

Е.А. Чаплыгин, М.В. Барбашова, А.Ю. Коваль

ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ С ПРИТЯГИВАЮЩИМ ЭКРАНОМ И ПЛОСКИМ ПРЯМОУГОЛЬНЫМ СОЛЕНОИДОМ

Проведено чисельні оцінки та аналіз отриманих результатів для струмів і сил в досліджуваній індукторній системі з притягуючим екраном і прямокутним соленоїдом. Виявлено, що при зменшенні глибини вм'ятини в металі, амплітуда, збуджуваних електродинамічних зусиль, зростає. Аналіз показав, що значення сил відштовхування, інтегральне в часі, нижче сил притягання, що розвиваються. При досить низьких робочих частотах діючих полів, розглянута система працює, як інструмент магнітно-імпульсного притягання тонкостінних листових металів. Бібл. 8, рис. 7.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка, індукторна система, притягуючий екран, прямокутний соленоїд, електродинамічні процеси.

Проведены численные оценки и анализ полученных результатов для токов и сил в исследуемой индукторной системе с притягивающим экраном и прямоугольным соленоидом. Выявлено, что при уменьшении глубины вмятины в металле, амплитуда, возбуждаемых электродинамических усилий, растёт. Анализ показал, что значение сил отталкивания, интегральное во времени, ниже развиваемых сил притяжения. При достаточно низких рабочих частотах действующих полей, рассмотренная система работает, как инструмент магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов. Библ. 8, рис. 7.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка, индукторная система, притягивающий экран, прямоугольный соленоид, электродинамические процессы.

Введение. Развитие любой области современной промышленности ориентировано на ускоренное внедрение инноваций. Это касается и металлообрабатывающей области. Потребности общества также свидетельствуют о том, что необходимо способствовать большему развитию обрабатывающих производств. Магнитно-импульсная обработка металлов за последнее время стала достаточно распространенной в применении различных производственных операций [1, 2]. В связи с этим, актуально совершенствование систем и инструментов, которые повышают эффективность работы существующих устройств или же создание абсолютно новых для современного уровня развития МИОМ.

Анализ основных достижений и публикаций. Главной составляющей любой системы магнитно-импульсного притяжения тонкостенных металлических листов является индукторная система. Её совершенствование и является решением проблемы по увеличению эффективности инструментов магнитно-импульсной технологии. Для того чтобы получить высокую однородность возбуждаемого поля и сил в рабочей зоне инструмента МИОМ, были созданы индукторные системы с притягивающим экраном (в аббревиатуре – ИСПЭ). Принцип работы основан на взаимном притяжении проводников с одинаково направленными токами (закон Ампера) [3-6].

Цель работы – провести численные оценки электродинамических усилий в исследуемой «индукторной системе с притягивающим экраном» для определения эффективности силового притяжения.

Постановка задачи. Система ИСПЭ состоит из источника магнитного поля (плоского прямоугольного соленоида), вспомогательного проводящего экрана и объекта обработки. Поле соленоида возбуждает в экране и листовом металле однонаправленные вихревые токи Фуко. За счет жёстко зафиксированного экрана, притяжение испытывает лишь объект обработки. Силовое магнитно-импульсное воздействие приводит к вытягиванию заданного участка на его

поверхности. Рабочая зона рассматриваемой ИСПЭ – это область под ветвями параллельных токопроводов, то есть, заданный участок листового металлического объекта обработки, имеющий углубление (например, вмятину), который и подлежит деформированию (притяжению).

Исходные данные (рис. 1). Соленоид:

а) число витков в каждой ветви – $N = 10$;

б) ширина ветви – $(b - a) = 0,05$ мм;

в) ширина витка и межвитковой изоляции –

$$g = \frac{(b - a)}{2N - 1} \approx 0,0026 \text{ м};$$

г) внутреннее окно соленоида – $a = 0,025$ м;

д) ток в индукторе, генерируемый при разряде емкостного накопителя – $C = 1200$ мкФ с напряжением – $U_m \approx 2000$ В на частоте – $f = 1500$ Гц, принят равным – $J_m \approx 22620$ А (соответственно, линейная плотность возбуждающего тока – $j_m \approx 8,6 \cdot 10^6$ А/м).

