

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛОСКОЙ ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ С ДВУМЯ КАТУШКАМИ ПРИ РАВНОМЕРНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ В НИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТОКОВ

Проведено аналіз розподілу дотичного компонента напруженості магнітного поля із двох сторін плоского металевого немагнітного листа при впливі на нього з однієї сторони полів двох плоских співвісних індукторів, включених у розрядні ланцюги двох магнітно-імпульсних установок. Розрядний струм першої установки має частоту порядку десятків кілогерц, а другий – одиниць кілогерц. Струми в індукторах мають взаємно протилежний напрямок. Визначена ділянка заготовки, на поверхні якої, дотична компонента напруженості магнітного поля практично дорівнює нулю і співвідношення поверхневої щільності струмів в індукторах, при якому ця умова досягається.

Проведен анализ распределения касательной компоненты напряжённости магнитного поля с двух сторон плоского металлического немагнитного листа при воздействии на него с одной стороны полей двух плоских соосных индукторов, включённых в разрядные цепи двух магнитно-импульсных установок. Разрядный ток первой установки имеет частоту порядка десятков килогерц, а второй – единиц килогерц. Токи в индукторах имеют взаимно противоположное направление. Определена область заготовки, на поверхности которой, касательная компонента практически равна нулю и соотношение поверхностных плотностей токов в индукторах, при котором это условие достигается.

ВВЕДЕНИЕ

Около пяти десятилетий в машиностроительной, авиационной и других отраслях промышленности используется магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ). При этом в основном, использовались технологические схемы обработки, в которых силы, действующие на заготовку, направлены от индуктора к последней [4]. В настоящее время для расширения технологических возможностей МИОМ исследуют схемы обработки, в которых пондеромоторные силы направлены от заготовки к индуктору, т.е. операция притяжения участка заготовки. Данная операция может использоваться для расширения труб малого диаметра [9], для обработки закрытых металлических сосудов, а также для рихтовки вмятин на корпусах самолётов и автомобилей [2] внешним индуктором. Операция притяжения участка заготовки к индуктору может осуществляться разными способами [2]. Один из таких способов – создание воздействующего на заготовку импульса магнитного поля с пологим фронтом и резким спадом [8]. Для практической реализации импульса такой формы может быть использована двухчастотная схема, в которой индукторная система состоит из двух катушек. Каждая катушка подключена к своей магнитно-импульсной установке (МИУ): на одну катушку (индуктор) подаётся разрядный ток высокой частоты (порядка нескольких десятков килогерц), на вторую – низкой частоты (порядка единиц килогерц). При "медленном" нарастании магнитного поля, создаваемого первой катушкой, поле легко проникает сквозь металлический лист. В определённый момент времени включается вторая катушка (через которую протекает ток высокой частоты), создаваемое ей поле резко нарастает до амплитудного значения и направлено противоположно по отношению к первоначальному "медленному" полю. Пространственно-временная суперпозиция этих полей приводит к тому, что над листовым металлом напряжённость магнитного поля резко падает. При этом поле с обратной стороны листа остаётся практически неизменным. В течение определённого временного интервала на металл будет действовать сила притяжения,

направленная к индукторам. Принцип действия такой системы описан, например, в работе [10], однако, в ней не проведены исследования распределения напряжённости магнитного поля в рабочем зазоре. Условием для выполнения операции притяжения в рассматриваемой системе является наличие проникшего сквозь обрабатываемую листовую заготовку низкочастотного магнитного поля и отсутствие его на внутренней поверхности заготовки, обращённой к индукторам [8].

Цель работы – теоретическое исследование распределения напряжённости магнитного поля в плоской индукторной системе с двумя катушками, подключенными к двум источникам энергии при магнитно-импульсном воздействии на участок листовой металлической немагнитной заготовки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Теоретическое описание процессов проведём для конструкций, содержащих два источника магнитного поля. Схематически, система с двумя катушечными индукторами показана на рис. 1.

