

Ю.В. БАТЫГИН, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри, ХНАДУ,
Харьков

А.В. ГНАТОВ, канд. техн. наук, доц., докторант, ХНАДУ,
Харьков

Е.А. ЧАПЛЫГИН, канд. техн. наук, доц., ХНАДУ, Харьков

И.С. ТРУНОВА, аспирант, ХНАДУ, Харьков

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА
ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ОТ ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКИ
В СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТИПА**

Статья посвящена определению зависимости коэффициента передачи энергии из первичной во вторичную обмотку согласующих устройств – импульсных трансформаторов тока цилиндрического типа, от значения индуктивной нагрузки. В ходе исследований проведено осциллографирование разрядных импульсов и экспериментально определен коэффициент передачи энергии в зависимости от индуктивности индукторной системы – нагрузки согласующего устройства.

Ключевые слова: импульсный трансформатор, индуктивная нагрузка, коэффициент передачи энергии, индукторная система, согласующие устройства.

Стаття присвячена визначенню залежності коефіцієнта передачі енергії з первинної у вторинну обмотку погоджувальних пристроїв – імпульсних трансформаторів струму циліндричного типу, від значення індуктивного навантаження. У ході досліджень проведено осцилографування розрядних імпульсів і експериментально визначений коефіцієнт передачі енергії залежно від індуктивності індукторної системи – навантаження пристрою, що погодить.

Ключові слова: імпульсний трансформатор, індуктивне навантаження, коефіцієнт передачі енергії, індукторна система, що погодять пристрої.

The paper is dedicated to energy-transfer coefficient (from primary to secondary) dependence determination on inductive load value in matching devices – cylindrical type pulse current transformers. The discharge pulse oscillograms have been measured and energy-transfer coefficient in the dependence on inductance of inductor system – matching device load has been experimentally determined.

Keywords: pulse transformer, inductive load, energy-transfer coefficient, inductor system, matching devices.

Введение. Согласующее устройство представляет собой повышающий импульсный трансформатор тока, назначение которого состоит

в увеличении амплитуды сигнала и в варьировании временных параметров каждого из импульсов.

По сути, согласующее устройство необходимо для согласования источника мощности – магнитно-импульсной установки с инструментом обработки – индукторной системой, что приводит к повышению эффективности выполнения заданной технологической операции.

Анализ основных достижений и публикаций. Согласующие устройства можно классифицировать по конструктивному исполнению на дисковые плоские, цилиндрические коаксиальные и др. (специальные конструкции) [1, 2]. Так в [3, 4] описываются конструктивные особенности плоских дисковых импульсных трансформаторов тока. Причем, в [4] приводится анализ существующих конструкций импульсных трансформаторов, предназначенных для получения больших токов – порядка единиц и десятков мегампер. В [5-8] рассмотрены конструктивные особенности специальных импульсных трансформаторов тока. В [9] описывается индуктор, состоящий из нескольких электрически изолированных секций, каждая из которых соединена со своим трансформатором тока. Авторы работы [10] рассматривают вопросы проектирования и исследования электрической эффективности одновитковых индукторов, на основании чего делают однозначный вывод, что наиболее перспективными являются одновитковые индукторы в сочетании с импульсным трансформатором.

Авторским коллективом лаборатории электромагнитных технологий Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (ХНАДУ) разработан целый ряд согласующих устройств, использование которых позволило выполнять ранее трудно реализуемые, а порой и невозможные, технологические операции по восстановлению (удалению вмятин, прогибов, деформаций) поверхности тонкостенных листовых металлов [1, 11-13]. Это открывает совершенно новые возможности в обрабатывающей промышленности, т.к. операции по реставрации могут быть выполнены бесконтактно и без разборки корпусных элементов восстанавливаемых конструкций.

Цель работы: экспериментальное исследование зависимости коэффициента передачи энергии из первичной во вторичную обмотку согласующих устройств – импульсных трансформаторов тока цилиндрического типа, от значения индуктивной нагрузки, разработанных в лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ.

