

УДК 621.318

А.Ю. Бондаренко¹, В.Ф. Далека², Т.В. Гаврилова³

¹ *Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков*

² *Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, г. Харьков*

³ *Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков*

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В ДВУХЧАСТОТНЫХ ИНДУКТОРНЫХ СИСТЕМАХ – ИНСТРУМЕНТАХ ВНЕШНЕЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РИХТОВКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ КУЗОВОВ

В статье проведен анализ электромагнитных процессов в двухчастотных индукторных системах – инструментах внешней магнитно-импульсной рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов. Построены графики распределения амплитудных значений напряжённости возбуждаемого магнитного поля для рассматриваемой индукторной системы. Определена рабочая область притяжения листового металла.

Ключевые слова: *Магнитно-импульсная обработка металлов, индукторная система, инструмент рихтовки, магнитно-импульсная рихтовка, автомобильные кузова*

Постановка проблемы. Прогрессивные обрабатывающие технологии с использованием энергии импульсных электромагнитных полей вызывают всё больший интерес не только в крупномасштабных отраслях промышленности, но и в ремонтных производствах по бесконтактной реставрации кузовных покрытий автомобилей, корпусов самолётов и других транспортных средств. В этой связи следует особо выделить устройства для внешней рихтовки без поэлементной разборки и без возможного нарушения защитного лакокрасочного покрытия [1–6].

Основные публикации по теме. Не останавливаясь на подробном анализе публикаций, укажем, что данная работа является логическим продолжением исследований, представленных авторами работ [7,8], где дано достаточно подробное описание предмета настоящих исследований. Речь идёт о принципе действия и расчётах двухчастотных индукторных систем – инструментов внешней магнитно-импульсной рихтовки автомобильных кузовов.

Цель работы – анализ электромагнитных процессов в двухчастотных индукторных системах – инструментах внешней магнитно-импульсной рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов с помощью расчётных соотношений, полученных в работе [8].

Для ясности дальнейшего рассмотрения необходимо сформулировать основные положения, определяющие действенность предмета настоящих исследований [9,10].

КОНСТРУКЦИЯ И ДЕЙСТВЕННОСТЬ ИНСТРУМЕНТА

Первое. Конструктивно, двухчастотные индукторные системы включают два плоских индуктора, расположенные друг над другом параллельно поверхности листового металла. Их обмотки подсоединены к отдельным источникам мощности, гене-

рирующим импульсы тока низкой и высокой частоты.

Второе. Эффективность индукторных систем рассматриваемого принципа действия устанавливается пространственно-временным распределением напряжённости результирующего магнитного поля в области вмятины на листовом металле. Для практики это означает, что на поверхности обрабатываемой заготовки существует область, где силовое воздействие будет наиболее эффективным. Именно эта область носит название «рабочей зоны» и её положение позволит ориентировать инструмент рихтовки при выполнении операции по устранению вмятины.

РАСЧЁТ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЁННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Основные расчётные соотношения выпишем из работы [4], где результаты даны в выражениях (33) и (34).

Напряжённость магнитного поля над листом:

$$H_1(t, r, z=0) \approx -\left(\frac{j_1(t)}{2}\right) \int_0^{\infty} \int_{(\lambda \cdot R_1)}^{(\lambda \cdot R_2)} x \cdot J_1(x) dx \left[\frac{e^{-\lambda \cdot H}}{\lambda} \cdot J_1(\lambda \cdot r) d\lambda + \right. \\ \left. + j_2(t) \cdot \int_0^{\infty} \int_{(\lambda \cdot r_1)}^{(\lambda \cdot r_2)} x \cdot J_1(x) dx \right] \cdot \frac{e^{-\lambda \cdot h}}{\lambda} \cdot J_1(\lambda \cdot r) d\lambda, \quad (1)$$

где $j_1(t)$ – плотность тока в индукторе–1,

$$j_1(t) = \frac{I_1(t) \cdot w_1}{(R_2 - R_1)},$$

$I_1(t)$ и w_1 – ток и число витков, соответственно,

$j_2(t)$ – плотность тока в индукторе–2,

$$j_2(t) = \frac{I_2(t) \cdot w_2}{(r_2 - r_1)},$$

$I_2(t)$ и w_2 – ток и число витков, соответственно,

$R_{1,2}$ – внутренний и внешний радиусы каждого из индукторов,

H и h – расстояние между индукторами и листовым металлом,

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

Напряжённость магнитного поля под листом.

$$H_2(t, r, z = -d) \approx -\left(\frac{j_1(t)}{2}\right) \int_0^{\infty} \int_{(\lambda \cdot R_1)}^{(\lambda \cdot R_2)} x \cdot J_1(x) dx \left[\frac{e^{-\lambda(H+d)}}{\lambda} J_1(\lambda \cdot r) d\lambda \right. \quad (2)$$

Задание исходных данных для численных оценок выполним согласно характеристикам экспериментальных индукторных систем [11].

