

Расчет основных параметров магнитно-импульсной установки для обработки металлов серий импульсов

БАТЫГИН Ю.В., ГНАТОВ А.В., ЧАПЛЫГИН Е.А., АРГУН Щ.В.

Обоснована идея перехода от однократного к многократному силовому воздействию в технике магнитно-импульсной обработки металлов. Предложена принципиальная схема магнитно-импульсной установки, работающей в режиме генератора серийного повторения импульсов тока. Рассчитаны основные характеристики процесса заряда емкостного накопителя в течение определённого временного интервала при заданном уровне потребляемой мощности. Расчётные данные дополнены осциллограммами процессов заряда и разряда емкостных накопителей энергии магнитно-импульсной установки.

Ключевые слова: обработка металлов, магнитно-импульсная установка, зарядный контур, индукторная система, зарядное напряжение, разрядный импульс

Современная магнитно-импульсная система (комплекс) предполагает однократное силовое воздействие на обрабатываемый объект с амплитудой, достаточной для необходимого уровня его деформирования и выполнения заданной производственной операции. Источниками энергии являются высоковольтные магнитно-импульсные установки (5–10 кВ и выше) с соответствующим набором необходимого электротехнического оборудования — батарей импульсных конденсаторов, рассчитанных на работу под высоким напряжением, высоковольтных коммутаторов, систем автоматики, контроля, защитных устройств и др. [1, 2].

Общим и существенным недостатком магнитно-импульсных генераторов мощности является то, что их работа основана на единичном импульсе силового воздействия. Это ограничивает технологические возможности выполняемых операций, а следовательно, значительно сужает область их применения.

Идея, положенная в основу предлагаемой в статье магнитно-импульсной установки (МИУ), состоит в замене мощного однократного силового воздействия серийю малых импульсов, достаточной для достижения заданного уровня деформирования объекта обработки, т.е. реализации поставленной технологической задачи [3, 4]. Следует отметить, что аналогичное предложение, но без какого-либо обоснования и конкретики, прозвучало в рекламных материалах американской фирмы «Electro-impact», отделившейся от концерна «Boeing» и ве-

The idea of making a shift from using a single-shot force impact to using a multiple-shot one in the techniques of magnetic-impulse processing of metals is substantiated. The basic design arrangement of a magnetic-impulse installation operating as a generator producing a series of repeated current impulses is proposed. The main parameters characterizing the capacitive energy storage device charging process for a certain interval of time at a preset level of consumed power are calculated. The calculated data are supplemented by oscillograms illustrating the charge/discharge processes of the capacitive energy storage devices used in the magnetic-impulse installation.

Key words: processing of metals, magnetic-impulse installation, charging loop, inductor system, charging voltage, discharge impulse

дущей разработки магнитно-импульсных комплексов для внешней рихтовки корпуса самолётов [5].

Авторские предложения. Технически предлагаемая идея может быть реализована за счёт питания МИУ от сети напряжением 220 В, 50 Гц. В этом случае напряжение заряда емкостного накопителя можно выбирать примерно до 2000 В (с повышающим трансформатором или без него), частота следования разрядных импульсов может быть связана с рабочей частотой сети (50, 25, 10 Гц и ниже), а временные интервалы между импульсами должны обеспечивать процесс заряда конденсаторов. Амплитуда каждого импульса должна соответствовать условию достижения уровня механической энергии, необходимого для минимальной работы деформации по преодолению предела текучести металла обрабатываемого объекта.

Число импульсов в серии выбирается из условия получения требуемого уровня деформации по условиям технического задания на производственную операцию в целом. Грубая оценка осуществляется по значению вкладываемой в процесс энергии, рассчитанной суммированием для всех импульсов в серии. Например, при частоте следования разрядных импульсов ~ 10 Гц в течение одной минуты может генерироваться серия из 600 импульсов. Если по условиям технологического задания требуется энергия ~ 6 кДж, то один импульс давления должен обеспечивать не менее ~ 10 Дж. При этом должно соблюдаться только одно условие: энергия одного импульса должна быть доста-

точной для преодоления предела текучести обрабатываемого металла. Больше или меньшее значение энергии по условиям технологического задания может устанавливаться числом разрядных импульсов, т.е. временем силового воздействия. Таким образом, уровень энергии, подаваемой в рабочую зону индукторной системы, может регулироваться не только применением зарядного напряжения накопителя при установленном значении ёмкости, но и временем силового воздействия [6, 7].