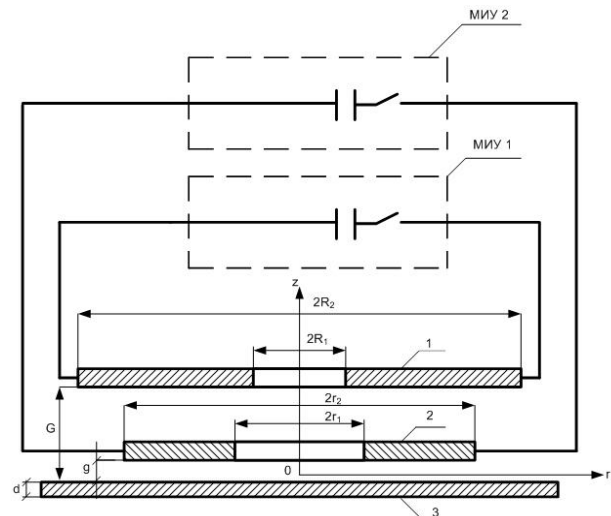


Рис. 1

На рис. 1 цифрами обозначены: 1 – индуктор, включенный в разрядную цепь низкочастотной МИУ (МИУ 1) и расположенный на расстоянии G от заготовки, 2 – индуктор, включенный в разрядную цепь высокочастотной МИУ (МИУ 2) и расположенный на расстоянии g от заготовки, 3 – листовая заготовка, толщиной d и удельной электропроводностью металла – γ . Начало цилиндрической системы координат находится на поверхности листа под центром витков индукторов, ось z перпендикулярна плоскости листа и направлена в сторону индукторов.

Расчёт электромагнитных процессов проведен в два этапа в приближении заданного тока. Предполагается, что разрядные токи МИУ, протекающие в индукторах, определяются параметрами разрядных контуров, их поверхностные плотности распределены равномерно, взаимное влияние катушек не учитывается. На первом этапе вычисляется напряжённость магнитного поля, создаваемого одной плоской катушкой, расположенной над металлическим листом. Временные характеристики процессов не конкретизируются и задаются в общем виде. Подобная задача рассматривалась в работах многих авторов [1, 5, 7, 8], но с целью исследования распределения напряжённости магнитного поля в индукторной системе с двумя плоскими катушками, подключёнными к двум источникам энергии, автору не известно.

На втором этапе, исходя из полученных результатов, необходимо записать два выражения для напряжённостей полей с заданными временными параметрами ("медленное" и "быстрое"). Суперпозиция этих полей даёт ответ на поставленный вопрос.

Для решения первого этапа поставленной задачи воспользуемся расчётной моделью, представленной на рис. 1, при условии, что источником магнитного поля является только один индуктор. Решение задачи проведено в цилиндрической системе координат, при этом приняты следующие допущения: рассматривается взаимодействие электромагнитного поля с листовым немагнитным металлом толщиной d и удельной электропроводностью γ , имеет место аксиальная симметрия относительно оси OZ в выбранной системе координат, толщина катушки пренебрежимо мала, так что её металл "прозрачен" для действующих электромагнитных полей, в катушке с равномерной намоткой (число витков – w) протекает ток $I(t)$, временные параметры которого таковы, что в расчётах можно применить условие квазистационарности происходящих электромагнитных процессов.

Уравнения Максвелла для возбуждаемых в рассматриваемой системе составляющих вектора электромагнитного поля, преобразованных по Лапласу с учётом нулевых начальных условий, имеют вид:

$$\frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\varphi(p, r, z), \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\varphi(p, r, z)) = -\mu_0 p H_z(p, r, z), \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_\varphi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 p H_r(p, r, z), \quad (3)$$

