

УДК 621.3.011:621.372

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ ТОКА В НАГРУЗКЕ
ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТАНОВОК

А.А. Щерба*, чл.-корр. НАН Украины, Н.И. Супруновская**, докт.техн.наук, В.К. Сеницын
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина. E-mail: iednat1@gmail.com

На основе анализа переходных процессов колебательного и апериодического разрядов накопительного конденсатора электроразрядной установки на нагрузку доказано, что увеличение его емкости уменьшает длительность нарастания разрядного тока от нуля до любого фиксированного значения, вплоть до максимального значения тока, получаемого при наименьшем (из рассматриваемых) значении емкости конденсатора. Базируясь на этом, предложен метод повышения скорости нарастания импульсных токов в нагрузке, основанный на увеличении емкости разряжаемого конденсатора и принудительного прерывания тока в нагрузке при достижении заданного фиксированного значения (или длительности) тока. Принудительное ограничение длительности разряда осуществляется полностью управляемым полупроводниковым ключом. Применение метода является актуальным, в частности в электроразрядных установках для получения дисперсных электроэрозионных порошков, поскольку позволяет уменьшать их размеры. Предложено два способа реализации метода. Библ. 14, рис. 3, табл. 1.

Ключевые слова: переходный процесс, разрядный импульс, емкость конденсатора, скорость нарастания тока.

Введение. Синтез цепей электроразрядных установок (ЭРУ) с емкостными накопителями энергии (ЕНЭ) обычно направлен на повышение динамических параметров разрядных токов в нагрузке [1, 3, 6], что позволяет реализовать современные разрядно-импульсные технологии, в частности искроэрозионной обработки поверхности металлов [8, 9, 13] и производства микро- и нанопорошков [10–12]. Для повышения энергоэффективности ЕНЭ проводился анализ процессов энергообмена между конденсаторами при применении одно- и двунаправленных коммутаторов [14] и использовании нелинейных накопителей (суперконденсаторов) [5] вместо широко применяемых линейных конденсаторов. Учитывая влияние длительности разрядных токов на размеры получаемых искроэрозионных частиц [2], исследованы закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов [6] и влияния на нее нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки при протекании и отсутствии тока в нагрузке [7].

Анализ публикаций [1, 3, 5–9, 13, 14] показал, что одной из основных электродинамических проблем при усовершенствовании формирователей импульсных токов (ФРИ) для ЭРУ является повышение скорости нарастания токов в технологической нагрузке (поскольку при этом возрастает их силовое воздействие на нагрузку) за счет формирования больших разрядных токов с малой длительностью протекания. При разработке полупроводниковых ФРИ для установок объемного электроискрового диспергирования (ОЭИД) металлов такой подход направлен на уменьшение размеров получаемых порошков [2] и повышение энергоэффективности установок [6, 10–12]. Для решения рассматриваемой проблемы в установках ОЭИД металлов необходимо выполнить анализ особенностей протекания переходных процессов разряда накопительного конденсатора на электроискровую нагрузку и выявить закономерности, увеличивающие скорость нарастания в ней тока и уменьшающие его длительность. Поэтому **целью работы** является определение путей повышения скорости нарастания токов в нагрузке ЭРУ ОЭИД металлов, для чего необходимо исследовать переходные процессы в цепи разряда накопительного конденсатора на электроискровую нагрузку и определить закономерности изменения разрядных токов (скорости их нарастания и длительности) при изменении параметров цепи и условий разряда конденсатора.

При проведении исследований электрическое сопротивление нагрузки линеаризировалось и представлялось энергетически эквивалентным линейным сопротивлением, в котором потреблялась

© Щерба А.А., Супруновская Н.И., Сеницын В.К., 2017
ORCID ID: * <http://orcid.org/0000-0002-0200-369X> ;**<http://orcid.org/0000-0001-7499-9142>;

такая же электрическая энергия, как и при разряде конденсатора на реальную нелинейную электроискровую нагрузку.