Постановка задачи:

- источники поля – два катушечных индуктора;

- оба индуктора расположены соосно на разных расстояниях от внутренней поверхности обрабатываемого листа;

- геометрия индуктора – 1, возбуждающего низкочастотное магнитное поле: $R_1 = 0,01$ м, $R_2 = 0,05$ м, $H = 0,01$ м;

- геометрия индуктора – 2, возбуждающего высокочастотное магнитное поле: $r_1 = 0,025$ м, $r_2 = 0,035$ м, $h = H/2 = 0,005$ м;

- обрабатывается стальной лист толщиной $d = 0,0008$ м с удельной электропроводностью $\gamma = 0,6 \cdot 10^7$ 1/Ом м;

- временные зависимости токов, протекающих в обмотках первого и второго источников функционально одинаковы и представляют собой экспоненциально затухающие синусоиды, то есть $j_{1,2}(t) = j_{1,2}^{(max)} \cdot \varphi_{1,2}(t)$, $\varphi_{1,2}(t) = e^{-\delta_{1,2}t} \cdot \sin(\omega_{1,2} \cdot t)$ (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 одинаковы – $\delta_{1,2} \approx 0,2$, рабочая частота низкочастотного источника поля – $f_1 = 2$ кГц, рабочая частота высокочастотного источника поля – $f_2 = 40$ кГц.

Требуется 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, помимо результирующих напряжённостей магнитных полей вычислим в отдельности напряжённости, возбуждаемые каждым из индукторов с токами $j_1(t)$ и $j_2(t)$ – соответственно (алгебраические слагаемые в формулах (1) и (2)).

Результаты расчётов представлены на графиках ниже.

Результаты расчётов представлены на графиках ниже.

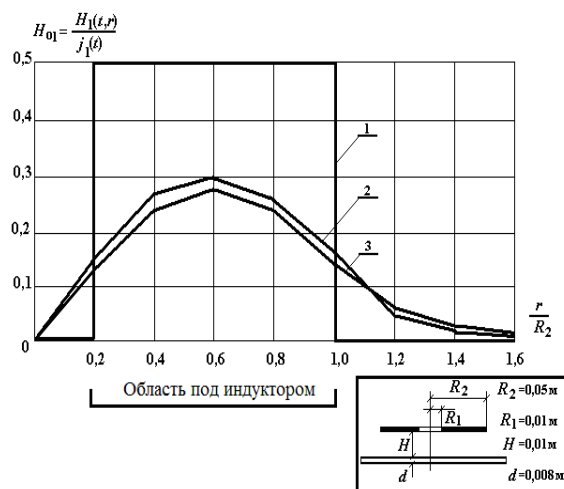


Рис. 1. Распределение амплитудных значений напряжённости магнитного поля, возбуждаемого НЧ индуктором – 1 на внутренней со стороны индукторов (2) и внешней (3) поверхностях металлического листа (кривая – 1 соответствует распределению поля по поверхности индуктора).

Как видно из результатов расчёта, представленного на рис. 1, максимально возможная напряжённость низкочастотного магнитного поля может составлять не более 50% от плотности тока в катушке. Этот факт объясняется тем, что в данном режиме наличие заготовки практически не ощущается (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).

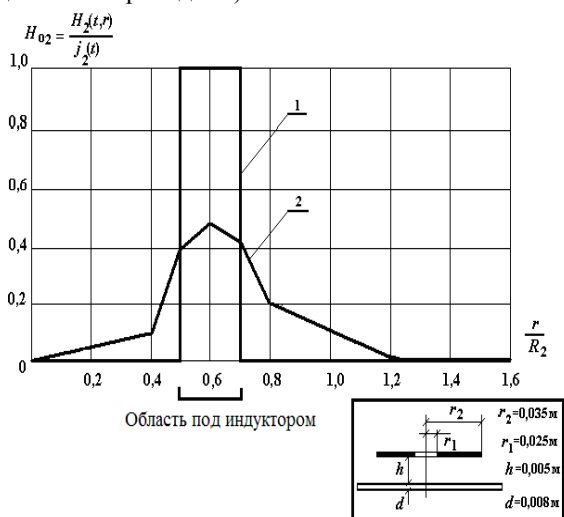


Рис. 2. Распределение амплитудных значений напряжённости магнитного поля, возбуждаемого ВЧ индуктором – 2 на поверхности металлического листа со стороны индуктора (2) (кривая – 1 соответствует распределению поля по поверхности индуктора).

