

ИНДУКЦИОННАЯ ИНДУКТОРНАЯ СИСТЕМА С КРУГОВЫМ ВИТКОМ С РАЗРЕЗОМ МЕЖДУ ДВУМЯ ТОНКОСТЕННЫМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЛИСТАМИ

В статті проведено дослідження електродинамічних процесів в системі з "незамкнутим одновитковим циліндричним витком" і двома паралельними плоскими тонкостінними провідниками, розташованими симетрично по обидві сторони витка. По отриманим аналітичним залежностям проведені числові оцінки і побудовані об'ємні епюри амплітудно-просторового розподілу густини індукованого струму і сил притягання, що збуджуються полем витка, з "розривами" різної величини.

В статье проведено исследование электродинамических процессов в системе с "незамкнутым" одновитковым цилиндрическим витком и двумя параллельными плоскими тонкостенными проводниками, расположенными симметрично по обе стороны витка. По полученным аналитическим зависимостям проведены численные оценки и построены объёмные эпюры амплитудно-пространственного распределения плотности индуцированного тока и сил притяжения, возбуждаемых полем витка, с "разрывами" различной величины.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы. Разработки разного рода технических систем для выравнивания заданных участков на поверхности тонкостенных листовых металлов инициированы, в основном, спросом на производственные операции по реставрации корпусов самолётов и кузовов автомобилей [1].

В первом случае необходимость такой операции обусловлена нарушением аэродинамических характеристик летательного аппарата, вплоть до потери устойчивости в полёте, во втором, не только эстетическими соображениями, но зачастую и просто невозможностью дальнейшей эксплуатации транспортного средства с повреждённым кузовом. В этой связи особый интерес представляют устройства, позволяющие производить реставрацию повреждений (вмятин) на поверхности с внешней стороны без разборки корпуса или кузова и, по возможности, без нарушения существующего защитного покрытия [2-5].

Анализ основных достижений и публикаций. Исключительно новые возможности для создания устройств по внешнему устранению вмятин в кузовах легковых автомобилей открыло явление, экспериментально обнаруженное в 2004 г. профессорами Национального Технического Университета "Харьковский политехнический институт" Батыгиным Ю.В., Лавинским В.И., Хименко Л.Т. [6]. Его суть состоит в том, что при частотах действующих полей ниже ~ 2 кГц имело место притяжение с образованием вмятины тонкой стальной пластины к рабочей поверхности индуктора-инструмента. При увеличении частоты до ~ 7 кГц и выше образец отталкивался с образованием выпуклости согласно традиционным представлениям о процессах при магнитно-импульсной обработке металлов.

Обнаруженное явление на основании феноменологических соображений и понимания происходящих процессов на уровне того времени позволило запатентовать "Способ магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов" [7], отличающийся от известных аналогов тем, что для притяжения заготовки к индуктору при использовании одного источника импульс-

ного поля частота действующего поля выбирается из условия низкочастотности [1, 5, 6]. Авторами работы [8] сформулированы физические основы перспективных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов и запатентовано другое решение по магнитно-импульсному притяжению, принцип действия которого основан на силовом взаимодействии проводников с одинаково направленными токами (закон Ампера) [9].

В дальнейшем, запатентованный в [9] "Способ магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов", как первое предложение подобного рода, лёг в основу создания "индукционных индукторных систем" (авторское название), различного конструктивного исполнения [10, 11].

Одним из наиболее важных вопросов при выборе определенной конструкции индукционной индукторной системы, является исследование в ней электродинамических процессов. Т.к. их характер и протекание в соответствии с конструктивными особенностями – определяют эффективность и работоспособность системы в целом.

Цель работы – исследование электродинамических процессов в системе с "незамкнутым" одновитковым цилиндрическим витком и двумя параллельными плоскими тонкостенными проводниками, расположенными симметрично по обе стороны витка.

РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Расчётная модель рассматриваемой системы приведена на рис. 1, где цилиндрический виток с разрезом для подключения к источнику мощности помещён между двумя тонкостенными листовыми металлами параллельно друг другу.