Условия эксперимента и эксперимент. Экспериментальные исследования проводились на комплексе для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов,

разработанного в лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ [1] (рис. 1).

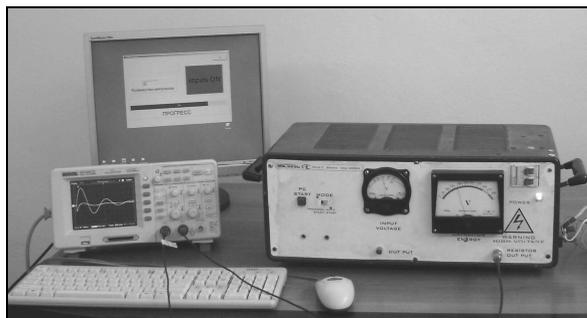


Рис. 1 – Комплекс для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов.

Комплекс работает в серийном режиме генерирования разрядных импульсов, при следующих параметрах:

- напряжение питающей сети $\sim U_c=220$ В;
- максимальное напряжение заряда емкостных накопителей $U_3=650$ В;
- емкость конденсаторов комплекса $C=33$ мкФ;
- частота следования разрядных импульсов $f_{\text{имп.}}=20$ Гц;
- собственная частота разрядного импульса 30 кГц;
- амплитудное значение тока в импульсе 3000 А;
- форма сигнала – аperiodически затухающая синусоида

Осциллограммы сигналов в разрядной цепи комплекса были получены с помощью цифрового осциллографа PV6501 через включенный в разрядную цепь шунт с сопротивлением $R_{\text{ш}}=12,5 \cdot 10^{-3}$ Ом, а также с помощью индукционного датчика – пояса Роговского.

При исследовании зависимости коэффициента передачи энергии от индуктивной нагрузки в согласующих устройствах цилиндрического типа было проведено следующие опыты:

1. Определение параметров комплекса для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов и исследуемых индукторов:

1.1. Осциллографирование разрядного импульса комплекса при его работе на закороченный выход.

1.2. Осциллографирование разрядных импульсов при подключении комплекса для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов раз-

личной индуктивной нагрузки (рис. 2):

- 1.2.1. Осциллографирование сигналов с нагрузкой в виде конического индуктора (рис. 2, а).
- 1.2.2. Осциллографирование сигналов с нагрузкой – плоская медная спираль с количеством витков $w=3,5$ (рис. 2, б).
- 1.2.3. Осциллографирование сигналов с нагрузкой – плоская медная спираль с количеством витков $w=1,5$ (рис. 2, в).
- 1.2.4. Осциллографирование сигналов с нагрузкой – плоская медная спираль с количеством витков $w=1$ (рис. 2, г).
- 1.2.5. Осциллографирование сигналов с нагрузкой – плоская медная спираль с количеством витков $w=0,5$ (рис. 2, д).

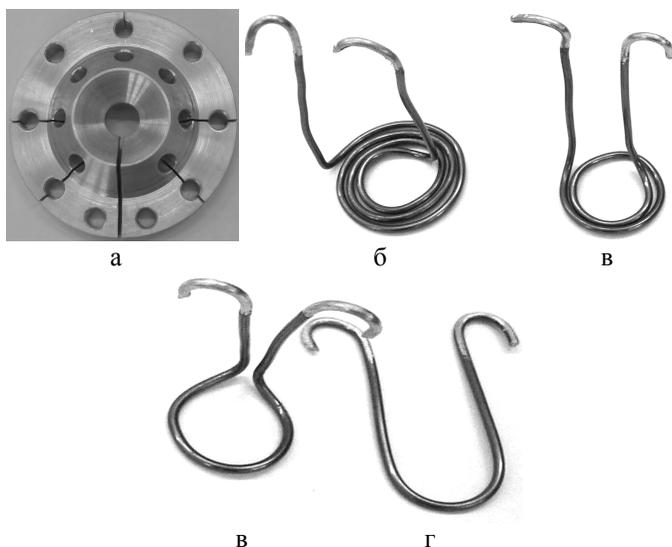


Рис. 2 – Исследуемые индукторы: а – конический; б – плоская медная спираль с количеством витков $w=3,5$; в – плоская медная спираль с количеством витков $w=1,5$; г – плоская медная спираль с количеством витков $w=1$; д – плоская медная спираль с количеством витков $w=0,5$.

