

УДК 621.318

**А. Ю. БОНДАРЕНКО**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;  
**В. Б. ФИНКЕЛЬШТЕЙН**, д-р техн. наук, проф., ХНУГХ им. А. Н. Бекетова,  
 Харьков;  
**Т. В. ГАВРИЛОВА**, канд. физ.-мат. наук, доц., ХНАДУ, Харьков

### **ВНЕШНЯЯ РИХТОВКА КУЗОВОВ АВТОТРАНСПОРТА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ПРЯМОМ ПРОПУСКЕНИИ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА**

В статье предложены принципиальные решения модельных конструкций электродинамических систем, принцип действия которых основан на силовом взаимодействии параллельных проводников с однонаправленными токами, позволяющими устранить вмятины в кузовах автомобилей. Продемонстрировано реальную работоспособность предложенного инструмента внешней магнитно-импульсной рихтовки конкретными вычислениями.

**Ключевые слова:** внешняя рихтовка, индукторная система, однонаправленный ток.

**Постановка проблемы.** В результате механического воздействия в металлических кузовах автомобилей возможно появление вмятин различного размера сфероидальной или конической формы. Традиционная рихтовка с внутренней стороны кузовной обшивки зачастую невозможна из-за отсутствия доступа, так как здесь могут присутствовать рёбра жёсткости, разного рода электротехническое, электронное и другое оборудование [1].

**Анализ публикаций.** Описание традиционных подходов к устранению вмятин в металлических обшивках автомобильных кузовов контактными механическими методами дано, например, в [2]. Не останавливаясь на перечислении недостатков, связанных с физическими основами их действенности, следует отметить появление прогрессивных предложений по использованию магнитно-импульсных методов притяжения заданных участков листовых металлов, позволяющих осуществлять операции рихтовки с внешней стороны автомобильного кузова без какого-либо механического контакта с возможным сохранением защитного лакокрасочного покрытия [3,4,5]. Аналогично известным обрабатывающим технологиям в машиностроении магнитно-импульсные методы кузовного ремонта реализуются с помощью оборудования, включающего две основные составляющие: источник мощности и инструмент [6]. Последний, в специальной литературе получил название «индукторной системы», и представляет собой технически довольно сложное устройство, принцип действия которого основан на силовом взаимодействии полей и токов. В ряде случаев, когда требование сохранения защитного покрытия не является определяющим и допускается контакт с объектом обработки, инструмент магнитно-импульсного метода можно упростить, если использовать «прямое пропускание тока» через металл устраняемой вмятины. Впервые принципиальное предложение такого рода было сформулировано авторами работ [7,8]. Помимо технической простоты, его несомненным достоинством является возможность работы как с магнитными (сталь), так и с немагнитными (алюминий) металлами кузовных покрытий автомобилей. Практическая реализация инструментов с «прямым пропусканием тока» требует дальнейших разработок конструктивного исполнения с последующей практической апробацией.

**Цель настоящей работы** – предложение принципиальных решений, а также теоретическое и экспериментальное обоснование работоспособности модельных

© А. Ю. Бондаренко, В. Б. Финкельштейн, Т. В. Гаврилова, 2014

конструкций электродинамических систем, принцип действия которых основан на силовом взаимодействии параллельных проводников с однонаправленными токами, позволяющих устранить (рихтовку) вмятин в кузовах автомобилей.

**Оборудование.** В целом, комплекс для рихтовки вмятин в кузовных элементах автомобилей показан на рис. 1а. Как было ранее отмечено, он состоит из двух крупных составляющих: первая – это источник мощности, обеспечивающий питание инструмента, а вторая составляющая – это собственно инструмент метода.

Источник мощности (в общепринятых терминах специальной литературы – это магнитно-импульсная установка [6]) включает зарядное устройство, батарею емкостных накопителей, коммутаторы и др.

Инструмент метода, получивший в специальной литературе название – «индукторная система» [6], включает исполнительный орган – «основной токопровод» или просто «индуктор» и металл участка с вмятиной – «обрабатываемую заготовку».

Один из вариантов конструктивного исполнения предлагаемого инструмента для удаления вмятин с параллельным подсоединением основного токопровода и участка листовой заготовки с вмятиной иллюстрируется схемой на рис. 1б.

