

УДК 621.318

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКИ В СОГЛАСУЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ ДИСКОВОГО ТИПА

А.В. Гнатов, доцент, к.т.н., И.С. Трунова, аспирант, С.А. Шиндерук, аспирант, ХНАДУ

Аннотация. Статья посвящена определению зависимости коэффициента передачи энергии из первичной во вторичную обмотку согласующего устройства – импульсного трансформатора тока дискового типа – от значения индуктивной нагрузки. В ходе исследований сняты осциллограммы разрядных импульсов и экспериментально определены индуктивность исследуемых индукторов и коэффициент передачи энергии из первичной обмотки согласующего устройства в индуктор – инструмент обработки.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка металлов, импульсный трансформатор тока, согласующее устройство, бесконтактная рихтовка, индуктор.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ЗАЛЕЖНО ВІД ІНДУКТИВНОГО НАВАНТАЖЕННЯ В УЗГОДЖУВАЛЬНОМУ ПРИСТРОЇ ДИСКОВОГО ТИПУ

А.В. Гнатов, доцент, к.т.н., І.С. Трунова, аспірант, С.О. Шиндерук, аспірант, ХНАДУ

Анотація. Стаття присвячена визначенню залежності коефіцієнта передачі енергії з первинної у вторинну обмотку узгоджувального пристрою – імпульсного трансформатора струму дискового типу – від значення індуктивного навантаження. В ході досліджень знято осцилограми розрядних імпульсів і експериментально визначено індуктивність досліджуваних індукторів та коефіцієнт передачі енергії з первинної обмотки узгоджувального пристрою в індуктор – інструмент обробки.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка металів, імпульсний трансформатор струму, узгоджувальний пристрій, безконтактне рихтування, індуктор.

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF ENERGY TRANSFER COEFFICIENT DEPENDING ON INDUCTANCE LOAD IN THE DISK MATCHING DEVICE

A. Gnatov, Associate Professor, Candidate of Technical Science, I. Trunova, postgraduate, S. Shynderuk, postgraduate, KhNAHU

Abstract. The article deals with determination of energy transfer coefficient dependence from primary coil to secondary matching device coil on inductive load value. In the course of researches, the discharge pulses oscillograms have been registred, and the inductance of research inductors and the energy transfer coefficient from the primary matching device coil to the inductor– processing tool have been experimentally determined.

Key words: magnetic-pulse metal working, pulse current transformer, matching device, non-contact straightening, inductor.

Введение

Согласующими устройствами в технике МИОМ являются специальные импульсные трансформаторы тока [1, 2].

Согласующие устройства предназначены для увеличения амплитуды сигнала, а также для

варьирования временных параметров каждого из импульсов (принципиальная возможность). Согласующее устройство представляет собой импульсный повышающий трансформатор тока. Первая задача – по увеличению амплитуды импульса до требуемого уровня – решается выбором надлежащего соотношения числа витков в первичной и

вторичной обмотках. Вторая – по варьированию временных параметров генерируемых импульсов – сводится к варьированию собственной частоты сигнала, поскольку каждый из них, как правило, во времени представляет собой экспоненциально затухающую синусоиду. Решение этой задачи достигается варьированием числа витков первичной обмотки импульсного трансформатора. Изменение его суммарной индуктивности ведёт к изменению частоты разрядного импульса. По сути, согласующее устройство необходимо для согласования источника мощности – магнитно-импульсной установки (МИУ) с инструментом обработки – индукторной системой, что приводит к эффективному выполнению заданной технологической операции.

Анализ 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. А 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.

В 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 поверхности тонкостенных листовых металлов [1, 11–16]. Разработанные согласующие устройства, совместно с индукторными системами, позволяют выполнять бесконтактную рихтовку кузовов транспортных средств.

Цель и постановка задачи

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование зависимости коэффициента передачи энергии от значения индуктивной нагрузки согласующего устройства дискового типа, разработанного в лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ.

Условия эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на комплексе для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов, разработанном в лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ, рис. 1.