2. Исследование параметров цилиндрического согласующего устройства с одним разомкнутым вторичным витком. Внешний вид исследуемого согласующего устройства – импульсного трансформатора тока с подключенным к нему коническим индуктором представлен на рис. 3.

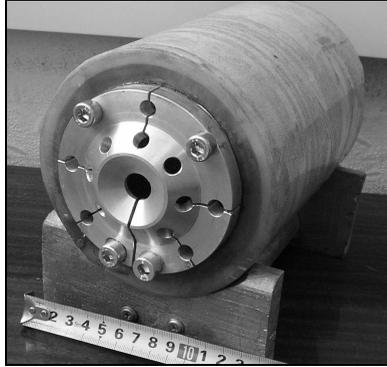


Рис. 3 – Внешний вид импульсного трансформатора тока с подключенным к нему коническим индуктором.

- 2.1. Во вторичную обмотку согласующего устройства подключен *конический индуктор*.
- 2.2. Во вторичную обмотку согласующего устройства подключен *индуктор в виде плоской спирали с количеством витков $w=3,5$* .
- 2.3. Во вторичную обмотку согласующего устройства подключен *индуктор в виде плоской спирали с количеством витков $w=1,5$* .
- 2.4. Во вторичную обмотку согласующего устройства подключен *индуктор в виде плоской спирали с количеством витков $w=1$* .
- 2.5. Во вторичную обмотку согласующего устройства подключен *индуктор в виде плоской спирали с количеством витков $w=0,5$* .

Посредством шунта, подключенного в разрядную цепь комплекса, получены осциллограммы разрядного импульса в *первичной обмотке* согласующего устройства. С помощью индукционного датчика – пояса Роговского получены осциллограммы разрядных импульсов в *первичной и вторичной обмотке* согласующих устройств.

3. Исследование параметров цилиндрического согласующего устройства с двумя вторичными коаксиально расположенными витками. Внешний вид исследуемого согласующего устройства – импульсного трансформатора тока с подключенным к нему коническим индуктором представлен на рис. 4.



Рис. 4 – Внешний вид исследуемого согласующего устройства.

По пункту 3 были проведены исследования, идентичные пункту 2.

В соответствии с перечнем экспериментальных исследований были получены осциллограммы. На рис. 5 представлена осциллограмма разрядного сигнала комплекса для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов (выход закорочен, сигнал измерен с шунта, делитель 1×10). На рис. 6 представлены осциллограммы разрядных сигналов комплекса, нагрузка – медный многовитковый индуктор (количество витков w , сигнал измерен с шунта, делитель 1×10).

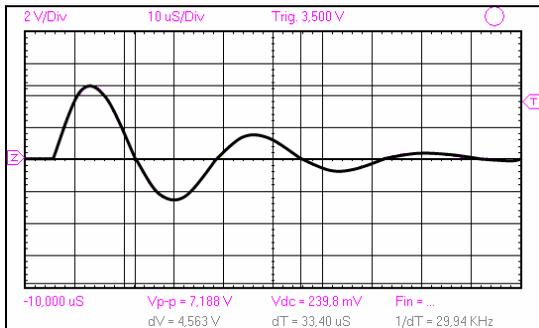


Рис. 5 – Осциллограмма разрядного сигнала комплекса для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов.

