

УДК 621.318

Ю.В. БАТЫГІН, д-р. техн. наук, проф., зав. каф., ХНАДУ, Харьков
В.В. ВОРОБЬЕВ, аспірант, ХНАДУ, Харьков
А.В. ГНАТОВ, канд. техн. наук, доц., ХНАДУ, Харьков
Щ.В. ГНАТОВА, аспірант, ХНАДУ, Харьков
Г.С. СЕРИКОВ, асистент, ХНАДУ, Харьков
Е.А. ЧАПЛЫГІН, канд. техн. наук, доц., ХНАДУ, Харьков

РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ СЕРИЕЙ ИМПУЛЬСОВ

Обґрунтовано ідею переходу від однократної до багатократної силової дії в сучасних магнітно-імпульсних технологіях. Запропоновано принципова схема магнітно-імпульсної установки, що працює в режимі генератора серійного повторення імпульсів струму. Проведено розрахунок основних характеристик процесу заряду накопичувача ємності протягом певного часового інтервалу при заданому рівні споживаної потужності. Розрахункові дані доповнені осцилограмами реальних характеристик процесів заряду-розряду.

Обоснована идея перехода от однократного к многократному силовому воздействию в современных магнитно-импульсных технологиях. Предложена принципиальная схема магнитно-импульсной установки, работающей в режиме генератора серийного повторения импульсов тока. Проведен расчет основных характеристик процесса заряда емкостного накопителя в течение определенного временного интервала при заданном уровне потребляемой мощности. Расчетные данные дополнены осциллограммами реальных характеристик процессов заряда-разряда.

Введение. Реализация современных магнитно-импульсных технологий предполагает однократное силовое воздействие на обрабатываемый объект с амплитудой, достаточной для требуемого уровня его деформирования и выполнения, таким образом, заданной производственной операции. Источниками энергии являются мощные магнитно-импульсные установки, представляющие собой высоковольтные электротехнические устройства (5...10кВ и выше) с соответствующим набором необходимых компонент. К таковым относятся, в первую очередь, батареи импульсных конденсаторов, рассчитанных на работу под высоким напряжением, высоковольтные коммутаторы, системы авто-

матики, контроля, защитные устройства и др. [1].

Общим и существенным недостатком описанных 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.

Цель работы – обоснование и разработка усовершенствованной магнитно-импульсной установки для обработки металлов.

Идея, положенная в основу предлагаемой магнитно-импульсной системы состоит в замене мощного однократного силового воздействия серией довольно малых импульсов, суммарное действие которых должно быть достаточным для достижения заданного уровня деформирования объекта обработки, то есть реализации соответствующей технологической задачи [2, 3]. Следует отметить, что аналогичное предложение, но без какого-либо обоснования и конкретики, прозвучало в рекламных материалах американской фирмы "Electroimpact", отпочковавшейся от концерна "Boeing" и ведущей разработки магнитно-импульсных комплексов для внешней рихтовки корпусов самолетов [4].

Усовершенствованная магнитно-импульсная установка. Конкретная техническая реализация предлагаемой идеи может осуществляться за счет питания магнитно-импульсной установки от сети с напряжением 220 В и рабочей частотой 50 Гц. В этом случае напряжение заряда емкостного накопителя может выбираться в диапазоне до ~ 2000 В (без или с повышающим трансформатором), частота следования разрядных импульсов может привязываться к рабочей частоте сети (50 Гц, 25 Гц, 10 и ниже), а временные интервалы между импульсами должны обеспечивать процесс заряда конденсаторов. Амплитуда каждого из импульсов должна соответствовать условию достижения уровня механической энергии, необходимого для выполнения минимальной работы деформации по преодолению предела текучести металла обрабатываемого объекта. Количество импульсов в серии выбирается из условия получения требуемого уровня деформации по условиям технического задания на производственную операцию в целом. Грубая оценка может проводиться по величине энергии, вкладываемой в процесс и 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 им-

пульса должна быть достаточной, чтобы преодолеть предел текучести обрабатываемого металла. Большая или меньшая величина энергии по условиям технологического задания может устанавливаться количеством разрядных импульсов, то есть временем силового воздействия. Таким образом, регулирование уровня энергии, подаваемой в рабочую зону индукторной системы, может осуществляться не только варьированием зарядного напряжения накопителя при установленной величине емкости, но и варьированием времени силового воздействия.