где p – параметр преобразования Лапласа; $j_\varphi(p, r, z)$ –

плотность стороннего тока в катушке; $j_\varphi(p, r, z) = j(p) \cdot (\eta \cdot (r - R_1) - \eta \cdot (r - R_2)) \cdot \delta(z - h)$ [5]; $I(p) = L\{I(t)\}$; $E_\varphi(p, r, z) = L\{E_\varphi(t, r, z)\}$, $H_{r,z}(p, r, z) = L\{H_{r,z}(t, r, z)\}$; $\eta(r)$ и $\delta(z)$ – ступенчатая и импульсная функции, соответственно [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Из дифференциальных уравнений (1) – (3) с учётом принятых допущений можно получить уравнения для азимутальной компоненты напряжённости электрического поля – $E_\varphi(p, r, z)$ в трёх областях: над листовой заготовкой, $z \geq 0$, в металле заготовки, $z \in [-d, 0]$, под листовой заготовкой, $z \leq -d$. Условие ограниченности радиального распределения $E_\varphi(p, r, z)$ при $r = 0$ и $r = \infty$ удовлетворяет интегральное преобразование Фурье-Бесселя [6].

После применения интегрального преобразования Фурье-Бесселя уравнения для азимутальной компоненты напряжённости электрического поля в трёх рассматриваемых областях приводятся к обыкновенным дифференциальным уравнениям второго порядка, решение которых подробно описаны в [3, 7]. Запишем окончательное выражение для касательной компоненты вектора напряжённости магнитного поля на поверхностях обрабатываемой плоской заготовки.

$$H(p, \lambda, z = 0) = -j(p) \cdot f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h}.$$

$$\frac{sh(qd) + \left(\frac{\lambda}{q}\right) \cdot ch(qd)}{2 \cdot \left(\frac{\lambda}{q}\right) \cdot ch(qd) + \left[1 + \left(\frac{\lambda}{q}\right)^2\right] \cdot sh(qd)}, \quad (4)$$

$$H(p, \lambda, z = -d) = H(p, \lambda, z = 0) \cdot S(q, \lambda), \quad (5)$$

где $q = \sqrt{\lambda^2 + (p\mu_0\gamma)}$; λ – параметр интегрального преобразования Фурье-Бесселя; $S(q, \lambda)$ – коэффициент экранирования поля металлической листовой заготовкой,

$$S(q, \lambda) = \frac{\left(\frac{\lambda}{q}\right)}{sh(qd) + \left(\frac{\lambda}{q}\right) \cdot ch(qd)};$$

$$f(\lambda) = \int_0^\infty (\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)) \cdot J_1(\lambda r) \cdot r \cdot dr = \frac{F(\lambda R_1) - F(\lambda R_2)}{\lambda^2}, \quad F(x) = \int_0^x x \cdot J_1(x) \cdot dx;$$

$J_1(\lambda r)$, $J_1(x)$ – функции Бесселя первого рода первого порядка.

Достоверность полученных формул (4) и (5) проверена с помощью предельных переходов к хорошо известным физическим ситуациям при $\gamma \rightarrow \infty$, $d \rightarrow 0$ [3].

Непосредственное использование формул (4) и (5) для конкретных расчётов затруднительно. Выполнение обратных преобразований Лапласа и Фурье-Бесселя в этих выражениях требует проведения достаточно сложных и громоздких математических выкладок, поэтому воспользуемся упрощениями, которые были использованы в работах [3, 7].

Для низких частот $\sim 1 \div 2$ кГц выражения (4) и (5) принимают вид:

$$H(p, \lambda, z=0) \approx -j(p) \cdot f(\lambda) \cdot \frac{e^{-\lambda G}}{2}. \quad (6)$$

$$H(p, \lambda, z=-d) \approx -j(p) \cdot f(\lambda) \cdot \frac{e^{-\lambda(d+G)}}{2}. \quad (7)$$

Для высокочастотного диапазона действующего магнитного поля с частотой $f \approx 30-40$ кГц и выше выражения (4) и (5) принимают вид:

$$H(p, \lambda, z=0) \approx -j(p) \cdot f(\lambda) \cdot e^{-\lambda g}. \quad (8)$$

$$H(p, \lambda, z=-d) \approx -j(p) \cdot f(\lambda) \cdot e^{-\lambda g} \cdot \frac{\left(\frac{\lambda}{\sqrt{\rho\mu_0\gamma}} \right)}{\text{sh}\left(\sqrt{\rho\mu_0\gamma}d\right)}. \quad (9)$$

Полученные результаты описывают пространственно-временные распределения касательной компоненты напряжённости магнитного поля на поверхностях обрабатываемого металлического листа.