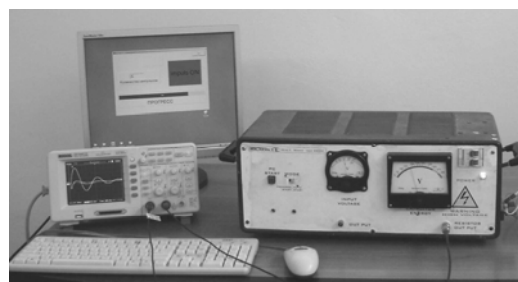


Рис. 1. Комплекс для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов

Комплекс работал в серийном режиме генерации разрядных импульсов при следующих параметрах:

- напряжение питающей сети $\sim U_c = 220$ В;
- напряжение заряда емкостных накопителей $U_3 = 650$ В;
- ёмкость 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 при работе на закороченный выход ~ 3000 А;
- форма сигнала – апериодически затухающая синусоида.

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

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

Перечень экспериментальных исследований.

1. Измерение осциллограммы разрядного импульса комплекса для имитации и моделирования процессов в инструментах магнитно-импульсной обработки металлов (далее КОМПЛЕКС) при его работе на закороченный выход.
2. Измерение осциллограмм разрядных импульсов при подключении к КОМПЛЕКСУ различной индуктивной нагрузки.
 - Измерение осциллограмм с нагрузкой – плоская медная спираль с количеством витков $w=3,5$;
 - Измерение осциллограмм с нагрузкой – плоская медная спираль с количеством витков $w = 1,5$;
 - Измерение осциллограмм с нагрузкой – плоская медная спираль с количеством витков $w = 1$;
 - Измерение осциллограмм с нагрузкой – плоская медная спираль с количеством витков $w = 1$ (широкий виток);
 - Измерение осциллограмм с нагрузкой – плоская медная спираль с количеством витков $w = 0,5$;
 - Измерение осциллограмм с нагрузкой в виде конического индуктора.

В соответствии с перечнем экспериментальных исследований были сняты осциллограммы, представленные на рис. 2 и 3.

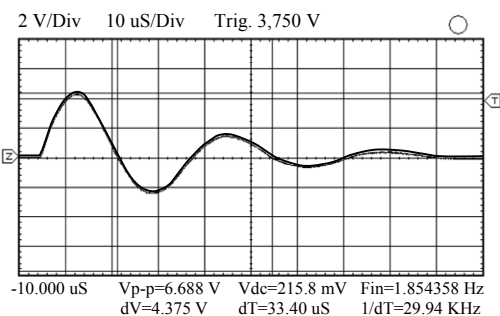
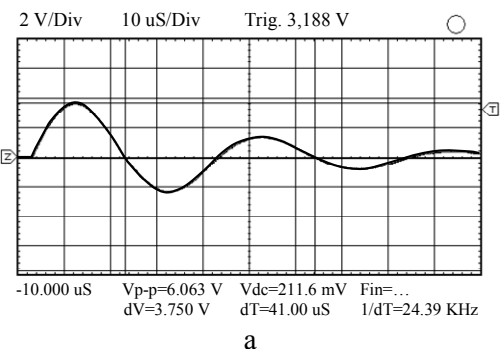
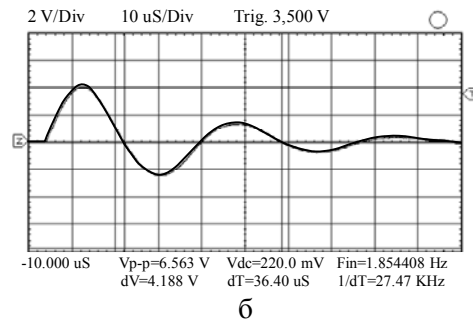


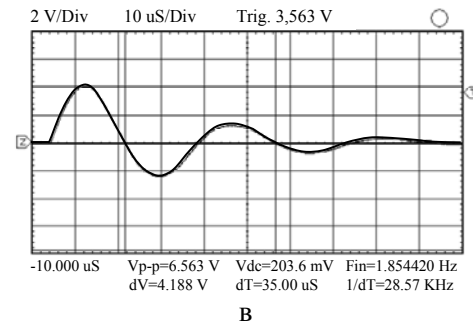
Рис. 2. Осциллограмма разрядного сигнала КОМПЛЕКСА при его работе на закороченный выход. Сигнал снят с шунта



