

УДК 621.318

Ю.В. БАТЫГИН, д-р техн. наук, проф., зав. каф., ХНАДУ, Харьков
А.В. ГНАТОВ, канд. техн. наук, ХНАДУ, Харьков
О.С. САБОКАРЬ, студент, ХНАДУ, Харьков
Щ.В. ГНАТОВА, аспірант, ХНАДУ, Харьков

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАРЯДНОЙ ЦЕПИ НА ТОК В
РАЗРЯДНОМ КОНТУРЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ
УСТАНОВКИ. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Стаття присвячена визначенню міри впливу параметрів зарядного кола на формування імпульсу струму в розрядному контурі при розряді нагромаджувачів ємнісної енергії. Проведена обробка експериментальних даних, отриманих за допомогою індукційного датчика – пояса Роговського. Проаналізовано вплив параметрів зарядного кола на форму і характеристики розрядного струму.

Статья посвящена определению степени влияния параметров зарядной цепи на формирование импульса тока в разрядном контуре при разряде накопителей емкостной энергии. Проведена обработка экспериментальных данных, полученных с помощью индукционного датчика – пояса Роговского. Проанализировано влияние параметров зарядной цепи на форму и характеристики разрядного тока.

Введение.

Анализ основных достижений и публикаций, постановка задачи.
На данном этапе развития машиностроительной отрасли, необходимость в использовании принципиальных ресурсосберегающих технологий обуславливает разработку новейших процессов производства, к числу которых относятся бесконтактные методы магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) [1, 2]. Силовая магнитно-импульсная установка (МИУ) является источником мощности в комплексах применяемых для пластического формоизменения металлов с использованием импульсного магнитного поля. Работа данной МИУ основана на использовании запасенной энергии электрического поля, с дальнейшим ее преобразованием в механическую энергию, при взаимодействии электромагнитных полей с индуцированными токами [2, 3].

При экспериментальной апробации МИУ важнейшими параметрами являются амплитудные и частотные характеристики разрядного тока,

а также его форма. Сочетание этих характеристик позволяет достигать требуемых результатов воздействия на обрабатываемый объект.

Параметры разрядного контура МИУ определяют форму разрядного тока с соответствующими ему характеристиками. Но в зависимости от схемной реализации, например, как в [3-5] состав (параметры) зарядного контура также участвуют в формировании токового импульса в момент разряда МИУ.

Возникает необходимость в определении степени влияния зарядной цепи (ее состава и электротехнических характеристик) на процесс разряда, т.к. в технологиях магнитно-импульсной обработке металлов форма разрядного тока является определяющим фактором. По форме разрядного тока и его характеристикам можно судить о степени реализации МИОМ с рассматриваемой МИУ.

Авторское предложение. С целью получения желаемой формы разрядного сигнала, в зарядный контур МИУ (рис. 1) включались различные электротехнические устройства – это катушка индуктивности (дроссель), дополнительное активное сопротивление (резистор), а также замена электромеханических коммутаторов (пускателей) электрическими (тиристорами).

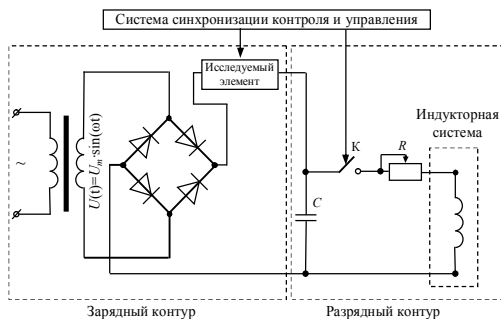


Рис. 1. Схема магнитно-импульсной установки для многократного генерирования разрядных импульсов.

Исследуемая МИУ предполагает работу в режиме многократного повторения токовых импульсов в разрядном контуре. Из этого следует, что время, затраченное на заряд емкостных накопителей энергии, является принципиально важным.

