

УДК 621.318.4

РИХТОВКА КУЗОВНЫХ ПАНЕЛЕЙ ИНДУКЦИОННОЙ ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГЕОМЕТРИИ С ТОНКОСТЕННЫМ ЭКРАНОМ

**А. В. Гнатов, доц., к. т. н., Е. А. Чаплыгин, доц., к. т. н.,
С. А. Шиндерук, асп., О. С. Сабокар, студ.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**

***Аннотация.** Проведена практическая апробация внешней магнитно-импульсной рихтовки с определением электромагнитных характеристик силовых импульсов при использовании в качестве инструмента индукционной индукторной системы цилиндрической геометрии с круговыми витками. Приведены измеренные осциллограммы силовых токовых импульсов. Продемонстрирована действенность исследуемого инструмента рихтовки.*

***Ключевые слова:** магнитно-импульсная рихтовка, индукционная индукторная система, силовой импульс, кузовной ремонт.*

РИХТУВАННЯ КУЗОВНИХ ПАНЕЛЕЙ ІНДУКЦІЙНОЮ ІНДУКТОРНОЮ СИСТЕМОЮ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ГЕОМЕТРІЇ З ТОНКОСТІННИМ ЕКРАНОМ

**А. В. Гнатов, доц., к. т. н., Є. О. Чаплигін, доц., к. т. н.,
С. О. Шиндерук, асп., О. С. Сабокар, студ.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

***Анотація.** Проведено практичну апробацію зовнішнього магнітно-імпульсного рихтування з визначенням електромагнітних характеристик силових імпульсів під час використання як інструменту індукційної індукторної системи циліндричної геометрії з круговими витками. Наведено вимірні осцилограми силових струмових імпульсів. Продемонстровано дієвість досліджуваного інструменту рихтування.*

***Ключові слова:** магнітно-імпульсне рихтування, індукційна індукторна система, силовий імпульс, кузовний ремонт.*

STRAIGHTENING OF THE CAR BODY PANELS BY INDUCTION INDUCTOR SYSTEM OF CYLINDRICAL GEOMETRY WITH A THIN-WALLED SCREEN

**A. Gnatov, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.), E. Ghaplygin, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.),
S. Shinderuk, P. G., O. Sabokar St.,
Kharkiv National Automobile and Highway University**

***Abstract.** The practical testing of the external magnetic pulse straightening with determination of the electromagnetic characteristics of the power pulses with the usage of the induction inductor system of cylindrical geometry with circular turns as a tool has been done. The measured oscillograms of the power current pulses have been done. The efficiency of the test straightening tool has been demonstrated.*

***Key words:** magnetic pulse straightening, induction inductor system, power pulse, body repair.*

Введение

Магнитно-импульсная рихтовка имеет несомненные преимущества перед известными традиционными методами устранения вмятин. Среди таких преимуществ наиболее весомым

является эффективное бесконтактное силовое воздействие, которое осуществляется с внешней стороны поверхности рихтуемого элемента. Это приобретает особое значение при невозможности доступа изнутри для выравнивания поврежденной металлической по-

верхности. Таким образом, отпадает необходимость в разборке и демонтаже ремонтируемых элементов кузовных конструкций и появляется возможность восстановления поврежденной поверхности кузовной панели автомобиля без подготовительных ремонтных операций [1–3].

Наибольший интерес вызывают инструменты, позволяющие производить рихтовку кузовных панелей автомобилей с использованием энергии импульсных магнитных полей. К таким инструментам относятся индукционные индукторные системы (ИИС) – универсальные инструменты внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки [3–7].

Анализ публикаций

В основу принципа действия ИИС положен закон Ампера [4–9]. В отличие от индукторных систем, основанных на естественном притяжении ферромагнетиков при понижении рабочих частот действующих полей, ИИС представляют собой техническое решение. Здесь, помимо собственно индуктора-источника магнитного поля и листовой заготовки (кузовная панель автомобиля), вводится дополнительный конструктивный элемент. Это так называемый дополнительный или вспомогательный экран. Он располагается параллельно и симметрично относительно плоскости индуктора к обрабатываемому листовому металлу [4–6, 8–10]. Если экран и заготовка идентичны, то в них возбуждаются одинаковые токи (речь идёт о величине, временной зависимости и направлении). Их магнитное взаимодействие приводит к взаимному притяжению. При жёсткой фиксации дополнительного экрана деформироваться будет только листовая заготовка, т. е. её участок в рабочей области ИИС будет притягиваться к индуктору [4, 8, 9, 11].