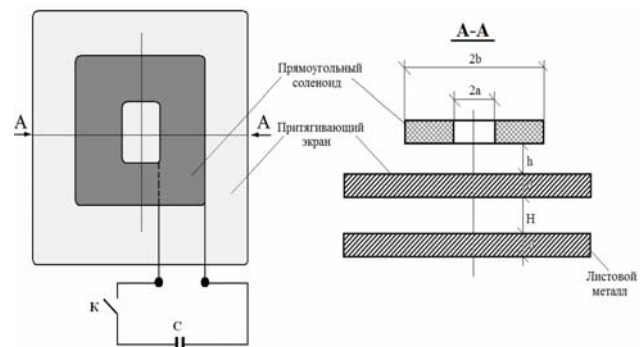


Рис. 1. Схематическое изображение ИСПЭ, C – емкость, K – коммутатор

Экран и листовой металл:

а) толщина – $d = 0,0075$ мм;

б) удельная электропроводность – $\gamma = 0,4 \cdot 10^7$ (Ом·м)⁻¹ (сталь).

Геометрия системы:

а) расстояние между рабочей поверхностью соленоида и экраном – $h = 0,0005$ м;

б) глубина вмятины – $H = 0,005$ м, ее длина – $D = 0,03$ м.

Расчётные соотношения:

а) из выражения, полученного в работе [7] получаем формулу для тока, индуцированного в экране:

$$j_e(\psi, y) = \left(\frac{J_m}{g} \right) \frac{(\mu_0 \gamma \omega d^2)}{2} \frac{dj_i(\psi)}{d\psi} \times \int_0^\infty f(x) e^{-x \frac{h}{d}} (1 - e^{-x}) \sin\left(x \frac{y}{d}\right) dx \quad (1)$$

где J_m – амплитуда тока в соленоиде, $\psi = \omega t$ фаза возбуждающего тока в импульсе, $j_i(\psi)$ – фазовая функция

тока в соленоиде, $f(x) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{x^3} \int_0^\infty f(\alpha) \cdot \sin(\alpha) d\alpha$,

$f(\alpha)$ – функция поперечного распределения возбуждающего тока

$$f(\alpha) = \begin{cases} 1, & \alpha \in \left[\frac{a}{d}, \frac{b}{d} \right], \\ 0, & \alpha \notin \left[\frac{a}{d}, \frac{b}{d} \right], \end{cases}$$

$$f(x) = \frac{2}{\pi x^3} \cdot \left[\sum_{k=1}^N \cos\left(x \cdot \left(\frac{a}{d} + 2(k-1) \frac{g}{d} \right)\right) - \cos\left(x \cdot \left(\frac{a}{d} + (2k-1) \frac{g}{d} \right)\right) \right];$$

б) из соотношения полученного в работе [7] получаем формулу для тока, индуцированного в листовом металле:

$$j_{lm}(\psi, y) = \left(\frac{J_m}{g} \right) \frac{(\omega \mu_0 \gamma d^2)}{2} \frac{dj_i(\psi)}{d\psi} \times \int_0^\infty f(x) e^{-x \frac{(h+d+H)}{d}} (1 - e^{-x}) \sin\left(x \frac{y}{d}\right) dx \quad (2)$$

в) из соотношения работе [7] находим распределённую силу притяжения (сила Ампера),

$$F_{attr}(\psi, y) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot j_e(\psi, y) \cdot j_{lm}(\psi, y) \cdot \frac{D}{H} \quad (3)$$

где D – размер (длина), H – глубина вмятины, $j_{e,lm}(\psi, y)$ – плотность тока, индуцированного в экране и листовом металле, соответственно формулам (1, 2);

г) сила отталкивания (сила Лоренца!), действующая на листовый металл, определяется из выражения работы [7]:

$$F_{rep}(\psi, y) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot j_i(\psi, y) \cdot j_{lm}(\psi, y) \cdot \frac{D}{(h+d+H)} \quad (4)$$