Количественно, на внутренней и внешней поверхностях заготовки напряжённости практически одинаковы и составляют около $\approx 0,3 \cdot j_1$ (см. кривые –

2 и 3). Таким образом, для компенсации поля над заготовкой необходимо возбуждение противоположно направленного высокочастотного поля с амплитудой $H_{m2} \approx -0,3 \cdot j_1$.

Если учесть, что на внутренней поверхности заготовки напряжённость высокочастотного поля составляет $\approx 0,48 \cdot j_2$ (см. рис. 2, кривая – 2), то соотношение плотностей токов в обмотках источников магнитных полей должно составлять $\approx j_2 / j_1 \approx 0,625$. Данное соотношение позволяет выбрать токовые режимы источников в рассматриваемой индукторной системе.

Вопрос о распределении напряжённостей магнитных полей с разными временными параметрами на внутренней и внешней поверхностях листовой заготовки (над и под) проиллюстрирован на рис. 3, 4.

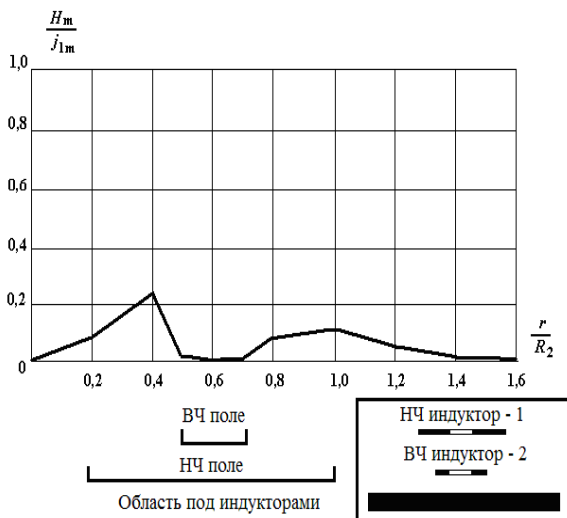


Рис. 3. Распределение результирующей напряжённости магнитного поля (суперпозиция НЧ и ВЧ полей) на поверхности листа со стороны индукторов.

Как видно из рис. 3, пространственная область над заготовкой, где должна иметь место практически нулевая напряжённость, находится под непосредственно ВЧ индуктором.

На внешней поверхности заготовки, пространственная область с максимальной напряжённостью магнитного поля расположена также под высокочастотным индуктором. Её амплитуда составляет около 20% от плотности тока в низкочастотной катушке, то есть $\approx 0,2 \cdot j_1$. Данный результат позволяет практически оценить возможные амплитуды сил магнитного давления, действующие на обрабатываемую листовую заготовку (напомним, речь идёт о притяжении её к индукторам) в рассматриваемой системе.

Перейдём к описанию электромагнитных процессов во времени.

Как было указано в постановке задачи по расчёту, токи в катушках представлены экспоненциально затухающими синусоидами с одинаковыми декрементами затухания, но разными частотами (низкая частота ≈ 2 кГц и высокая ≈ 40 кГц).

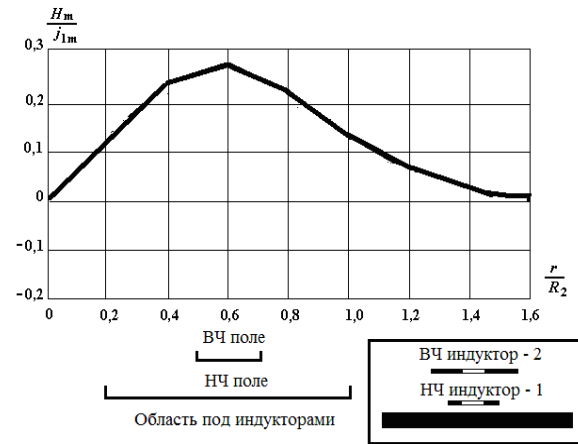


Рис. 4. Пространственное распределение напряжённости результирующего поля на внешней поверхности обрабатываемой листовой заготовки.