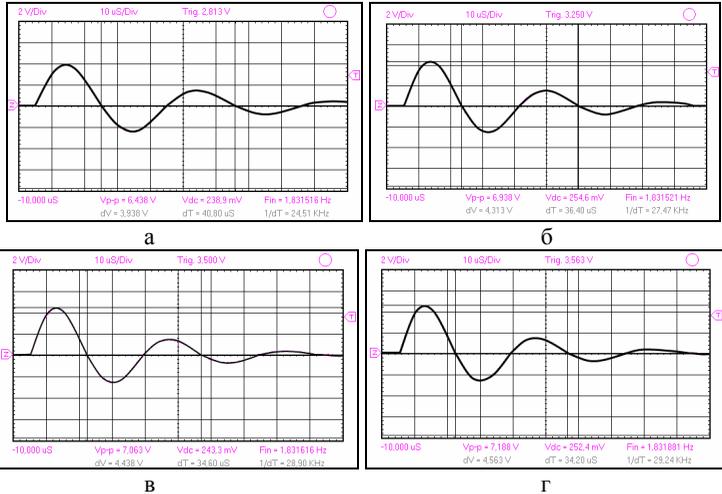


Рис. 6. Осциллограммы разрядных сигналов комплекса, нагрузка – медный многovitковый индуктор (число витков w , сигнал измерен с шунта, делитель 1×10): а – $w=3,5$; б – $w=1,5$; в – $w=1$; г – $w=0,5$

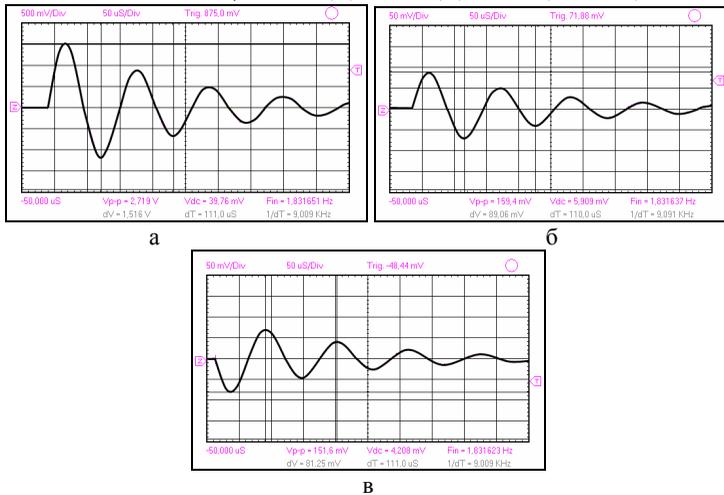


Рис. 7 – Осциллограммы разрядных сигналов при подключенном цилиндрическом согласующем устройстве с индуктором в виде плоской спирали, $w=3,5$: а – сигнал измерен с шунта в первичной цепи (делитель 1×10); б – сигнал измерен с помощью пояса Роговского в первичной цепи (делитель 1×1); в – сигнал измерен с помощью пояса Роговского во вторичной цепи (делитель 1×1).

Для сравнительного примера приведем осциллограммы, полученные в ходе проведения экспериментов по пунктам 2 и 3. Осциллограммы разрядных сигналов при подключенном цилиндрическом согласующем устройстве с индуктором в виде плоской спирали, $w=3,5$ (рис. 7) и осциллограммы разрядных сигналов при подключенном цилиндрическом согласующем устройстве с двумя вторичными коаксиально расположенными витками и индуктором в виде плоской спирали, $w=3,5$ (рис. 8).

