

# ИНСТРУМЕНТ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА НА ОСНОВЕ СОВМЕЩЕННОГО СОГЛАСУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТИПА

*Ю.В. БАТЫГИН, доктор техн. наук, профессор  
А.В. ГНАТОВ, канд. техн. наук, доцент  
И.С. ТРУНОВА, аспирант  
(ХНАДУ, г. Харьков)*

Статья получена 01 марта 2013 года

**Трунова И.С.** – Украина, 61002, г. Харьков, ул. Петровского 25,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,  
e-mail: trynova\_irinka@mail.ru

Проведен анализ электромагнитных процессов в совмещенном согласующем устройстве, представляющем собой базовую составляющую инструмента бесконтактной магнитно-импульсной технологии устранения вмятин в листовых металлах. Предложенная конструкция представляет собой совмещение собственно согласующего устройства с исполнительным органом, что существенно повышает уровень энергии, передаваемой от источника мощности в зону силового воздействия на обрабатываемый объект. Интегрированием уравнений Максвелла получены аналитические выражения для компонент вектора электромагнитного поля, возбуждаемого в системе, и токов, индуцированных в металле вторичного витка рассмотренного конструктивного исполнения устройства. Показано, что для цилиндрической геометрии устройства, выполненного, например, из меди, и реальных в магнитно-импульсной обработке металлов временных параметров тока в первичной обмотке, коэффициент трансформации может достигать своего максимального значения, равного числу витков в первичной обмотке рассмотренного согласующего устройства. Результаты проведенных исследований полностью согласуются с данными, полученными из ранее опубликованных аналогичных зависимостей для подобных конструкций импульсных преобразователей тока, что подтверждает достоверность выводов настоящей работы. Проведенные экспериментальные исследования показали высокую эффективность совмещенного согласующего устройства цилиндрического типа для технологии бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная обработка металлов, внешняя магнитно-импульсная рихтовка, согласующее устройство, коэффициент трансформации.

## Введение

Разрабатываемые различные технические системы и комплексы, основанные на использовании энергии электромагнитных полей в современной промышленности, например в практике ремонта и восстановления поврежденных кузовных покрытий автомобилей, в наше время являются весьма актуальными и перспективными. В связи с этим возрастает необходимость в осуществлении различных технических разработок и усовершенствований всевозможных технических систем и устройств, которые по-

зволяют производить внешнюю бесконтактную магнитно-импульсную рихтовку [1–3]. К таким устройствам относятся согласующие устройства (СУ) – импульсные трансформаторы тока. Данные устройства применяют в практике магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) для повышения уровня энергии, передаваемой от мощных импульсных установок (источников мощности) в малоиндуктивные нагрузки – инструмент магнитно-импульсного воздействия [2, 4, 5].

Основной функцией СУ в технике МИОМ является преобразование амплитудно-временных

параметров тока при разряде емкостных накопителей, что позволяет существенно повысить величину силового воздействия на обрабатываемый объект [4, 5]. СУ условно можно разделить на две большие группы – дискового и цилиндрического типа.

Коллективом лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ предложена совмещенная конструкция СУ с индуктором [6]. Такая конструкция обеспечивает:

- повышение прочностных показателей;
- повышение уровня передачи энергии в рабочую зону инструмента;
- исключение так называемых переходных сопротивлений, которые возникают в местах подсоединения индуктора к СУ.

Подобные узкоспециализированные решения применялись в традиционной МИОМ (концентраторы) для обжима полых цилиндрических труб [4, 7–9].

**Цель работы** – анализ протекающих процессов в инструменте бесконтактной магнитно-импульсной технологии ремонта – совмещенном согласующем устройстве цилиндрического типа с определением его основных параметров и характеристик; экспериментальная апробация рассматри-

ваемого согласующего устройства как инструмента внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки кузовных панелей автомобилей.