Авторами работ [4–7, 10–12] проведен подробный анализ протекания электромагнитных процессов в ИИС. В работах [10, 12–15] отражены некоторые аспекты практической апробации ИИС. На данный момент остаются открытыми вопросы практической апробации ИИС с тонкостенным дополнительным экраном и основным и дополнительным витками.

Цель и постановка задачи

Цель работы – практическая апробация внешней магнитно-импульсной рихтовки с определением электромагнитных характеристик

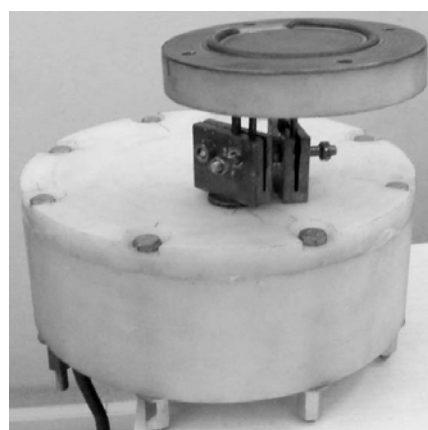
силовых импульсов при использовании в качестве инструмента индукционной индукторной системы цилиндрической геометрии с круговыми витками, расположенными с разных сторон тонкостенного дополнительного экрана.

Условия эксперимента. Оборудование

Экспериментальные исследования проводились на оборудовании лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ. В качестве источника мощности использовалась магнитно-импульсная установка МИУС-2, внешний вид, технические характеристики и параметры которой приведены ниже на рис. 1, а. Для согласования по индуктивной нагрузке источника мощности с инструментом внешней магнитно-импульсной рихтовки использовалось специально разработанное (в ХНАДУ) согласующее устройство (СУ) дискового типа (рис. 1, б) [3, 16, 17].



а



б

Рис. 1. Внешний вид экспериментального оборудования: а – МИУС-2 с подключенным СУ; б – СУ дискового типа с подключенным инструментом внешней магнитно-импульсной рихтовки – индукционной индукторной системой

Технические характеристики МИУС-2:

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

В качестве инструмента внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки исследуется ИИС цилиндрической геометрии с круговыми витками (основным и разветвленным дополнительным), расположенными с разных сторон тонкостенного экрана и соединенными параллельно (рис. 2).

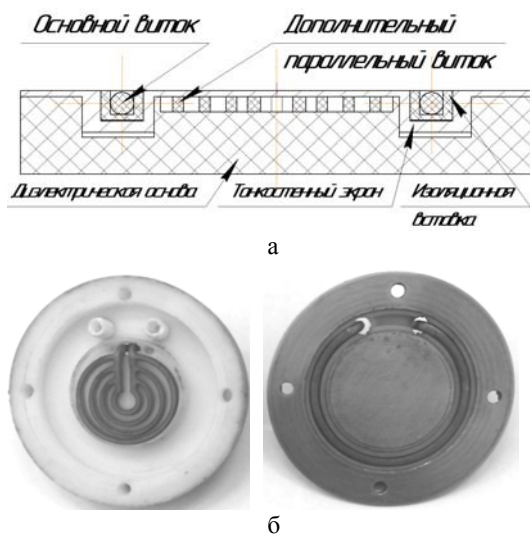


Рис. 2. ИИС цилиндрической геометрии с круговыми витками, расположенными с разных сторон тонкостенного экрана: а – чертеж поперечного сечения ИИС; б – экспериментальная модель (слева – диэлектрическая основа с дополнительным разветвленным витком, справа – тонкостенный экран с основным внешним витком)

Осциллограммы сигнала в разрядной цепи (токовый импульс на выходе с МИУС-2 и в ИИС) снимались с помощью цифрового осциллографа PV6501 посредством индукционного датчика пояса Роговского [18, 19].

Для большей достоверности полученных результатов предлагается серия опытов для разных напряжений заряда ёмкостных накопителей МИУС-2. Установка работает в серийном режиме генерации разрядных импульсов униполярной формы.

