

Д.О. Волонцевич, М.В. Барбашова, О.С. Сабокарь

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОМБИНИРОВАННЫХ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМАХ – ИНСТРУМЕНТАХ РИХТОВКИ СОВРЕМЕННЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

*У комбінованих індукторних системах поле існує тільки над заготовкою, під нею має місце тільки кругове низькочастотне магнітне поле. У роботі виконано аналіз електромагнітних процесів в інструментах магнітно-імпульсного притягання (комбінованих індукторних системах), заснований на численних оцінках, за допомогою раніше отриманих аналітичних залежностей для збуджуваних полів і сил, необхідних для успішного виконання рихтування металевих покриттів автомобільних кузовів. Отримано просторово-часовий розподіл дотичної складової напруженості магнітного поля на поверхнях оброблюваного металевого листа; умови, при виконанні яких можливе притягання листа з боку його внутрішньої поверхні (до індукторів); часовий характер взаємодії збуджуваних полів; просторові зони максимального впливу на оброблюваний лист. Особливістю комбінованої індукторної системи є нерівномірність розподілених сил притягання в робочій зоні. Результати аналізу показали, що в розрахованій робочій області на зовнішній поверхні листової заготовки напруженість магнітного поля буде складати не більше 5% напруженості кругового поля низькочастотного джерела. Враховуючи, що крізь листову заготовку плоскопаралельне поле практично не проникає, на її зовнішній стороні, як випливає з виконаних оцінок, напруженість діючого поля буде складати ~ 30-40%. Отримано розподіл відносної напруженості магнітного поля на поверхні листової заготовки в центрі робочої зони, а також розподіл амплітудних значень дотичної компоненти напруженості результуючого магнітного поля на поверхні листової заготовки вздовж центру прямокутного витка. Обчислення продемонстрували дієвість запропонованого інструменту магнітно-імпульсної рихтування металевих покриттів автомобільних кузовів. Реальні амплітуди розподілених сил притягання складають ~ 7.7 МПа, при амплітуді напруженості магнітного поля  $\approx 0,35 \cdot 10^7$  А/м. Індуктори – джерела поля можуть виконуватися багатовитковими. Це дозволить істотно збільшити напруженість збуджуваного магнітного поля і, відповідно, амплітуду сил притягання. Бібл. 6, рис. 5.*

*Ключові слова:* комбінована індукторна система, зовнішнє рихтування, низькочастотне магнітне поле.

*В комбинированных индукторных системах поле существует только над заготовкой, под ней имеет место только круговое низкочастотное магнитное поле. В работе выполнен анализ электромагнитных процессов в инструментах магнитно-импульсного притяжения (комбинированных индукторных системах), основанный на численных оценках, с помощью ранее полученных аналитических зависимостей для возбуждаемых полей и сил, необходимых для успешного выполнения рихтовки металлических покрытий автомобильных кузовов. Получены пространственно-временные распределения касательной составляющей напряжённости магнитного поля на поверхностях обрабатываемого металлического листа; условия, при выполнении которых возможно притяжение листа со стороны его внутренней поверхности (к индукторам); временной характер взаимодействия возбуждаемых полей; пространственные зоны максимального воздействия на обрабатываемый лист. Особенностью комбинированной индукторной системы является неравномерность распределённых сил притяжения в рабочей зоне. Результаты анализа показали, что в рассчитанной рабочей области на внешней поверхности листовой заготовки напряжённость магнитного поля будет составлять не более 5% напряжённости кругового поля низкочастотного источника. Учитывая, что сквозь листовую заготовку плоскопаралельное поле практически не проникает, на её внешней стороне, как следует из выполненных оценок, напряжённость действующего поля будет составлять ~30-40%. Получено распределение относительной напряжённости магнитного поля на поверхности листовой заготовки в центре рабочей зоны, а также распределение амплитудных значений касательной компоненты напряжённости результующего магнитного поля на поверхности листовой заготовки вдоль центра прямоугольного витка. Вычисления продемонстрировали действенность предложенного инструмента магнитно-импульсной рихтовки металлических покрытий автомобильных кузовов. Реальные амплитуды распределённых сил притяжения составляют ~ 7.7 МПа, при амплитуде напряженности магнитного поля  $\approx 0,35 \cdot 10^7$  А/м. Индукторы – источники поля могут выполняться многовитковыми. Это позволит существенно увеличить напряжённость возбуждаемого магнитного поля и, соответственно, амплитуду сил притяжения. Библ. 6, рис. 5.*