Использование вышеперечисленных элементов в зарядном контуре МИУ приводит к ряду характерных изменений. Так, например, замена

автоматического пускателя тиристором исключает возможность пробоя и появления электрической дуги, вследствие чего наблюдается дрожание, залипание контактов пускателя или их полное сплавление в момент замыкания и размыкания цепи. По той причине, что открытие запирающего $p-n$ перехода осуществляется значительно быстрее, чем срабатывание втягивающего механизма пускателя, использование тиристора является более предпочтительным, причем робота циклов заряда-разряда становится значительно быстрее и более контролируемой [3, 4].

В ходе проведения экспериментов, из-за мгновенных падений напряжений, наблюдался сбой в работе, как аналогово-вычислительной техники, так и в системе синхронизации контроля и управления МИУ. Решением таковой проблемы является включение в зарядный контур индуктивности (дресселя) и активного сопротивления, что, в свою очередь, положительно влияет на протекание процесса заряда. За счет собственной индуктивности дресселя, его использование позволяет снизить мгновенные значения ударного тока заряда на конденсаторах, тем самым, снижая мгновенные падения напряжения на обмотках повышающего трансформатора. В совокупности с последовательно подключенным активным сопротивлением, это дает возможность корректировать величину времени заряда.

Целью настоящей работы является определение влияния параметров зарядного контура МИУ на формирование тока в разрядном контуре при разряде накопителей емкостной энергии.

Расчетные соотношения. Экспериментальные исследования проводились на оборудовании лаборатории электромагнитных технологий ХНАДУ. В качестве источника мощности использовалась магнитно-импульсная установка МИУС-2, которая обладает следующими характеристиками [1]:

- работа от сети ~ 220 В;
- зарядное напряжение до 2 кВ, запасаемая энергия до 2 кДж;
- собственная частота в импульсе $\sim 7,5$ кГц, в комплекте с согласующими устройствами – импульсными трансформаторами $\sim 1 \dots 2$ кГц;
- частота повторения разрядных импульсов до ~ 10 Гц;
- емкость конденсаторов $C = 1200$ мкФ.

Далее приведен алгоритм численной обработки экспоненциально затухающих колебаний разрядного сигнала.

Сигнал в разрядном контуре МИУ измерялся в первичной обмотке согласующего устройства с помощью индукционного датчика – пояса Роговского. Исходя из принципов работы пояса Роговского, сигнал, измеренный с его помощью, является производной от первона-

чального (измеряемого) сигнала, протекающего в проводнике, который он охватывает. Для определения первичного сигнала – $I(t)$, необходимо произвести интегрирование сигнала $U(t)$, измеряемого с помощью пояса Роговского.

Данная операция может быть осуществлена одним из численных методов, например, методом Симпсона [7]

$$I(t) = \int_{t_0}^{t_n} U(t) dt = \frac{t_n - t_0}{3n} \left(\frac{U_0 + U_n}{2} + (U_1 + U_2 + \dots + U_{n-1}) + 2 \left(\frac{U_1}{2} + \frac{U_3}{2} + \dots + \frac{U_{n-1}}{2} \right) \right) \quad (1)$$

где t – значение времени в конкретной точке интегрируемого сигнала; U – значение интегрируемой функции напряжения, соответствующее временным отсечкам измеряемого сигнала; $I(t)$ – функция силы тока от времени; n – количество точек интегрирования.

Целесообразность в использовании данного метода состоит в том, что он является наиболее точным, в отличие от аналогичных методов прямоугольников и прямолинейной трапеции [5].

Применим формулу (1) для интегрирования экспериментально полученных осциллограмм напряжения. Расчет и построение графических зависимостей $y = I(t)$ проводился на базе пакета программ Microsoft Office Excel 2003.

Для более качественного анализа процесса протекания тока, форма которого приближается к колебательной и характерной для реальных МИУ, необходимо рассчитать ряд фундаментальных величин, от которых, собственно, и зависит, как форма токового сигнала, так и его амплитудные и временные характеристики. Это декремент затухания сигнала токового импульса δ , индуктивность L и активное сопротивление R разрядной цепи.

Запишем основные расчетные соотношения в соответствии с [2-4, 7]. Циклическая частота колебаний, рад/с

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (2)$$

Логарифмический декремент затухания

$$\lambda = \ln \frac{U_1}{U_2}, \quad (3)$$

где $U_1 = U(t)$; $U_2 = U(t+T)$ – значение напряжения U , В за время t , с, измеренное с помощью пояса Роговского; T – период колебания, при

заданной частоте f , Гц (среднее значение, измеренное по осциллограмме) $T = 1/f$.