Постановка задачи.

1. Бесконечно протяжённые в поперечных направлениях идентичные листы толщиной – d выполнены из немагнитного металла с удельной электропроводностью – γ .

2. Виток индуктора расположен между листами на одинаковом расстоянии h до каждого из них, радиус витка – R , поперечные размеры настолько малы, что математически, расположение возбуждающего тока индуктора можно описать произведением дельта-функций Дирака $\sim \delta(z-h) \cdot \delta(r-R)$.

3. В местах соединения витка (соответствующие токопроводы перпендикулярны к его плоскости) и источника мощности имеет место "разрыв" по азимуту, описываемый функцией

$$f(\varphi) = \eta(\varphi - \varphi_0) - \eta(\varphi - (2\pi - \varphi_0)), \quad (1)$$

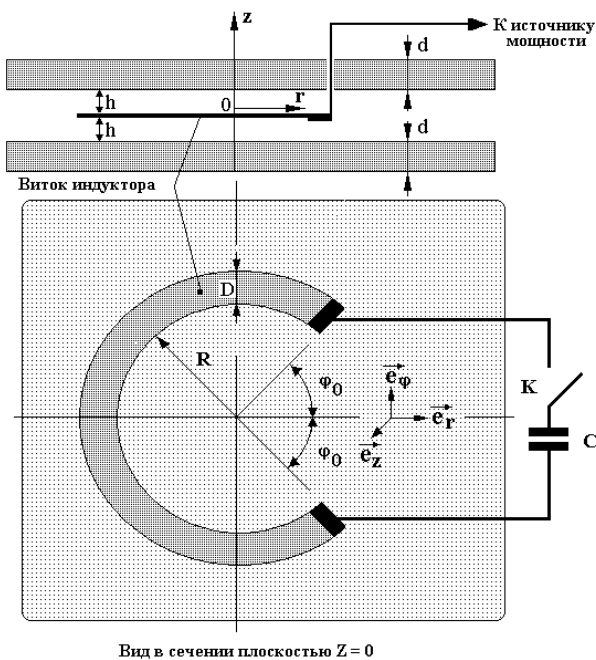
где $\eta(\varphi)$ – ступенчатая функция Хевисайда, $2\varphi_0$ – величина "разрыва" в витке, выраженная в терминах азимутального угла.

4. По витку протекает азимутальный ток с плотностью $-j_{\varphi i}(\rho, r, \varphi, z)$,

$$j_{\varphi i}(t, r, \varphi, z) = j(t) \cdot \delta(r-R) \cdot \delta(z-h) \cdot f(\varphi), \quad (2)$$

где $j(t)$ – амплитудно-временная зависимость, t – время.

5. Временные характеристики возбуждающего тока таковы, что $\omega \cdot \tau \ll 1$, где ω – характерная циклическая частота сигнала, $\tau = \mu_0 \gamma \cdot d^2$ – характерное время диффузии в металлический лист [1, 5-7].



Вид в сечении плоскостью $Z = 0$

Рис. 1 "Незамкнутый" виток между тонкостенными металлами

Необходимо подчеркнуть, что допущение о форме возбуждающего тока с азимутальным разрывом первого рода исключает лишь влияние токоподводов к витку и не противоречит требованию непрерывности линий возбуждающего тока.

Первое. Токоподводы в практике магнитно-импульсной обработки металлов, как правило, перпендикулярны к его плоскости.

В таком конструктивном исполнении их влиянием на протекающие электромагнитные процессы действительно можно пренебречь.

Второе. Принимаемые в дальнейшем модели расчёта предполагают замкнутость линий возбуждающего тока в элементах разрядного контура, частью которого является и собственно виток, а не в пространстве между местами его подсоединения к источнику за счёт априори пренебрежимо малых токов смещения.

Согласно принятым допущениям в системе возбуждается электромагнитное поле с векторами напряжённости $\mathbf{E} = \{E_r \neq 0, E_\varphi \neq 0, E_z \neq 0\}$ и $\mathbf{H} = \{H_r \neq 0, H_\varphi \neq 0, H_z \neq 0\}$.