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 магнитно-импульсной обработки. Как показывают предварительные оценки, источниками энергии могут служить низковольтные электротехнические системы (до ~ 1 кВ). Соответственно, все необходимые компоненты могут быть рассчитаны на работу под относительно низким напряжением. Вместо высоковольтных коммутаторов могут применяться обычные тиристоры. Схемы устройств синхронизации, контроля и управления могут быть построены на решениях из низковольтной и слаботочной электроники.

Все вместе взятое позволяет предположить, что стоимость источника энергии для практической реализации идеи серийного силового воздействия должна снизиться по сравнению с известными высоковольтными аналогами более чем в 20...25 раз.

На рис. 1 представлена схема магнитно-импульсной системы для многократного генерирования разрядных импульсов. Для того чтобы оперировать с конкретными величинами в объяснении принципиальной работоспособности схемы положим, что частота следования разрядных импульсов составляет ~ 10 Гц.

Зарядное устройство заряжает емкостной накопитель до заданного уровня энергии в течение времени до $\sim 0,1$ с. Далее следует разряд на нагрузку – индукторную систему в течение $\sim 0,001...0,002$ с. Затем процесс "заряд – разряд" повторяется. Эти циклы идут в течение заданного временного интервала. Схема управления в энергетическом блоке обеспечивает синхронную работу коммутаторов K_1 и K_2 в течение каждого цикла "заряд – разряд" так, что при заряде емкости K_1 открыт, а K_2 закрыт. По достижении требуемого напряжения на конден-

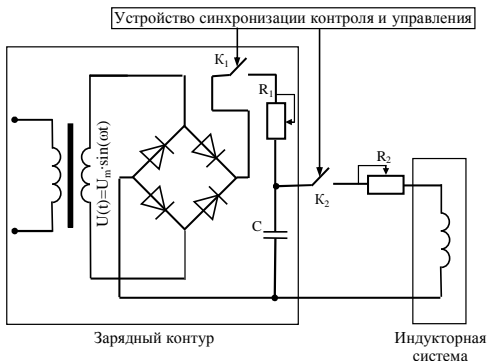


Рис. 1. Схема магнитно-импульсной системы для многократного генерирования разрядных импульсов.

саторах, K_1 разрывает зарядный контур, в то же время 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. Реализация этого вопроса обеспечивается, в первую очередь, должной работой зарядного устройства системы.

Расчетные соотношения. Дифференциальное уравнение, описывающее заряд емкости через резистор, имеет вид [5]:

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

где $\tau = R \cdot C$ – постоянная времени заряда; $U(t)$ – напряжение на входе выпрямителя зарядного устройства.

Временная зависимость для напряжения на емкости как решение дифференциального уравнения (1), удовлетворяющее нулевому начальному условию имеет вид [5]:

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

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

Ток через емкость будет равен:

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

Мгновенная мощность находится как произведение

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

Среднее значение мощности, потребляемой из сети, определяется, как хорошо известно, отношением интеграла мгновенной мощности в формуле (5) за время заряда собственно ко времени заряда емкостного накопителя электромагнитной энергии:

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

где T – время заряда.

Для того чтобы выражения (2...5) адекватно описывали процесс заряда в выбранной схеме, следует учесть, что через емкость ток может протекать только в одном "положительном" направлении, обусловленном расположением вентилей в выпрямительном устройстве.

Условие "положительности" следует из зависимости (2).

Если

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

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 учетом вышеприведенных замечаний, а также конкретного вида временной функции источника напряжения, записываем выражение для расчета зарядного напряжения на емкостном накопителе установки.