*Ключевые слова:* комбинированная индукторная система, внешняя рихтовка, низкочастотное магнитное поле.

**Введение.** Появление новых сплавов в современных авиа- и автомобилестроении инициировало развитие новых обрабатывающих технологий, поскольку известные подходы оказались недееспособными. Рекомендуются для кузовных покрытий современных автомобилей соединения различных металлов, обладающих малым весом и высокой прочностью, оказались не технологичными с точки зрения традиционной механической штамповки. Причина – недостаточная пластичность. При обработке имели место разрывы и разрушение формуемых изделий. Как показали исследования, направленные на преодоление отмеченных негативов, при магнитно-импульсном силовом воздействии проявляется эффект «гиперпластичности», вследствие которого

относительные деформации металлических образцов могут достигать ~ 200 % и более [1].

**Обзор литературы.** Современные потребности авто- и авиапромышленности поставили задачу внешней рихтовки вмятин на металлических поверхностях кузовных и корпусных покрытий. Как оказалось, практически, наиболее эффективным способом решения данной проблемы является магнитно-импульсное притяжение повреждённых участков силами низкочастотных полей при интенсивном проникновении сквозь обрабатываемый металл [2, 3].

В этой связи весьма интересными для практики являются разработки инженеров концерна «Боинг». Физическая сущность их предложений состоит в про-

© Д.О. Волонцевич, М.В. Барбашова, О.С. Сабокарь

пространственно-временной суперпозиции низко- (НЧ) и высокочастотных (ВЧ) магнитных полей. Первые проникают сквозь металл с вмятиной. Вторые не проникают, и при определённых условиях нивелируют НЧ-поле над обрабатываемым объектом. В результате, над металлом с вмятиной нуль напряжённости, под ним – амплитуда. Возникающая сила магнитного давления осуществляет притяжение металла вмятины к источнику поля – индуктору [4].

Реализация цитируемого предложения является достаточно сложной и дорогостоящей, ввиду обязательного наличия источников мощности разного типа – генераторов НЧ и ВЧ сильноточных токовых импульсов. Упростить схему двухчастотной реализации магнитно-импульсного притяжения можно с помощью систем, генерирующих плоскопараллельные магнитные поля. В этом случае источники мощности могут генерировать идентичные НЧ-сигналы. Данная идея в виде «комбинированных индукторных систем» была представлена в работе [5]. Настоящая работа является логическим продолжением цитируемой публикации.

**Цель работы.** Анализ электромагнитных процессов в инструментах магнитно-импульсного притяжения данного типа, выполненный на основе численных оценок с помощью ранее полученных аналитических зависимостей для возбуждаемых полей и сил, необходимых для успешного выполнения рихтовки металлических покрытий автомобильных кузовов.

Исходные данные для вычислений взяты из типичных экспериментов, описанных авторами научного издания [6].

**Численные оценки.** Постановка задач расчёта.

*Дано:*

- источники поля – плоский катушечный индуктор, индуктор прямоугольной формы, их взаимное расположение представлены на рис. 1, 2;

- оба индуктора расположены соосно на разных расстояниях от внутренней поверхности обрабатываемого листа ( $H = 0,006$  м,  $h = 0,003$  м);

- геометрия катушечного индуктора:  $R_1 = 0,025$  м,  $R_2 = 0,063$  м;

- геометрия прямоугольного индуктора: квадрат с внутренними и внешними сторонами, соответственно  $-2b_1 = 2R_1 = 0,05$  м,  $2b_2 = \sqrt{2} R_2 \approx 0,09$  м;