Абсолютный декремент затухания

$$\delta = \lambda/T. \quad (4)$$

Зная величину декремента затухания, можно судить об интенсивности изменения амплитуды сигнала за промежуток времени равный периоду. Чем меньшее значение декремента затухания, тем большее воздействие будет происходить на металл со стороны магнитного поля индуктора.

Собственная частота колебаний разрядного контура в рад/с определяется:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega^2 + \delta^2}. \quad (5)$$

Индуктивность L , Гн разрядного контура определяется:

$$L = 1/(\omega_0^2 \cdot C). \quad (6)$$

Активное сопротивление R , Ом разрядного контура определяется:

$$R = 2 \cdot \delta L. \quad (7)$$

Совокупность выражений (1), (4)-(7), в указанной последовательности, позволяют рассчитывать все основные характеристики процесса разряда емкостного накопителя в рассматриваемой МИУ. По значениям приведенных показателей, можно судить о работоспособности самой МИУ. Для чистоты экспериментальных исследований к МИУ, через согласующее устройство - импульсный трансформатор, был подсоединен цилиндрический индуктор, у которого рабочая область имеет форму усеченного конуса. Общий вид согласующего устройства с подключенным к нему индуктором представлен на рис. 2.

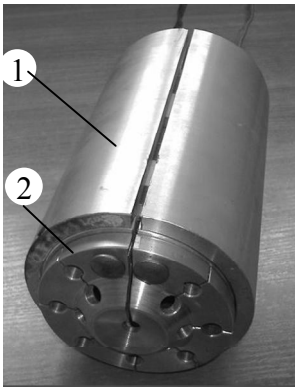
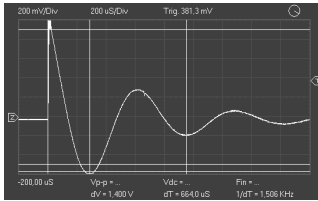


Рис. 2. Согласующее устройство (1) с индуктором-инструментом (2).

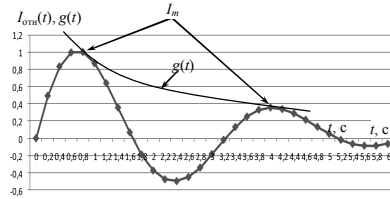
Осциллограммы сигнала в разрядной цепи измерялись с помощью цифрового осциллографа PV6501.

В ходе проведения эксперимента были проведены следующие опыты.

1. Установка МИУС-2 без исследуемых элементов в зарядной цепи. Накопители емкостной энергии заряжались до напряжения $U = 1000$ В.

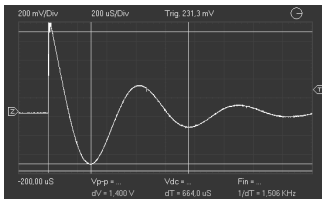


а

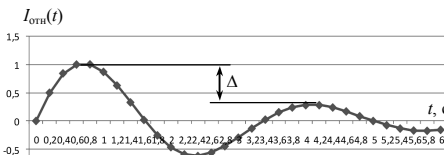


б

Рис. 5. Ток в зарядной цепи МИУ с резистором $R = 170$ Ом: а – экспериментально измеренная осциллограмма напряжения; б – график изменения разрядного тока.

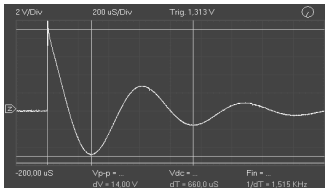


а

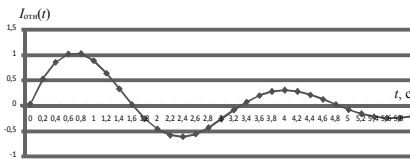


б

Рис. 6. Ток в зарядной цепи МИУ с дросселем и тиристором: а – экспериментально измеренная осциллограмма напряжения; б – график изменения разрядного тока.