## 1. Исследование электромагнитных процессов

Принятая расчетная модель и ее физическая реализация представлены на рис. 1.

Постановка задачи:

- принимается полярная система координат;
- первичную обмотку – катушку с достаточно плотным размещением витков (их число  $w$ ) можно считать цельнометаллическим полым цилиндром с внутренним и внешним радиусами  $R_3, R_4$  соответственно;
- вторичная обмотка – полый металлический цилиндр с внутренним и внешним радиусами  $R_1, R_2$  соответственно;
- цилиндры первичного и вторичного витков выполнены из одинаковых немагнитных металлов с удельной электропроводностью  $\gamma$ ;
- продольный  $\ell$  и радиальные размеры  $R_{1,2,3,4}$  рассматриваемой системы достаточно велики, так что  $\ell/R_{1,4} \gg 1$  и  $R_{1,2,3,4}/h \gg 1$ , где  $h = (R_3 - R_2)$  – расстояние между обмотками;

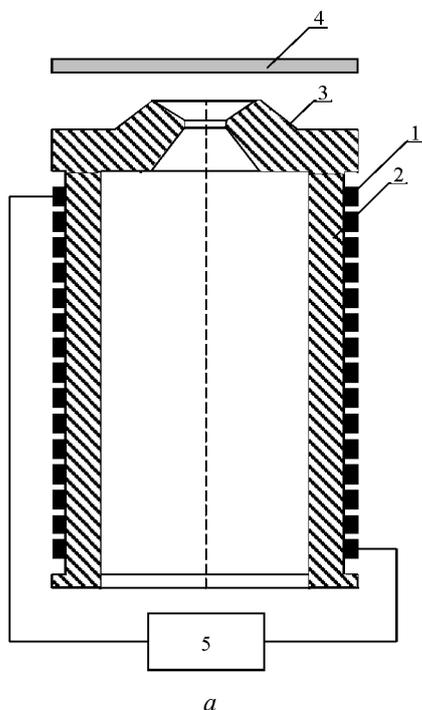


Рис. 1. Совмещенное согласующее устройство цилиндрического типа:

*a* – расчетная модель; *б* – физическая реализация;

1 – первичная обмотка; 2 – разомкнутый виток вторичной обмотки; 3 – индуктор-инструмент;  
4 – тонкостенная металлическая заготовка; 5 – магнитно-импульсная установка



– наличием продольного разреза во внутреннем цилиндре пренебрегаем и полагаем, что система обладает аксиальной симметрией, так что  $\partial/\partial\varphi \approx 0$  ( $\varphi$  – азимутальный угол);

– в первичной обмотке согласующего устройства имеет место только азимутальная составляющая плотности тока  $J(t) = J_m j(t)$ , где  $J_m$  – амплитуда;  $j(t)$  – временная зависимость;

– электромагнитные процессы удовлетворяют условию квазистационарности,  $\omega/c\ell \ll 1$ , где  $\omega$  – радиальная частота;  $c$  – скорость света в вакууме;  $\ell$  – наибольший характерный геометрический размер в системе.

Обозначим области с одинаковыми электрофизическими параметрами:

- 1 – внутренняя полость,  $r \in [0, R_1]$ ;
- 2 – металл внутреннего цилиндра,  $r \in [R_1, R_2]$ ;
- 3 – диэлектрическая полость между цилиндрами,  $r \in [R_2, R_3]$ ;
- 4 – металл внешнего цилиндра,  $r \in [R_3, R_4]$ ;
- 5 – свободное пространство вне системы,  $r \in [R_4, \infty)$ .