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

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

Совокупность выражений (6), (7), (3), (4) и (5) в указанной последовательности позволяют рассчитывать все основные характеристики процесса заряда емкостного накопителя в рассматриваемой магнитно-импульсной установке.

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

Напряжение и ток в нагрузке,

$$\begin{cases} U_{Li}(t) \approx U_{cm} \cdot \exp(-\delta \cdot t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t); \\ J_{Li}(t) \approx \frac{U_{cm}}{Z} \cdot \exp(-\delta \cdot t) \cdot \sin(\omega_0 \cdot t), \end{cases}$$

где $\delta = \frac{R_2}{2 \cdot (L_c + L_i)}$ – декремент затухания в разрядном контуре;

$\omega_0 \approx \left(\sqrt{(L_c + L_i)/C} \right)^{-1}$ – частота колебаний в разрядном контуре;

$Z = \sqrt{(L_c + L_i)/C}$ – волновое сопротивление разрядного контура, L_c, L_i – индуктивности батареи емкостных накопителей и собственно индукторной системы.

Пример. Согласно схеме на рис. 1 зарядный контур магнитно-импульсной установки содержит емкостной накопитель энергии $C=1000$ мкФ, токоограничивающее сопротивление $R_1=10\dots100$ Ом и источник напряжения (вторичная обмотка входного трансформатора) с частотой промышленной сети $f=50$ Гц и амплитудой $U_m \approx 1000\dots2000$ В.

Начнем с режима, когда время заряда емкости мало настолько, чтобы особенности процесса проявились достаточно четко: $R_1 \approx 10$ Ом, $U_m \approx 1000$ В.

Результаты вычислений представлены на рис. 2 (1 – напряжение источника питания, 2 – зарядное напряжение). Среднее значение мощности за время заряда составляет $\sim 7,3$ кВт.

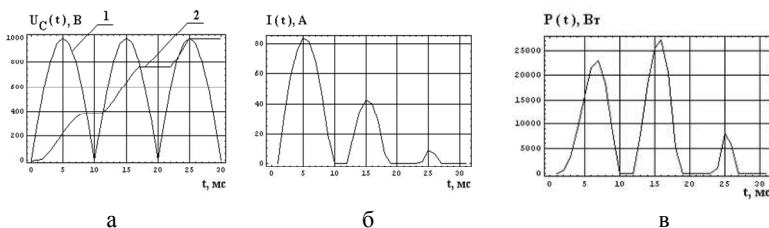


Рис. 2. Графики напряжения (а), зарядного тока (б) и мгновенной мощности (в) магнитно-импульсной установки.

Как следует из вычислений, заряд емкости 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 остается неизменным (горизонтальные полки зависимости на 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 амплитуд со средними величинами.

Время заряда до напряжения источника составляет ~ 25 мс, то

есть циклы заряда емкостного накопителя могут повторяться с частотой до ~ 40 Гц.

Все отмеченные особенности процесса заряда получены для идеализации, когда ток через емкость течет строго в одном направлении согласно схеме на рис. 1, то есть разрядный ток совершенно отсутствует. Практически, данная идеализация пренебрегает возможной утечкой по элементам контура.

Для иллюстрации влияния процессов разряда, в той или иной степени сопровождающих заряд емкости, с помощью формул (2)-(5) выполнены те же расчеты, но для противоположной идеализации, когда ничто не мешает появлению разрядных токов.

Результаты вычислений представлены на рис. 3 (1 – напряжение источника питания, 2 – зарядное напряжение).

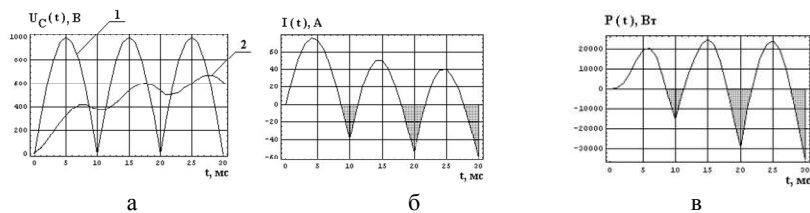


Рис. 3. Графики напряжения (а), зарядного тока (б) и мгновенной мощности (в) магнитно-импульсной установки.