В ходе проведения экспериментов были выполнены следующие опыты.

1. Измеряется разрядный импульс на выходе с МИУС-2 и в исследуемой индукционной индукторной системе. Места измерения обозначены на рис. 3.

- 1.1. Установка МИУС-2 работает на напряжении заряда $U_3 = 1100$ В.
- 1.2. Установка МИУС-2 работает на напряжении заряда $U_3 = 1250$ В.
- 1.3. Установка МИУС-2 работает на напряжении заряда $U_3 = 1600$ В.
- 1.4. Установка МИУС-2 работает на напряжении заряда $U_3 = 2000$ В.

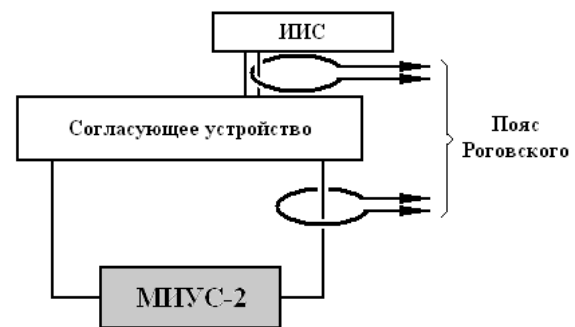


Рис. 3. Схема измерений

2. Удаление вмятины на элементе кузовной панели автомобиля Субару посредством исследуемой ИИС. Металл кузовной панели имеет толщину 0,8 мм.

Измерение осциллограмм

В соответствии с перечисленными опытами были проведены измерения разрядных импульсов (первая часть экспериментов). Типичные осциллограммы измеренных разрядных импульсов представлены на рис. 4.

Обработка снятых осциллограмм представлена в табл. 1, где $I_{m1\text{экс}}$ – амплитудное значение тока на выходе с МИУС-2 (первичная обмотка СУ), определенное экспериментально; $I_{m1\text{расч}}$ – расчетное значение амплитуды тока на выходе с МИУС-2, рассчитанное по формуле (1); $I_{m2\text{экс}}$ – амплитудное значение тока в ИИС определенное экспериментально; $K_{\text{тр}(I)}$ – коэффициент трансформации по току СУ.

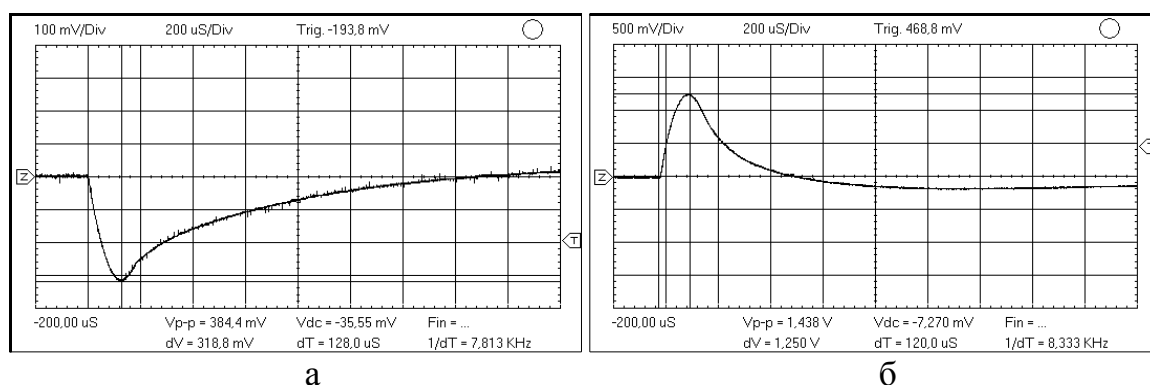


Рис. 4. Осциллограммы разрядных импульсов для $U_3 = 1250$ В: а – импульс тока на выходе с МИУС-2 (первичная обмотка СУ); б – импульс тока в ИИС

Таблица 1 Обработка осциллограмм

№ п/п	Напряжение заряда МИУС-2, В	$I_{m1эксп.}$, А	$I_{m1расч.}$, А	$I_{m2эксп.}$, А	$K_{тр(l)}$
1.	1100	11275	11605	41656	3,7
2.	1250	13071	13188	51250	3,9
3.	1600	16390	16881	62928	3,8
4.	2000	22090	21101	85500	3,87