Не останавливаясь на математических операциях по интегрированию уравнений Максвелла, проделанных в [12], запишем аналитическую пространственно-временную зависимость для линейной плотности азимутальной составляющей тока, индуцированного низкочастотным магнитным полем "разомкнутого" витка индуктора в каждом из тонкостенных листовых металлов, полученную в [12].

$$J_\varphi^{(2)}(t, r, \varphi) = -\frac{\tau \cdot R}{(8d^2)} \cdot \frac{dj(t)}{dt} \times \int_0^\infty \sum_{n=0}^\infty F_n(\varphi_0) \cdot [J_{n+1}(\lambda R) - J_{n-1}(\lambda R)] \times [J_{n+1}(\lambda r) - J_{n-1}(\lambda r)] \cdot e^{-\lambda h} \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} \cos(n\varphi) d\lambda, \quad (3)$$

где

$$F_n(\varphi_0) = \begin{cases} \left(-\frac{2 \cdot \sin(n \cdot \varphi_0)}{\pi \cdot n} \right), & n \neq 0, \\ \left(1 - \frac{\varphi_0}{\pi} \right), & n = 0. \end{cases}$$

$J_n(\lambda \cdot r)$ – функция Бесселя n -ого порядка, λ – параметр преобразования.

Проведенное решение и формула (3) позволяет получить некоторое представление о пространственно-временном распределении возбуждаемых сил притяжения между проводниками с индуцированными токами (закон Ампера) с учётом влияния разреза в витке, то есть, нарушения аксиальной симметрии системы, на силовые процессы в индукционной индукторной системе.

Уточним, в данном случае речь идёт не о силах взаимодействия, вычисленных строго по закону Ампера, а о качественном представлении их распределения по пропорциональности квадрату индуцированных токов.

Отметим, что силы отталкивания здесь также имеют место, но, как было показано ранее в многочисленных авторских работах, их интегральное действие во времени будет стремиться к нулю [1, 5, 13, 14].

Итак, сила взаимного притяжения вспомогательного тонкостенного экрана и листовой заготовки в индукционных индукторных системах, соответствующих математической модели рис.1, нормированная на амплитудный множитель, соответствующий произвольному контуру протекания тока с радиусом $-r$, будет описываться следующей зависимостью

$$F_{attr}(r, \varphi) \sim \left[\int_0^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} F_n(\varphi_0) \cdot [J_{n+1}(\lambda R) - J_{n-1}(\lambda R)] \times \right. \\ \left. \times [J_{n+1}(\lambda r) - J_{n-1}(\lambda r)] \cdot e^{-\lambda h} \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} \cos(n\varphi) d\lambda \right]^2 \quad (4)$$

Примечание. Амплитудный множитель определяется

$$F_{\max attr} = \left(\frac{\mu_0 J_m^2}{2} \right) \cdot \frac{r}{h}$$

Результаты вычислений по формуле (4) приведены на рис. 2. Для сравнения на рис. 3 даны картины пространственного распределения возбуждаемых вихревых токов, взаимодействие которых инициирует силы притяжения.