- обрабатывается стальной лист толщиной  $d = 0,0008$  м (удельная электропроводность –  $\gamma = 0,6 \cdot 10^7$  (Ом·м)<sup>-1</sup>);

- на вход индукторной системы подаются токовые импульсы, временные зависимости которых функционально одинаковы и представляют собой экспоненциально затухающие синусоиды, то есть

$$j_{1,2}(t) = j_{1,2}^{(\max)} \cdot \varphi_{1,2}(t),$$

$$\varphi_{1,2}(t) = e^{-\delta_{1,2}(\omega_{1,2} t)} \cdot \sin(\omega_{1,2} \cdot t),$$

здесь  $j_{1,2}^{(\max)}$  – амплитудные значения плотностей токов,  $\varphi_{1,2}(t)$  – временные функции,  $\delta_{1,2}$  – относительные декременты затухания,  $\omega_{1,2} = 2\pi \cdot f_{1,2}$ ,  $f_{1,2}$  – рабочие частоты;

- относительные декременты –  $\delta_1 \approx 0,2$ ,  $\delta_2 \approx 0,5$ , рабочая частота низкочастотного сигнала –  $f_1 = 2,2$  кГц, плоскопараллельного поля –  $f_2 = 5 \div 10$  кГц;

- начальные моменты токовых импульсов смещены, величина смещения составляет  $\Delta t \approx \pi/2\omega_1$  (четверть периода низкочастотного сигнала).

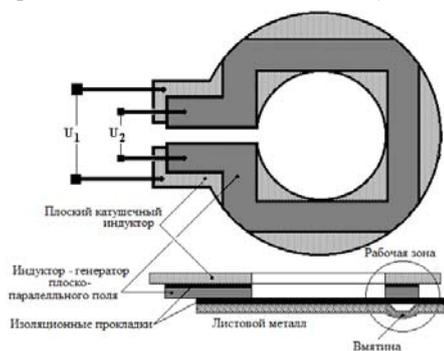
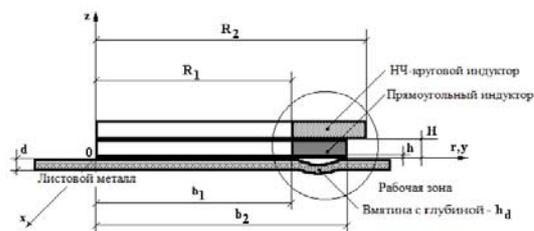
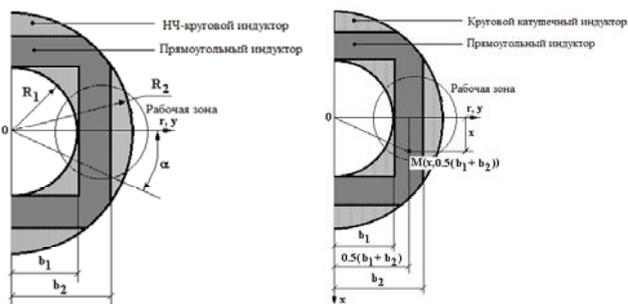


Рис. 1



а



б

в

Рис. 2

*Найти:*

- пространственно-временные распределения касательной составляющей напряжённости магнитного поля на поверхностях обрабатываемого металлического листа;

- условия, при выполнении которых возможно притяжение листа со стороны его внутренней поверхности (к индукторам);

- временной характер взаимодействия возбуждаемых полей;

- пространственные зоны максимального воздействия на обрабатываемый лист.

*Вычисления.*

Для более ясного понимания происходящих процессов выпишем из работы [5] напряжённости магнитных полей, возбуждаемых каждым из источников в отдельности. Но вначале некоторые замечания.

Зависимости, полученные в цитируемой публикации, показывают, что пространственные распределения низкочастотного поля над листом и под листом не зависят от его временного характера. Этого нельзя сказать о временной зависимости плоскопараллельного поля (напомним, что это поле существует только над заготовкой, под ней имеет место только круговое низкочастотное магнитное поле).