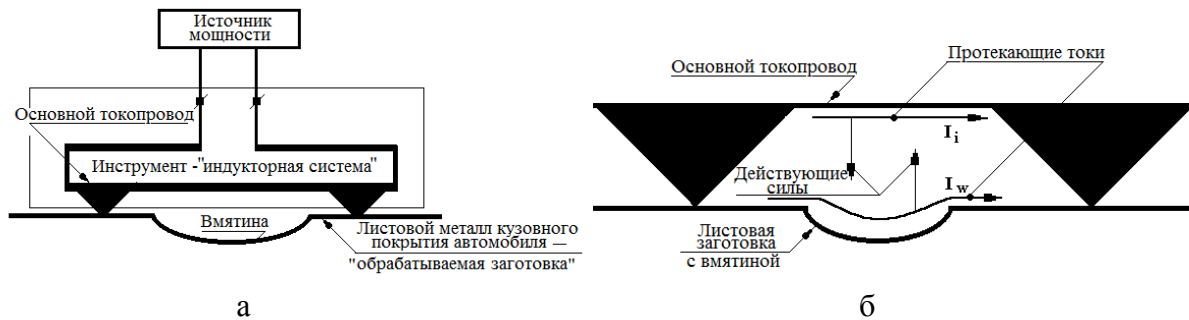


Рисунок 1 – Схематическая иллюстрация комплекса для рихтовки с инструментом, принцип действия которого основан на притяжении проводников с однонаправленными токами (закон Ампера): а принципиальная схема комплекса в целом; б физическая схема возбуждения механических сил притяжения при взаимодействии тока в основном токопроводе –  $I_i$  с током в металле листовой заготовки с вмятиной –  $I_w$ .

Через кабель высокого напряжения индукторная система подключается к источнику мощности. Рабочая часть инструмента – индуктор накладывается на поверхность кузова с вмятиной (напомним, что в специальных терминах – эта часть кузова названа «обрабатываемой заготовкой»). Электрические выводы основного токопровода – индуктора должны войти в плотный электрический контакт с металлом обшивки кузова и обеспечить минимальное переходное сопротивление.

В реальных условиях это может обеспечиваться, например, притяжением за счёт применения мощных электромагнитов, которые устанавливаются по краям основного токопровода непосредственно в области контактов. Может оказаться, что таковые не нужны совсем, и для обеспечения требуемого контакта будет вполне достаточно физического усилия со стороны оператора, работающего с инструментом. В конечном итоге, каким образом должен осуществляться требуемый электрический контакт будет зависеть от токового режима работы инструмента. Ответ на данный вопрос могут дать только исследования с конкретной работоспособной электродинамической системой, практически позволяющей выполнение заданной производственной операции.

**Работа комплекса.** После подачи источником мощности импульса напряжения на электрический вход индукторной системы, в её цепи (состоит из токопроводов, основного токопровода и участка металлического кузова с вмятиной) будет протекать ток. В рабочей зоне индукторной системы (область вмятины) этот ток в соответствии электрической схемой параллельного соединения проводников разделяется и будет протекать по контурам: первый – это основной токопровод индуктора (ток –  $I_i$ ), а второй – это участок кузова с вмятиной (ток –  $I_w$ ). Токи в элементах указанного контура будут иметь одинаковое направление. По закону Ампера между ними возникают мощные ponderomotorные силы, под действием которых произойдёт притяжение деформированного участка кузова к жёстко зафиксированному основному токопроводу – индуктору.

В результате, реализуется предлагаемая производственная операция по устранению вмятины в обшивке кузова автомобиля.

Следует отметить, что параллельное электрическое соединение основного токопровода индуктора и металла кузова – обрабатываемой заготовки не обязательное условие практической действенности данной электродинамической системы. Соединение может быть и последовательным. Главным требованием работоспособности является требование протекания токов в одном направлении.

**Оценка электродинамических и температурных показателей.** Поскольку классическая формулировка закона Ампера дана для постоянных токов в вакууме [9], расчёты параметров протекающих электромагнитных процессов, возбуждаемых механических усилий и возможных температурных режимов в первом приближении можно провести именно для этой идеализации. Хотя практически, токовые импульсы, у которых время нарастания и спада много меньше длительности собственно сигнала, можно считать «постоянными» при достижении амплитудного значения.