В принятой системе координат (в соответствии с постановкой задачи) составим уравнения Максвелла для ненулевых компонент вектора напряженности электрического и магнитного полей  $E_\varphi(r, t) \neq 0, H_z(r, t) \neq 0$ :

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\varphi(p, r)) = -\mu_0 p H_z(p, r), \\ -\frac{\partial H_z(p, r)}{\partial r} = p\epsilon_0 E_\varphi(p, r) \text{ (вакуум)}, \\ -\frac{\partial H_z(p, r)}{\partial r} = \gamma E_\varphi(p, r) \text{ (металл)}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;  $\mu_0, \epsilon_0$  – магнитная и диэлектрическая проницаемости свободного пространства;  $E_\varphi(p, r) = L\{E_\varphi(t, r)\}, H_z(p, r) = L\{H_z(t, r)\}$ .

Система уравнений (1) приводится к соответствующим дифференциальным уравнениям для напряженности электрического поля:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\varphi(p, r)) \right) - k_{1,2}^2(p) E_\varphi(p, r) = 0, \quad (2)$$

где  $k_1(p)$  – волновое число в металле,  $k_1(p) = \sqrt{p\mu_0\gamma}$ ;  $k_2(p)$  – волновое число в вакууме,  $k_2(p) = p/c$ .

Решая полученные уравнения известными методами математического анализа с применением интегрального преобразования Бесселя, как это выполнено в работах [1, 3, 5], опуская промежуточные выкладки, запишем систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных произвольных постоянных  $C_1, D_1, A_1$  в выражениях и тока, индуцированного во вторичной обмотке рассматриваемого согласующего устройства:

$$\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{R_1}} (C_1(p)e^{k_1(p)R_1} + D_1(p)e^{-k_1(p)R_1}) = \frac{A_1(p)R_1}{2}, \\ \frac{\gamma}{k_1(p)\sqrt{R_1}} (C_1(p)e^{k_1(p)R_1} - D_1(p)e^{-k_1(p)R_1}) = \frac{A_1(p)}{p\mu_0}, \\ \frac{\gamma}{k_1(p)\sqrt{R_1}} (C_1(p)e^{k_1(p)R_1} - D_1(p)e^{-k_1(p)R_1}) \approx \\ \approx \left( \frac{J_1(p) + J(p)w}{\ell} \right), \end{cases} \quad (3)$$

где  $J_1(p)$  –  $L$ -изображение тока, индуцированного в металле внутреннего цилиндра.

Исключив  $A_1(p)$ , находим связь следующего вида:

$$C_1(p)e^{k_1(p)R_1} = \left( \frac{k_1(p)R_1 + 2}{k_1(p)R_1 - 2} \right) D_1(p)e^{-k_1(p)R_1}. \quad (4)$$

Следует отметить, что рабочие частоты в технике МИОМ не превышают  $\sim 50 \dots 70$  кГц [4, 9]. Например, для  $f \sim 2$  кГц и реально возможных радиальных размеров рассматриваемой системы  $R_1 \approx 0,025 \dots 0,25$  м при  $\gamma = 6 \cdot 10^7$  1/Ом·м (медь) справедлива оценка:

$$\sqrt{\omega\mu_0\gamma} \cdot R_1 \gg 1 \quad \text{и} \quad |k_1(p) \cdot R_{1,2,3,4}| \gg 1. \quad (5)$$

Тогда при выполнении условия (5) выражение (4) принимает вид

$$C_1(p)e^{k_1(p)R_1} \approx D_1(p)e^{-k_1(p)R_1}. \quad (6)$$

Связь (6) подставим в третье уравнение системы (3). После перехода в пространство оригиналов находим, что

$$J_1(t) \approx -wJ(t). \quad (7)$$

Проводя сравнение результата (7) с аналогичной зависимостью для индуцированных токов в

СУ с двумя вторичными витками в виде коаксиальных полых цилиндров, между которыми размещена первичная многovitковая обмотка, можно судить о достоверности полученного результата [3]. В пределе, когда толщина внешнего цилиндра-витка стремится к нулю, индуцированный ток, так же как и в (7), пропорционален току индуктора с коэффициентом пропорциональности, равным числу витков в первичной обмотке.