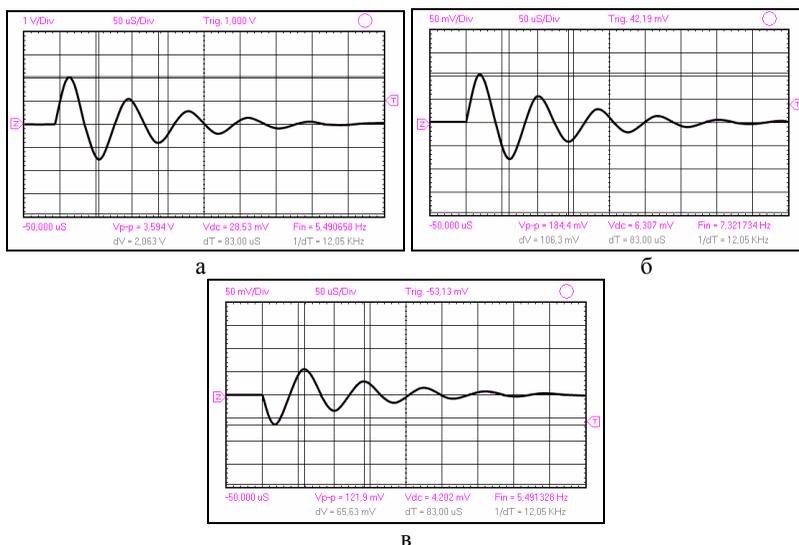


Рис. 8. Осциллограммы разрядных сигналов при подключенном цилиндрическом согласующем устройстве с двумя вторичными коаксиально расположенными витками и индуктором в виде плоской спирали, $w=3,5$: а – сигнал измерен с шунта в первичной цепи (делитель 1×10); б – сигнал измерен с помощью пояса Роговского в первичной цепи (делитель 1×10); в – сигнал измерен с помощью пояса Роговского во вторичной цепи (делитель 1×10).

Обработка экспериментальных данных. Индуктивность L вычисляется по измеренным осциллограммам по формуле:

$$L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C} \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота разрядного импульса, рад/с; C – емкость накопителя энергии, Ф.

Результаты обработки измеренных осциллограмм сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты обработки измеренных осциллограмм.

Объект исследования	f , Гц	ω , рад/с	$L_{общая}$, нГн	$L_{инд.}$, нГн
Закороченный вывод	29940	188023,2	857	-
Медный многовитковый индуктор $w=3,5$	24270	153922,8	1279	422
Медный многовитковый индуктор $w=1,5$	27170	172511,6	1018	161
Медный многовитковый индуктор $w=1$	28900	181492	920	63
Медный многовитковый индуктор $w=0,5$	2924	183627,2	898	42
Конический индуктор	-	-	-	30

Индуктивность цилиндрического индуктора, рабочая область которого в сечении имеет форму усеченного конуса (конический индуктор), была измерена в предыдущих экспериментах [14].

Коэффициент передачи энергии, из первичной обмотки во вторичную (коэффициент трансформации по току), цилиндрического согласующего устройства с одним разомкнутым вторичным витком, определяется отношением амплитудного значения сигнала во вторичной обмотке к амплитудному значению сигнала в первичной обмотке.

- Конический индуктор – $K_{тр} \approx 6,4$.
- Индуктор в виде плоской спирали, $w=3,5$ – $K_{тр} \approx 0,9$.
- Индуктор в виде плоской спирали, $w=1,5$ – $K_{тр} \approx 1,7$.
- Индуктор в виде плоской спирали, $w=1$ – $K_{тр} \approx 3,1$.
- Индуктор в виде плоской спирали, $w=0,5$ – $K_{тр} \approx 3,5$.

Коэффициент передачи энергии, из первичной обмотки во вторичную (коэффициент трансформации по току), цилиндрического согласующего устройства с двумя вторичными коаксиально расположенными витками, определяется отношением амплитудного значения сигнала во вторичной обмотке к амплитудному значению сигнала в первичной обмотке.

- Конический индуктор – $K_{тр} \approx 4,7$.
- Индуктор в виде плоской спирали, $w=3,5$ – $K_{тр} \approx 0,6$.
- Индуктор в виде плоской спирали, $w=1,5$ – $K_{тр} \approx 1,25$.
- Индуктор в виде плоской спирали, $w=1$ – $K_{тр} \approx 2,5$.
- Индуктор в виде плоской спирали, $w=0,5$ – $K_{тр} \approx 2,9$.

Сравнение результатов обработки экспериментальных данных.
Сравнительный анализ обработки экспериментальных исследований

цилиндрических согласующих устройств с различной индуктивной нагрузкой представлен в табл. 2.

Таблица 2 – Анализ обработки экспериментальных исследований.