а



б

Рис. 7. Ток в зарядной цепи МИУ с дросселем: а – экспериментально измеренная осциллограмма напряжения; б – график изменения разрядного тока.

Замечание. "Завал" графика ниже оси абсцисс в проинтегрированной зависимости рис. 4,б, гипотетически можно объяснить статистической погрешностью данного метода измерений. Даная погрешность спровоцирована тем, что при низких уровнях амплитуд исследуемых сигналов, имеют место высокочастотные наводки. Последние, искажают сигнал с пояса Роговского и, соответственно, вносят свою погрешность в вычисления искомым характеристик [6].

В табл. 1 представлены конечные результаты расчетов по соотношениям (2)-(7) отдельных искомым показателей характеризующих токый сигнал в разрядном контуре МИУ, в зависимости от элемен-

тов зарядной цепи. Приведенные табличные показатели являются усредненными.

Таблица 1 – Расчетные характеристики

Исследуемые элементы в зарядной цепи	Характеристики разрядного контура			
	Декремент затухания		Индуктивность L , мкГн	Активное сопротивление R , Ом
	λ	δ		
Резистор $R=12$ Ом	1,1711	1699,27	9,43	0,030
Резистор $R=170$ Ом	1,2577	1886,66	8,99	0,033
Дроссель и тиристор	1,0197	1664,00	8,92	0,029
Дроссель	1,0986	1647,91	9,10	0,030

Применяя операцию интегрирования к экспериментально измеренным осциллограммам, можно получить временную зависимость функций тока без применения интегрирующих цепочек в индукционных датчиках. Это дает ряд преимуществ в использовании интегрирующих методов в практике МИОМ. Т.к. для измерения конкретного сигнала, при изменении частоты разрядного импульса на выходе с МИУ, необходима своя интегрирующая цепочка. А применение интегрирующих методов при обработке измеренных осциллограмм с помощью индукционных датчиков, позволяет, не применяя интегрирующие цепочки, получить временную зависимость разрядного тока. Это свидетельствует об универсальности интегрирующих методов в практике МИОМ.

Обладая временными зависимостями функций тока можно судить об электромагнитных переходных процессах в разрядном контуре. Функции напряжения и тока от времени (измеренные в ходе эксперимента – функции напряжения от времени и полученные после интегрирования – функция тока от времени) в разрядном контуре МИУ эквивалентны между собой с разницей $\sim \pi/2$, т.е. найденные значения декремента затухания функции напряжения, так же применимы и для функции тока от времени.

В практике магнитно-импульсной обработки металлов временная функция тока индуктора, как правило, имеет вид экспоненциально затухающей синусоиды, то есть $I(t) = I_m \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin \varphi$, где I_m – амплитуда тока, δ – относительный декремент затухания, $\varphi = \omega \cdot t$ – фаза, ω – циклическая частота возбуждающего тока. Это согласуется с полученными результатами обработки осциллограмм, например, на рис. 5, б

показана функция $g(t) = e^{-\delta T}$, задающая степень затухания синусоидальной функции $I_{\text{отн}}(t)$ с экстремумами I_m .

Значение силы тока имеет непосредственное влияние на создаваемый им магнитный поток $\Phi = L \cdot I$, следовательно, величина самого магнитного потока приобретает временную зависимость токового сигнала, где L – действительное значение индуктивности разрядного контура, найденное входе обработки осциллограмм. Исходя из вышесказанного и основываясь на принципе работы МИУ, можно сказать, что влияние магнитного поля (при заданной частоте f), создаваемого разрядным током в индукторе, подключенного к МИУ, будет тем сильнее, чем меньше разница между значениями величины магнитного потока $\Phi(t)$ и $\Phi(t+T)$. То есть, чем меньше значение декремента затухания δ , или величины Δ на рис. 6,б тем большее воздействие будет на заготовку со стороны магнитного поля индуктора – инструмента магнитно-импульсной обработки.

Результаты обработки экспериментальных данных (рис. 3-7) показывают существенное отличие между характеристиками разрядного контура в зависимости от параметров зарядной цепи. Помимо изменения взаимосвязанных показателей, замечено также, изменение независимых (от силы тока) переменных, к числу которых относят индуктивность и активное сопротивление разрядного контура. В свою очередь, повышение индуктивности приводит к увеличению значения магнитного потока, а уменьшение сопротивления способствует увеличению амплитудного значений тока I_m (рис. 4, 5, 7). Это хорошо согласуется с известными положениями МИОМ.