Наиболее простая электрическая схема замещения разрядного контура ЭРУ для случая, когда нагрузку можно представить линейным активным сопротивлением, может рассматриваться как последовательный RLC контур, где R – суммарное активное сопротивление нагрузки, соединительных проводов и ключа, L – индуктивность разрядного контура, C – емкость разряжаемого конденсатора. Максимальное значение колебательного разрядного тока I_{max} при добротности такого контура $Q > 2$ можно рассчитать как $I_{max} \approx U_{0C} \sqrt{C} / \sqrt{L}$, где U_{0C} – начальное напряжение на конденсаторе при его разряде [1, 3, 4]. Поэтому в большинстве ЭРУ индуктивность L уменьшают до минимально возможного значения. Увеличивать амплитуду тока можно, увеличивая напряжение заряда конденсатора и его емкость. Однако увеличение напряжения заряда накопительных конденсаторов более 1000 В имеет серьезные технические ограничения и существенно увеличивает опасность обслуживания ЭРУ, а увеличение емкости приводит к нежелательному увеличению длительности разрядного импульса (т.к. $\tau_{PI} \approx \pi \sqrt{LC}$) и размеров получаемых искроэрозионных порошков. Поэтому в данной работе было проведено исследование переходных процессов при увеличении емкости конденсаторов и их разряде на нагрузку с принудительным ограничением в ней длительности импульсного тока при помощи современных полностью управляемых полупроводниковых ключей, позволяющих прерывать токи в сотни – тысячи ампер за время 0,1–10 мкс.

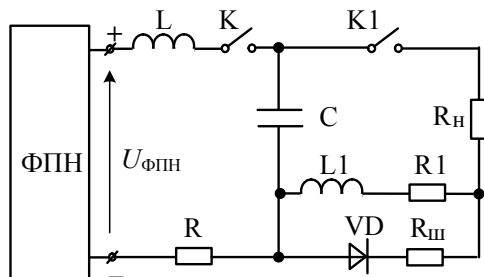


Рис. 1

Анализ средней скорости нарастания тока от нулевого до фиксированного значения (меньшего, чем максимально возможное) при разряде накопительного конденсатора. На рис. 1 показана электрическая схема формирователя разрядных импульсов в установке объемного электроискрового диспергирования металлов с использованием полностью управляемых ключей K и K_1 . Заряд накопительного конденсатора C в схеме осуществляется от формирователя постоянного напряжения (ФПН) по цепи ФПН- L - K - C - R -ФПН, а его разряд по цепи C - K_1 - R_n - R_1 - L_1 . Шунтирующая цепочка $R_{ш}$ - VD шунтирует индуктивность L_1 после раз-

мыкания K_1 . Обозначения в схеме: R , R_1 , L , L_1 – активные сопротивления и индуктивности дросселей соответственно зарядной и разрядной цепей, R_n – линейризованное сопротивление технологической нагрузки, C – емкость накопительного конденсатора, K , K_1 – полностью управляемые полупроводниковые ключи соответственно зарядной и разрядной цепей, $R_{ш}$ – сопротивление шунта, VD – диод.

В большинстве случаев в таких установках рабочими являются колебательные режимы разряда конденсатора на нагрузку.

Анализ колебательного разряда конденсатора. В общем случае ток колебательного разряда конденсатора может быть рассчитан по формуле [6]

$$i(t) = U_{0CP} e^{-\omega_{01} t / 2Q_1} \sin(\omega_{01} B t) / L_1 \omega_{01} B, \quad (1)$$

где U_{0CP} – начальное напряжение конденсатора при его разряде, $\omega_{01} = \sqrt{1/L_1 C}$ и $Q_1 = \sqrt{L_1 / C (R_n + R_1)}$ – соответственно частота собственных колебаний и добротность разрядной цепи, $B = \sqrt{1 - 1/4Q_1^2}$.

При добротности $Q_1 > 2$ (принимается, что $B \approx 1$ и $e^{-\omega_{01} t / 2Q_1} \approx 1$) формула (1) упрощается

$$i(t) = U_{0CP} \sin(\omega_{01} t) / L_1 \omega_{01}. \quad (2)$$

Для большинства электроискровых установок предельным наименьшим значением индуктивности разрядного контура является $L_1 \approx 1$ мкГн. Поэтому при определении закономерностей изменения параметров разрядных токов при ограничении их длительности и увеличении емкости разряжаемого конденсатора принималось, что $L_1 = 1$ мкГн = const.

Согласно (2) $I_{max} = A / \omega_{01}$, где $A = U_{0CP} / L_1$ – постоянный коэффициент. Время, за которое ток достигнет значения I_{max} при высокой добротности разрядной цепи, $t_{max} \approx \pi \sqrt{L_1 C} / 2$ [4, 6].