Расчетное значение амплитуды тока I_m в разрядной цепи установки вычисляется [4, 18, 20]

$$I_m = U_3 \cdot \omega \cdot C \cdot e^{-\delta \cdot \varphi_{\max}}, \quad (1)$$

где U_3 – напряжение заряда емкостных накопителей, В; $\omega = 2 \pi \cdot f$ – радиальная частота, рад/с, где f – рабочая частота, Гц; C – ёмкость конденсаторных батарей МИУС-2, Ф; δ – декремент затухания; φ_{\max} – значение фазы сигнала, соответствующее его амплитуде. Декремент затухания δ для разрядных сигналов МИУС-2 в режиме, близком к апериодическому, составляет 0,3 [4, 10, 12, 21, 22].

Проведенные исследования позволяют сделать следующее выводы.

1. Усредненное значение коэффициента трансформации по току для данного СУ с нагрузкой в виде ИИС цилиндрической геометрии с круговыми витками, расположенными с разных сторон тонкостенного экрана и соединенными параллельно, $\approx 3,85$.
2. Экспериментальные и расчетные значения амплитуд токовых импульсов показали хорошее совпадение, что говорит о достоверности полученных экспериментальных данных.
3. Как показывает практика применения магнитно-импульсных методов для рихтовки кузовных элементов автомобилей, при токе в инструменте (индукторе) более $50 \div 70$ кА возбуждаются усилия, достаточные для вы-

полнения необходимой технологической операции [10, 12, 23, 24]. Поэтому следует ожидать того, что данная ИИС может быть эффективной в качестве инструмента внешней магнитно-импульсной рихтовки.

Внешняя магнитно-импульсная рихтовка

Во второй части экспериментальных исследований (пункт 2 в перечне опытов) проведена экспериментальная апробация действенности исследуемой ИИС как инструмента внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки кузовных панелей автомобилей. Ценность проводимых исследований заключается в том, что они являются одними из первых, где проводятся силовые эксперименты с ИИС цилиндрического типа с круговыми витками, расположенными с разных сторон тонкостенного дополнительного экрана. Ранее проводились подобного рода исследования только с индукционной индукторной системой с тонкостенным дополнительным экраном и одним (основным) витком индуктора [10, 12, 13].

Иллюстрация экспериментального оборудования и технологической оснастки представлена на рис. 5.

В ходе проведенных экспериментальных исследований МИУС-2 работала в серийном режиме генерации разрядных импульсов. На-

пряжение заряда составляло 2000 В. Было произведено 4 серии по 10 разрядных импульсов. Частота следования разрядных импульсов в одной серии составляла 10 Гц.

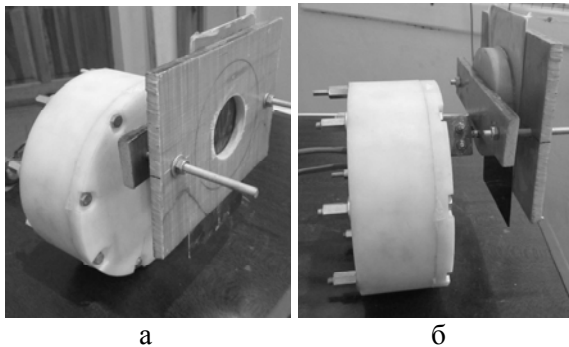


Рис. 5. Внешний вид СУ дискового типа с подключенным к нему ИИС и листовой заготовкой кузовной панели автомобиля Субару с вмятиной

В качестве заготовки была взята листовая сталь кузовной панели автомобиля Субару толщиной 0,8 мм с круговой вмятиной: диаметром 40 мм и глубиной ~ 2 мм.

Результаты силовых экспериментальных исследований по удалению вмятины на листовом металле кузовной панели автомобиля Субару представлены на рис. 6.

