

УДК 621.318

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

Щ.В. АРГУН, аспирант, ХНАДУ, Харьков

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

А.М. ДРОБИНИН, студент, ХНАДУ, Харьков

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗРЯДНОМ КОНТУРЕ
МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ УСТАНОВКИ**

Transients in a discharge contour of a magnetic pulse unit are researched experimentally and resulted in the paper. Influence of processes in parallel branches of the discharge contour on a current impulse characteristics is investigated. The unit work is analyzed for as branched so not branched schemes.

Стаття присвячена експериментальному дослідженню перехідних процесів в розрядному контурі магнітно-імпульсної установки. Досліджено процес впливу паралельних гілок розрядного кола на характеристики розрядного імпульсу струму в індукторній системі. Проведений аналіз роботи установки з розгалуженням і нерозгалуженням розрядним колом.

Статья посвящена экспериментальному исследованию переходных процессов в разрядном контуре магнитно-импульсной установки. Исследован процесс влияния параллельных ветвей разрядной цепи на характеристики разрядного импульса тока в индукторной системе. Проведен анализ работы установки с разветвленной и неразветвленной разрядной цепью.

Введение. Одними из наиболее прогрессивных технологий в обрабатывающей промышленности можно считать магнитно-импульсные технологии [1-3]. Они основаны на магнитно-импульсной обработке металлов (МИОМ), причем такая обработка происходит без непосредственного контакта инструмента обработки (в магнитно-импульсных системах – это индукторная система (ИС)) с заготовкой. Обработка же происходит посредством импульсного магнитного поля, возбуждаемого ИС. Энергия, передаваемая силами импульсного магнитного поля от индуктора к обрабатываемому изделию, первоначально запасается в емкостных накопителях источника мощности – магнитно-импульсной установки (МИУ). Сама же ИС, подсоединяется к зажимам МИУ, изображенным на схеме с разветвленной разрядной

цепью рис. 1 [2, 4, 5]. Следовательно, вопросы, связанные с передачей запасенной в емкостных накопителях МИУ энергии к инструменту обработки – индукторной системе приобретают значимый характер, и становятся актуальными.

Цель настоящей работы – исследование переходных процессов в разрядном контуре МИУ с определением степени влияния параллельных ветвей разрядной цепи на характеристики разрядного импульса в инструменте обработки – индукторной системе.

Анализ основных достижений и публикаций. Существующие схемы МИОМ, как правило, работают в режиме однократного силового воздействия на обрабатываемый объект [2, 6]. Здесь невозможно контролировать процесс обработки, необходимы громоздкие источники мощности, требуются существенные затраты на создание комплекса оборудования в целом и др.

Идея, предложенная авторами [3-5, 7] и положенная в основу источника мощности для магнитно-импульсной технологии состоит в замене мощного однократного силового воздействия серией довольно малых импульсов, суммарное действие которых должно быть достаточным для достижения заданного уровня деформирования объекта обработки.

Следует отметить, что аналогичное предложение, но без какого-либо обоснования и конкретики, прозвучало в рекламных материалах американской фирмы "Electroimpact", отделившейся от концерна "Boeing" и ведущей разработки магнитно-импульсных комплексов для внешней рихтовки корпусов самолетов [1, 2].

Исследование влияния разрядных цепей на характеристики выходного импульса. В качестве объекта исследования была взята магнитно-импульсная установка МИУС-2, разработанная в лаборатории магнитно-импульсных технологий ХНАДУ рис. 1, которая обладает следующими характеристиками [1]:

- работа от сети ~ 220 В;
- зарядное напряжение до 2 кВ, запасаемая энергия до 2 кДж;
- собственная частота в импульсе ~7 кГц; в комплекте с согласующими устройствами (импульсными трансформаторами) ~1-2 кГц;
- частота повторения разрядных импульсов до ~ 10 Гц;
- емкость накопителей энергии $C = 1200$ мкФ.

Алгоритм работы МИУС-2. Системой управления, вручную, задаются уровень напряжения, на которое будут заряжаться конденсаторы. Заданный уровень напряжения отслеживает электроника по вольтметру V_3 .