Кроме того, особенностью рассматриваемой комбинированной индукторной системы является неравномерность распределённых сил притяжения в рабочей зоне. Эта неравномерность обусловлена следующим фактором.

Касательная компонента напряжённости кругового низкочастотного магнитного поля направлена по радиусу в цилиндрической системе координат, связанной с соответствующим индуктором. А касательная компонента плоскопараллельного поля направлена вдоль поперечной пространственной координаты в прямоугольной системе координат, связанной со своим источником. Их суперпозиция при соответствующем выборе амплитуд, может дать нулевое поле над листовой заготовкой только в центре рабочей зоны, то есть там, где радиус  $r$  совпадает с поперечной координатой  $y$ . Отклонение от центра приводит к тому, что суммирование напряжённостей полей разной геометрии следует проводить с учётом некоторой разницы в их направлениях. Это означает появление зависимости от азимута в цилиндрической системе координат, что эквивалентно появлению зависимости от пространственной переменной  $x$  в прямоугольной системе координат.

Введение азимутального угла  $\alpha$ , характеризующего появление таких зависимостей, иллюстрируется рис. 2.

Дальнейшие вычисления будут проведены для центральной части рабочей зоны, где  $y = r$  ( $x = 0$ , см. рис. 1, 2), и для  $y = 0,5 \cdot (b_1 + b_2)$ , но  $x = \text{var}$  (средняя линия прямоугольного витка).

Формула для напряжённости магнитного поля над листовым металлом с вышеозначенными поправками принимает следующий вид.

Для  $y \in [b_1, b_2]$  и  $x = 0$

$$H_s^{(over)}(t, y, z = 0) = H_r(t, r = y, z = 0) + H_y(t, y, z = 0) \quad (1)$$

Для расчёта распределения поля вдоль средней линии прямоугольного витка в рабочей зоне возьмём лежащую на ней произвольную точку  $M(x, 0,5 \cdot (b_1 + b_2))$ . В этой точке радиус для вычисления радиальной компоненты напряжённости будет равен

$$r = \sqrt{\left(\frac{b_1 + b_2}{2}\right)^2 + x^2}.$$

Кроме того, суммировать  $r$ - и  $y$ - составляющие напряжённостей магнитных полей в данной точке следует с учётом их направлений (фактически – это суммирование проекции  $H_r$  на направление  $H_y$ , но можно и наоборот!).

Итак, для  $y = 0,5 \cdot (b_1 + b_2)$ ,  $x \in [0, (0,5 \cdot b_2)]$  (дальнейшее увеличение координаты  $x$  не имеет смысла ввиду искажения поля прямоугольного витка вблизи внутренних углов) записываем, что

$$\begin{aligned} H_s^{(over)}(t, y = 0,5(b_1 + b_2), z = 0) \Big|_{x=\text{var}} &= \\ &= H_r(t, r = \sqrt{\left(\frac{b_1 + b_2}{2}\right)^2 + x^2}, z = 0) \times \\ &\times \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot x}{b_1 + b_2}\right)^2}} + H_y(t, y = 0,5(b_1 + b_2), z = 0). \end{aligned} \quad (2)$$

Выражения для  $H_{r,y}$  в зависимостях (1) и (2) приведены в работе [5]. В настоящем изложении их развёрнутые выражения опущены ввиду громоздкости.

Результаты расчётов, выполненных с помощью (1) и (2), представлены на рис. 3, 4.