Зависимости, полученные при проведении настоящих вычислений, приводят к следующему выводу: при достаточной длине системы ( $l \gg R_{\max}$ ,  $R_{\max}$  – максимальный радиус) и выполнении двойного неравенства (5) ( $\sqrt{\omega\mu_0\gamma \cdot R_{\min}} \gg 1$ ,  $R_{\min}$  – минимальный радиус) величина коэффициента трансформации по току достигает своего максимального значения, равного числу витков в первичной обмотке рассмотренного согласующего устройства.

Для подтверждения достоверности результатов теоретических исследований были проведены эксперименты с рассмотренным СУ.

## 2. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на магнитно-импульсной установке МИУС-2, разработанной в лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ, рис. 2 [10–12].



Рис. 2. Магнитно-импульсная установка МИУС-2 с кабельным подключением совмещенного СУ цилиндрического типа

МИУС-2 обладает следующими техническими характеристиками:

- запасаемая энергия  $W \sim 2$  кДж;
- напряжение питающей сети  $\sim 380/220$  В.
- емкость конденсаторов  $C = 1200$  мкФ;
- собственная частота  $f_0 \sim 7$  кГц;
- собственная индуктивность  $L \sim 440 \dots 500$  нГн;
- напряжение заряда емкостных накопителей  $U \sim 100 \dots 2100$  В;
- частота следования разрядных импульсов  $f_{\text{имп}} \sim 1 \dots 10$  Гц;
- тип коммутаторов – тиристорные ключи;
- режим работы:
  - а) аperiodический (разрядный импульс униполярной формы);
  - б) колебательный (разрядный импульс – затухающая синусоида).

В качестве образцов металла для проведения экспериментальных исследований используются обшивки кузовной панели автомобиля фирмы «Subaru» толщиной 0,8 мм.

Экспериментальные исследования предполагали создание и удаление вмятины магнитно-импульсным притяжением участка (область внутреннего отверстия индуктора) на поверхности листового образца стали кузовной панели автомобиля. Эксперименты проводились в режиме многократного повторения импульсов силового воздействия. Их количество позволяло дозировать интегральную энергию в зоне деформирования и, в конечном итоге, управлять процессом образования или устранения вмятины. Для создания вмятины было подано 20 силовых разрядных импульсов. Результат опыта: силовым

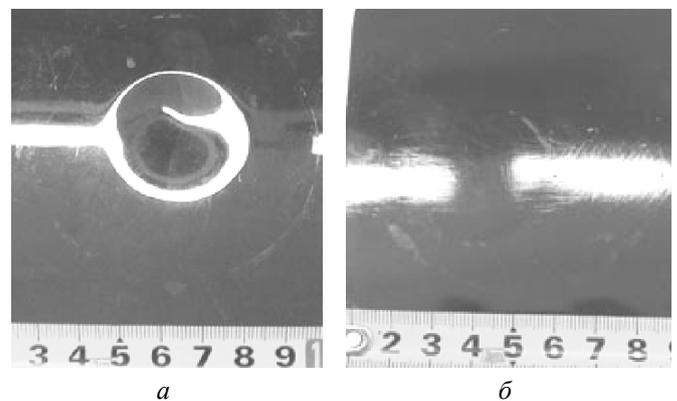


Рис. 3. Фрагмент обшивки кузова автомобиля «Subaru»:

а – образование вмятины; б – удаление вмятины

магнитно-импульсным притяжением на ровной поверхности образца была получена вмятина глубиной ~ 1,7 мм и диаметром ~ 40 мм [12] (рис. 3, а).

Устранение вмятины осуществлялось силовым магнитно-импульсным притяжением, было произведено 20 силовых разрядных импульсов, для втягивания металла вмятины до уровня поверхности листового образца (рис. 3, б). В результате эксперимента получено удовлетворительное выравнивание образца, лакокрасочное покрытие осталось **неповрежденным**.