Начало работы. Система контроля и управления дает команду на открытие электронных ключей – тиристоров $VS1$ и $VS2$ в зарядном контуре. При достижении напряжения на конденсаторах заданного уровня, система управления дает команду на отключение $VS1$ и $VS2$. После отключения электронных ключей в зарядном контуре, система управления дает команду на включение тиристоров в разрядном контуре $VS3$ и $VS4$. Тиристоры $VS3$ и $VS4$ закрываются после полного разряда конденсаторных батарей. После закрытия электронных ключей в разрядном контуре, система управления дает команду на открытие тиристоров $VS1$ и $VS2$ и цикл работы повторяется.

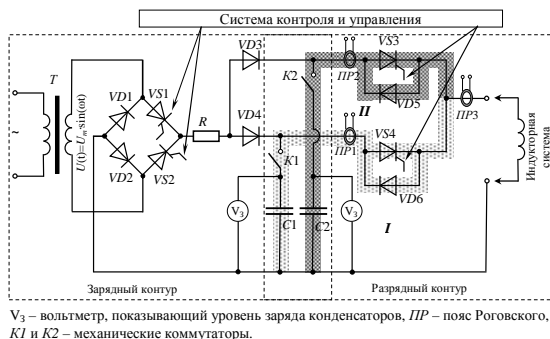


Рис. 1. Схема магнитно-импульсной установки МИУС-2.

Для более качественного определения степени влияния разрядных цепей на формирование выходного импульсного сигнала в МИУ разделим проводимые исследования на три этапа:

Этап I. Исследование влияния разрядных цепей на формирование выходного импульсного сигнала в МИУ при замкнутых коммутаторах K1 и K2 (рис. 1).

Этап II. Исследование влияния разрядных цепей на формирование выходного импульсного сигнала в МИУ при одном разомкнутом коммутаторе (рис. 1).

Этап III. Исследование характеристик разрядного сигнала при разветвленной и неразветвленной цепи разрядного контура (рис. 1).

Перейдем к описанию результатов проведенных исследований в соответствии с обозначенными этапами.

Этап I. Условия опыта. Индукционным датчиком – поясом Роговского, проводилось измерение сигнала:

- а) в разрядной ветви со второй группой конденсаторных батарей $C2$ (осциллограмма рис. 2, а) – датчик $PP2$;
- б) в разрядной ветви с первой группы конденсаторов $C1$ (осциллограмма рис. 2, б) – датчик $PP1$;
- в) общий (суммарный) сигнал в разрядной цепи (осциллограмма рис. 2, в) – датчик $PP3$.

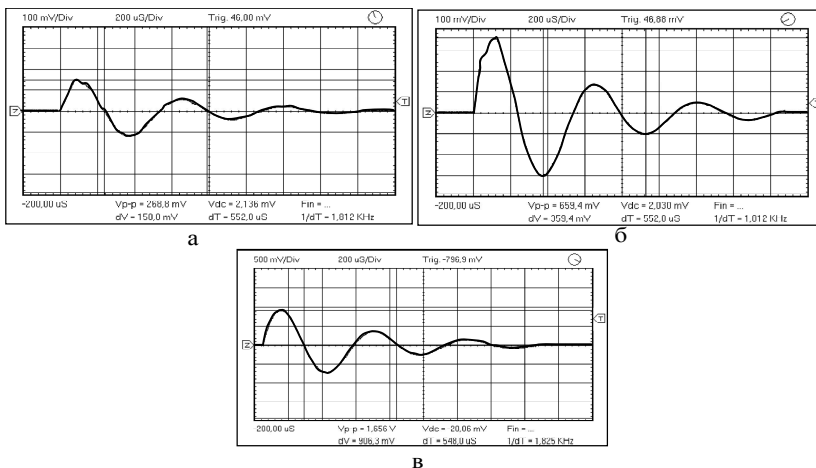


Рис. 2. Осциллограммы сигналов на этапе I.

Цель опыта – выяснить, влияют ли разрядные контура первой и второй группы конденсаторных батарей друг на друга. Выяснить, идентичность электротехнических характеристик параллельных ветвей разрядного контура (емкость, индуктивность, активное сопротивление, форма и частота разрядного тока).

Экспериментальные результаты – осциллограммы по первому этапу исследований представлены на рис. 2.