В отличие от известных комплексных устройств для магнитно-импульсной обработки металлов однократного действия предлагаемая система должна включать не только основные функциональные составляющие, такие как источник электромагнитной энергии, устройства контроля, управления, инструмент-индуктор, предназначенный для осуществления конкретной технологической операции, но и электронную систему синхронизации процессов «заряда–разряда» в схеме собственно МИУ. Как показывают предварительные оценки, источниками энергии могут служить низковольтные электротехнические системы (примерно до 1 кВ). Соответственно, все необходимые устройства могут быть рассчитаны на работу под относительно низким напряжением. Вместо высоковольтных коммутаторов могут применяться обычные тиристоры. Схемы синхронизации, контроля и управления могут быть построены на устройствах низковольтной и слаботочной электроники.

Вышеизложенное позволяет предположить, что стоимость источника энергии для практической реализации идеи серийного силового воздействия должна снизиться по сравнению с известными высоковольтными аналогами более чем в 10 раз.

На рис. 1 представлена схема магнитно-импульсной системы для многократного генерирования

разрядных импульсов. Для того чтобы оперировать конкретными значениями величин в объяснении принципиальной работоспособности схемы, положим, что частота следования разрядных импульсов составляет примерно 10 Гц.

Зарядное устройство заряжает емкостный накопитель до заданного уровня энергии в течение времени примерно до 0,1 с. Далее следует разряд на нагрузку (индукторную систему) в течение ~ 0,001, 0,002 с. Затем процесс «заряд–разряд» повторяется. Эти циклы идут в течение заданного временного интервала. Устройство синхронизации контроля и управления в энергетическом блоке обеспечивает синхронную работу коммутаторов K_1 и K_2 в течение каждого цикла «заряд – разряд» так, что при заряде ёмкости коммутатор K_1 открыт, а K_2 закрыт. По достижении требуемого напряжения на конденсаторах K_1 разрывает зарядный контур, в то время как K_2 замыкает разрядную цепь.

Узловым вопросом работоспособности предлагаемой магнитно-импульсной системы является соответствие практически возможного уровня мощности, потребляемой из сети в течение реального временного интервала, уровню электромагнитной энергии, запасаемой емкостным накопителем. Решение этого вопроса обеспечивается, в первую очередь, должной работой зарядного устройства системы.

Цель настоящей работы – обоснование работоспособности магнитно-импульсного источника мощности в режиме многократного повторения токовых импульсов, включающее расчёт его основных характеристик и последующее сопоставление их с экспериментальными характеристиками реальной магнитно-импульсной установки, изготовленной и предназначенной для обработки металлов серийой импульсов электродинамического воздействия.

Расчетные соотношения. Дифференциальное уравнение, описывающее заряд ёмкости через резистор [8]:

$$\frac{dU_c(t)}{dt} + \frac{1}{t}U_c(t) = \frac{1}{t}U(t), \quad (1)$$

где $t = RC$ – постоянная времени заряда; $U(t)$ – напряжение на входе выпрямителя зарядного устройства.