Для проведения расчётов необходимо выбрать конкретную модель инструмента, позволяющую реализацию ранее сформулированного принципа действия. В качестве таковой возьмём конструкцию и соответствующую электрическую схему замещения, представленные на рис.2.

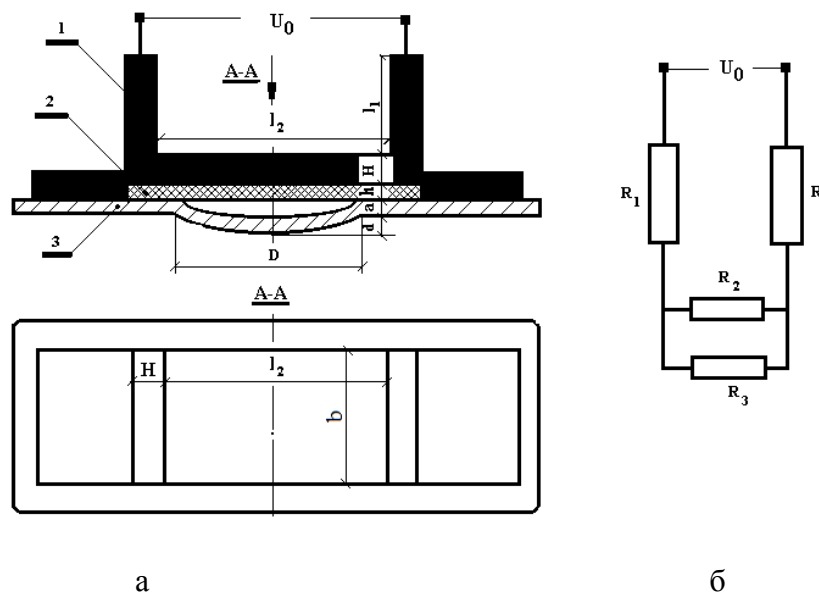


Рисунок 2 – Расчётная модель: а конструкция; б электрическая схема замещения

**Постановка задачи.**

Дано:

1) Соответственно рисунку индуктор представляет собой металлический виток прямоугольной формы со сторонами:  $l_1$  – длина токоподводов;  $l_2, b, H$  – длина, ширина, толщина основного токопровода, соответственно, общая длина токоподводов и основного токопровода –  $l = 2l_1 + l_2$ .

2) Основание индуктора (основной токопровод) – рабочая зона отделяется от листовой заготовки изолирующей прокладкой толщиной –  $h$ .

3) Электрическое соединение прямоугольного витка индуктора с листовой заготовкой осуществляется по основаниям двух уголков, расположенных с внешних сторон токоподводов.

4) Листовая заготовка – стальной лист с удельной электропроводностью:  $\gamma_w = 0,15 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$  (данное значение электропроводности – минимальная величина для существующих сталей).

5) Размеры листовой заготовки в рабочей зоне:  $l_2$  – длина,  $b$  – ширина,  $a$  – толщина.

6) В листовой заготовке существует вмятина полусферической формы с диаметром на поверхности листа –  $D$ , глубиной –  $d$ .

Найти:

1) Ток в индукторе –  $I_i$ , обеспечивающий развитие силового воздействия с амплитудой –  $F$ .

2) Температуры нагрева индуктора и заготовки при протекании тока в индукторе –  $I_i$ .

**Расчётные соотношения.**

При подключении напряжения к токоподводам индуктора в системе протекает суммарный ток –  $I$ , разветвляющийся по двум параллельным контурам, первый из которых – это основание витка (основной токопровод), второй – часть листовой заготовки, находящейся в рабочей зоне.

Ток в рабочей зоне витка (основание) –  $I_i$ , ток в заготовке (область вмятины в металле кузова) –  $I_w$ .

Общий ток –  $I = I_i + I_w$ .

Токи протекают в одном направлении, следовательно, между основанием витка индуктора и листовой заготовкой согласно рис.2а будет иметь место притяжение с силой –  $F$ , определяемой законом Ампера [9].

