

*The analysis of electromagnetic processes in a symmetric multi-purpose tool of magnetic pulse straightening yielded calculated ratios for the radial dependence of the excitation current and the component of the magnetic field in a blank sheet of the system, as well as built for the radial dependence distribution of the density induced current and intensity magnetic field.*

*Key words: magnetic pulse metal working, density induced current, intensity magnetic field, thin-walled screen, inductor.*

Статтю прийнято  
до редакції 4.05.2013