Временная зависимость для напряжения на ёмкости как решение дифференциального уравнения (1), удовлетворяющее нулевому начальному условию, имеет вид [8]:

$$U_c(t) = \frac{U_m}{t} \int_0^t \frac{\exp\left(-\frac{x}{t}\right)}{x} f(x) dx, \quad (2)$$

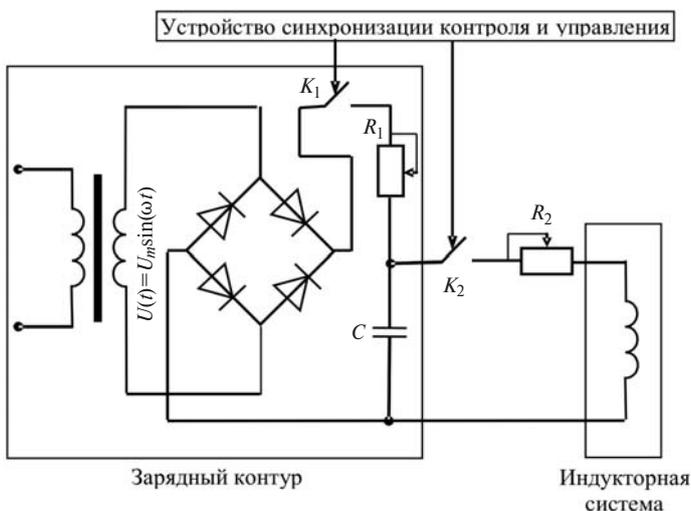


Рис. 1. Схема магнитно-импульсной системы для многократного генерирования разрядных импульсов

где U_m – амплитуда напряжения источника; $f(t) = |\sin(\omega t)|$ – временная зависимость напряжения источника, обусловленная наличием двухполупериодного выпрямителя.

Ток через ёмкость

$$J_c(t) = \frac{1}{R}(U(t) - U_c(t)). \quad (3)$$

Мгновенная мощность

$$P(t) = U_c(t)J_c(t). \quad (4)$$

Среднее значение мощности, потребляемой из сети, определяется, как известно, отношением интеграла мгновенной мощности за время заряда ко времени заряда ёмкостного накопителя электромагнитной энергии:

$$\bar{P}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T U_c(t)J_c(t)dt, \quad (5)$$

где T – время заряда.

Для того чтобы выражения (2)–(5) адекватно описывали процесс заряда в выбранной схеме, следует учесть, что через ёмкость ток может протекать только в одном «положительном» направлении, обусловленном расположением вентилей в выпрямительном устройстве. Это условие следует из зависимости (2).

Если

$$J_c(t_n) = \frac{1}{R}(U(t_n) - U_c(t_n)), \quad (6)$$

то для временных интервалов, где $t_n \in [t_{ni}, t_{ne}]$, в зарядной цепи протекает ток ($n = 1, 2, 3, \dots, t_{ni}, t_{ne}$ – граничные значения).

С учётом вышеприведенных замечаний, а также конкретного вида временной функции источника напряжения записываем выражение для расчёта зарядного напряжения на ёмкостном накопителе установки:

$$U_c(t_n) = U_{0n} + \frac{U_m}{t} \int_{t_{ni}}^{t_{ne}} \exp\left(-\frac{t_n}{\tau}\right) |\sin(\omega x)| dx, \quad (7)$$

где U_{0n} – напряжение на ёмкости в момент времени t_{0i} .

Выражения (6), (7), (3)–(5) в указанной последовательности позволяют рассчитывать все основные характеристики процесса заряда ёмкостного накопителя в рассматриваемой МИУ.

В конечном итоге, для большей иллюстративности в описании работы предлагаемой МИУ и контроля достоверности численного интегрирования можно добавить хорошо известные простейшие зависимости для разрядного контура [1].

Напряжение и ток в нагрузке:

$$U_{Li}(t) \approx U_{cm} \exp(-dt) \cos(\omega_0 t); \quad (8)$$

$$J_{Li}(t) \approx \frac{U_{cm}}{Z} \exp(-dt) \sin(\omega_0 t), \quad (9)$$

где $d = \frac{R_2}{2(L_c + L_i)}$ – декремент затухания в разрядном контуре; $\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{(L_c + L_i)C}}$ – частота колебаний

в разрядном контуре; $Z = \sqrt{\frac{(L_c + L_i)}{C}}$ – волновое со-

противление разрядного контура; L_c, L_i – значения индуктивности батареи ёмкостных накопителей и собственно индукторной системы.