№ п/п	Исследуемый индуктор	L инд., нГн	$K_{\text{пр}}$	
			Согл. устрой- ство 1 втор. вит- ток	Согл. устрой- ство 2 втор. вит- ка
1	Конический индуктор	30	6,4	4,7
2	Индуктор в виде плоской спирали, $w=0,5$	42	3,5	2,9
3	Индуктор в виде плоской спирали, $w=1$	63	3,1	2,5
4	Индуктор в виде плоской спирали, $w=1,5$	161	1,7	1,25
5	Индуктор в виде плоской спирали, $w=3,5$	422	0,9	0,6

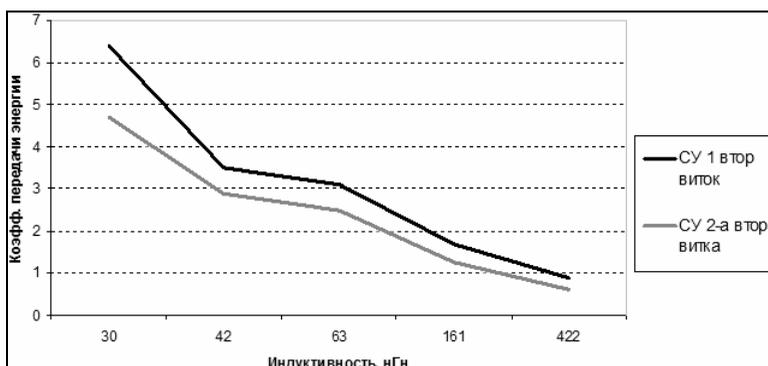


Рис. 9 – График изменения коэффициента передачи энергии.

По значениям основных характеристик исследуемых устройств построен график изменения коэффициента передачи энергии в исследуемых согласующих устройствах в зависимости от индуктивности индуктора (рис. 9).

Выводы. Проведенные экспериментальные исследование с последующей их обработкой позволяет сделать следующие выводы.

1. В ходе проведения экспериментальных исследований были определены индуктивности индукторов, которые являлись нагрузкой для исследуемых согласующих устройств.

2. Проведенные исследования показали, что коэффициент передачи энергии из первичной обмотки во вторичную у исследуемых согла-

сующих устройств зависит от значения индуктивности нагрузки (индукторных систем подключаемых к согласующим устройствам).

3. Данный тип согласующих устройств способен эффективно работать с индукторными системами, с низким значением индуктивности ≤ 50 нГн. Увеличение индуктивности индукторов больше 50 нГн, приведет к значительному снижению коэффициента передачи энергии из первичной обмотки во вторичную.