Для фиксированного значения тока $I_{\text{фикс}} < I_{\text{max}}$ можно записать, что $I_{\text{фикс}} = A/N$, где N – постоянный коэффициент (имеющий размерность круговой частоты), для которого выполняется неравенство $N > \omega_{01}$. Значение $I_{\text{фикс}}$ будет достигнуто через время $t_{\text{фикс}} < t_{\text{max}}$. При этом на основании (2) будет верно

$$A \cdot \sin(\omega_{01} t_{\text{фикс}}) / \omega_{01} = A/N. \quad (3)$$

Поскольку $N > \omega_{01}$, то (3) имеет решение, которое можно представить функцией $t_{\text{фикс}}(\omega_{01})$. С учетом того, что $A \neq 0$ и $\omega_{01} \neq 0$, решение уравнения (3) за первый период колебательного разряда конденсатора запишется как

$$t_{\text{фикс}}(\omega_{01}) = \arcsin(\omega_{01}/N) / \omega_{01}. \quad (4)$$

Рассмотрим производную $t'_{\text{фикс}}(\omega_{01})$ по переменной ω_{01} . Продифференцировав (4), получим

$$t'_{\text{фикс}}(\omega_{01}) = \left(\omega_{01}/N \sqrt{1 - (\omega_{01}/N)^2} - \arcsin(\omega_{01}/N) \right) / \omega_{01}^2. \quad (5)$$

Область определения функции $t'_{\text{фикс}}(\omega_{01})$: $\omega_{01} \in (0; N)$. Знак этой функции определяется числителем выражения (5), который обозначим как $f(\omega_{01})$

$$f(\omega_{01}) = \omega_{01}/N \sqrt{1 - (\omega_{01}/N)^2} - \arcsin(\omega_{01}/N). \quad (6)$$

Для нижней границы области определения ($\omega_{01} = 0$) функция $f(\omega_{01}) = f(0) = 0$. Для определения знака функции $f(\omega_{01})$ в остальном диапазоне области определения продифференцируем ее

$$f'(\omega_{01}) = \omega_{01}^2 / \sqrt{(N^2 - \omega_{01}^2)^3}. \quad (7)$$

Очевидно, что функция $f'(\omega_{01})$ принимает положительные значения на всей области определения $\omega_{01} \in (0; N)$. Следовательно, функция $f(\omega_{01})$ положительна и строго возрастает для $\forall \omega_{01} \in (0; N)$. Тогда функция $t'_{\text{фикс}}(\omega_{01}) > 0$ во всей области определения, из чего следует, что функция $t_{\text{фикс}}(\omega_{01})$ является строго возрастающей.

Таким образом, при колебательных режимах разряда конденсатора увеличение параметра ω_{01} всегда увеличивает длительность нарастания разрядного тока от нуля до любого $I_{\text{фикс}} < I_{\text{max}}$. Поскольку величина ω_{01} обратно пропорциональна \sqrt{C} , то увеличение емкости C всегда вызывает уменьшение длительности нарастания разрядного тока до $I_{\text{фикс}} < I_{\text{max}}$.

Анализ аperiodического разряда конденсатора. В общем случае ток аperiodического разряда конденсатора определяется функцией [6]

$$i(t) = A e^{-\alpha t} \left(e^{\sqrt{\alpha^2 - \omega_{01}^2} t} - e^{-\sqrt{\alpha^2 - \omega_{01}^2} t} \right) / 2\sqrt{\alpha^2 - \omega_{01}^2}, \quad (8)$$

где $\alpha = (R_n + R_1) / 2L_1$.

Продифференцируем эту функцию по параметру ω_{01} . Поскольку функция $i(\omega_{01})$ непрерывна и дифференцируема во всей области определения, то получим

$$di(\omega_{01})/d\omega_{01} = A \omega_{01} e^{-\alpha t} \left[\text{sh} \left(t \sqrt{\alpha^2 - \omega_{01}^2} \right) - t \sqrt{\alpha^2 - \omega_{01}^2} \cdot \text{ch} \left(t \sqrt{\alpha^2 - \omega_{01}^2} \right) \right] / (\alpha^2 - \omega_{01}^2). \quad (9)$$

Так как множители A и $e^{-\alpha t}$ являются положительными и рассматривается аperiodический процесс, при котором $\alpha^2 - \omega_{01}^2 > 0$ (то есть $\omega_{01} \in (0, \alpha)$), то знак производной $di(\omega_{01})/d\omega_{01}$ определяется сомножителем в квадратных скобках выражения (9), который обозначим функцией $F(\omega_{01})$

$$F(\omega_{01}) = \left[\text{sh} \left(t \sqrt{\alpha^2 - \omega_{01}^2} \right) - t \sqrt{\alpha^2 - \omega_{01}^2} \cdot \text{ch} \left(t \sqrt{\alpha^2 - \omega_{01}^2} \right) \right], \quad \omega_{01} \in (0, \alpha). \quad (10)$$