Численные оценки. Согласно схеме рис. 1 зарядный контур МИУ содержит ёмкостный накопитель энергии $C = 1000$ мкФ, токоограничивающее сопротивление $R_1 = 10, 100$ Ом и источник напряжения (вторичная обмотка входного трансформатора) с частотой промышленной сети $f = 50$ Гц и амплитудой $U_m \approx 1000, 2000$ В.

Начнём с режима, когда время заряда ёмкости мало настолько, чтобы особенности процесса проявились достаточно чётко: $R_1 \approx 10$ Ом; $U_m \approx 1000$ В.

Результаты вычислений представлены на рис. 2.

Из расчета следует, что заряд ёмкости происходит до амплитуды напряжения источника и носит «ступенчатый» характер. В интервалы времени, когда ток равен нулю («провалы» графика на рис. 2, б), напряжение на накопителе остаётся неизменным (горизонтальные отрезки на кривых рис. 2, а). В эти же временные интервалы мощность из сети не потребляется («провалы» графика на рис. 2, в). Эффективность процесса заряда возрастает. Падает среднее значение мощности, потребляемой из сети. Этот факт проявляется в сравнении мгновенных значений амплитуд со средними значениями.

Время заряда до напряжения источника составляет ~ 25 мс, т.е. циклы заряда ёмкостного накопителя могут повторяться с частотой примерно до 40 Гц.

Все отмеченные особенности процесса заряда получены для идеального случая, когда ток через ёмкость течёт строго в одном направлении согласно схеме рис. 1, т.е. разрядный ток отсутствует. Практически такая идеализация пренебрегает возможной утечкой по элементам контура.

Для иллюстрации влияния процессов разряда, в той или иной степени сопровождающих заряд ёмкости, с помощью (2)–(5) выполним те же расчёты, но для противоположного случая, когда ничто не мешает появлению разрядных токов.

Результаты расчётов представлены на рис. 3.