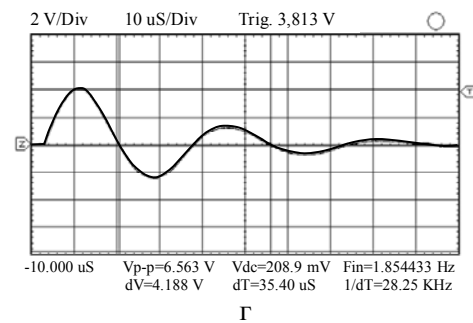
а



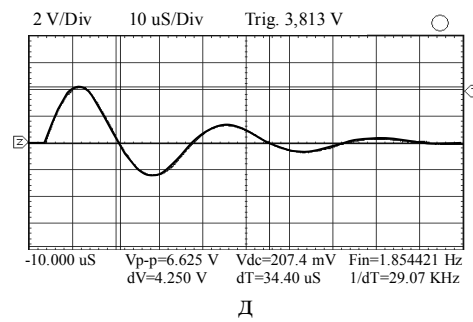
б



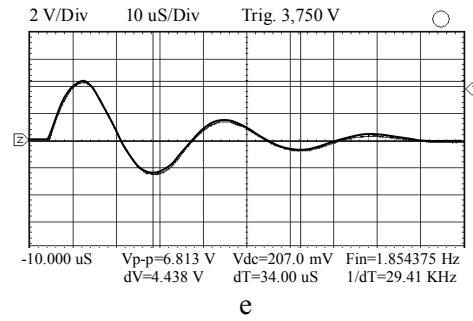
в



г



д



е

Рис. 3. Осциллограммы разрядных сигналов, нагрузка – медный многовитковый индуктор: а – $w = 3,5$; б – $w = 1,5$; в – $w = 1$; г – $w = 1$ широкий виток; д – $w = 0,5$; е – конический индуктор. Сигнал измерен с шунта

Далее представлена обработка экспериментальных исследований по 1-му опыту.

Параметр индуктивности вычислялся по снятым осциллограммам в соответствии с формулой

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

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

Результаты обработки измеренных осциллограмм сведены в табл. 1, где $L_{\text{общ}}$ – общая индуктивность, включающая собственную индуктивность КОМПЛЕКСА объекта исследования, нГн; $L_{\text{инд}}$ – индуктивность объекта исследования, нГн.

Таблица 1 Параметры исследуемых объектов

Объект исследования	f , Гц	ω , рад/с	$L_{\text{общ}}$, нГн	$L_{\text{инд}}$, нГн
Комплекс – закороченный выход	29940	188023,2	857	-
Медный многовитковый индуктор $w = 3,5$	24390	153169,8	1291	434
Медный многовитковый индуктор $w = 1,5$	27470	172512,6	1018	161
Медный многовитковый индуктор $w = 1$ шир. виток	28250	177410	962	105
Медный многовитковый индуктор $w = 1$	28570	179420	941	84
Медный многовитковый индуктор $w = 0,5$	29070	182560,2	909	52
Конический индуктор*	-	-	-	30

*Примечание.** Индуктивность цилиндрического индуктора, рабочая область которого в сечении имеет форму усеченного конуса (конический индуктор), была измерена в предыдущих экспериментах [1, 17].

Опыт 2. Исследование параметров дискового согласующего устройства.

Внешний вид исследуемого согласующего устройства – импульсного трансформатора тока представлен на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид дискового согласующего устройства

Перечень экспериментальных исследований.

Измерение осциллограммы разрядного импульса в первичной и вторичной обмотках согласующего устройства, подключенного к КОМПЛЕКСУ:

- Во вторичную обмотку согласующего устройства подключен конический индуктор;
- Во вторичную обмотку согласующего устройства подключен индуктор – плоская медная спираль с количеством витков $w=3,5$;
- Во вторичную обмотку согласующего устройства подключен индуктор – плоская медная спираль с количеством витков $w=1,5$;
- Во вторичную обмотку согласующего устройства подключен индуктор – плоская медная спираль с количеством витков $w=1$;
- Во вторичную обмотку согласующего устройства подключен индуктор – плоская медная спираль с количеством витков $w=0,5$.

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

В соответствии с перечнем экспериментальных исследований были сняты осциллограммы, представленные на рис. 5–9.

Нагрузка – конический индуктор.