Таблица 1 – Экспериментальные данные

№ п/п	$U_{зар}$, В	C , мкФ	f , кГц	I_{m1} , А	Осциллограмма
1.	1000	1200	1,81	882	рис. 2,а
2.	1000	1200	1,81	2111	рис. 2,б
3.	1000	1200	1,82	5329	рис. 2,в

Результаты экспериментов сведены в табл.1, где $U_{зар}$ – напряжение

заряда емкостных накопителей, C – суммарная емкость конденсаторных батарей, f – частота импульса при разряде, I_{m1} – амплитудное значение первой полуволны разрядного тока на выходе МИУС-2.

Анализ результатов этапа I.

1. При разряде исследуемых групп конденсаторов в установке прослеживается их взаимное влияние друг на друга.

2. Характеристики разрядных токов (форма и частота) идентичны друг другу.

3. Амплитудные значения сигнала во второй группе конденсаторов, более чем в 2 раза меньше, чем значения в первой группе. Несоответствие амплитуд сигналов можно объясняется взаимным магнитным влиянием ветвей разрядного контура МИУ. Это обусловлено принятой схемной реализацией МИУ и ее неструктивным исполнением (анализ процесса магнитного влияния двух параллельных ветвей в исследуемом разрядном контуре МИУ будет приведен в последующих публикациях).

4. Амплитудные значения суммарного сигнала не соответствуют сумме амплитудных значений сигналов каждой из групп конденсаторов. Данное несоответствие, также объясняется взаимным магнитным влиянием ветвей разрядного контура МИУ.

5. Искажения в первой полуволне разрядного сигнала вызвано разбросом во времени включения тиристоров, что приводит к небольшой разности фаз между сигналами. Но вследствие электродинамических процессов (электродинамические силы стремятся уменьшить разность потенциалов, т.е. нивелировать те причины, которые их возбудили), асинхронность практически исчезает (фаза установления синхронности – до $\pi/2$). По достижению синхронности формы разрядных сигналов от двух групп конденсаторных батарей полностью совпадают. Следует подчеркнуть, что имеющий место разброс во времени включения разрядных тиристоров не оказывает существенного влияния на протекающие процессы в разрядном контуре установки (т.к. характерное время включения тиристора – это микросекунды, в то время как характерное время процессов в разрядном контуре – миллисекунды!).

Этап II. Условия опыта. Группы конденсаторов $C1$ и $C2$ имеют емкость по 600 мкФ. Конденсаторы заряжаются до напряжения 1000 В. Измерение сигнала проводилось с помощью индукционного датчика – пояса Роговского:

а) в разрядной ветви со второй группой конденсаторных батарей $C2$ при отключенном коммутаторе $K1$ (осциллограмма рис. 3, а) – дат-

чик *ПР2*;

б) в разрядной ветви с первой группы конденсаторов *C1* при отключенном коммутаторе *K2* (осциллограмма рис. 3, б) – датчик *ПР1*;

Цель опыта – выяснить соответствие (идентичность) электро-технических характеристик, как каждой из групп конденсаторных батарей *C1* и *C2*, так и блоков разрядных ключей (разрядных тиристоров *VS3* и *VS4* и диодов *VD5* и *VD6*).

Экспериментальные результаты – осциллограммы по второму этапу исследований представлены на рис. 3.

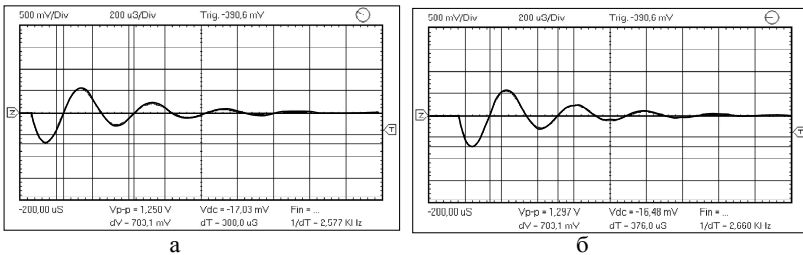


Рис. 3. Осциллограммы сигналов на этапе II.

Результаты экспериментальных данных сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Экспериментальные данные

№ п/п	$U_{зар}$, В	C , мкФ	f , кГц	I_{ml} , А	Осциллограмма
1.	1000	600	2,557	4135	рис. 3,а
2.	1000	600	2,660	4135	рис. 3,б

Анализ результатов этапа II.