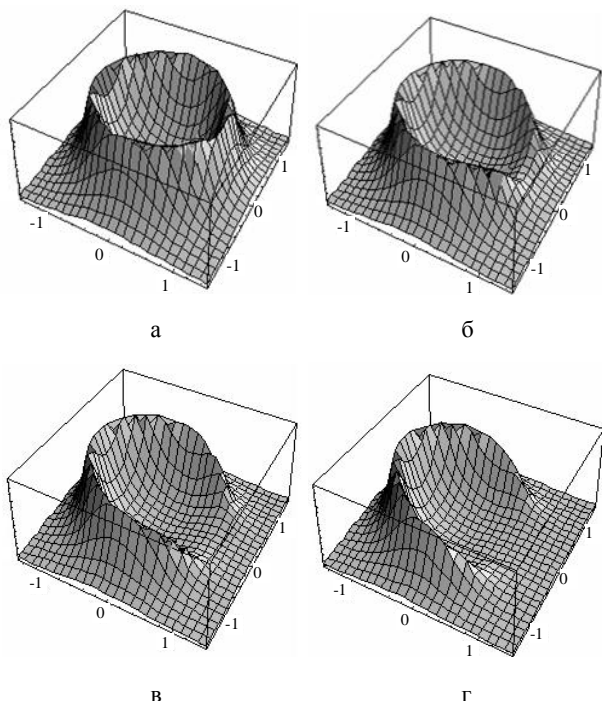


Рис. 2. Объёмные эпюры амплитудно-пространственного распределения сил притяжения, возбуждаемых полем витка, с "разрывами" различной величины
а) $\Theta=0.01$, б) $\Theta=0.1$, в) $\Theta=0.2$, г) $\Theta=0.3$

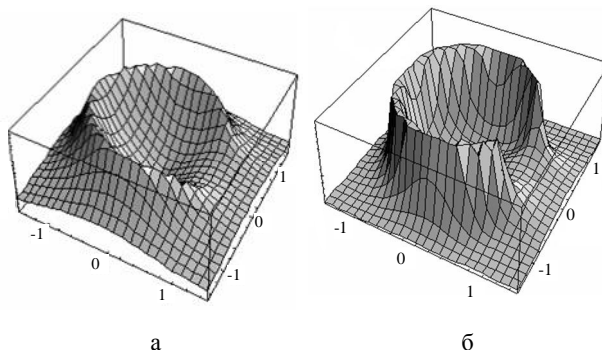


Рис. 3. Объёмные эпюры амплитудно-пространственного распределения модуля плотности тока, индуцированного витком с "разрывом", $\Theta=0.2$, а) в металле тонкостенного листа, б) на поверхности идеального проводника

ВЫВОДЫ

Выполненные оценки показали, что:

- наличие разреза в витке – источнике магнитного поля в индукционной индукторной системе приводит к искажению аксиальной симметрии в распределении возбуждаемых сил притяжения, эффект имеет место уже при величине разреза в 1% от длины окружности витка (рис. 2,а);
- увеличение разреза, зачастую необходимое по конструктивным соображениям, существенно искажает картину распределения действующих сил, и, как видно из эпюр на рис.2,б-г "провалы" в распределениях при величинах разрезов 10÷30 % растут в квадратичной зависимости;
- последнее замечание подтверждается сравнением эпюры для силы на рис. 2,в и эпюры распределений индуцированного тока на рис. 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнатов А.В. Прогрессивные технологии. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография / А.В. Гнатов, Ю.В. Батыгин, А.Н. Туренко. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 238 с.
2. Гнатов А.В. Безконтактне магнітно-імпульсне рихтування автомобільних кузовів. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції ["Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій"]. (Тернопіль, 19-21 травня 2010 р.). – Тернопіль: Вісник ТДТУ, 2010. – Т. 15. – № 2. – С. 164-171.
3. Эксперименты по магнитно-импульсному притяжению тонкостенных листовых металлов в автомобилестроении: 1-международной Интернет-конференции: ["Мехатроника транспортных средств и технологических машин"] (с 1.09.2010 г. по 30.11.2010 г.) Сборник статей 1-й международной Интернет-конференции / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов. – Губкинский институт (филиал) ГОУ ВПО "Московский государственный открытый университет" <http://gubkin.msu.ru>. Мехатроника транспортных средств и технологических машин, 2010. – С. 77-86.
4. Прогрессивные магнитно-импульсные технологии на транспорте. Третя Міжнародна науково-практична конференція ["Сучасні інформаційні технології на транспорті" MINTT-2011]. У 2-х тт. Том 2. (Херсон, Україна 23-25 травня 2011 р.) / А.В. Гнатов. – Херсон: Херсонський державний морський інститут, 2011. – С. 232-239.
5. Прогресивні технології в автотранспортних засобах / Ч. II: Фізичні основи магнітно-імпульсних технологій безконтактного рихтування кузовних елементів автомобіля: навчальний посібник / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, І.С. Трунова, Є.А. Чаплигін. – Харків: ХНАДУ, 2011. – 176 с.
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. Пат. 75676 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батыгин Ю.В., Лавінський В.І., Хименко Л.Т.; заявитель и патентообладатель ХПИ. – №2004010512; заявл.23.01.04; опубл. 15.05.06, Бюл. №5.
8. Батыгин Ю.В. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, Л.Т. Хименко // Елек-

тротехніка і електромеханіка. – 2004. – № 2. – С. 80-84.