### Выводы

1. Проведен анализ протекающих процессов в инструменте бесконтактной магнитно-импульсной технологии – совмещенном согласующем устройстве цилиндрического типа.

2. Получены аналитические зависимости для определения основных параметров и характеристик в исследуемом согласующем устройстве.

3. Определено, что коэффициент трансформации по току может достигать своего максимального значения, равного числу витков в первичной обмотке совмещенного согласующего устройства цилиндрического типа.

4. Проведена экспериментальная апробация исследуемого согласующего устройства как инструмента внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки кузовных панелей автомобилей.

5. Экспериментальные исследования показали высокую эффективность совмещенного согласующего устройства цилиндрического типа для технологии бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки.

### Список литературы

1. Батыгин Ю.В. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, С.А Щиголева // *Электричество*. – 2011. – № 4. – С. 55–62.

2. Батыгин Ю.В. Цилиндрический виток индуктора с разрезом как инструмент для магнитно-импульсной обработки металлов / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов // *Электричество*. – 2011. – № 12. – С. 53–59.

3. Батыгин Ю.В. Расчет электродинамических процессов в согласующем устройстве цилиндриче-

ского типа с двумя разомкнутыми вторичными витками / Ю.В. Батыгин А.В. Гнатов И.С. Трунова // *Вестник ХНАДУ*. – 2012. – В. 56. – С. 30–36.

4. Белый И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертник, Л.Т. Хименко. – Харьков: Вища школа, 1977. – 189 с.

5. Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов. – Т. 3. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с.

6. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Аргун Щ.В., Смирнов Д.О., Трунова И.С., Чаплыгин Е.А., Щиголева С.А. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок з використанням узгоджувального пристрою // Патент України № 69467. – 2012. – Бюл. № 8.

7. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 200 с.

8. Комельков В.С. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / В.С. Комельков, П.Н. Дашук, С.Л. Зайенц – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.

9. Батыгин, Ю.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, Л.Т. Хименко. – Т. 1, под ред. Ю.В. Батыгина. – 2-е изд. – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 284 с.

10. Батыгин, Ю.В. Экспериментальные исследования магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов / Ю.В. Батыгин, С.Ф. Головащенко, А.В. Гнатов [и др.] // *Электротехника и электромеханика*. – 2010. – № 3. – С. 39 – 41.

11. *Экспериментальные исследования согласующих устройств – импульсных трансформаторов тока, в бесконтактной рихтовке транспортных средств: Міжнародна науково-технічна конференція [«Науково-прикладні аспекти автомобільної галузі»]* (Луцк 2012 г.) / А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун, И.С. Трунова. – Луцк : Наукові нотатки, В.36. – 2012. – С. 53–57.

12. *Экспериментальные исследования импульсных трансформаторов тока – согласующих устройств цилиндрического типа в технике МИОМ. Часть 1. сборник трудов IV международной научно-технической конференция [«Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии»]*, (Тольятти, 24-25 апреля 2012 г.) / Ю.В. Батыгин А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун, И.С. Трунова, А.В. Гопко. – Тольятти : Издательство ТГУ. 2012. – 280 с. – С. 154–161.

## The tool of magnetic-pulse repair technology based on combined matching device of cylindrical type

Yu.V. Batygin, A.V. Hnatov, I.S. Trunova

Kharkiv National Automobile and Highway University, Petrovskogo st., 25  
Kharkov, 61002, Ukraine

### Abstract

The electromagnetic processes analysis in the combined matching device that is presented by some base component of the tool for the non-contact electromagnetic metal forming technology of the dents removing in the sheet metals is conducted. The proposed design is a combination of proper matching device with an executive body, which significantly increases the level of energy transmitted from the source of power in the area of impacts to the object being processed. Analytical expressions for the components of the electromagnetic field excited in the system, and the currents, induced in the secondary coil of the metal considered constructive of the device were obtained by integration of Maxwell's equations. It is shown that the cylindrical geometry of the device made of, e.g., copper and being in actual pulsed magnetic metal processing time the current in the primary winding, conversion coefficient can reach its maximum value equal to the number of turns in the primary winding of the matching device considered. Research results are entirely consistent with those obtained from a previously published similar relationships for similar designs DC switching converters, which confirms the reliability of the conclusions of this work. The experimental results showed the high efficiency of the combined matching device cylindrical type of contactless technology for magnetic pulse alignment.