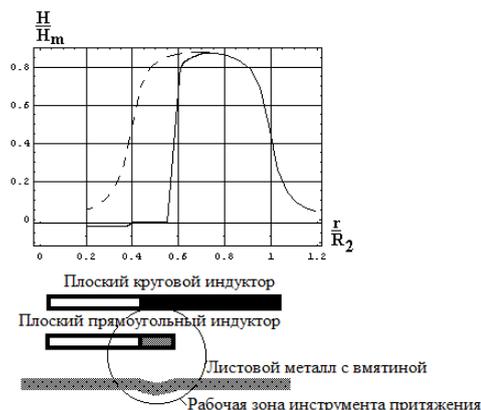


Рис. 3. Распределение относительной напряжённости магнитного поля на поверхности листовой заготовки в центре рабочей зоны (нормировка на максимум,  $H_m = 0,5 j_{1m}$ ,  $x = 0$  рис. 1, 2): пунктирная линия – касательная составляющая напряжённости кругового низкочастотного поля; сплошная линия – касательная составляющая напряжённости результата суперпозиции низкочастотного и плоскопараллельного полей

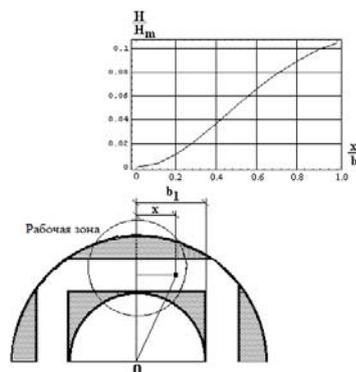


Рис. 4. Распределение амплитудных значений касательной компоненты напряжённости результирующего магнитного поля поверхности листовой заготовки вдоль центра прямоугольного витка (нормировка на максимум,  $H_m = 0,5 j_{1m}$ )

Как видно из результатов расчёта, возможные размеры рабочей зоны рассчитанной индукторной системы составляют  $(b_2 - b_1) \times 2 \cdot (0,5 \cdot b_1) \approx 0,01 \text{ м} \times 0,025 \text{ м}$ . В этой области на внешней поверхности листовой заготовки напряжённость магнитного поля будет составлять не более 5 % напряжённости кругового поля низкочастотного источника. Учитывая, что сквозь листовую заготовку плоскопараллельное поле практически не проникает, на её внешней стороне, как следует из выполненных оценок, напряжённость действующего поля будет составлять  $\sim (0,3 \div 0,4) j_{1m}$ .

Для полноты описания процессов в рассмотренной индукторной системе приведём ранее рассчитанную временную зависимость для силы притяжения, которая будет действовать на листовую заготовку при рабочих частотах  $f_1 \approx 2,2 \text{ кГц}$ ,  $f_2 \approx 7,0 \text{ кГц}$  (рис. 5).

При данных временных параметрах амплитуда сил притяжения будет превышать амплитуды сил отталкивания в  $\sim 6$  раз.

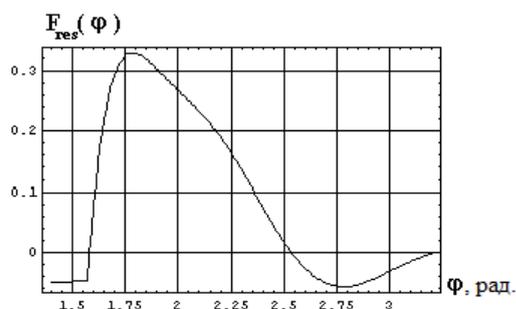


Рис. 5. Временная (фазовая) зависимость распределённой силы притяжения-отгалькивания (с нормировкой на максимум), действующей на листовую заготовку при  $f_1 \approx 2,2$  кГц,  $f_2 \approx 7,0$  кГц,  $\delta_1 \approx 0,2$ ,  $\delta_2 \approx 0,5$

При типичной для магнитно-импульсной обработки металлов линейной плотности токов  $-j_m \approx 10^7$  А/м амплитуда напряжённости будет равна  $-H_m \approx 0,35 \cdot 10^7$  А/м. Распределённая сила магнитно-импульсного притяжения в комбинированной индукторной системе может достигать величины  $\sim 7.7$  МПа ( $\sim 77$  атм)

В заключение следует указать, что индукторы – источники поля могут выполняться многovitковыми. Это позволит существенно увеличить напряжённость возбуждаемого магнитного поля и, соответственно, амплитуду сил притяжения.

