

УДК 621.318

**Ю.В. БАТЫГИН**, д-р техн. наук, проф., зав. каф., ХНАДУ, Харьков  
**А.В. ГНАТОВ**, канд. техн. наук, докторант, ХНАДУ, Харьков  
**Щ.В. АРГУН**, аспирант, ХНАДУ, Харьков  
**Е.А. ЧАПЛЫГИН**, канд. техн. наук, ХНАДУ, Харьков  
**О.С. СОБАКАРЬ**, студент, ХНАДУ, Харьков

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ  
СХЕМ ПОДКЛЮЧЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ В  
РАЗРЯДНОМ КОНТУРЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ  
УСТАНОВКИ**

Theoretical and experimental researches of magnetic pulse unit at various schemes of its condensers connection into the discharge contour are resulted. It is shown, that electromagnetic coupling of separate discharge contours leads to reduce of current amplitude in loading and raised its working frequency.

Статья посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям магнитно-импульсной установки при различных схемах подключения конденсаторов в разрядном контуре. Показано, что электромагнитная связь между отдельными разрядными цепями приводит к снижению амплитуды тока в нагрузке и повышению его рабочей частоты.

Стаття присвячена теоретичним і експериментальним дослідженням магнітно-імпульсної установки при різних схемах підключення конденсаторів в розрядному контурі. Показано, що електромагнітний зв'язок між окремими розрядними ланцюгами приводить до зниження амплітуди струму в навантаженні і підвищення його робочої частоти.

**Анализ основных достижений и публикаций, постановка задачи.**  
Для внешней реставрации поврежденных на поверхности автомобильных кузовов и корпусов самолетов огромный интерес представляет магнитно-импульсная технология, позволяющая устранение вмятин без разборки всей конструкции и нарушения существующего защитного покрытия [1].

В качестве источника мощности авторами патента [2] предложено использовать магнитно-импульсную установку (МИУ), работающую как генератор многократных токовых импульсов. Такая установка в известном варианте содержит зарядный контур, емкостной накопитель электрической энергии и разрядный контур с нагрузкой. Последняя пред-

ставляет собой импульсный трансформатор тока (согласующее устройство), к выходу которого подключается индукторная система – инструмент метода. Отличительная особенность предлагаемого источника мощности состоит в том, что зарядный и разрядный контур соединены через тиристорно-электронное устройство, которое синхронизирует процессы в них и позволяет работать источнику в режиме многократного повторения с заданной частотой выходных сигналов.

Использование тиристорov в качестве коммутаторов накладывает определенные ограничения на амплитуды и временные параметры генерируемых импульсов тока. Повысить порог этих ограничений можно, если батарею конденсаторов разбить на несколько групп, каждая из которых подключается к нагрузке собственной отдельной ветвью. То есть, один разрядный контур в этом случае разбивается на несколько отдельных контуров с общим выходом в точке подключения к нагрузке. Коммутация в каждом из них осуществляется синхронно работающими тиристорами. Ток в контурах будет обладать допустимыми амплитудно-временными характеристиками (достигается выбором количества отдельных групп). Предлагаемое решение в конструкции МИУ защищено патентом Украины [3] и позволяет получать высокие амплитуды результирующих сигналов при снижении нагрузки на тиристоры в элементах разрядного контура [4].

**Целью настоящей работы** является исследование источника мощности – магнитно-импульсной установки с различными схемами подключения конденсаторов в разрядном контуре.

**Экспериментальные исследования.** В экспериментах исследовались следующие варианты:

- №1 – блок конденсаторов общей емкостью  $\sim 1200$  мкФ, заряженный предварительно до заданного уровня энергии ( $U \approx 1000$  В), разряжается на подключенную нагрузку;

- №2 – два блока конденсаторов емкостью  $\sim 600$  мкФ каждый, заряженные предварительно до  $U \approx 1000$  В, образуют два отдельных разрядных контура с общим выходом на нагрузку установки.

Осциллограммы токовых импульсов в нагрузке при различных способах подключения конденсаторов (1 – вариант № 1: частота  $\sim 1,773$  кГц, амплитуда  $\sim 7535$  А; 2 – вариант № 2: частота  $\sim 1,923$  кГц, амплитуда  $\sim 6890$  А) приведены на рис. 1.

Из сравнения результатов измерений следует, что разделение разрядного контура МИУ на две части приводит к снижению результирующего тока в нагрузке на  $\sim 8,56\%$  и повышению его рабочей частоты на  $\sim 8,4\%$ .