где $j_i(\psi, y)$ – плотность тока в соленоиде,

$$j_i(\psi, y) = \begin{cases} \left(\frac{J_m}{g} \right) \cdot j_i(\psi), & \text{при } |y| \in [a, b], \\ 0, & \text{при } |y| \notin [a, b], \end{cases}$$

$j_i(\psi)$ – фазовая зависимость тока в соленоиде, $j_{lm}(\psi, y)$ – плотность тока, индуцированного в листовом металле, соответственно формуле (2);

д) амплитудное по фазе значение силы притяжения

$$F_{attr}^{max}(y) = F_{attr}(\psi, y) \Big|_{\psi=\psi_{max}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot j_e(\psi, y) \Big|_{\psi=\psi_{max}} \cdot j_{lm}(\psi, y) \Big|_{\psi=\psi_{max}} \cdot \frac{D}{H} \quad (5)$$

е) фазовая зависимость силы притяжения, усреднённой в поперечном измерении на интервале $y \in [-b, b]$

$$\bar{F}_{attr}(\psi) = \frac{1}{2b} \int_{-b}^b F_{attr}(\psi, y) dy \quad (6)$$

ж) амплитудное значение силы отталкивания

$$F_{rep}^{max}(y) = F_{rep}(\psi, y) \Big|_{\psi=\psi_{max}} = \frac{\mu_0}{2\pi} j_i(\psi, y) j_{lm}(\psi, y) \Big|_{\psi=\psi_{max}} \frac{D}{(h+d+H)} \quad (7)$$

з) фазовая зависимость силы отталкивания, усреднённой в поперечном измерении на интервале $y \in [-b, b]$

$$\bar{F}_{rep}(\psi) = \frac{1}{2b} \int_{-b}^b F_{rep}(\psi, y) dy \quad (8)$$

и) фазовая зависимость результирующей силы, найденной как фазовая суперпозиция сил отталкивания и притяжения, усреднённых в поперечном измерении по ширине ИСПЭ на интервале $y \in [-b, b]$

$$\bar{F}_{sum}(\psi) = \bar{F}_{attr}(\psi) + \bar{F}_{rep}(\psi) \quad (9)$$

Характерную фазовую зависимость возбуждающего аperiodического сигнала можно описать функцией вида [8]:

$$j_i(\psi) = \begin{cases} \sin \psi, & \psi \leq \frac{\pi}{2}, \\ \exp\left(-\beta \cdot \left(\psi - \frac{\pi}{2}\right)\right), & \psi \geq \frac{\pi}{2}, \beta \approx 0,75. \end{cases} \quad (10)$$

Кроме того, графические зависимости проиллюстрируем дополнительными усреднёнными численными оценками:

а) значение силы притяжения, усреднённой в поперечном измерении на интервале $y \in [-b, b]$ и по фазе $\psi \in [0, 2\pi]$

$$\bar{F}_{attr} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \bar{F}_{attr}(\psi) d\psi = \frac{1}{(2\pi \cdot 2b)} \int_0^{2\pi} \int_{-b}^b F_{attr}(\psi, y) dy d\psi \quad (11)$$

б) значение силы отталкивания, усреднённой в поперечном измерении на интервале $y \in [-b, b]$ и по фазе $\psi \in [0, 2\pi]$

$$\bar{F}_{rep} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \bar{F}_{rep}(\psi) d\psi = \frac{1}{(2\pi \cdot 2b)} \int_0^{2\pi} \int_{-b}^b F_{rep}(\psi, y) dy d\psi \quad (12)$$

в) значение результирующей силы (суперпозиция силы притяжения – Ампера и силы отталкивания – Лоренца), усреднённой в поперечном измерении на интервале $y \in [-b, b]$ и по фазе $\psi \in [0, 2\pi]$

$$\bar{F}_{\text{sum}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_{\text{sum}}(\psi) d\psi = \frac{1}{(2\pi \cdot 2b)} \times \int_0^{2\pi} \int_{-b}^b F_{\text{sum}}(\psi, y) dy d\psi. \quad (13)$$

Отметим, что формула (13) иллюстрирует количественный рост эффективности магнитно-импульсного притяжения с учетом фазы протекающего процесса. Численные оценки могут усредняться по любому интересующему пространственному или фазовому интервалу. Например, при рассмотрении процессов в области непосредственно под отдельным токопроводом индуктора интервал усреднения – $y \in [a, (a + b)]$.