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I_i \cdot I_w \cdot \frac{D}{(d + h)}, \quad (1)$$

где  $(d + h)$  – расстояние между проводниками,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

При равенстве площадей основного токопровода и деформируемого участка заготовки токи в параллельных контурах, согласно электрической схеме замещения связаны, соотношением [10]

$$I_w = I_i \cdot \frac{1}{\alpha}, \quad (2)$$

где  $\alpha = \frac{\gamma_i \cdot H}{\gamma_w \cdot a}$ .

Подставляя (2) в (1), находим, что заданную величину силы воздействия на листовую заготовку можно получить при токе

$$I_i = \sqrt{2\pi \cdot \alpha \cdot \frac{F}{\mu_0} \cdot \frac{(d+h)}{D}} \quad (3)$$

Суммарное сопротивление индукторной системы (включая виток и заготовку) в соответствии с электрической схемой замещения при постоянном токе будет равно [10]:

$$R = \frac{1}{\gamma_i} \cdot \frac{l_2}{H \cdot b} \cdot \left[ 2 + \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{\alpha}{1 + \alpha} \right]. \quad (4)$$

Температуры нагрева индуктора и заготовки при протекании прямоугольного импульса тока с длительностью –  $t_i$  может быть вычислена по формулам

а) индуктор,

$$\Delta T_i^o = \left( \frac{I_i}{b \cdot H} \right)^2 \cdot \frac{t_i}{\gamma_i \cdot \rho_i \cdot c_i}, \quad (5)$$

где  $\rho_i, c_i$  – плотность и удельная теплоёмкость материала индуктора;

б) заготовка,

$$\Delta T_w^o = \left( \frac{I_w}{b \cdot a} \right)^2 \cdot \frac{t_i}{\gamma_w \cdot \rho_w \cdot c_w}. \quad (6)$$

где  $\rho_w, c_w$  – плотность и удельная теплоёмкость материала заготовки.

### Пример расчёта.

Задано:

1. Геометрия системы:

$$l_1 = l_2 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; b = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; a = 10^{-3} \text{ м}; H = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$d = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}, h = 10^{-3} \text{ м}, D = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

2. Пусть виток индуктора выполнен из меди. Обрабатывается листовая заготовка из стали. Физические параметры металлов:

$$\text{медь} - \gamma_{cu} = 6 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}, \rho_{cu} = 9000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, c_{cu} = 437 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$\text{сталь} - \gamma_{steel} = 0.15 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}, \rho_{steel} = 7500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, c_{steel} = 483 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

3. Необходимые силы притяжения по справочным данным:  
 $F \leq 1000 \text{ Н}$ .

Вычисления:

1) формула (2):  $\alpha = \frac{\gamma_i}{\gamma_w} \cdot \frac{H}{a} = \frac{6 \cdot 10^7}{0.15 \cdot 10^7} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-3}}{10^{-3}} = 80;$

2) ток в индукторе, формула (3):

$$I_i = \sqrt{2\pi \cdot \alpha \cdot \frac{F}{\mu_0} \cdot \frac{(d+h)}{D}} = \sqrt{2\pi \cdot 80 \cdot \frac{1000}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-2}}} \approx 200 \text{ кА};$$

3) ток в заготовке, формула (2):

$$I_w = \frac{I_i}{\alpha} = \frac{200}{80} = 2,5 \text{ кА}.$$

**Примечание.**

Если токи одинаковы, то их амплитуды для развития заданной величины силы должны составлять  $I_i \approx I_w \approx 22 \text{ кА}$ .

4) Нагрев индуктора, формула (5):

$$\Delta T_i^o = \left( \frac{I_i}{b \cdot H} \right)^2 \cdot \frac{t_i}{\gamma_i \cdot \rho_i \cdot c_i} \approx 10^4 \cdot t_i.$$

Во временном интервале –  $t_i \leq 10^{-3} \text{ с}$  повышение температуры нагрева должно составить  $\sim \Delta T_i^o \leq 10^\circ$ .