9. Пат. 74909 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю.В., Лавінський В.І., Хавін В.Л.; заявитель і патентобладатель ХПІ. – №2004010542; заявл. 26.01.04; опубл. 15.02.06, Бюл. №2.

10. Пат. 31751 України, В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготовок методом притягання до індуктора / Батигін Ю.В., Бондаренко О.Ю., Чаплигін Є.О.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u200712252; заявл. 05.11.2007; опубл. 25.04.08, Бюл. №8.

11. Пат. 31752 України, В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки металевих заготовок / Батигін Ю.В., Бондаренко А.Ю., Сериков Г.С.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u200712252; заявл. 05.11.2007; опубл. 25.04.08, Бюл. №8.

12. Батигін Ю.В. Электромагнитные процессы в индукционной индукторной системе с круговым витком с разрезом между двумя тонкостенными металлическими листами / Ю.В. Батигин, А.В. Гнатов, Е.А. Чаплыгин, Д.О. Смирнов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2012. – № 3. – С. 51-55.

13. Батигін Ю.В. Расчет электродинамических усилий в индукционной индукторной системе с неферромагнитными массивным экраном и листовой заготовкой / Ю.В. Батигин, А.В. Гнатов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2009. – № 4. – С. 56-59.

14. Батигін Ю.В. Расчет электродинамических усилий в индукционной индукторной системе с неферромагнитным массивным экраном и ферромагнитной листовой заготовкой / Ю.В. Батигин, А.В. Гнатов, С.А. Драченко, Т.В. Гаврилова // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2010. – № 6. – С. 60-63.

Bibliography (transliterated):