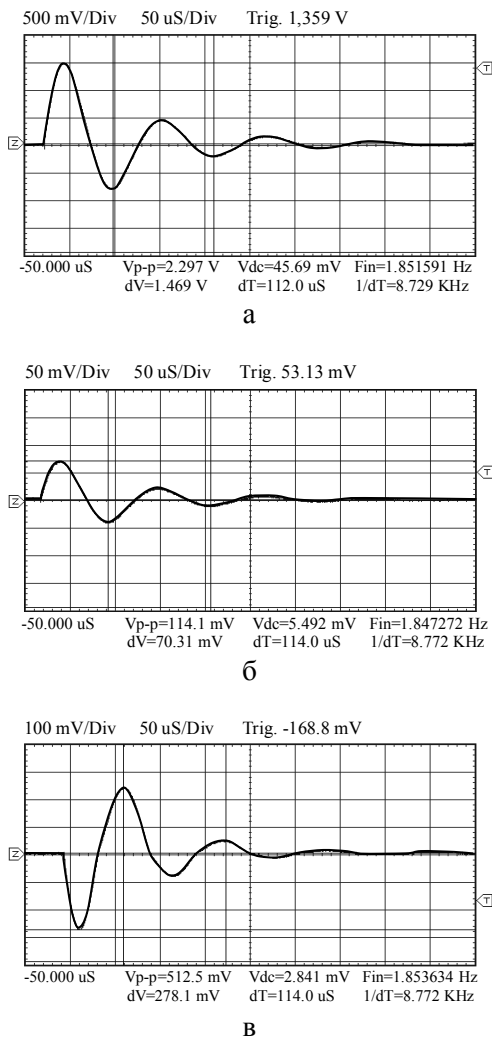


Рис. 5. Осциллограммы разрядных сигналов, нагрузка – конический индуктор: а – сигнал снят с шунта в первичной цепи; б – сигнал снят с помощью пояса Роговского в первичной цепи; в – сигнал снят с помощью пояса Роговского во вторичной цепи

Коэффициент передачи энергии из первичной обмотки во вторичную (коэффициент трансформации по току) определяется отношением амплитудного значения сигнала во вторичной обмотке к амплитудному значению сигнала в первичной обмотке. Нагрузка – конический индуктор – $K_{тр} \approx 3,95$.

Следует отметить существенное различие между коэффициентом передачи энергии $K_{тр}$ и хорошо известным параметром – коэффициентом трансформации. Коэффициент транс-

формации показывает изменение параметров во вторичной цепи трансформатора по отношению к первичной. Коэффициент передачи энергии $K_{тр}$ характеризует степень передачи энергии из первичной обмотки согласующего устройства – импульсного трансформатора тока – во вторичную. Его значение будет меньше, чем у коэффициента трансформации, т.к. часть энергии рассеивается в окружающую среду (отсутствует магнитопровод), часть рассеивается во вторичной обмотке согласующего устройства вследствие того, что наведенные токи, из-за наличия достаточной индуктивности индуктора (нагрузки для согласующего устройства), находят другие пути для замыкания (минуя индуктор).

Нагрузка – плоская медная спираль с количеством витков $w = 3,5$.

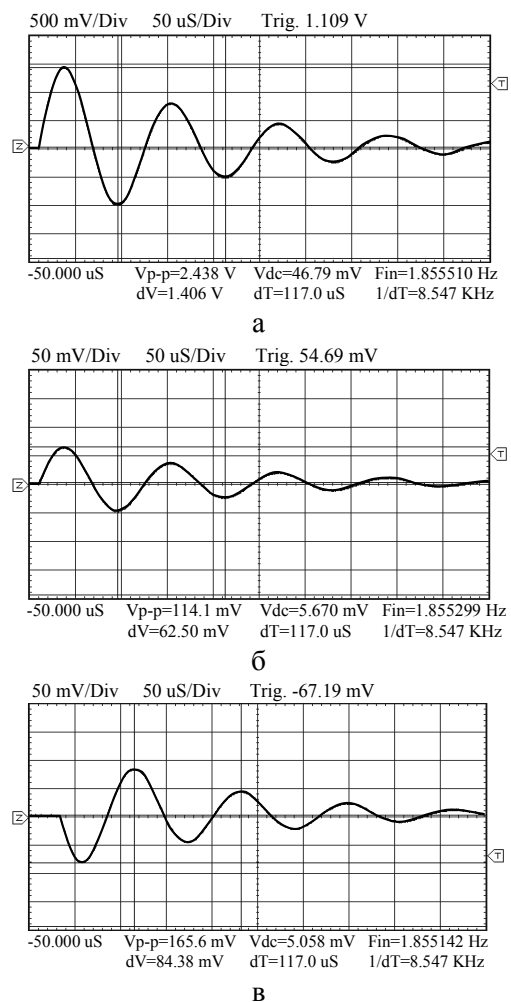
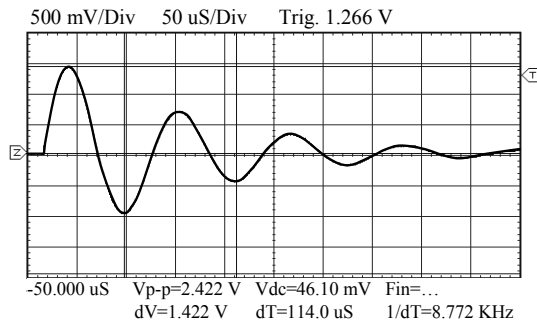