На рис. 5 для первого полупериода низкочастотного поля показаны временные зависимости полей источников в отдельности. Отметим, что на обоих графиках зависимость от времени сформулирована в терминах фазы низкочастотного поля – $\varphi = \omega_1 \cdot t$. Графики расположены таким образом, чтобы наглядно иллюстрировать необходимую взаимосвязь временных функций низкочастотного и высокочастотного полей.

На рис. 6, опять же для первого полупериода низкочастотного поля, показано развитие во времени результирующего электромагнитного процесса над обрабатываемой листовой заготовкой.

Как следует из графической зависимости, спад поля над заготовкой (физически – это соответствует росту сил притяжения листа) произойдёт за $\Delta\varphi \approx (0,05 \div 0,1) \cdot \pi$ или (в терминах времени) за промежуток, приблизительно равный четверти периода высокочастотного сигнала, $\Delta t \approx (6,25 \div 12,5) \cdot 10^{-6}$ с.

Из зависимости на рис. 6 следует, что первое силовое воздействие на заготовку в направлении к индукторам носит ударный характер и ожидается весьма «резким».

Практические выводы настоящего рассмотрения можно свести к следующим основным положениям:

- рассмотренная индукторная система с двумя источниками магнитного поля (катушечные индукторы, генерирующие низкочастотное ≈ 2 кГц и высокочастотное ≈ 40 кГц магнитные поля) позволяет получить на внешней стороне стального листа толщиной 0,8 мм поле, напряжённость которого составляет не более $\approx 20\%$ от амплитудного значения линейной плотности тока в обмотке низкочастотного индуктора;
- пространственная область, где может быть реализован эффект притяжения есть кольцо с размерами высокочастотного индуктора и расположенное под ним (ширина ≈ 10 мм, внутренний диаметр ≈ 25 мм);

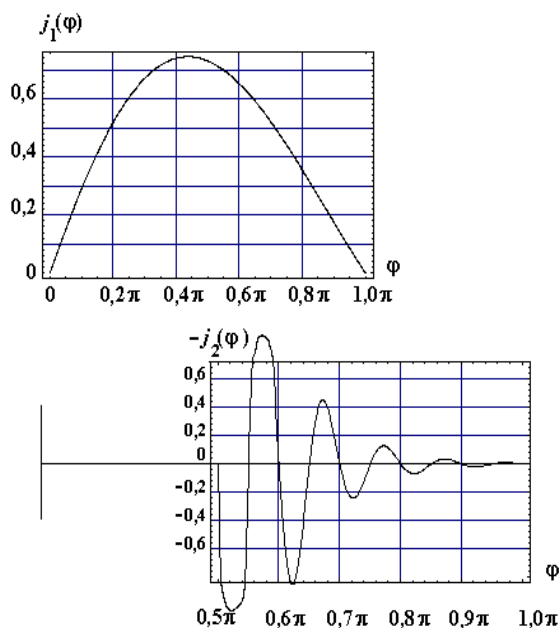


Рис. 5. Временные зависимости для низкочастотного (верхний график) и высокочастотного (нижний график) плотностей токов в индукторах с фазировкой друг относительно друга, необходимой для реализации эффекта притяжения заготовки.

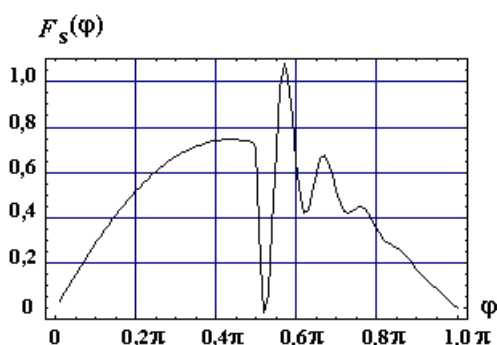


Рис. 6. Временная функция для результирующего поля на внутренней поверхности стального листа (в зависимости от фазы низкочастотного поля).

• время нарастания поля притяжения составляет $(6,25 \div 12,5) \cdot 10^{-6}$ с, что приблизительно соответствует четверти периода высокочастотного поля.

Выводы

1. Проведен анализ электромагнитных процессов в двухчастотных индукторных системах – инструментах внешней магнитно-импульсной рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов.
2. По полученным аналитическим зависимостям построены графики распределения амплитудных значений напряженности возбуждаемого магнитного поля для рассматриваемой двухчастотной индукторной системы.
3. Определена рабочая область двухчастотной индукторной системы, где может быть реализован эффект притяжения – кольцо высокочастотного индуктора.