**Выводы.** Выполнены численные оценки напряжённостей возбуждаемых полей в комбинированной индукторной системе, основанной на суперпозиции кругового низкочастотного и плоско параллельного магнитного полей. Проведенные вычисления продемонстрировали дееспособность предлагаемого инструмента рихтовки вмятин в автомобильных кузовах, возможные значения сил притяжения составляют  $\sim 7.7$  МПа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proceedings of the 1st International Conference on High Speed Metal Forming. (ICHSF 2004). March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany.
2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Бажинов А.В., Магнитно-импульсные методы и системы для притяжения тонкостенных листовых металлов // Труды междунауч.-техн. конф. «Магнитно-импульсная обработка металлов. Пути совершенствования и развития». Самара, 18-19 сентября 2007. – С. 3-13.
3. 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.
4. US Patent no.4,986,102, Hendrickson et al. (The Boeing Company, 1991).
5. Волонцевич Д.О., Барбашова М.В., Радченко Е.С. Расчёт полей в комбинированных индукторных системах – инструментах рихтовки металлических покрытий автомобильных кузовов // Электротехника і електро механіка. – 2015. – №3 – С. 55-58.
6. 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.

#### REFERENCES

1. Proceedings of the 1st International Conference on High Speed Metal Forming. (ICHSF 2004). March 31/April 1, 2004. Dortmund, Germany.

2. Batygin Yu.V., Lavinskiy V.I., Bazhinov A.V. Magnetic pulsed methods and systems for attraction of thin sheet metal. *Trudy mezhd. nauchn.-tekhn. konf. «Magnitno-impul'snaya obrabotka metallov. Puti sovershenstvovaniya i razvitiya»* [Proceedings of Int. Sci.-Tech. Conf. «Magnetic pulsed treatment of metals. Ways to improve and develop»]. Samara (Russia), 18-19 September, 2007, pp. 3-13. (Rus).
3. 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.
4. Hendrickson et al. (The Boeing Company). Patent US, no.4.986.102, 1991.
5. Voloncevich D.O., Barbashova M.V., Radchenko E.S. Calculation of fields in a combined inductor system as a tools of straightening of metal coating of car body. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.3, pp. 55-58. (Rus).
6. 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).

Поступила (received) 28.04.2015

Волонцевич Дмитрий Олегович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Барбашова Марина Викторовна<sup>2</sup>, ассистент,  
Сабокарь Олег Сергеевич<sup>2</sup>, студент,

<sup>1</sup>Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, e-mail: vdo@kpi.kharkov.ua  
<sup>2</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный  
университет,  
61002, Харьков, ул. Петровского, 25,  
e-mail: barbashova1987@gmail.com

D.O. Voloncevich<sup>1</sup>, M.V. Barbashova<sup>2</sup>, O. S. Sabokar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup>Kharkov National Automobile and Highway University,  
25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine.

#### Analysis of electromagnetic process in combined inductor systems, as tools for straightening of modern car.

The field in combined inductor systems exists only over workpiece, it occurs at only a low-frequency circular magnetic field. In this paper electromagnetic processes in tools of the magnetic pulse attraction (the combined inductor systems) are analyzed. Investigation based on numerical estimations, using previously obtained analytical relations for the excited fields and forces. Calculations are necessary for the successful implementation of straightening metal coatings bodies car. A distribution of relative intensity of magnetic fields to surfaces of sheet workpiece in the centre of a working zone is obtained. The distribution of amplitude tangential component intensity of resulting magnetic field of the surface of sheet metal along the centre of a rectangular coil is received. Feature of the combined induction system is non-uniformly distributed forces of attraction in the work area. The results showed that the calculated working area on the outer surface of sheet workpiece magnetic field strength will be less than 5% of the field strength of a circular low-frequency source. Calculations have shown the effectiveness of the proposed instrument magnetic pulse straightening metal coating bodies car. The actual amplitude of distributed attraction forces are  $\sim 7.7$  MPa. References 6, figures 5.

Key words: combined inductor system, external straightening, low-frequency magnetic field.