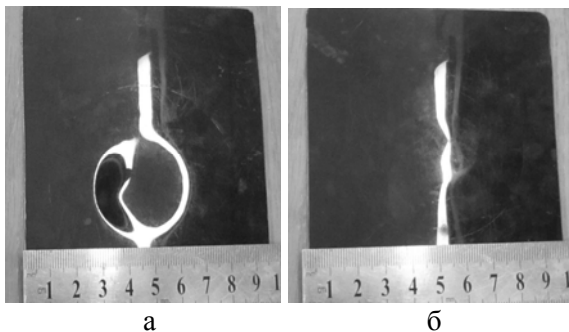


Рис. 6. Элемент листовой стали кузовной панели автомобиля Субару: а – до рихтовки; б – после рихтовки

Проведенные силовые экспериментальные исследования следует прокомментировать.

1. Источник мощности – магнитно-импульсная установка МИУС-2 во время силовых экспериментов работала в одном из штатных своих режимов с запасанием энергии в 2 кДж.

2. Удаление вмятины на образце металла кузовной панели автомобиля Субару произошло без повреждения защитного лакокрасочного покрытия.

3. При однократном импульсном силовом воздействии видимых изменений в конфигурации вмятины не наблюдалось. Переход к серийному режиму генерации силовых разрядных импульсов обеспечил постепенное выравнивание металлического элемента кузовной панели до приемлемой ровной поверхности.

4. Образование вмятины в противоположном (первоначальном) направлении ограничивается ровной поверхностью тонкостенного экрана исследуемой ИИС, что обеспечивается особенностями конструктивного выполнения данного инструмента рихтовки.

5. Практически продемонстрирована действенность ИИС как инструмента внешней магнитно-импульсной рихтовки цилиндрической геометрии с круговыми витками, расположенными с разных сторон тонкостенного экрана и соединенные параллельно.

Выводы

Проведена практическая апробация внешней магнитно-импульсной рихтовки с определением электромагнитных характеристик силовых импульсов при использовании в качестве инструмента индукционной индукторной системы цилиндрической геометрии с круговыми витками, расположенными с разных сторон тонкостенного дополнительного экрана.

В процессе экспериментальных исследований определены значения основных параметров силовых разрядных импульсов и измерены амплитудные значения тока в исследуемой индукторной системе как инструменте магнитно-импульсной рихтовки.

В ходе обработки экспериментально измеренных осциллограмм токовых импульсов вычислено усредненное значение коэффициента трансформации по току для используемого СУ с подключенной к нему исследуемой индукторной системой. Коэффициент трансформации составляет $\approx 3,85$.

Практически продемонстрирована действенность индукционной индукторной системы как инструмента внешней магнитно-импульсной рихтовки цилиндрической геометрии с круговыми витками, расположенными с разных сторон тонкостенного экрана и соединенными параллельно. В процессе рихтовки по индуктору инструмента протекал импульсный ток униполярной формы с амплитудным значением 85,5 кА.