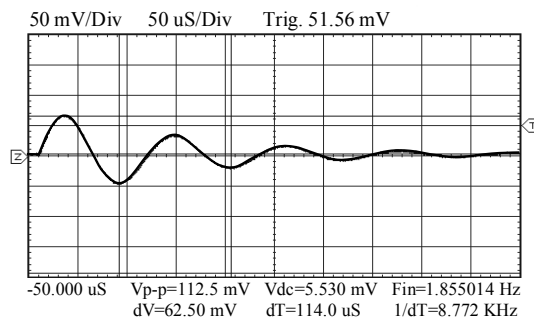
Рис. 6. Осциллограммы разрядных сигналов, нагрузка – плоская медная спираль с количеством витков $w = 3,5$: а – сигнал измерен с шунта в первичной цепи; б – сигнал измерен с помощью пояса Роговского в первичной цепи; в – сигнал измерен с помощью пояса Роговского во вторичной цепи

Коэффициент передачи энергии из первичной обмотки во вторичную согласующего устройства, при его нагрузке индуктором в форме плоской медной спирали с количеством витков $w = 3,5 - K_{\text{тп}} \approx 1,35$.

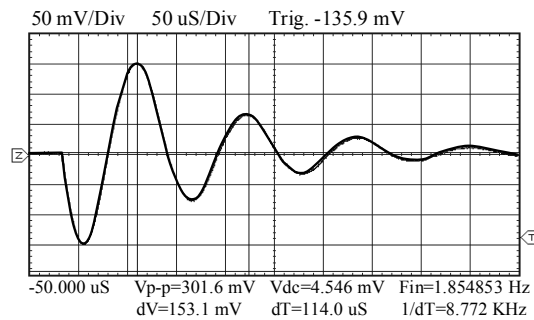
Нагрузка – плоская медная спираль с количеством витков $w = 1,5$.



a



б



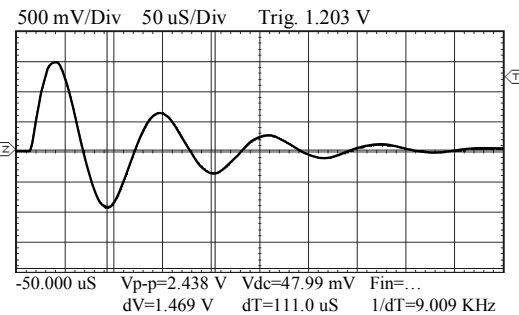
в

Рис. 7. Осциллограммы разрядных сигналов, нагрузка – плоская медная спираль с количеством витков $w = 1,5$: а – сигнал измерен с шунта в первичной цепи; б – сигнал измерен с помощью пояса Роговского в первичной цепи; в – сигнал измерен с помощью пояса Роговского во вторичной цепи

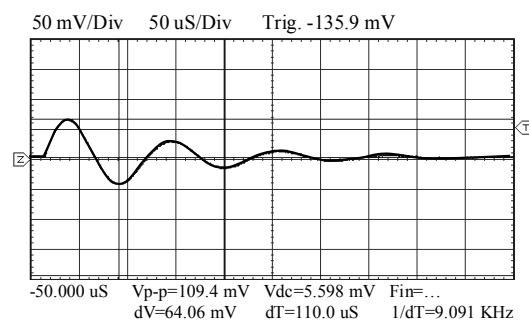
Коэффициент передачи энергии из первичной обмотки во вторичную согласующего устройства, при его нагрузке индуктором в

форме плоской медной спирали с количеством витков $w = 1,5 - K_{\text{тп}} \approx 2,44$.