Результаты вычислений.

1. Электродинамические процессы в области под токопроводами прямоугольного соленоида ИСПЭ (рис. 2-7).

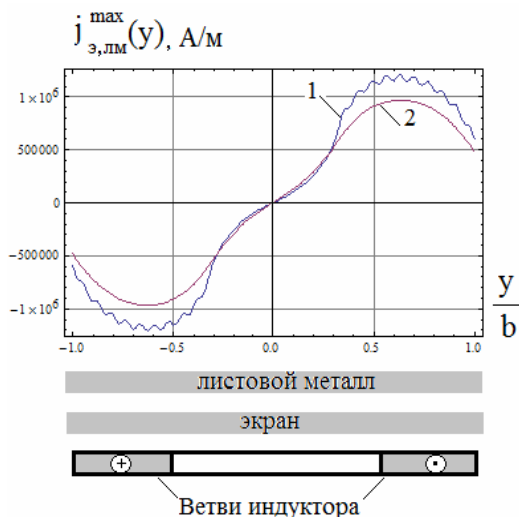


Рис. 2. Картина пространственного распределения индуцированных токов, 1 – металл экрана, 2 – листовой металл

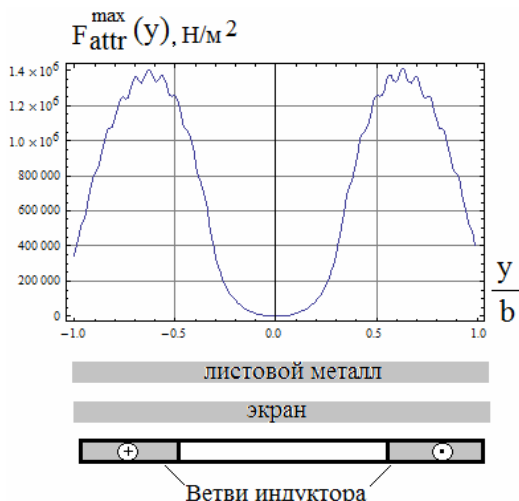


Рис. 3. Пространственная картина распределённой силы притяжения (Ампера), среднее значение на ширине ИСПЭ – $\bar{F}_{\text{attr}} \approx 0,78 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$

При уменьшении глубины вмятины, практически пропорционально, растёт амплитуда возбуждаемых

электродинамических усилий. Так, при снижении глубины с 0,005 м до 0,002 м усилия возрастают более чем в ~ 2 раза.

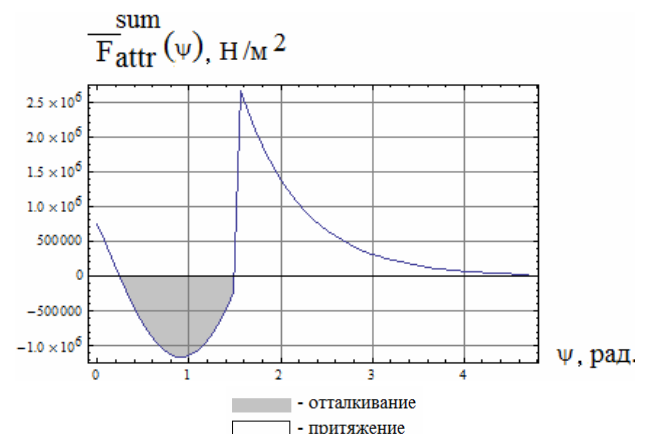


Рис. 4. Фазовая зависимость результирующей силы (суперпозиция Ампера и Лоренца), действующей на листовой металл в ИСПЭ, среднее значение за время действия – $\bar{F}_{\text{attr}}^{\text{sum}} \approx 0,245 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$

Основные результаты вычислений сводятся к следующим положениям:

- расчётные данные являются интегральными показателями электродинамических процессов, характеризующими их протекание на всей площади индукторной системы, возбуждаемой многовитковым плоским прямоугольным соленоидом с амплитудой тока в обмотке ~ 22,6 кА при напряжении емкостного накопителя ~ 2 кВ и запасаемой энергией ~ 2,4 кДж;
- временные зависимости возбуждающего и индуцированного токов различны, что, в конечном итоге, является причиной осцилляции силы Лоренца, то есть появления интервалов отталкивания и притяжения;
- превалирование сил отталкивания над силами притяжения является кратковременным и имеет место исключительно в начальной фазе процесса силового воздействия;
- усреднение возбуждаемых сил по времени воздействия показывает более, чем на порядок (~15 раз) превышение притяжения над отталкиванием (притяжение – $\bar{F}_{\text{attr}} \approx 0,282 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$, отталкивание – $\bar{F}_{\text{rep}} \approx -0,0182 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$);
- в интеграле (усреднение по времени воздействия и пространственной переменной) рассмотренная ИСПЭ на всей своей площади обеспечивает магнитно-импульсное притяжение с силой – $\bar{F}_{\text{attr}}^{\text{sum}} \approx 0,245 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$.

2. Токи и силы в области вмятины.

Геометрия области вмятины (принимаемой области силового воздействия): $D \times D \times H = 0,03 \text{ м} \times 0,03 \text{ м} \times 0,05 \text{ м}$.

Заданная область листового металла помещается под плоскостью токопроводов любой из ветвей прямоугольного соленоида, возбуждающего «индукторную систему с притягивающим экраном» (ИСПЭ).

Для принятой области силового воздействия усреднение по поперечной пространственной переменной выполняется в интервале $\psi \in [0, D]$.

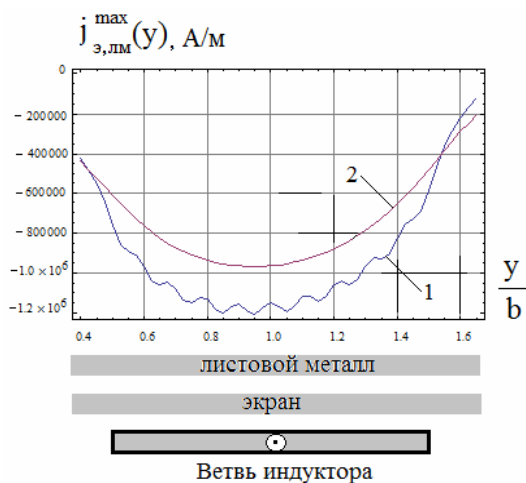


Рис. 5. Картина пространственного распределения индуцированных токов, 1 – металл экрана, 2 – листовой металл

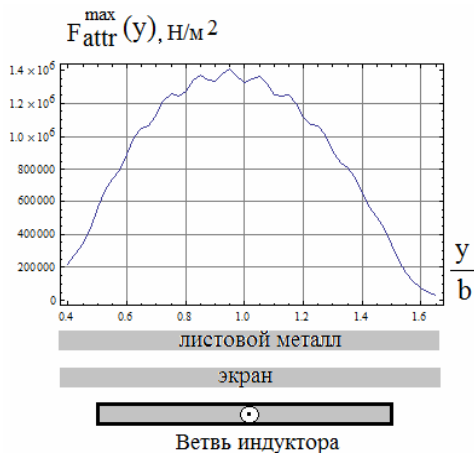


Рис. 6. Пространственная картина распределённой силы притяжения (Ампера), среднее значение на ширине ИСПЭ – $\bar{F}_{attr} \approx 0,92 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$