Литература

1. Кузовной ремонт легковых автомобилей: производственно-практическое издание. – Минск: Автостиль, 2003. – 272 с.
2. Welcome to BETAG Innovation [Электронный ресурс] – 2014. – Режим доступа: www.beulentechnik.com.
3. Лаборатория электромагнитных технологий [Электронный ресурс] – 2013. – Режим доступа: <http://electromagnetic.comoj.com>.
4. Гнатов А. В. Анализ электродинамических процессов в цилиндрических индукторных системах – инструментах магнитно-импульсной рихтовки: монография / А. В. Гнатов. – Х.: ХНАДУ, 2013 – 292 с.
5. Гнатов А. В. Анализ процессов в инструменте магнитно-импульсной рихтовки кузовных панелей с листовым алюминием: материалы X Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania światowej nauki – 2014» (Przemysł, 07–15 lutego 2014 roku) / А. В. Гнатов М. В. Барбашова, С. А. Шиндерук. – Przemysł: Nauka i studia, 2014. – Vol. 34. – P. 77–82.
6. Гнатов А. В. Анализ электромагнитных процессов в симметричном инструменте магнитно-импульсной рихтовки / А. В. Гнатов, С. А. Шиндерук, Щ. В. Аргун // Сборник научных трудов Sworld. – 2014. – Т. 1. – № 1. – С. 82–86.
7. Batygin Yuri V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals / Yu. Batygin, S. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol. 214. – Issue 2. – P. 390–401.
8. Пат. 70055 Україна, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів одновитковою індукторною системою з тонким екраном / Батигін Ю. В., Гнатов А. В., Чаплигін Є. О., Аргун Щ. В., Гопко А. В., Дробінін О. М.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u 2011 13398 заявл. 14.11.2011; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10.
9. Пат. 70734 Україна, В21 Д 26/14. Спосіб магнітно-імпульсного притягання металевих об'єктів двовитковою круговою індукторною системою з тонким екраном / Батигін Ю. В., Гнатов А. В., Чаплигін Є. О., Гопко А. В., Щиголева С. О., Дробінін О. М.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u 2011 14018 заявл. 28.11.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.
10. Туренко А. Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий: монография / А. Н. Туренко, Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов. – Х.: ХНАДУ, 2009. – Т. 3: Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями. – 2009. – 240 с.
11. Электромагнитные процессы в симметричных индукционных системах с идентичными ферромагнитными тонкостенными экраном и листовой заготовкой / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, Щ. В. Аргун и др. // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 4 – С. 50–53.
12. Чаплыгин Е. А. Разработка цилиндрических индукционных индукторных систем для магнитно-импульсного притяжения тонких металлических листов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.13 / Евгений Александрович Чаплыгин. – Х., 2009. – 168 с.
13. Батыгин Ю. В. Эксперименты с индукционными индукторными системами для магнитно-импульсного притяжения листовых металлов / Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин, Т. Т. Черногор // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 6. – С. 64–67.
14. Батыгин Ю. В. Электродинамические процессы в цилиндрической индукционной индукторной системе для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок / Ю. В. Батыгин, А. Ю. Бондаренко, Е. А. Чаплыгин // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2007. – № 11/47. – С. 109–117.
15. Батыгин Ю. В. Электродинамические процессы в индукционной индукторной системе с прямоугольной формой рабочей зоны / Ю. В. Батыгин, А. Ю. Бондаренко, Г. С. Сериков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – №2 (49). – С. 45–50.
16. Батыгин Ю. В. Расчет электродинамических процессов в импульсном трансформаторе тока – согласующем устройстве «дискового» типа / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, И. С. Трунова // Электричество. – 2013. – № 9. – С. 23–27.
17. Батыгин Ю. В. Согласующее устройство «дискового» типа / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, И. С. Трунова // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 2. – С. 69–73.

18. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972. – 392 с.
19. Обработка результатов измерения импульсных токов поясом Роговского без применения интегратора: труды XI международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии» [«СИЭТ–2010»] (Одесса 24–28 мая 2010 г.) / А. В. Гнатов, С. А. Драченко, Г. С. Сериков, Д. О. Смирнов, Е. А. Чаплыгин. – Одесса: Политехпериодика, 2010 – Т. 1.– 2010. – 257 с.
20. Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники / Л. Р. Нейман, П. Л. Калантаров. – М.: Госэнергоиздат, 1959 – Т. 2. – 1959. – 92 с.
21. Батыгин Ю. В. Анализ протекания переходных процессов в разрядном контуре магнитно-импульсной установки / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, И. С. Трунов // Электричество. – 2013. – № 6. – С. 36–41.
22. Гнатов А. В. Экспериментальные исследования индукторов – инструментов для МИОМ / А. В. Гнатов, Е. А. Чаплыгин // Вісник НТУ «ХП». – 2012. – № 49. – С. 79–84.
23. Гнатов А. В. Экспериментальные исследования согласующих устройств для технологий магнитно-импульсной обработки металлов [Электронный ресурс] / А. В. Гнатов, И. С. Трунова // Актуальные инновационные исследования: наука и практика. – 2013. – № 2. – 15 с. – Режим доступа к журн.: http://actualresearch.ru/nn/2013_2/Article/science/gnatov_2013_2.htm
24. Батыгин Ю. В. Магнитно-импульсные технологии для восстановления корпусных элементов транспортных средств. Часть 2. Оборудование для практической реализации внешней бесконтактной магнитно-импульсной рихтовки / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, И. С. Трунова // Науковий вісник ХДМА. – 2013. – № 2 (9). – С. 68–82.

Рецензент: Ю. В. Батигін, професор, д. т. н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 24 января 2014 г.