1. Все процессы, как при заряде, так и при разряде обеих групп конденсаторов, протекают идентично. Форма, частота и амплитудные значения разрядного токового сигнала в обеих группах конденсаторов совпадает. Это свидетельствует о том, что параллельные ветви в разрядном контуре установки обладают одинаковыми электротехническими характеристиками. Отклонение в частотах разрядного импульса несущественно: 2-я группа конденсаторов $f = 2,557$ кГц, 1-я группа конденсаторов $f = 2,66$ кГц. Как говорилось выше, при суперпозиции разрядных импульсов от рассматриваемых групп конденсаторов, происходит синхронизм разрядных импульсов тока (рис. 3).

2. При повышении зарядного напряжения на конденсаторах, наблюдается увеличение амплитудных значений токового импульса. При

$U_{\text{зар}} = 1000 \text{ В}$, $I_{m1} = 4135 \text{ А}$, а при $U_{\text{зар}} = 1500 \text{ В}$, $I_{m1} = 5694 \text{ А}$.

Этап III. Схема электрическая принципиальная установки с неразветвленным разрядным контуром представлена на рис. 4.

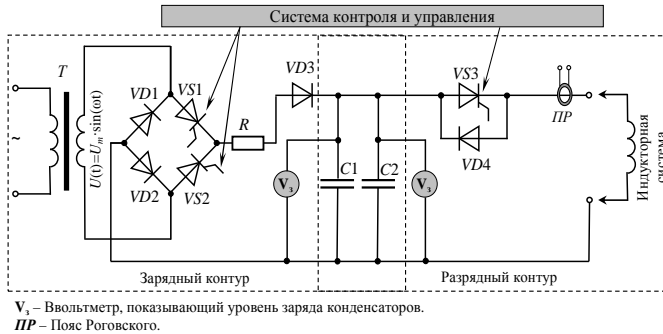


Рис. 4. Схема установки с неразветвленным разрядным контуром.

Условия опыта. Суммарная емкость группы конденсаторов $C1$ и $C2$ – 1200 мкФ. Конденсаторы заряжаются до напряжения 1500 В:

а) измерение сигнала в разрядной ветви с разветвленной цепью разрядного контура проводилось индукционным датчиком – поясом Роговского. Коммутаторы $K1$ и $K2$ – замкнуты (рис. 1), сигнал поступает с датчика $ПП3$ (осциллограмма рис. 5, а);

б) измерение сигнала в разрядной ветви с неразветвленной цепью разрядного контура проводилось индукционным датчиком-поясом Роговского. (рис. 4), сигнал поступает с датчика $ПП$ (рис. 5, б).

Цель опыта – выяснить соответствие характеристик полученных сигналов в разрядном контуре при неразветвленной разрядной цепи (один разрядный тиристор) и при разветвленной разрядной цепи (два разрядных тиристора, включенные в параллельные ветви).

Экспериментальные результаты – осциллограммы по третьему этапу исследований представлены на рис. 5 и в табл. 3, где использованы обозначения: I_{m1} – амплитудное значение первой полуволны разрядного тока на выходе с МИУС-2; I_{m2} – амплитудное значение первой полуволны разрядного тока в индукторе; ΔI_1 потеря – разница в амплитудных значениях первой полуволны импульса разрядного тока разветвленной и неразветвленной цепи разрядного контура на выходе с МИУС-2; ΔI_2 потеря – разница в амплитудных значениях первой полуволны импульса разрядного тока разветвленной и неразветвленной цепи разрядного контура.

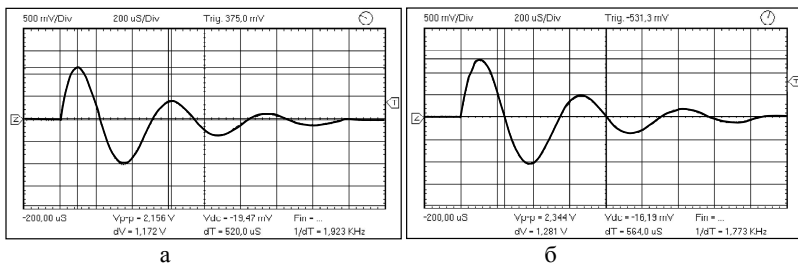


Рис. 5. Осциллограммы сигналов на этапе III.

Результаты экспериментальных исследований сведены в табл. 3.