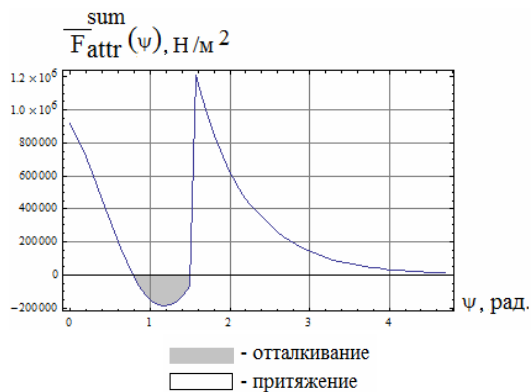


Рис. 7. Фазовая зависимость результирующей силы (суперпозиция Ампера и Лоренца!), действующей на листовой металл в ИСПЭ, среднее значение за время действия – $\bar{F}_{attr}^{sum} \approx 0,345 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$

Обсуждение результатов вычислений:

- расчётные данные являются локальными показателями электродинамических процессов, характеризующими их протекание в области вмятины заданной геометрии, в отличие от предыдущих результатов, полученных для всей площади под обмоткой ИСПЭ;
- так же, как и ранее, превалирование сил отталкивания над силами притяжения является кратковре-

менным и имеет место исключительно в начальной фазе процесса силового воздействия;

- усреднение возбуждаемых сил по времени воздействия показывает значительное превышение притяжения над отталкиванием (притяжение – $\bar{F}_{attr} \approx 0,35 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$, отталкивание – $\bar{F}_{rep} \approx -0,056 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$);

- в интеграле (усреднение по времени воздействия и пространственной переменной) рассмотренная ИСПЭ на всей своей площади обеспечивает магнитно-импульсное притяжение с распределённой силой – $\bar{F}_{attr}^{sum} \approx 0,345 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$;

- в целом, сравнение показателей электродинамических процессов в рассмотренных вариантах расчёта показывает приближённый рост в 1,3-1,5 раз силовых показателей в области принятой вмятины на поверхности листового металла по сравнению с аналогичными величинами для всей площади под обмоткой индуктора ИСПЭ.

Выводы.

1. В работе проведен численный анализ электродинамических процессов в индукторной системе с притягивающим экраном и источником магнитно поля – плоским прямоугольным соленоидом.

2. Численные оценки показали, что при уменьшении глубины вмятины, практически пропорционально, растёт амплитуда возбуждаемых электродинамических усилий.

3. Наибольшая эффективность силового притяжения имеет место для областей листового металла, размеры которых не превышают поперечных размеров ветвей обмотки возбуждающего соленоида.

4. Интегральное во времени значение сил отталкивания существенно ниже развиваемых сил притяжения (менее ~ 5 %).

5. В целом, при достаточно низких рабочих частотах действующих полей (~1500 Гц) рассмотренная «индукторная система с притягивающим экраном» работает как инструмент магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов. Локальные распределённые силы притяжения в области заданных участков (например, вмятин с ограниченными размерами!) при токе в индукторе ~ 22 кА могут достигать величин порядка ~ $0,345 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Издание второе, переработанное и дополненное. Под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю. В. – Х.: МОСТ-Торнадо, 2003. – 284 с.
2. Yuriy V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – fundamentals and perspective applications // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – vol.213. – no.3. – pp. 444-452. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003.
3. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic forming – A review // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – vol.211. – no.5. – pp.787-829. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012.
4. Gnatov A., Argun S. New method of car body panel external straightening. Tools of method // International Journal of Ve-

- hicular Technology. – 2015. – vol.2015. – pp. 1-7. doi: **10.1155/2015/192958**.
5. Batygin Yuri V., Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2014. – vol.214. – iss.2. – pp. 390-401. doi: **10.1016/j.jmatprotec.2013.09.018**.
6. Batygin Yu.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V., Chaplygin E.A. Pulsed Electromagnetic Attraction Processes for Sheet Metal Components // *Proceedings of the 6th International Conference High Speed Forming 2014*. – May 26-29, 2014, Daejeon, Korea. – pp. 253-260.
7. Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А., Гаврилова О.Е. Индукторная система с притягивающим экраном и плоским прямоугольным соленоидом // *Автомобильный транспорт*. – 2017. – №41. – С. 146-154.
8. Chitode J.S. *Signal an systems*. – Pune, India: Technical Publications, 2009. – 767 p.