Обработка экспериментальных данных полученных в опыте без исследуемых элементов в зарядной цепи МИУ (рис. 3) показала, что изменение разрядного тока имеет аperiodический характер. Это свидетельствует о наличии значительной составляющей активного сопротивления в разрядном контуре МИУ. Т.е. при данной схемной реализации, характеристики импульса разрядного тока не соответствуют тем параметрам, при которых будет эффективная работа МИУ.

Особое внимание необходимо уделить опыту, когда в зарядной цепи стоит только активное сопротивление с номиналом 12 Ом (рис. 4). Расчеты показывают, что в этом случае было получено наибольшее значение индуктивности в разрядном контуре и одно из наиболее выгодных значений декремента затухания токового импульса. Это говорит о том, что рассматриваемая схемная реализация является наиболее предпочтительной с точки зрения передачи энергии от МИУ к индуктору-инструменту МИОМ.

Проведенные исследования показали, что для эффективной работы МИУ в качестве источника мощности необходимо, чтобы в ее зарядную цепь было включено активное сопротивление порядка 10-15 Ом, а в качестве электронного ключа (для разъединения зарядного контура с разрядным), предпочтительно использовать тиристор.

Выводы.

1. Произведена обработка экспериментальных данных и осуществлен качественный анализ влияния параметров зарядного контура МИУ на формирование тока в разрядном контуре в процессе разряда накопителей емкостной энергии.

2. Проведенные исследования показали, что в рассматриваемой схемной реализации источника мощности – МИУ, параметры зарядного контура влияют на процессы в разрядной цепи установки.

3. Наиболее оптимальным, с точки зрения передачи энергии от источника мощности к инструменту-индуктору, является схемная реализация, в которой применяется тиристор в качестве электронного ключа, разъединяющего зарядный и разрядный контуры установки. Если последняя схемная реализация невозможна, то следует в зарядную цепь включить активное сопротивление номиналом 10-15 Ом. Данное решение обеспечивает достаточные условия для эффективной работы МИУ.

Список литературы: 1. *Гнатюв А.В.* Безконтактне магнітно-імпульсне рихтування автомобільних кузовів / *А.В. Гнатюв* // 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.* Расчетные характеристики магнитно-импульсной установки для обработки металлов серий импульсов / *Ю.В. Батыгин, В.В. Воробьев, А.В. Гнатюв* и др. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПИ", 2011. – № 12. – С. 86-95. 4. Pat. USA 2008/0163661 A1. Dent removing method and device / *Meichtry et al.* – Pub. Date: Jul. 10, 2008. 5. *Гнатюв А.В., Драченко С.А., Сериков Г.С.* и др. Обработка результатов измерения импульсных токов поясом Роговского без применения интегратора // Материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. "Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2010)", Одесса, 24-28 мая 2010 г. – Одесса: Политехпериодика, 2010 – Т. 1. – С. 243. 6. *Выгодский. М.Я.* Справочник по высшей математике. – М.: Наука, 2002. – 559 с. 7. *Кузмичев В.Е.* Законы и формулы физики. – К.: Наук. думка, 1989. – 864 с.



Батыгин Юрий Викторович – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики; 61002, г. Харьков, ул. Петровского, 25; тел: (057) 700-38-52



Гнатов Андрей Викторович – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, кандидат технических наук, доцент кафедры "Автомобильная электроника"; 61002, г. Харьков, ул. Петровского, 25; тел: (057) 700-38-52



Гнатова Щасяна Валиковна – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, аспирант кафедры "Автомобильная электроника"; 61002, г. Харьков, ул. Петровского, 25; тел: (057) 700-38-52



Сабокарь Олег Сергеевич – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, студент 1-го курса кафедры "Автомобильная электроника"; 61002, г. Харьков, ул. Петровского, 25; тел: (057) 700-38-52

*Поступила в редколлегию 22.06.2011
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.*