Приведём их к виду, удобному для практических вычислений. Выполним обратные преобразования Фурье-Бесселя и Лапласа и введём новые обозначения.

Для низкочастотного режима, определяемого верхней катушкой, получим:

а) над листом:

$$H_1(t, r, z=0) \approx \frac{-j_1(t)}{2} \cdot \int_0^{\infty} \left[\int_{(\lambda R_1)}^{(\lambda R_2)} x \cdot J_1(x) \cdot dx \right] \times \frac{e^{-\lambda G}}{\lambda} \cdot J_1(\lambda r) \cdot d\lambda, \quad (10)$$

б) под листом:

$$H_1(t, r, z=-d) \approx \frac{-j_1(t)}{2} \cdot \int_0^{\infty} \left[\int_{(\lambda R_1)}^{(\lambda R_2)} x \cdot J_1(x) \cdot dx \right] \times \frac{e^{-\lambda(G+d)}}{\lambda} \cdot J_1(\lambda r) \cdot d\lambda, \quad (11)$$

где $j_1(t)$ – поверхностная плотность тока в катушке [8],

$$j_1(t) = \frac{I_1(t) \cdot w_1}{(R_2 - R_1)} \quad [5], \quad I_1(t) \text{ и } w_1 \text{ – ток и число витков в катушке, соответственно.}$$

Для высокочастотного режима, определяемого нижней катушкой, получим:

а) над листом:

$$H_2(t, r, z=0) \approx -j_2(t) \cdot \int_0^{\infty} \left[\int_{\lambda r_1}^{\lambda r_2} x \cdot J_1(x) \cdot dx \right] \times \frac{e^{-\lambda g}}{\lambda} \cdot J_1(\lambda r) \cdot d\lambda, \quad (12)$$

б) под листом:

$$H_2(t, r, z=-d) \approx \frac{-\int_0^t j_2(\tau) \cdot d\tau}{(\mu_0 \gamma d)} \cdot \int_0^{\infty} \left[\int_{(\lambda r_1)}^{(\lambda r_2)} x \cdot J_1(x) \cdot dx \right] \times e^{-\lambda g} \cdot J_1(\lambda r) \cdot d\lambda, \quad (13)$$

где $j_2(t)$ – поверхностная плотность тока в катушке [8],

$$j_2(t) = \frac{I_2(t) \cdot w_2}{(r_2 - r_1)} \quad [5], \quad I_2(t) \text{ и } w_2 \text{ – ток и число витков в катушке, соответственно.}$$

Переход в пространство оригиналов от изображения по Лапласу в выражении (13) совершён при дополнительном математическом упрощении. Гиперболический синус в знаменателе дроби (9) заменён первым слагаемым его разложения в окрестности нуля. Физически, эта операция адекватна усилению интенсивности диффузионных процессов сквозь металл обрабатываемого листа (практически – это либо уменьшение его толщины, либо уменьшение частоты действующего поля). Таким образом, полученный результат (13) даёт несколько завышенную амплитуду напряжённости проникшего поля. Однако, этот факт играет положительную роль в оценке параметров происходящих электромагнитных процессов. Их значения получаются с некоторым "запасом", что крайне важно для практических рекомендаций по конструктивному исполнению рассматриваемой индукторной системы.

Результирующие магнитные поля в системе находятся суперпозицией соответствующих решений. Формулы (10) – (13) представляют собой полное решение поставленной задачи о расчёте электромагнитных процессов в индукторной системе для "вытягивания" участка металлического листа магнитным полем, возбуждаемым низкочастотным и высокочастотным источниками.

В качестве примера, рассмотрим применение полученных результатов для расчёта распределения напряжённости магнитного поля в индукторной системе, эскиз которой представлен на рис. 1.