Литература

1. Бажинов А. В. Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобильной промышленности / А. В. Бажинов, Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин // *Автомобильный транспорт*. – Харків: ХНАДУ, 2005. – Вып. 16. – С. 349-353.
2. Пат. 3,998,081 USA (США), B21D 26/14. Electromagnetic dent puller / Hansen Karl A., Hendrickson Glen I.; заявитель и патентообладатель The Boeing Company, Seattle, Wash. – № 489,290 ; заявл. 17.07.1974; опубл. 21.12.1976.
3. Batygin Yuri V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – *Fundamentals and perspective applications* / Yuri V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov // *Journal of Materials Processing Technology*. – Elsevier. – 2013. – № 213 (3). – P. 444–452.
4. *Electromagnetic Dent Removal: onsite repairs in minutes* [Электронный ресурс] – 2013. – Режим доступа: http://www.boeing.com/commercial/aviationservices/brochures/34241_ElectDentRemoval04-05.pdf.
5. *Electromagnetic Dent Removal* [Электронный ресурс] – 2013. – Режим доступа: <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp>.
6. *Need an electromagnetic dent remover on hand. Fluxtronic offers the best: the Portable Flux 3 dent remover* [Электронный ресурс] – 2013. – Режим доступа: <http://www.fluxtronic.com/product.php>.
7. Бондаренко А. Ю. Электромагнитные процессы в плоской индукторной системе с двумя катушками при равномерном распределении в ней поверхностных токов / А. Ю. Бондаренко // *Электротехника і електромеханіка*. – 2012. – №3. – С. 61 – 65.
8. Далека В. Ф. Расчёт двухчастотных индукторных систем – инструментов внешней магнитно-импульсной рихтовки автомобильных кузовов / В. Ф. Далека, А. Ю. Бондаренко, А. А. Степанов // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2014. – № 3/1 (17). – С. 53-58.
9. Batygin Yuri V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – *Fundamentals and perspective applications* / Yuri V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov // *Journal of Materials Processing Technology*. – Elsevier. – 2013. – № 213 (3). – P. 444–452.
10. Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. *Магнитно-импульсные технологии бесконтактной рихтовки кузовных элементов автомобиля: монография* / А. В. Гнатов, Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 242 с.
11. Батыгин Ю. В. *Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов, Т.2.* / Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский. – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2002. – 288 с.

Автор: БОНДАРЕНКО Александр Юрьевич
Национальный технический университет «ХПИ»,
к. т. н., старший научный сотрудник, доцент.
E-mail – bond.ayu@mail.ru

Автор: ДАЛЕКА Василий Фомич
Харьковский национальный университет городского
хозяйства шимени А.Н. Бекетова, д. т. н., професор.
E-mail – dalekavf@ukr.net

Автор: ГАВРИЛОВА Тетяна Володимирівна
Харьковский национальный автомобильно-
дорожный университет, к. ф.-м. н., доцент.
E-mail – gavrilovatv21@mail.ru

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ У ДВОХЧАСТОТНИХ ІНДУКТОРНИХ СИСТЕМАХ – ІНСТРУМЕНТАХ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО РИХТУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ КУЗОВІВ

О.Ю. Бондаренко, В.Х. Далека, Т.В. Гаврилова

У статті проведено аналіз електромагнітних процесів в двочастотних індукторних системах-інструментах зовнішнього магнітно-імпульсного рихтування вм'ятин в металевих покриттях автомобільних кузовів. Побудовано графіки розподілу амплітудних значень напруженості збуджуваного магнітного поля для індукторної системи, що розглядається. Визначена робоча область притягання листового металу.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка металів, індукторна система, інструмент рихтування, магнітно-імпульсне рихтування, автомобільні кузови.

ANALYSIS OF THE PROCESSES IN THE TWO-FREQUENCY INDUCTOR SYSTEMS – THE TOOLS OF THE EXTERNAL MAGNETIC-PULSE STRAIGHTENING OF THE AUTOMOBILE CAR BODIES

A. Bondarenko, V. Daleka, T. Gavrilova

The analyzes of the electromagnetic processes in the two-frequency inductor systems as tools of the external magnetic-pulse straightening dents in the metallic coatings of the body car had been provided in the article. The graphs of the distribution amplitude values tension of the excited magnetic field for the inductor system had been constructed. The work area of the attraction of the sheet metal has been defined.

Key words: Magnetic-pulse treatment of metals, inductor system, tool of the straightening, magnetic-pulse straightening, car bodies.