**Keywords:** magnetic-pulse metal working, external magnetic-pulse straightening, matching device, transformer ratio.

### References

1. Batygin Ju.V., Gnatov A.V., Shhigoleva S.A. *Jelektrichestvo*, 2011, no. 4, pp. 55-62.
2. Batygin Ju.V., Gnatov A.V. *Jelektrichestvo*, 2011, no. 12, pp. 53-59.
3. Batygin Ju.V., Gnatov A.V., Trunova I.S. *Vestnik KhNAHU*, 2012, no. 56, pp. 30-36.
4. Belyj I.V., Fertik S.M., Himenko L.T. *Spravochnik po magnitno-impul'snoj obrabotke metallov* (Magnetic pulse treatment of metals. Reference-book), Kharkov, Vishha shkola, 1977. 189 p.
5. Turenko A.N., Batygin Ju.V., Gnatov A.V. *Impul'snye magnitnye polja dlja progressivnyh tehnologij. Teorija i jeksperiment pritjazhenija tonkostennyh metallov impul'snymi magnitnymi poljami*. (Pulsed magnetic fields for progressive technologies. Theory and experiment of attraction of thin-walled metal pulsed magnetic fields), Kharkov, KhNAHU, 2009, vol. 3, 240 p.
6. Batygin Ju.V., Gnatov A.V., Argun Shh.V., Smirnov D.O., Trunova I.S., Chaplygin E.A. Shhigoleva S.A. *Sposib magnitno-impul'snoi' obrobky tonkostinnyh metalevyh zagotovok z vykorystannjam uzgodzhuval'nogo prystroju* (Method of magnetic pulse processing thin metal blanks using a matching device)/ Ukraine Patent no. 69467. 2012. Bulletin no. 8.
7. Shneerson G.A. *Polja i perehodnye processy v apparature sverhsil'nyh tokov* (Fields and transients in equipment of ultrastrong currents). Leningrad, Jenergoizdat, 1981. 200 p.
8. Komel'kov V.S., Dashuk P.N., Zajenc S.L. *Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej* (Technique high pulse currents and magnetic fields). Moscow, Atomizdat, 1970. 472 p.
9. Batygin Ju.V., Lavinskij V.I., Himenko L.T. *Impul'snye magnitnye polja dlja progressivnyh tehnologij* (Pulse magnetic fields for progressive technologies). Kharkov, MOST-Tornado, Vol.1, Second edition, 2003. 284 p.
10. Batygin Ju.V., Golovashhenko S.F., Gnatov A.V. *Jelektrotehnika i jelectromehanika*, 2010, no. 3, pp. 39-41.
11. Gnatov A.V., Argun Shh.V., Trunova I.S. *Mizhnarodna naukovo-tehnichna konferencija "Naukovo-prykladni aspekty avtomobil'noi' galuzi"* (International Scientific Conference "Scientific and applied aspects of the automotive industry"), Lutsk, Naukovi notatky, 2012. V. 36, pp. 53-57.
12. Batygin Ju.V., Gnatov A.V., Argun Shh.V., Trunova I.S., Gopko A.V. *«Problemy jelektrotehniki, jelektrojenergetiki i jelektrotehnologii»: sbornik trudov IV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencija* ("Problems electrical engineers, electric power industry and electrotechnology": Proceedings IV International Scientific and Technical Conference), Part 1, Togliatti, TSU, 2012, pp. 154-161.