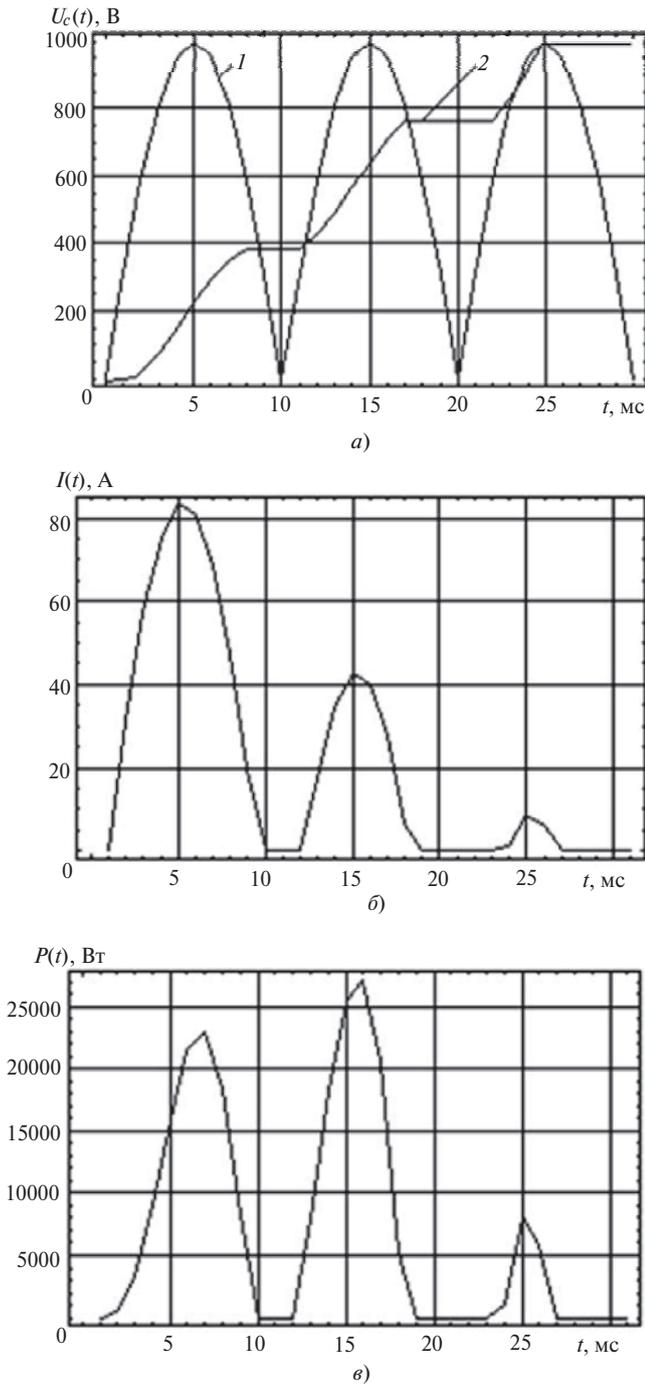


Рис. 2. Численные оценки для идеализации отсутствия токов утечки: а – напряжение; б – зарядный ток; в – мгновенное значение мощности (среднее за время заряда ~ 7,3 кВт): 1 – напряжение источника питания; 2 – зарядное напряжение

Расчётные зависимости показывают, что появление разрядного тока соответствует участкам на кривой 2 рис. 3,а, где производная по времени меняет знак. На графике для тока (рис. 3,б) этим интервалам времени соответствуют «затемнённые» отрицательные участки функциональной зависимости. Этим же временным интервалам на рис. 3,в соответствуют отрицательные значения мгновенной мощности («затемнённые участки»), опреде-

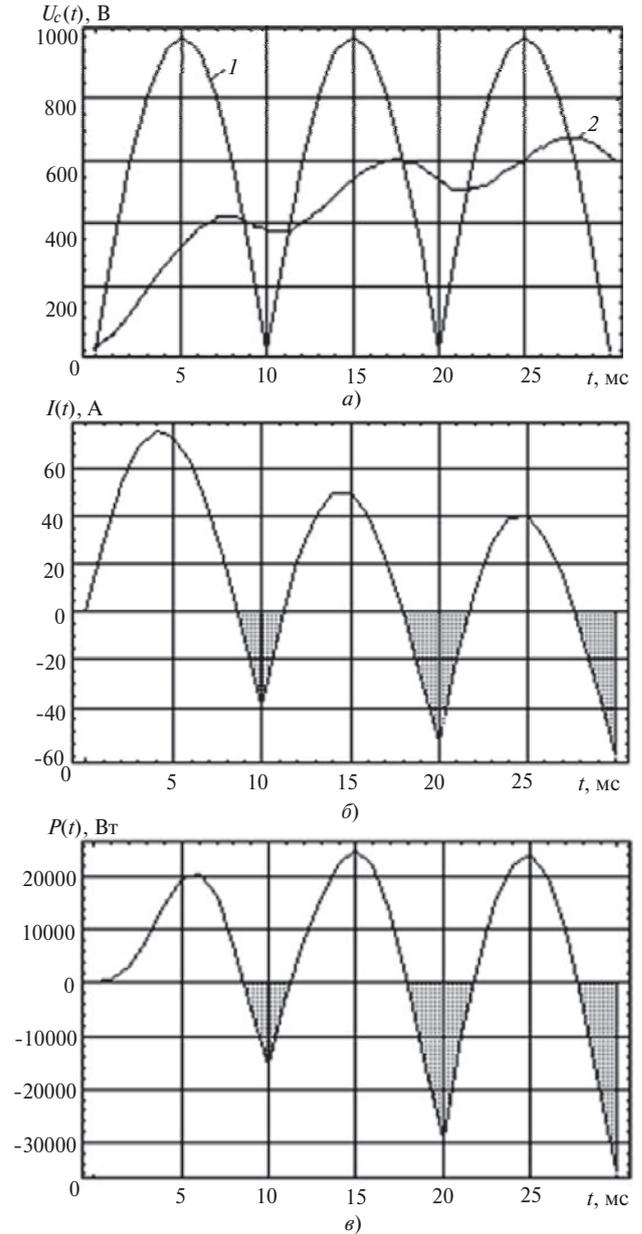


Рис. 3. Численные оценки с учетом токов утечки: а – напряжение; б – зарядный ток; в – мгновенное значение мощности: 1 – напряжение источника питания; 2 – зарядное напряжение