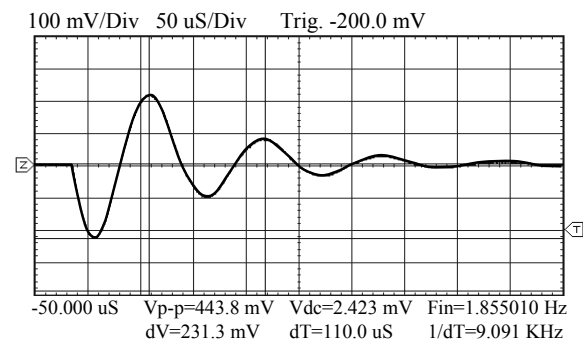
Нагрузка – индуктор в виде плоской спирали, $w = 1$.



a



б

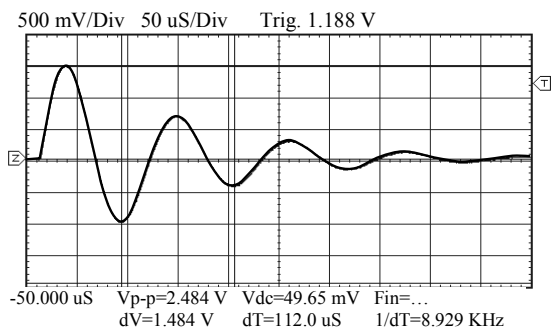


в

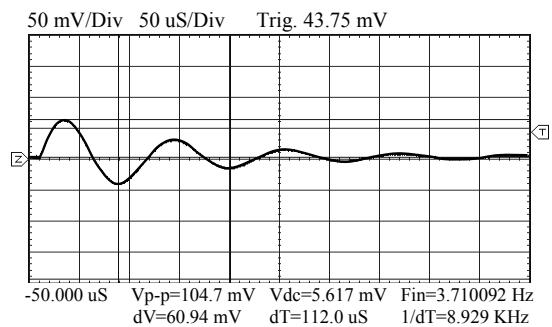
Рис. 8. Осциллограммы разрядных сигналов, нагрузка – плоская медная спираль с количеством витков $w = 1$: а – сигнал измерен с шунта в первичной цепи; б – сигнал измерен с помощью пояса Роговского в первичной цепи; в – сигнал измерен с помощью пояса Роговского во вторичной цепи

Коэффициент передачи энергии из первичной обмотки во вторичную согласующего устройства, при его нагрузке индуктором в форме плоской медной спирали с количеством витков $w = 1 - K_{\text{тп}} \approx 3,61$.

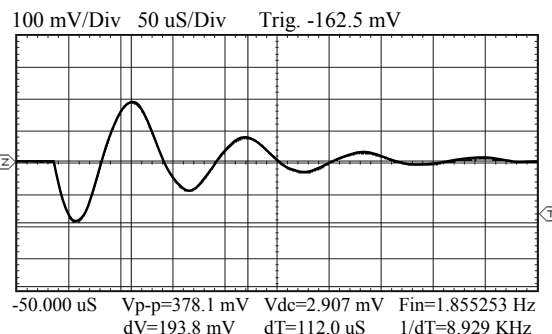
Нагрузка – плоская медная спираль с количеством витков $w = 1$ широкий виток.



а



б

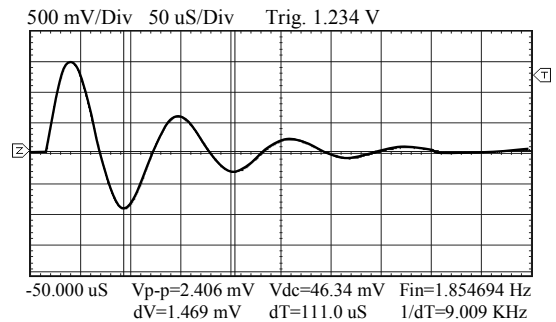


в

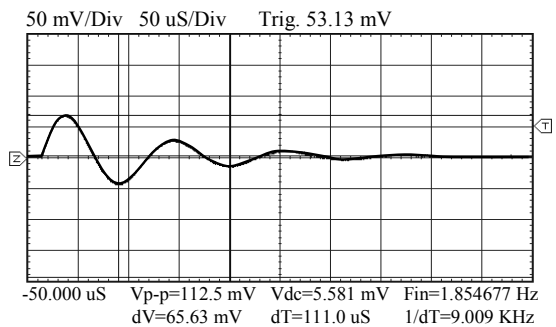
Рис. 9. Осциллограммы разрядных сигналов, нагрузка – плоская медная спираль с количеством витков $w = 1$ широкий виток: а – сигнал измерен с шунта в первичной цепи; б – сигнал измерен с помощью пояса Роговского в первичной цепи; в – сигнал измерен с помощью пояса Роговского во вторичной цепи

Коэффициент передачи энергии из первичной обмотки во вторичную согласующего устройства, при его нагрузке индуктором в форме плоской медной спирали с количеством витков $w = 1$ широкий виток – $K_{\text{тр}} \approx 3,18$.