Возможной причиной отмеченного факта является геометрия конструктивного расположения токопроводов в отдельных разрядных контурах. Влияние их взаимной индуктивности на протекающие процессы, по-видимому, может объяснить снижение амплитуды и повышение рабочей частоты результирующего сигнала в нагрузке МИУ. Эта гипотеза требует обоснования.

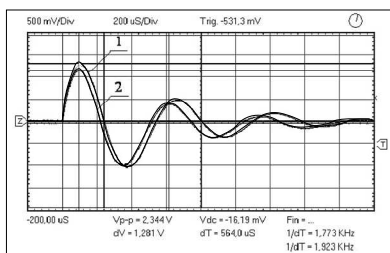


Рис. 1. Осциллограммы токовых импульсов МИУ.

**Анализ электромагнитных процессов в разрядном контуре МИУ.** Для проведения необходимых вычислений примем схему замещения разрядного контура МИУ, разделенного на две отдельные части с выделенными блоками емкостных накопителей (I – контур, образованный элементами отдельных разрядных цепей, II – контур с цепью выхода на нагрузку), представленную на рис. 2.

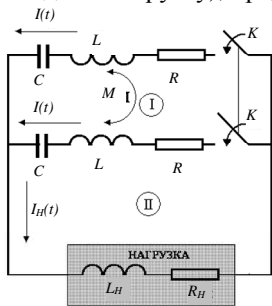


Рис. 2. Схема замещения разрядного контура МИУ.

Априори полагаем, что при разделении разрядной цепи на две отдельные параллельные ветви, сходящиеся к нагрузке, в каждой из них емкость, индуктивность и активное сопротивление ( $C, L, R$ ) связаны с параметрами разрядной цепи до разделения ( $C_0, L_0, R_0$ ) соотношениями:

$$C = 0,5 \cdot C_0, L = 2 \cdot L_0, R = 2 \cdot R_0 \quad (1)$$

В этом случае интегральные параметры процесса разряда будут идентичными. Практически, это означает эквивалентность емкости, собственной индуктивности и активного сопротивления (каждой из ветвей в разрядном контуре) МИУ энергии независимо от схемных особенностей подвода сигнала к нагрузке.

Как видно на принятой схеме замещения, после синхронного за-

мыкания коммутаторов –  $K$  емкостные накопители –  $C$ , предварительно заряженные до некоторого напряжения, разряжаются через « $L - R$ » цепи на нагрузку с заданными параметрами –  $L_H, R_H$ . Протекающие процессы будут описываться системой дифференциальных уравнений, составленных с применением основных законов теории цепей [5].

$$\begin{cases} I_H(t) = 2 \cdot I(t); \\ I_H(t)R_H + L_H \frac{dI_H(t)}{dt} + I(t)R + (L - M) \frac{dI(t)}{dt} + \left( U_0 + \int_0^t I(t) dt \right) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $U_0$  – напряжение на емкостных накопителях в момент коммутации.

В конечном итоге нас интересует суммарный результирующий ток в нагрузке. Выполним тождественные преобразования в системе (2) и получим интегро-дифференциальное уравнение для  $I_H(t)$

$$\frac{dI_H(t)}{dt} (2L_H + L - M) + I_H(t)(2R_H + R) + \int_0^t I_H(t) dt = -2U_0. \quad (3)$$

В уравнении (3) перейдем в пространство изображений по Лапласу. С учетом нулевых начальных условий запишем, что

$$Ip \cdot (2L_H + (L - M)) \cdot I(p) + (2R_H + R) \cdot I(p) + \frac{1}{p \cdot C} \cdot I(p) = -\frac{2U_0}{p}, \quad (4)$$

где  $p$  – параметр преобразования,  $I(p) = L\{I_H(t)\}$ .

Из (4) находим Лапласово изображение тока в нагрузке.

$$I(p) = -\frac{2U_0 \cdot C}{p^2 C \cdot (2L_H + (L - M)) + pC \cdot (2R_H + R) + 1}. \quad (5)$$

Отметим, что при  $M \rightarrow 0$  формула (5) с учетом соотношений в постановке задачи переходит в зависимость для тока, когда разрядная цепь не разделена на отдельные ветви. Итак,

$$I(p) = -\frac{U_0 \cdot C_0}{p^2 C_0 \cdot (L_H + L_0) + pC_0 \cdot (R_H + R_0) + 1}. \quad (6)$$

Результат (6) подтверждает идентичность рассматриваемых вариантов. С помощью выражения (5) можно определить характер зависимости тока в нагрузке от взаимоиנדуктивности выделенных контуров.