Таблица 3 – Экспериментальные данные

Результаты № п/п	$U_{зар}$, В	C , мкФ	f , кГц	I_{m1} , А	ΔI_1 потерь, А, %	I_{m2} , А	ΔI_2 потерь, А, %	Осциллограмма
1.	1500	1200	1,923	6890	645 А или 8,5 %	34450	3225 А или 8,5 %	рис. 5,а
2.	1500	1200	1,773	7535		37675		рис. 5,б

Анализ результатов этапа III.

1. При увеличении емкости, как и ожидалось, происходит уменьшение частоты разрядного импульса и увеличение его амплитудных значений (рис. 3 и рис. 5).

2. При увеличении емкости до 1200 мкФ, амплитудное значение тока в разрядном импульсе имеет наибольшее значение, а частота импульса – наименьшее.

3. Сравнение осциллограмм рис. 5, а и рис. 5, б показывает, что при переходе к схеме с двумя разрядными цепями в разрядном контуре МИУС-2, наблюдаются потери в амплитудных значениях суммарного тока на выходе с установки, порядка ~ 8,5 %.

4. Коэффициент трансформации по току рассматриваемого согласующего устройства – импульсного трансформатора порядка ~ 5. В соответствии с этим, можно определить амплитудное значение первой полуволны разрядного тока I_{m2} в витке индуктора по табл. 3.

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования переходных процессов в разрядном контуре МИУС-2 показали:

1. Установка работает адекватно всех исследованных режимах.
2. Потери в амплитудных значениях токового импульса с раз-

ветвленной цепью разрядного контура составляют 8,5 % по сравнению с неразветвленной. Данное снижение эффективности может быть компенсировано, увеличением емкости конденсаторных батарей.

3. Причина наблюдаемых потерь, кроется в конструктивной и схемотехнической реализации МИУС-2. В данной конструктивной реализации наблюдается магнитная связь между параллельными ветвями в разрядном контуре, что и обуславливает снижение амплитудно-значения токового импульса и увеличение его частоты.

4. Деление разрядной цепи на две параллельные ветви с электронным ключом в каждой приводит к снижению значения разрядного тока протекающего по каждой из ветвей в два раза, что существенно снижает вероятность электрического пробоя разрядного тиристора и увеличивает надежность источника мощности, и значительно продляет его работоспособность.

5. Электротехнические характеристики в параллельных ветвях разрядного контура установки – идентичны. Наблюдается небольшой разброс во времени включения разрядных тиристоров, но это несоответствие не оказывает существенного влияния на протекающие процессы в разрядном контуре установки (т.к. время включения тиристора имеет порядок микросекунд, а протекающие процессы в разрядном контуре имеют порядок миллисекунд).

Список литературы: 1. *Гнатюв А.В.* Безконтактне магнітно-імпульсне рихтування автомобільних кузовів // Вісник "ТДТУ". – Тернопіль: ТДТУ. – 2010. – Т. 15, Вип. 2. – С. 164-171. 2. *Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатюв А.В.* Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т. 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями. – Харьков: ХНАДУ. – 2009. – 240 с. 3. *Батыгин Ю.В., Воробьев В.В., Гнатюв А.В.* и др. Расчетные характеристики магнитно-импульсной установки для обработки металлов серий импульсов // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 12. – С. 86-95. 4. *Батыгин Ю.В., Гнатюв А.В., Гнатюва Щ.В.* и др. Переходной процесс при разряде емкостного накопителя в магнитно-импульсной установке // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 60. – С. 79-89. 5. Пат. України № 44933. Генератор багаторазових імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів // *Ю.В. Батыгин, О.Ю. Бондаренко, А.В. Гнатюв* и др. – Опубл. 26.10.2009. – Бюл. № 20. 6. Pat. U.S.A. No 2008/0163661. Dent removing method and device // *Al Meichtry et al.* Pub. Date:

Jul. 10, 2008. 7. *Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Сабокаръ О.С.* и др. Влияние параметров зарядной цепи на ток в разрядном контуре магнитно-импульсной установки. Обработка экспериментальных исследований / Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 48. – С. 84-94.



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.



Аргун Щасяня Валиковна. Защитила диплом инженера в Национальном техническом университете "ХПИ" по специальности метрология и измерительная техника в 2000 г. Аспирант 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.



Дробинин Александр Михайлович. Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, студент 5-го курса кафедры "Автомобильная электроника"; 61002, г.Харьков, ул. Петровского, 25; тел: (057) 700-38-52

*Поступила в редколлегию 25.01.2012
Рецензент д.т.н., проф. Лушков В.С.*