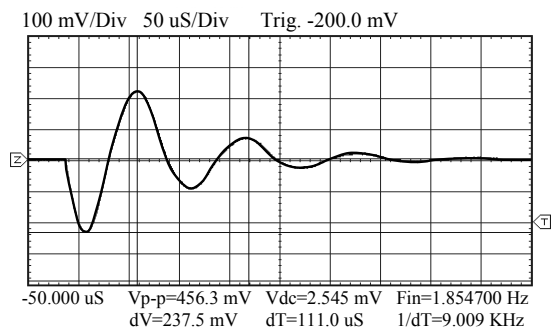
Нагрузка – плоская медная спираль с количеством витков $w = 0,5$.



а



б



в

Рис. 10. Осциллограммы разрядных сигналов, нагрузка – плоская медная спираль с количеством витков $w = 0,5$: а – сигнал измерен с шунта в первичной цепи; б – сигнал измерен с помощью пояса Роговского в первичной цепи; в – сигнал измерен с помощью пояса Роговского во вторичной цепи

Коэффициент передачи энергии из первичной обмотки во вторичную согласующего устройства, при его нагрузке индуктором в форме плоской медной спирали с количеством витков $w = 0,5$ – $K_{\text{тр}} \approx 3,62$.

Обработка экспериментальных исследований

Анализ обработки экспериментальных исследований дискового согласующего устройства с различной индуктивной нагрузкой представлен в табл. 2.

Таблица 2 Основные характеристики
сравнительного анализа

№ п/п	Исследуемый индуктор	$L_{\text{инд.}}$, нГн	$K_{\text{тр}}$
1	Конический индуктор	30	3,95
2	Индуктор – плоская спираль, $w = 0,5$	52	3,62
3	Индуктор – плоская спираль, $w = 1$	84	3,61
4	Индуктор – плоская спираль, $w = 1$ широкий виток	105	3,18
5	Индуктор – плоская спираль, $w = 1,5$	161	2,44
6	Индуктор – плоская спираль, $w = 3,5$	434	1,35

По значениям основных характеристик исследуемых устройств построен график (рис. 11).

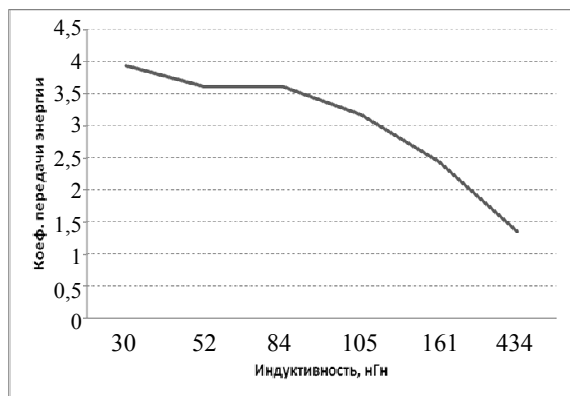


Рис. 11. Изменение коэффициента передачи энергии в исследуемом дисковом согласующем устройстве в зависимости от индуктивности индуктора

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования с последующей их обработкой позволяют сделать следующие выводы.

1. В ходе проведения экспериментальных исследований были определены индуктивности индукторов, которые являлись нагрузкой для исследуемого дискового согласующего устройства.

2. Проведенные исследования показали, что коэффициент передачи энергии из первичной обмотки во вторичную у исследуемого согласующего устройства зависит от значения индуктивности нагрузки (индуктора, подключаемого к выходу согласующего устройства).

3. Исследуемое дисковое согласующее устройство может эффективно работать с индукторными системами, с низким значением индуктивности ≤ 100 нГн. Увеличение индуктивности индукторов сверх указанного значения приведет к значительному снижению коэффициента передачи энергии.