Геометрия индукторной системы следующая: источник низкочастотного поля – $R_1 = 0,01$ м, $R_2 = 0,05$ м, $G = 0,01$ м; источник, создающий высокочастотное поле: $r_1 = 0,025$ м, $r_2 = 0,035$ м, $g = G/2 = 0,005$ м; обрабатывается стальной лист толщиной $d = 0,0008$ м, удельная электропроводность которого равна $0,6 \cdot 10^7$ 1/Ом·м. Временные зависимости токов, протекающих в обмотках первого и второго источников, функционально одинаковы и представляют собой экспоненциально затухающие синусоиды, то есть $j_{1,2}(t) = j_{1,2}^{\max} \cdot e^{-\delta_{1,2} t} \cdot \sin(\omega_{1,2} t)$, $j_{1,2}^{\max}$ – амплитудные значения поверхностных плотностей токов, $\delta_{1,2}$ – декременты затухания, $\omega_{1,2} = 2\pi \cdot f_{1,2}$, $f_{1,2}$ – рабочие частоты; относительные декременты одинаковы и равны 0,2, рабочая частота низкочастотного источника поля – $f_1 = 2$ кГц, рабочая частота высокочастотного источника поля – $f_2 = 40$ кГц.

Найдём распределение касательной составляющей напряжённости магнитного поля на поверхностях обрабатываемого металлического листа, пространственную область заготовки, в которой на внутренней поверхности, обращённой к индукторам, эта компонента напряжённости магнитного поля практически равна нулю, временной характер взаимодействия возбуждаемых полей.

Вычислим в отдельности напряжённости магнитных полей, возбуждаемых каждым из источников. На рис.2 приведено распределение амплитудных значений касательной компоненты напряжённости магнит-

ного поля, создаваемого низкочастотным источником (пунктирная линия) и высокочастотным источником (сплошная линия) на внутренней (2) и внешней (3) поверхностях металлического листа (внутренней поверхностью листа будем считать поверхность, обращённую к индукторам). Кривая – 1 соответствует распределению поля по поверхности индуктора.

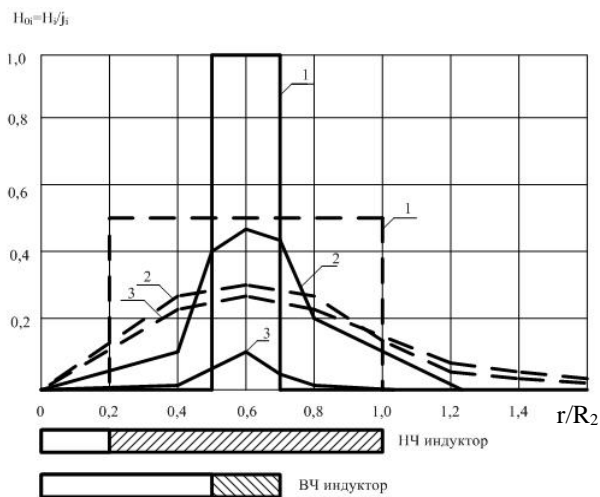


Рис. 2

Как видно из результатов расчёта, представленных на рис. 2, максимально возможная напряжённость низкочастотного магнитного поля может составлять не более 50 % от поверхностной плотности тока в катушке. Этот факт объясняется тем, что в данном режиме наличие заготовки практически не влияет на электромагнитные процессы (она "ведёт" себя как диэлектрик), и, как следует из закона полного тока, с каждой стороны катушки возбуждается поле с половинной амплитудой (от максимально возможной в случае, когда заготовка – идеальный проводник). Количественно, на внутренней и внешней поверхностях заготовки напряжённости практически одинаковы и составляют около $\sim 0,3j_1$ (рис. 2 пунктирные кривые – 2 и 3). Таким образом, для компенсации поля над заготовкой необходимо возбуждение противоположно направленного высокочастотного поля с амплитудой $H_{m2} \approx -0,3j_1$. Если учесть, что на внутренней поверхности заготовки напряжённость высокочастотного поля составляет $\sim 0,48j_2$ (рис. 2, сплошная кривая – 2), то соотношение поверхностных плотностей токов в индукторах должно составлять $\sim j_2/j_1 \approx 0,625$. Это соотношение позволяет выбрать токовые режимы источников в рассматриваемой индукторной системе.