Список литературы: 1. *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. 2. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / [авт. сот. И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко]. – Харьков: Вища школа, 1977. – 190с. 3. *Vorrichtung zur Formung von Werkstücken durch Anwendung magnetischer Impulse / Gulf General Atomic Incorp., San Diego, California (США); Авт. изобрет. F.D. Broton, G.B. Hayward.* – Заявл. 29.11.63. – № Р 1464646.9-14 (G 39271); Опубли. 19.05.71; Приор. 30.11.62. – № 3231842, США; МКИ В 21 D 26/14, Н 01 F (7с 26/14, 21 D 2/49, 21 G 1/02). 4. Импульсный согласующий трансформатор / *Г.М. Гончаренко, В.А. Галкин, Ю.И. Гужавин, Ю.А. Попов, И.А. Галкин.* – В кн.: Высоковольтная импульсная техника. Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 1976. – Вып.3. – С. 27-34. 5. А.с. 792298 (СССР). Импульсный трансформатор / Харк. политехну ин-т им. В.И. Ленина. Авт. изобрет. Л.Т. Хименко. – Заявл. 24.04.78. – № 2607647/24-07; Опубли. в Б.И., 1980. – № 48; МКИ Н 01 F 19/08, В 21 D 26/14. 6. А.с. 675456 (СССР). Импульсный трансформатор / Харк. политехну ин-т им. В.И. Ленина. Авт. изобрет. Л.Т. Хименко. – Заявл. 03.05.77. – № 2482198/27-07; Опубли. в Б.И., 1979. – № 27; МКИ Н 01 F 19/08, В 21 D 26/14. 7. А.с. 756496 (СССР). Импульсный трансформатор / Харк. политехну ин-т им. В.И. Ленина. Авт. изобрет. Л.Т. Хименко. – Заявл. 27.01.78. – № 2574788/24-07; Опубли. в Б.И., 1980. – № 30; МКИ Н 01 F 19/08, В 21 D 26/14. 8. А.с. 548341 (СССР). Согласующее устройство к магнитно-импульсной установке / Харк. политехну ин-т им. В.И. Ленина. Авт. изобрет. Л.Т. Хименко. – Заявл. 04.02.75. – № 2101814/27; Опубли. в Б.И., 1977. – № 8; МКИ В 21 D 26/14. 9. Пат. 146403 (ГДР). *Vorrichtung zur elektromagnetischen Hochenergieimpulsumformung / Н. – Р. Scheibe, V. Fischer.* – Заявл. 11.10.79. – № 216169; Опубли. 11.02.81; МКИ В 21 D 26/14. 10. Исследование и разработка одновитковых индукторов / *В.А. Галкин, О.М. Мосолов, Ю.А. Попов, Е.М. Шалунов.* – В кн.: Высоковольтная импульсная техника. Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 1976. – Вып.3. – С. 55-62. 11. Пат. 53969 України, В21 Д 26/14. Узгоджувальний пристрій-циліндричний з двома співвісними вторинними витками / *Ю.В. Батигін, А.В. Гнатов, Г.С. Сериков, Є.О. Чаплигін, С.О. Драченко;* заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u201004291 заявл. 13.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20. 12. Анализ электродинамических процессов в согласующем устройстве "дискового" типа: VIII

Українсько-Польської конференції молодих науковців ["Механіка та інформатика"], (12-14 травня 2011 р.) Тези наукових праць. / *Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, И.С. Трунова.* – Хмельницький: Хмельницький національний університет, 2011. – С. 19-21. **13.** *Батыгин Ю.В.* Экспериментальные исследования магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов / *Ю.В. Батыгин, С.Ф. Головащенко, А.В. Гнатов, Д.О. Смирнов* // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: 2010. – № 3 – С. 39-41. **14.** *Гнатов А.В.* Экспериментальные исследования индукторов-инструментов для МИОМ / *А.В. Гнатов, Е.А. Чаплыгин* // Харків: Вісник НТУ "ХПІ". 2012. – № 116 – С. 56.

Поступила в редколлегию 24.10.2012



Батыгин Юрий Викторович, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера, диссертации кандидата и доктора технических наук, последнюю в Харьковском политехническом институте по специальности техника сильных электрических и магнитных полей, соответственно в 1972, 1977, 1993 гг. Заведующий кафедрой "Физика" Харьковского национального автомобильно-дорожного университета с 2009 г. Основные направления научной деятельности: магнитно-импульсная обработка листовых металлов.



Гнатов Андрей Викторович, доцент, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера, диссертацию кандидата технических наук в Харьковском военный университет по специальности вооружение и военная техника, соответственно в 1998, 2004 гг. Доцент кафедры "Автомобильная электроника" Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Основные направления научной деятельности: магнитно-импульсная обработка листовых металлов.



Чаплыгин Евгений Александрович – кандидат технических наук. Защитил диплом инженера, диссертацию кандидата технических наук в Национальном техническом университете "ХПИ" по специальности техника сильных электрических и магнитных полей, соответственно в 2003, 2009 гг. Доцент кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Основные направления научной деятельности: магнитно-импульсная обработка листовых металлов.



Трунова Ирина Сергеевна – защитила диплом инженера, аспирант Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Ассистент кафедры автомобильной электроники Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Основные направления научной деятельности: магнитно-импульсная обработка листовых металлов.