ляющие процесс не потребления мощности из сети, а её возврат в сеть.

В целом эффективность процесса заряда существенно снижается; напряжение на ёмкости не может достичь более $\sim 0,6U_m$.

Вернёмся к заряду без токов утечки и для полноты описания работы всей МИУ в целом, задавшись необходимыми данными для вычислений, с помощью (8), (9) рассчитаем напряжение и ток в нагрузке – инструменте (в индукторной системе).

Пусть известны частота токового импульса $f \gg 2$ кГц и относительный декремент затухания сигнала $d_0 \gg 0,15$. Вычисляем, что $w_0 \gg 12,56 \cdot 10^3$ рад/с; $(L_c + L_i) \gg 6,33$ мкГн; $Z \gg 0,08$ Ом, максимум

разрядного тока составляет $\sim 12,57$ кА; максимум энергии, запасаемой емкостным накопителем, $\sim 0,5$ кДж. На рис. 4 приведена графическая иллюстрация многократно повторяющегося цикла «заряд–разряд» емкостного накопителя.

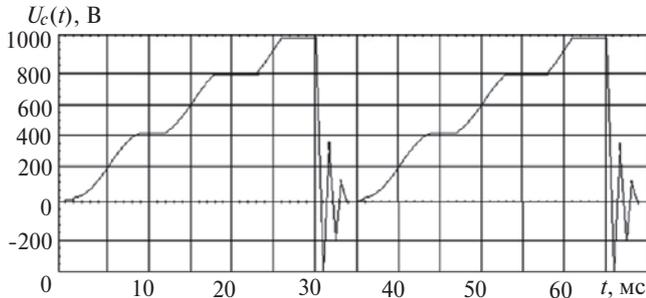


Рис. 4. Численные оценки цикла «заряд–разряд» емкостного накопителя

Повторение вычислений возможно через каждые 35 мс, т.е. разрядные импульсы в индукторной системе – инструменте и, соответственно, импульсы магнитного давления могут следовать с частотой ~ 28 Гц.

В заключение сделаем численные оценки для экстремального режима работы предлагаемой МИУ. Речь идёт о максимуме зарядного напряжения $U_m \gg 2000$ В при сохранении значения средней потребляемой мощности примерно 7,3 кВт. Расчёты в предположении отсутствия разрядного тока показывают, что для реализации такого режима следует принять $R_1 \gg 30$ Ом. Графические иллюстрации результатов вычислений приведены на рис. 5.

Из расчётов следует, что при запасаемой энергии ~ 2 кДж предлагаемая МИУ может работать в режиме многократного генерирования разрядных токов с частотой их следования до ~ 12 Гц.

Эксперимент. По результатам расчетов была изготовлена экспериментальная МИУ, работающая в режиме многократного повторения разрядных импульсов на нагрузку – индукторную систему (инструмент для выполнения заданной производственной операции).

Емкость накопителя энергии за счёт подключения различного числа конденсаторов могла варьироваться и составлять в максимуме до 1000 мкФ. Повышающий трансформатор позволял осуществлять заряд до напряжения примерно 2 кВ. Варьирование значений токоограничивающих резисторов в зарядном и разрядном контурах системы позволяло изменять частоту следования импульсов тока в нагрузке. В наиболее устойчивом рабочем режиме было получено ~ 5 –12 Гц при напряжении на емкостном накопителе ~ 1 кВ, что соответствует запасаемой энергии $\sim 0,5$ кДж.