Высокочастотное поле также проникает сквозь листовую заготовку (рис. 2, сплошная кривая 3) и его напряжённость определяет амплитуду результирующего поля в результате суперпозиции с низкочастотным полем.

Распределение касательных составляющих напряжённостей магнитных полей с разными временными параметрами в отдельности и результат их суперпозиции на внутренней и внешней поверхностях листовой заготовки приведено на рис. 3.

На рис. 3 цифрами обозначены пространственное распределение касательной составляющей напряжённости низкочастотного – 1, высокочастотного – 3 и результирующего поля – 2 на внешней поверхности обрабатываемой листовой заготовки, а также распределение результирующей касательной компоненты напряжённости магнитного поля на внутренней стороне листа – 4. Пространственная область над заготовкой, где должна иметь место практически нулевая напряжённость магнитного поля, приблизительно равна ширине высокочастотного индуктора и расположена под ним.

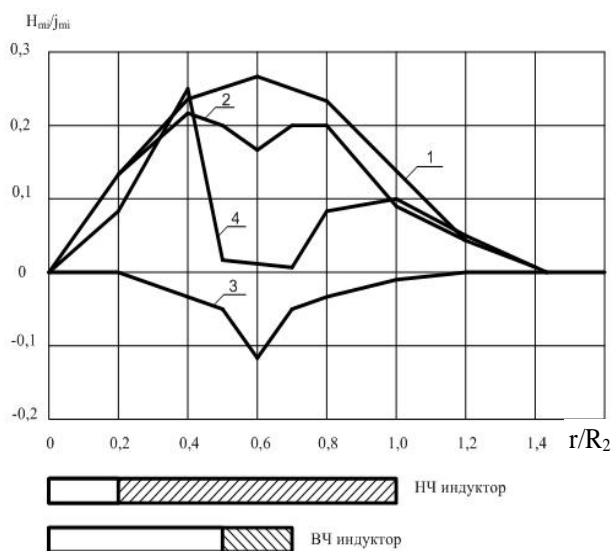


Рис. 3

На внешней поверхности заготовки, пространственная область с максимальной напряжённостью магнитного поля расположена также под высокочастотным индуктором. Её амплитуда составляет около 20% от поверхностной плотности тока в низкочастотной катушке, то есть $\sim 0,2j_1$. Данный результат позволяет практически оценить возможные амплитуды сил магнитного давления, действующие на обрабатываемую листовую заготовку.

ВЫВОДЫ

1. В рассмотренной индукторной системе напряжённость магнитного поля под обрабатываемой листовой заготовкой составляет $\sim 20\%$ от амплитудного значения поверхностной плотности тока в обмотке низкочастотного индуктора.

2. Пространственная область листовой заготовки, в которой выполняется условие, необходимое для проведения технологической операции притяжения, при разряде двух МИУ с разными частотными характеристиками разрядных токов, соответствует кольцу с размерами высокочастотного индуктора и расположена под ним.

3. Получено соотношение для определения величин поверхностных плотностей токов в индукторах из условия компенсации низкочастотного магнитного поля над заготовкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю. Силы, действующие на тонкостенный немагнитный проводник, в проникающем поле плоского одновиткового соленоида // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – № 1. – С. 9-14.
2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Бондаренко А.Ю. Инструмент для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 11(47). – С. 44-51.
3. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. 2-е изд., перераб. и доп. – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.
4. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с.
5. Дзенитис О.Я., Бандер З.И. Расчёт распределения поля плоской катушки вблизи полубесконечной проводящей среды с учётом переходного процесса // *Изв. АН Латв. ССР. Сер. физ. и техн. наук*. – 1971. – № 6. – С. 78-87.
6. Мэтьюз Дж., Уокер Р. Математические методы физики. – М.: Атомиздат, 1972. – 392 с.
7. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т.3: Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
8. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверх сильных токов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 416 с.
9. Щеглов Б.А., Есин А.А. Раздача тонкостенных трубчатых заготовок силами притяжения импульсного магнитного поля // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1971. – №4. – С. 15-18.
10. Патент 4061007 USA, МПК В21Д26/14. Electromagnetic dent remover with electromagnetic localized work coil / Karl A. Hansen, I. Glen Hendrickson (USA). – №646068, Filed 02.01.1976, Published 06.12.1977.– 10 p.