5) Нагрев заготовки, формула (6):

$$\Delta T_w^o = \left( \frac{I_w}{b \cdot a} \right)^2 \cdot \frac{t_i}{\gamma_w \cdot \rho_w \cdot c_w} \approx 372 \cdot t_i.$$

Во временном интервале –  $t_i \leq 10^{-3} \text{ с}$  повышение температуры нагрева должно составить  $\sim \Delta T_i^o \leq 0.372^\circ$ .

**Выводы.** Полученные результаты показали, что

- для внешней рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов в качестве инструмента предложена электродинамическая система, принцип действия которой основан на силовом взаимодействии однонаправленных больших токов;

- вычисления, выполненные для принятой модели электродинамической системы с прямым пропуском постоянного тока, продемонстрировали реальную

работоспособность предложенного инструмента внешней магнитно-импульсной рихтовки.

**Список литературы.** 1. *Бажинов А. В.*, Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобильной промышленности. / *А. В. Бажинов, Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин* //Сб. научных трудов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. - Харьков. - 2005. - Выпуск 16. - С.349-353. 2. <http://auto-remont.com.ua/rihtovka.html>. 3. *Meichtry R.*, Dent Removing Method and Device. International Patent Application WO2006/119661 A1, 2006. 4. *Batygin Y. V.*, Pulsed Electromagnetic Attraction of Sheet Metals – Fundamentals and Perspective Applications / *Y. V. Batygin., S. F. Golovashchenko, A. V. Gnatov* //Journal of Materials Processing Technologies. – Elsevier: 2013. 213, PP. 444-452. 5. *Batygin Y. V.*, Pulsed Electromagnetic Attraction of non-magnetic Sheet Metals. Applications / *Y. V. Batygin., S. F. Golovashchenko, A. V. Gnatov* // Journal of Materials Processing Technologies. – Elsevier: 2014. 214, PP. 390-401. 6. *Батыгин Ю. В.*, Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 1. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / *Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Л. Т. Хищенко* // Издание второе, переработанное и дополненное. Под общей ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю. В.– Харьков: изд. МОСТ-Торнадо. 2003. – 284 с. 7. *Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хищенко Л. Т.*, Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов.// *Електротехніка і електромеханіка*. Харків. 2004, №2, С.80-84. 8. *Батыгин Ю. В.*, Инструмент для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок / *Ю. В. Батыгин, В. И. Лавинский, Л. Т. Хищенко* //Авиационно-космическая техника и технология.2007.№11(47). – СС.44 – 51. 9. *Яворский Б. М.* Справочник по физике / *Б. М. Яворский, А. А. Детлаф*. – М.: Наука, 1974. – 940 с. 10. *Нейман Л. Р., Демирчян К. С.*, Теоретические основы электротехники. Часть 2. Теория линейных электрических цепей / *Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян* – Л.: Энергия, 1967. – 340 с.

*Надійшла до редколегії 01.02.2014*

УДК 621.318

**Внешняя рихтовка кузовов автотранспорта с помощью электродинамических систем при прямом пропускании импульсного тока / А. Ю. Бондаренко, В. Б. Финкельштейн, Т. В. Гаврилова** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 9 (1052). – С. 66-72. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-6840.

У статті запропоновані принципи рішення модельних конструкцій електродинамічних систем, принцип дії яких заснований на силовому взаємодії паралельних провідників з односпрямованими струмами, що дозволяють усунення вм'ятин в кузовах автомобілів. Продемонстровано реальну працездатність запропонованого інструменту зовнішньої магнітно-імпульсної рихтування конкретними обчисленнями.

**Ключові слова:** зовнішнє рихтування, індукторна система, односпрямований струм.

**External straightening basket of the motor transport by means of electro dynamic of the systems at direct drive pulsed current / A. Yu. Bondarenko, V. B. Finkelishteyn, T. V. Gavrilova** // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Car- and tractorbuilding. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 9 (1052). – P. 66-72. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2078-6840.

The paper proposes the fundamental solution of model structures electrodynamic systems, whose operation is based on the force interaction of parallel conductors with unidirectional currents, allowing the removal of dents in the body of car. Proposed design concept tool for removing dents with parallel connection of the conduction and a site of sheet metal with a dent is offered. Demonstrated the real efficiency of the proposed instrument of external magnetoimpuls straightening by concrete calculations.

**Key words:** external straightening, induction system, unidirectional current.