Как следует из приведенных расчетных зависимостей, появление разрядного тока соответствует участкам на кривой 2 рис. 3,а, где производная по времени изменяет свой знак. На графике для тока (рис. 3,б) этим интервалам времени соответствуют "затемненные" отрицательные участки функциональной зависимости. Этим же временным интервалам на рис. 3, в соответствуют отрицательные значения мгновенной мощности ("затемненные участки"), определяющие процесс не потребления мощности из сети, а ее возврат обратно в сеть.

В целом, эффективность процесса заряда существенно снижается. Напряжение на емкости не может достичь более чем $\sim 0,6 \cdot U_m$.

Вернемся к заряду без токов утечки, и для полноты описания картины работы всей магнитно-импульсной установки в целом, задавшись необходимыми данными для вычислений, с помощью формул (8), (9) выполним расчеты напряжения и тока в нагрузке – инструменте обрабатывающей технологии.

Пусть известна частота токового импульса – $f \approx 2$ кГц и относительный декремент затухания сигнала – $\delta_0 \approx 0,15$.

Вычисляем, что $\omega_0 \approx 12,56 \cdot 10^3$ рад/с, $(L_C + L_i) \approx 6,33$ мкГн, $Z \approx 0,08$ 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.

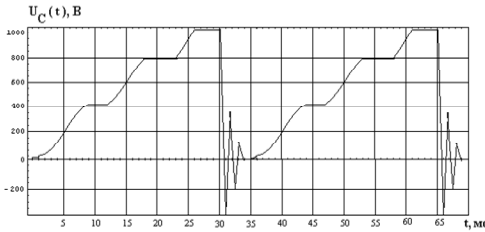


Рис. 4. Графическая иллюстрация многократно повторяющегося цикла "заряд-разряд" емкостного накопителя.

Как следует из вычислений, их повторение возможно через каждые 35 мс, то есть разрядные импульсы индукторной системе – инструменте и, соответственно, импульсы магнитного давления могут следовать с частотой ~ 28 Гц.

В заключение выполним численные оценки для экстремального режима работы предлагаемой магнитно-импульсной установки. Речь идет о максимуме зарядного напряжения $U_m \approx 2000$ В при сохранении величины средней потребляемой мощности порядка $\sim 7,3$ кВт. В расчетах полагаем, что разрядный ток отсутствует. Как показывают оценки, для реализации такого режима следует принять $R_I \approx 30$ Ом.

Графические иллюстрации результатов вычислений приведены на рис. 5. Среднее значение мощности за время заряда составляет $\sim 7,3$ кВт.

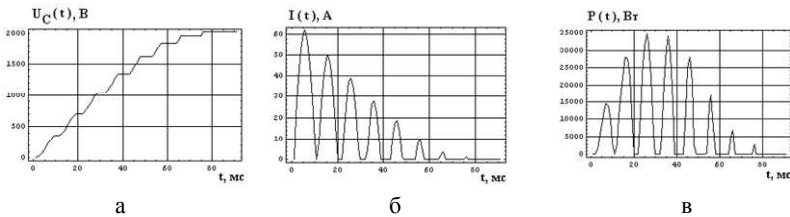


Рис. 5. Графики напряжения (а), зарядного тока (б) и мгновенной мощности (в) магнитно-импульсной установки.

Как следует из расчетов, при запасаемой энергии ~ 2 кДж предлагаемая магнитно-импульсная установка может работать в режиме многократного генерирования разрядных токов с частотой их следования \sim до 12 Гц.

Экспериментальная апробация. По результатам вышеприведенных вычислений была изготовлена экспериментальная магнитно-импульсная установка, позволяющая работу в режиме многократного повторения разрядных импульсов на нагрузку – индуктор-инструмент для выполнения заданной производственной операции.

Емкость накопителя энергии за счет подключения различного числа конденсаторов могла варьироваться и составлять в максимуме ~ 1000 мкФ. Повышающий трансформатор позволял производить заряд до напряжения ~ 2 кВ. Варьирование величин 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 ~ 0,5 кДж.