Bibliography (transliterated): 1. Batygin Yu.V., Bondarenko A.Yu. Sily, dejstvuyushchie na tonkostennyj nemagnitnyj provodnik, v pronikayushchem pole ploskogo odnovitkovogo solenoida // *Tekhnichna elektrodinamika*. - 2010. - № 1. - S. 9-14. 2. Batygin Yu.V., Lavinskij V.I., Bondarenko A.Yu. Instrument dlya magnitno-impul'snogo prityazheniya listovyh zagotovok // *Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*. - 2007. - № 11(47). - S. 44-51. 3. Batygin Yu.V., Lavinskij V.I., Himenko L.T. Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnyh

tehnologij. 2-e izd., pererab. i dop.-Har'kov: MOST-Tornado, 2003.-288 s. 4. Belyj I.V., Fertik S.M., Himenko L.T. Spravochnik po magnitno-impul'snoj obrabotke metallov. - Har'kov: Vischa shkola, 1977. - 168 s. 5. Dzenitis O.Ya., Bander Z.I. Raschet raspredeleniya polya ploskoj katushki vblizi polubeskonechnoj provodyaschej sredy s uchetom perehodnogo processa // *Izv. AN Latv. SSR. Ser. fiz. i tehn. nauk*. - 1971. - № 6. - S. 78-87. 6. M'et'yuz Dzh., Uoker R. Matematicheskie metody fiziki. - M.: Atomizdat, 1972. - 392 s. 7. Turenko A.N., Batygin Yu.V., Gnatov A.V. Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnyh tehnologij. T.3: Teoriya i `eksperiment prityazheniya tonkostennyh metallov impul'snymi magnitnymi polyami. - Har'kov: HNADU, 2009. - 240 s. 8. Shneerson G.A. Polya i perehodnye processy v apparature sverh sil'nyh tokov. 2-e izd., pererab. i dop. - M.: `Energoatomizdat, 1992. - 416 s. 9. Scheglov B.A., Esin A.A. Razdacha tonkostennyh trubchatyh zagotovok silami prityazheniya impul'snogo magnitnogo polya // *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. -1971. - №4. - S. 15-18. 10. Patent 4061007 USA, MPK V21D26/14. Electromagnetic dent remover with electromagnetic localized work coil / Karl A. Hansen, I. Glen Hendrickson (USA). - №646068, Filed 02.01.1976, Published 06.12.1977.- 10 p.

Поступила 15.11.2011

*Бондаренко Александр Юрьевич к.т.н., с.н.с, доц.
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Инженерная электрофизика"
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
тел. (057) 7076245, e-mail: baiu@kpi.kharkov.ua*

Bondarenko A.Yu.

Electromagnetic processes in a flat inductor system with two coils under uniform surface currents distribution in the coils.

An analysis of magnetic field intensity tangent component distribution from the both sides of a flat metal nonmagnetic sheet is carried out, one side of the sheet exposed to magnetic fields of two flat co-axial inductors. The inductors are connected to discharge circuits of two magnetic pulse plants. The frequency of the first plant discharge current is about dozens of kilohertz, while that of the other plant discharge current is a few kilohertz. The inductor currents are mutually opposite. The workpiece zone with the tangent component of magnetic field intensity practically equal to zero and the ratio of the inductor current surface densities to meet this condition are specified.

Key words – magnetic pulse treatment of metals, magnetic pulse plant, flat inductor, magnetic field strength.