1. Gnatov A.V. Progressivnyye tehnologii. Teoriya i `eksperiment prityazheniya tonkostennykh metallov impul'snymi magnitnymi polyami: monografiya / A.V. Gnatov, Yu.V. Batygin, A.N. Turenko. - LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. - 238 s. 2. Gnatov A.V. Bezkontaktnye magnitno-impul'snye rihtuvannya avtomobil'nykh kuzoviv. Materiali mizhnarodnoyi naukovoye-tehnichnoyi konferencii ["Fundamental'ni ta prikladni problemi suchasnykh tehnologij"]. (Temopil', 19-21 travnya 2010 r.). - Temopil': Visnik TDTU, 2010. - T. 15. - № 2. - S. 164-171. 3. `Eksperimenty po magnitno-impul'snomu prityazheniyu tonkostennykh listovykh metallov v avtomobilstroenii: 1-mezhdunarodnoyi Internet-konferencii: ["Mehatronika transportnykh sredstv i tehnologicheskikh mashin"] (s 1.09.2010 g. po 30.11.2010 g.) Sbornik statej 1-j mezhdunarodnoyi Internet-konferencii / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov. - Gubkinskij institut (filial) GOU VPO "Moskovskij gosudarstvennyj otkrytyj universitet" <http://gubkin.msu.ru>. Mehatronika transportnykh sredstv i tehnologicheskikh mashin, 2010. - S. 77-86. 4. Progressivnyye magnitno-impul'snye tehnologii na transporte. Tretiya Mizhnarodna naukovoye-praktichna konferenciya ["Suchasni informacijni tehnologii na transporti" MINTT-2011]. U 2-h tt. Tom 2. (Herson, Ukraïna 23-25 travnya 2011 r.) / A.V. Gnatov. - Herson: Hersonskij derzhavnij mors'kij institut <<http://www.kmi.kherson.ua/>>, 2011. - S. 232-239. 5. Progresivni tehnologii v avtotransportnih zasobah / Ch. II: Fizichni osnovi magnitno-impul'snykh tehnologij bezkontaktnogo rihtuvannya kuzovnykh elementiv avtomobilya: navchal'nij posibnik / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, I.S. Trunova, Є.А. Chaplygin. - Harkiv: HNADU, 2011. - 176 s. 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. Pat. 75676 Ukraïna, МПК В 21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snoï obrobki tonkostinnih metallevih zagotovok / Batigin Yu.V., Lavinskij V.I., Himenko L.T.; zayavitel' i patentoobladatel' HPI. - №2004010512; zayavl.23.01.04; opubl. 15.05.06, Byul. №5. 8. Batygin Yu.V. Fizicheskie osnovy vozmozhnykh napravlenij razvitiya magnitno-impul'snoj obrabotki tonkostennykh metallov / Yu.V. Batygin, V.I. Lavinskij, L.T. Himenko // *Elektrotehnika i elektromehaniika*. - 2004. - № 2. - S. 80-84. 9. Pat. 74909 Ukraïna, МПК В 21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snoï obrobki tonkostinnih metallevih zagotovok / Batigin Yu.V., Lavinskij V.I., Havin V.L.; zayavitel' i patentoobladatel' HPI. - №2004010542; zayavl. 26.01.04; opubl. 15.02.06, Byul. №2. 10. Pat. 31751 Ukraïni, V 21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snoï obrobki metallevih zagotivok metodom prityagannya do induktora / Batigin Yu.V., Bondarenko O.Yu., Chaplygin Є.O.; zayavnik ta patentovlasnik Harkivsk'ij nac. avtom.-dorozhn. un-t. - № u200712252; zayavl. 05.11.2007; opubl. 25.04.08, Byul. №8. 11. Pat. 31752 Ukraïni, V 21 D 26/14. Sposib magnitno-impul'snoï obrobki metallevih zagotivok / Batygin Yu.V., Bondarenko A.Yu., Serikov G.S.; zayavnik ta patentovlasnik Harkivsk'ij nac. avtom.-dorozhn. un-t. - № u200712252; zayavl. 05.11.2007; opubl. 25.04.08, Byul. №8. 12. Batygin Yu.V. `Elektromagnitnye processy v indukcionnoj induktornoj sisteme s krugovym vitkom s razrezom mezhdu dvumya tonkostennymi metallicheskimi listami / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, E.A. Chaplygin, D.O. Smirnov // *Elektrotehnika i elektromehaniika*. - 2012. - № 3. - S. 51-55. 13. Batygin Yu.V. Raschet `elektrodinamicheskikh usilij v indukcionnoj induktornoj sisteme s neferromagnitnymi massivnym `ekranom i listovoj zagotovkoj / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov // *Elektrotehnika i elektromehaniika*. - 2009. - № 4. - S. 56-59. 14. Batygin Yu.V. Raschet `elektrodinamicheskikh usilij v indukcionnoj induktornoj sisteme s neferromagnitnym massivnym `ekranom i ferromagnitnoj listovoj zagotovkoj / Yu.V. Batygin, A.V. Gnatov, S.A. Drachenko, T.V. Gavrilova // *Elektrotehnika i elektromehaniika*. - 2010. - №6. - S. 60-63.

Поступила 06.04.2012

Гнатов Андрей Викторович, к.т.н., доц.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
кафедра автомобильной электроники
61002, Харьков, ул. Петровского 25
тел. (057) 7003852, e-mail: kalifus@yandex.ru

Gnatov A.V.

An induction inductor system with a circular turn with a cut between two thin-walled sheet metals.

Research on electrodynamic processes in a system with an open cylindrical single-turn coil and two parallel flat thin-walled conductors placed symmetrically on the both sides of the coil has been carried out in this article. On the basis of obtained analytical relations, numerical evaluations have been made and three-dimensional amplitude-space distribution diagrams of induced current density and attraction force generated by the coil field have been plotted for various-size discontinuity.

Key words – magnetic pulse metal working, induction inductor system, electrodynamic processes, 3D distribution diagrams, research.