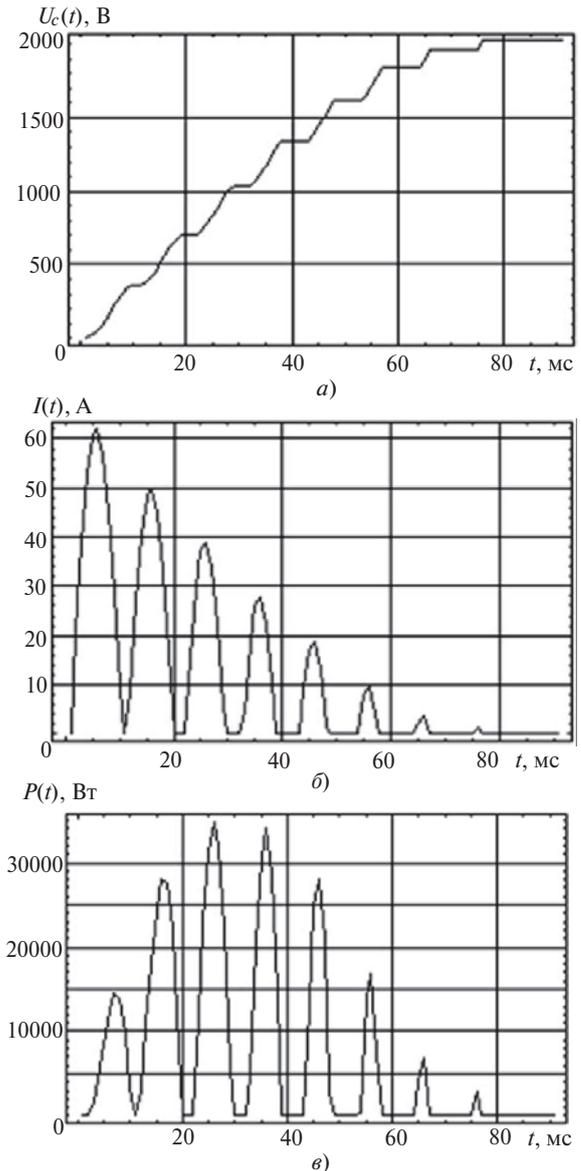


Рис. 5. Численные оценки для экстремального режима работы МИУ: а – напряжение; б – зарядный ток; в – мгновенная мощность (среднее значение за время заряда $\sim 7,3$ кВт)

Примеры типичных осциллограмм зарядного напряжения на емкостном накопителе энергии и разрядного тока показаны на рис. 6.

Экспериментальные характеристики созданной МИУ на рис. 6,а иллюстрируют её работу с периодом повторения ~ 80 мс, что соответствует частоте ~ 12 Гц. Виден процесс заряда и разряда по достижении заданного уровня напряжения. Более чётко разряд иллюстрируется типичной осциллограммой на рис. 6,б. В качестве примера выбран режим достаточно высокоомной нагрузки, при котором для разрядного тока практически имеет место аperiодическая временная зависимость.

Добавим, что эксперименты по магнитно-импульсному притяжению тонкостенных стальных образцов были проведены с помощью описанной выше МИУ [9].