Дифференцируя (5), находим

$$\frac{\partial I(p)}{\partial M} = -\frac{2U_0 \cdot (pC)^2 \cdot M}{\left[ p^2 C \cdot (2L_H + (L - M)) + pC \cdot (2R_H + R) + 1 \right]^2}. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что  $\partial I(p)/\partial M < 0$  и  $I(p)$  уменьшается для всех  $M \in \mathbb{R}$  [6].

Таким образом, величина тока в нагрузке есть монотонно убывающая функция взаимоиנדуктивности –  $M$ . Данный вывод объясняет снижение  $I_H(t)$  при разделении разрядного контура МИУ на две части.

Теперь о рабочей частоте.

Из (5) видно, что временная зависимость результирующего тока в нагрузке есть экспоненциально затухающая синусоида с параметрами:

- декремент затухания –  $\delta = \frac{2R_H + R}{2 \cdot [2L_H + (L - M)]}$ ;
- частота колебаний –  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ ,

где  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{[2L_H + (L - M)] \cdot C}}$  – собственная частота.

Как следует из осциллограмм на рис. 1, величина относительного декремента затухания составляет  $\sim 0,15$ .

В этой связи можно считать, что

$$\omega \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{[2L_H + (L - M)] \cdot C}}. \quad (8)$$

С помощью выражения (8) находим, что

$$\frac{\partial \omega}{\partial M} \approx \frac{M}{2 \cdot [2L_H + (L - M)]}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что  $\partial \omega / \partial M > 0$  и  $\omega \uparrow$  для всех реальных  $M \in \mathbb{R}$  [6].

То есть, величина рабочей частоты тока в нагрузке есть монотонно возрастающая функция взаимоиנדуктивности –  $M$ . Данный вывод объясняет повышение  $\omega$ , отмеченное в экспериментах.

### **Выводы.**

1. Электромагнитная связь (влияние взаимоиנדуктивности) между отдельными разрядными цепями приводит к снижению амплитуды тока в нагрузке и повышению его рабочей частоты.

2. Для увеличения эффективности магнитно-импульсного источника энергии при использовании схем с несколькими разрядными контурами необходимо устранить электромагнитную связь между ними, что может быть достигнуто экранированием или взаимноортогональным расположением токопроводов к нагрузке.

**Список литературы:** 1. Магнитно-импульсное притяжение листовых металлов-перспективное направление в развитии электромагнитной штамповки: XI

Міжнародна наук.-техн. конф. "Проблеми сучасної електротехніки-2010". – Київ 1-3 червня, 2010 / *Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов*. – К.: Технічна електродинаміка, Тематичний випуск, 2010. – Ч. 1. – С. 175-180. **2.** Пат. 44933 України, В21 D 26/14. Генератор багаторазових імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів / *Ю.В. Батыгин, О.Ю. Бондаренко, А.В. Гнатов, Г.С. Сєриков, Є.О. Чаплигин*; заявник та патентовласник Харківський нац. авт.-дор. ун-т. – № u200903072. – Заявл. 01.04.2009; Опубл. 26.10.2009. Бюл. № 20. **3.** Пат. 61008 України, В21 D 26/14. Генератор багаторазових імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів з розгалуженим колом комутуючих пристроїв / *Ю.В. Батыгин, В.В. Воробйов, А.В. Гнатов, А.С. Сосков, Є.О. Чаплигин*; заявник та патентовласник Харківський нац. авт.-дор. ун-т. – № u2010 12932. – Заявл. 01.11.2010; Опубл. 11.07.2011. Бюл. №13. **4.** *Батыгин Ю.В.* Переходной процесс в разрядном контуре магнитно-импульсной установки при электрическом пробое в цепи нагрузки / *Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, В.В. Воробьев, Щ.В. Гнатова, Е.Ф. Еремина* // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 5. – С 58-61. **5.** *Атабеков Г.И.* Основы теории цепей. – М: Энергия. 1969. – 424 с. **6.** *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. – М: Наука, 1973. – 831 с.



**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, диссертации кандидата технических наук в Харьковском военном университете 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 Шашина 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.



**Сабокарь Олег Сергеевич.** Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, студент 2-го курса кафедры "Автомобильная электроника"; 61002, г.Харьков, ул. Петровского, 25; тел: (057) 700-38-52

*Поступило в редколлегию 30.02.2012  
Рецензент д.т.н., проф. Лутиков В.С.*