Литература

1. Туренко А.Н. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография / А.Н. Туренко, Ю.В. Батыгин, А.В. Гнаатов. – Х.: ХНАДУ, 2009. – 240 с.
2. Белый И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. – Х.: Вища школа, 1977. – 189 с.
3. Пат. 1464646 ФРГ, МКИ В 21 D 26/14, Н 01 F (7с 26/14, 21 D 2/49, 21 G 1/02). Vorrichtung zur Formung von Werkstücken durch Anwendung magnetischer Impulse / Brolon F. D., Hayward G. B. заявитель и патентообладатель Gulf General Atomic Incorp., San Diego, California (США). – № Р 1464646.9-14 (G 39271) ; заявл. 29.11.63; опубл. 19.05.71.
4. Гончаренко Г.М. Импульсный согласующий трансформатор / Г.М. Гончаренко, В.А. Галкин, Ю.И. Гужавин и др. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 1976. – Вып.3. – С. 27–34.
5. А. с. 792298 СССР, МКИ Н 01 F 19/08, В 21 D 26/14. Импульсный трансформатор / Л.Т. Хименко (СССР). – №2607647/24-07 ; заявл. 24.04.78 ; опубл. в Б.И., 1980, № 48.
6. А. с. 675456 СССР, МКИ Н 01 F 19/08, В 21 D 26/14. Импульсный трансформатор / Л.Т. Хименко (СССР). – № 2482198/27-07 ; заявл. 03.05.77 ; опубл. в Б.И., 1979, № 27.
7. А. с. 756496 СССР, МКИ Н 01 F 19/08, В 21 D 26/14. Импульсный трансформатор / Л.Т. Хименко (СССР). – № 2574788/24-07 ; заявл. 27.01.78 ; опубл. в Б.И., 1980, № 30.
8. А. с. 548341 СССР, МКИ В 21 D 26/14. Согласующее устройство к магнитно-импульсной установке / Л.Т. Хименко (СССР). – № 2101814/27 ; заявл. 04.02.75; опубл. в Б.И., 1977, № 8.

9. Пат. 146403 ГДР, МКИ В 21 D 26/14. Vorrichtung zur elektromagnetischen Hochenergieimpulsumformung / Scheibe Н. Р., Fischer V. – № 216169 ; заявл. 11.10.79; опубл. 11.02.81.
10. Галкин В.А. Исследование и разработка одновитковых индукторов / В.А. Галкин, О.М. Мосолов, Ю.А. Попов, Е.М. Шалунов // Высоковольтная импульсная техника. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т им. И.Н. Ульянова, 1976. – Вып. 3. – С. 55–62.
11. Пат. 53969 Україна, В 21 D 26/14. Узгоджувальний пристрій-циліндричний з двома співвісними вторинними витками / Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Сериков Г.С., Чаплигін Є.О., Драченко С.О.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u201004291 ; заявл. 13.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.
12. Пат. 68745 Україна, В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Аргун Щ.В., Батигін Ю. В., Гнатов А. В., Трунова І.С., Чаплигін Є. О.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u201111225 ; заявл. 21.09.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7.
13. Пат. 75676 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю. В., Лавінський В. І., Хименко Л. Т.; заявник та патентовласник ХПІ. – № 2004010512 ; заявл. 23.01.2004; опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5.
14. Пат. 74909 Україна, МПК В 21 D 26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Батигін Ю. В., Лавінський В. І., Хавін В. Л.; заявник та патентовласник ХПІ. – № 2004010542 ; заявл. 26.01.2004; опубл. 15.02.2006, Бюл. № 2.
15. Батигін Ю.В. Анализ электродинамических процессов в согласующем устройстве «дискового» типа / Ю.В. Батигін, А.В. Гнатов, И.С. Трунова // Механіка та інформатика: матеріали VIII Українсько-польської конференції молодих науковців Хмельницького національного університету, Хмельницький, 12 – 14 трав. 2011 р. – С. 19–21.
16. Батигін Ю.В. Экспериментальные исследования магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов / Ю.В. Батигін, С.Ф. Головащенко, А.В. Гнатов, Д.О. Смирнов // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 3. – С. 39–41.
17. Гнатов А.В. Экспериментальные исследования индукторов-инструментов для МИОМ / А.В. Гнатов, Е.А. Чаплыгин // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – №116 – С. 27–34.

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

Статья поступила в редакцию 7 декабря 2012 г.