REFERENCES

1. Batygin Yu.V., Lavinskiy V.I., Khimenko L.T. *Impul'snyye magnitnyye polya dlya progressivnykh tekhnologiy. Tom 1. Izdaniye vtoroye, pererabotannoye i dopolnennoye*. [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol.1. 2nd edition, revised and enlarged.] Kharkov, MOST-Tornado Publ., 2003. 284 p. (Rus).
2. Yuriy V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, vol.213, no.3, pp. 444-452. doi: **10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003**.
3. Psyk V., Risch D., Kinsey B.L., Tekkaya A.E., Kleiner M. Electromagnetic forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol.211, no.5, pp.787-829. doi: **10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012**.
4. Gnatov A., Argun S. New method of car body panel external straightening. Tools of method. *International Journal of Vehicular Technology*, 2015, vol.2015, pp. 1-7. doi: **10.1155/2015/192958**.
5. Batygin Yuri V., Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol.214, iss.2, pp. 390-401. doi: **10.1016/j.jmatprotec.2013.09.018**.
6. Batygin Yu.V., Golovashchenko S.F., Gnatov A.V., Chaplygin E.A. Pulsed Electromagnetic Attraction Processes for Sheet Metal Components. *Proceedings of the 6th International Conference High Speed Forming 2014*, May 26-29, 2014, Daejeon, Korea, pp. 253-260.
7. Batygin Yu.V., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A., Gavrilova O.E. Inductor system with attracting screen and rectangular solenoid. *Automobile Transport*, 2017, no.41, pp. 146-154. (Rus).
8. Chitode J.S. *Signal an systems*. Pune, India, Technical Publications, 2009. 767 p.

Поступила (received) 25.12.2017

Чаплыгин Евгений Александрович¹, к.т.н., доц.,
 Барбашова Марина Викторовна¹, к.т.н.,
 Коваль Анжелика Юрьевна¹, студент,
¹ Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
 61002, Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25,
 тел/phone +380 57 7073727,
 e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com; barbashova1987@gmail.com

E.A. Chaplygin¹, M.V. Barbashova¹, A.Yu. Koval¹
¹ Kharkiv National Automobile and Highway University,
 25, Yaroslava Mudrogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

Numerical estimates of electrodynamics processes in the inductor system with an attractive screen and a flat rectangular solenoid.

Purpose. To carry out numerical estimates of currents and forces in the investigated inductor system with an attractive screen (ISAS) and determine the effectiveness of the force attraction. **Methodology.** The calculated relationships and graphical constructions were obtained using the initial data of the system: induced current in the screen and sheet metal; the distributed force of attraction (Ampère force); the repulsive force acting on the sheet metal (Lorentz force); amplitude values of the force of attraction and repulsion; phase dependence of the force of attraction, the repulsive force and the total resulting force. **Results.** The results of calculations in the form of graphical dependencies of electrodynamic processes in the region under the conductors of a rectangular solenoid of inductor system with an attracting screen are presented. The graphs of forces and currents in region of dent are obtained. In the paper the analysis of electrodynamics processes for whole area under the winding of inductor system with an attractive screen is shown. The flowing this processes in the region of dent a given geometry is presented. **Originality.** The considered inductor system with an attractive screen and a rectangular solenoid is improved, in comparison with the previous developed ISAS. It has a working area under the lines of parallel conductors in the cross section of a rectangular solenoid, and this allows to place a predetermined portion of the sheet metal anywhere within the working region. Comparison of the indicators of electrodynamics processes in the considered variants of calculation shows an approximate growth of almost 1.5 times the power indicators in the area of the accepted dent in comparison with similar values for the entire area under the winding of the ISAS. **Practical value.** The results obtained are important for the practice of real estimates of the excited forces of attraction. With a decrease in the dent, the amplitude of the electrodynamic forces being excited is growing proportionally (for example, when the depth decreases by 3 mm, the forces increase more than 2 times). The highest efficiency of force attraction is for sheet metal regions, the dimensions do not exceed the transverse dimensions of the winding branches of the exciting solenoid. References 8, figure 7.

Key words: magnetic-pulsed treatment, inductor system, attractive screen, rectangular solenoid, electrodynamic processes.