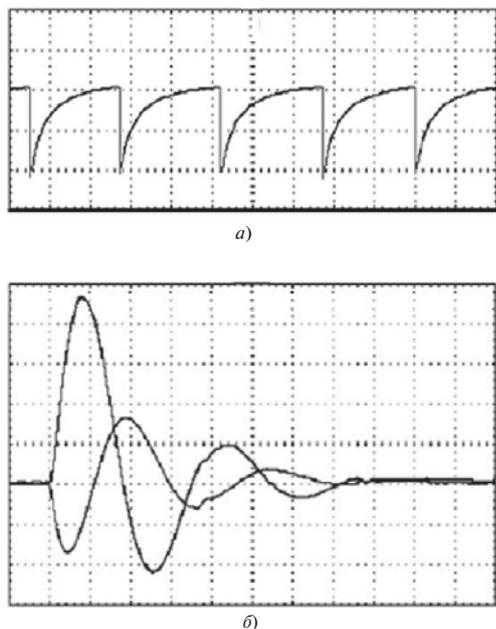


Рис. 6. Осциллограммы: *а* – заряд емкостного накопителя, цена дел. ~ 40 мс; *б* – разряд емкостного накопителя на одновитковый индуктор с согласующим устройством и тонкостенной листовой заготовкой, цена дел. ~ 10 мкс (верхняя осциллограмма – ток индуктора, нижняя – ток, индуцированный в заготовке)

Выводы. 1. Предложенная авторами магнитно-импульсная установка для многократного генерирования разрядных импульсов позволяет обрабатывать металлические объекты серией силовых воздействий, каждое из которых обладает достаточно малой амплитудой, но их интегральное действие обеспечивает выполнение заданной производственной операции.

2. Численные оценки характерных параметров магнитно-импульсной установки, полученные в различных временных и энергетических режимах, показали, что частота следования импульсов в разрядном контуре установки может достигать 12 Гц и выше, при этом средняя мощность, потребляемая из сети, остаётся неизменной ($\sim 7,3$ кВт); запасаемая энергия на емкостном накопителе, определяемая уровнем потребляемой мощности и частотой следования разрядных импульсов, для частоты ~ 12 Гц составляет $\sim 2,0$ кДж.

3. Эксперимент на модельном варианте магнитно-импульсной установки показал ее практическую работоспособность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий, изд. 2-е, перераб. и доп./Под общей ред. Ю.В. Батыгина. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003, 285 с.
2. Batygin Yu.V., Lavinsky V.I., Khimenko L.T. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field. – Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming, Dortmund (Germany), 31 March – 1 April 2004, pp. 157–160.
3. Пат. № 44933 (Украина). Генератор багатозаповних імпульсів струму для магнітно-імпульсної обробки металів/Ю.В. Батыгин, А.Ю. Бондаренко, А.В. Гнатов и др. – БИ, 2009, № 20.
4. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т. 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями. – Харьков: ХНАДУ, 2009, 240 с.
5. Electromagnetic Dent Removal. Режим доступа: <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp>
6. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Чаплыгин Е.А. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии бесконтактной рихтовки кузовных элементов автомобиля. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012, 242 с.
7. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Цилиндрический виток индуктора с разрезом как инструмент для магнитно-импульсной обработки металлов. – Электричество, 2011, № 12, с. 53–59.
8. Атабеков Г.М. Теоретические основы электротехники. Ч.1. – М.: Энергия, 1980, 340 с.
9. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Щиголева С.А. Притяжение тонкостенных металлических листов магнитным полем одновиткового индуктора. – Электричество, 2011, № 4, с. 55–62.

[01.12.2012]

Авторы: Батыгин Юрий Викторович окончил в 1972 г. инженерно-физический факультет Харьковского политехнического института (ХПИ). Докторскую диссертацию по специальности «Техника сильных электрических и магнитных полей» защитил в Национальном техническом университете «ХПИ» в 1994 г. Заведующий кафедрой физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (ХНАДУ).

Гнатов Андрей Викторович окончил в 1998 г. факультет энергетического и специального обеспечения Харьковского военного университета (ХВУ). Кандидатскую диссертацию по специальности «Вооружение и военная техника» защитил в ХВУ в 2004 г. Доцент кафедры физики ХНАДУ.

Чаплыгин Евгений Александрович окончил в 2003 г. ХНАДУ по специальности «Электрические системы и комплексы транспортных средств». Кандидатскую диссертацию по специальности «Техника сильных электрических и магнитных полей» защитил в НТУ «ХПИ» в 2009 г. Доцент кафедры физики ХНАДУ.

Аргун Шасяна Валиковна окончила в 2003 г. НТУ «ХПИ» по специальности «Метрология и измерительная техника». Аспирант кафедры физики ХНАДУ.