Примеры типичных осциллограмм зарядного напряжения на емкостном накопителе энергии и разрядного тока показаны на рис. 6 (а – заряд емкостного накопителя, цена дел. ~ 40 мс; б – разряд емкостного накопителя на одновитковый индуктор с согласующим устройством тонкостенной листовой заготовкой, цена дел. ~ 10 мкс (верхняя осциллограмма – ток индуктора, нижняя – ток, индуцированный в заготовке).

Экспериментальные характеристики созданной магнитно-импульсной установки на рис. 6, а иллюстрируют ее работу с периодом повторения ~ 80 мс, что соответствует частоте ~ 12 Гц. Здесь виден процесс заряда и разряда по достижении заданного уровня напряжения. Более четко разряд иллюстрируется типичной осциллограммой на рис. 6, б. В качестве примера выбран режим достаточно высокоомной нагрузки, в котором для разрядного тока, практически, имеет место аperiodическая временная зависимость.

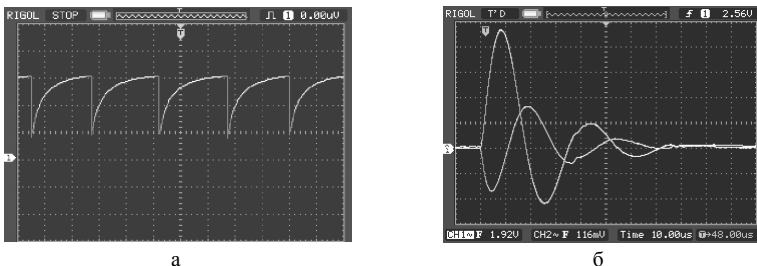


Рис. 6. Экспериментальные характеристики созданной магнитно-импульсной установки

Добавим, что эксперименты по магнитно-импульсному притяжению тонкостенных стальных образцов были проведены с помощью описанной выше магнитно-импульсной установки [6].

Выводы. Предложена и обоснована работоспособность магнитно-импульсной установки для многократного генерирования разрядных импульсов, позволяющей проводить обработку металлических объектов серией силовых воздействий, каждое из которых обладает достаточно малой амплитудой, но их интегральное действие обеспечивает выполнение заданной производственной операции.

1. Выполнены численные оценки характерных параметров магнитно-импульсной установки для многократного генерирования разрядных импульсов в различных временных и энергетических режимах.

2. Показано, что частота следования импульсов в разрядном контуре установки может достигать 12 Гц и выше, при этом средняя мощность, потребляемая из рабочей сети, остается неизменной (~7,3 кВт).

3. Величина запасаемой энергии на емкостном накопителе определяется уровнем потребляемой мощности и частотой следования разрядных импульсов, для ~ 12 Гц она составляет ~ 2,0 кДж.

4. Экспериментальная апробация модельного варианта магнитно-импульсной установки для работы в режиме многократного повторения разрядных импульсов тока показала практическую работоспособность изготовленного источника мощности.

Список литературы: 1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Харьков: Изд. НТУ "ХПИ", 2001. – 270 с. 2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Сериков Г.С., Чаплыгин Е.А. Возможности магнитно-импульсной технологии для рихтовки кузовных элементов автомобилей // Труды 13-ой Международной научно-технической конференции "Физические и компьютерные технологии". – Харьков, 19-20 апреля 2007г. – С. 352-355. 3. 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: Монография. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 240 с. 4. <http://www.electroimpact.com>. 5. Атабеков Г.М. Теоретические основы электротехники. – М.: Энергия, 1980. – Ч.1. – 340 с. 6. Батыгин Ю.В., Головащенко С.Ф., Гнатов А.В., Смирнов Д.О. Экспериментальные исследования магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов // Электротехніка і електромеханіка. – Харьков: 2010. – № 3. – С.39-41.

*Поступила в редколлегию 29.03.2011
Рецензент д.т.н., проф. Рудаков В.В.*