Очевидно, что при $\omega_{01} = \alpha$ (верхней границе области определения) функция $F(\omega_{01} = \alpha) = 0$. Для определения знака функции $F(\omega_{01})$ для $0 < \omega_{01} < \alpha$ и $\forall t > 0$ исследовалась ее производная

$$F'(\omega_{01}) = \omega_{01} \cdot t^2 \cdot \text{sh} \left(t \sqrt{\alpha^2 - \omega_{01}^2} \right). \quad (11)$$

Поскольку $t > 0$ и $\sqrt{\alpha^2 - \omega_{01}^2} > 0$, то $\text{sh}\left(t\sqrt{\alpha^2 - \omega_{01}^2}\right) > 0$. Тогда, зная, что $\omega_{01} > 0$, можно

утверждать, что $F'(\omega_{01}) > 0$ для $0 < \omega_{01} < \alpha$ и $\forall t > 0$.

Таким образом, функция $F(\omega_{01}) < 0$ во всей области определения, и, следовательно, также и производная $di(\omega_{01})/d\omega_{01} < 0$ для $\forall t > 0$, $\omega_{01} \in (0, \alpha)$. Поэтому функция $i(\omega_{01})$ для любого текущего момента времени t_k уменьшается с увеличением ω_{01} , и, соответственно, увеличивается с увеличением

емкости C , поскольку величина ω_{01} обратно пропорциональна величине \sqrt{C} . Этот факт проиллюстрирован на рис. 2, где показаны зависимости двух апериодических разрядных токов в нагрузке для разных значений емкости конденсатора C_1 и C_2 ($C_2 > C_1$) при неизменных остальных параметрах разрядной цепи.

На рис. 2 видно, что для текущего значения времени t_k , величина тока $I_2 = i_2(t_k)$ превышает величину $I_1 = i_1(t_k)$. Причем, если $C_2 > C_1$, то ток $i_2(t)$ достигнет фиксированного значения тока $I_{\text{фикс}}$ раньше, чем ток $i_1(t)$, то есть выполняется неравенство $t_2 < t_1$.

Таким образом, можно сделать вывод, что при апериодических режимах разряда конденсатора (также как и при колебательных разрядах) увеличение его емкости уменьшает длительность нарастания разрядного тока от нуля до любого фиксированного значения, вплоть до максимального значения тока, получаемого при наименьшем (из рассматриваемых) значении емкости конденсатора.

Влияние емкости накопительного конденсатора на скорость нарастания тока электроразрядных установок. На рис. 3 представлены кривые тока, отражающие закономерности изменения характера колебательных и апериодических разрядов конденсатора на нагрузку сопротивлением $R_n = 0,1$ Ом с увеличением емкости конденсатора C от 50 до 5500 мкФ при $U_{0cp} = 500$ В, $L_1 = 1$ мкГн.

При $C_1 = 50$ мкФ и $C_2 = 100$ мкФ разряд емкости имеет колебательный характер, а при $C_3 = 500$ мкФ и $C_4 = 5500$ мкФ – апериодический.

В таблице представлены результаты анализа зависимостей, приведенных на рис. 3: длительностей $t_{\text{фикс}}$, за которые ток достигнет значения $I_{\text{фикс}} = 2238$ А (минимального из амплитудных значений) при увеличении емкости C . Также в таблице приведены значения

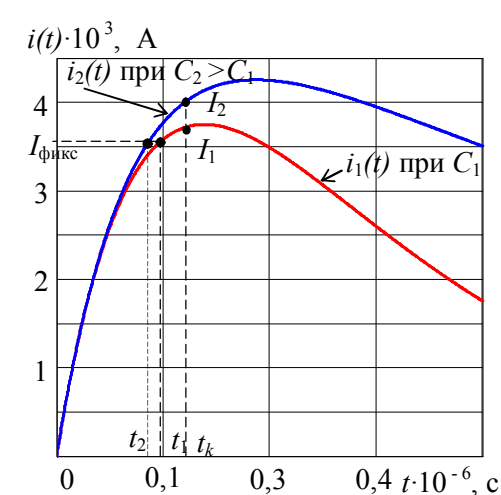


Рис. 2

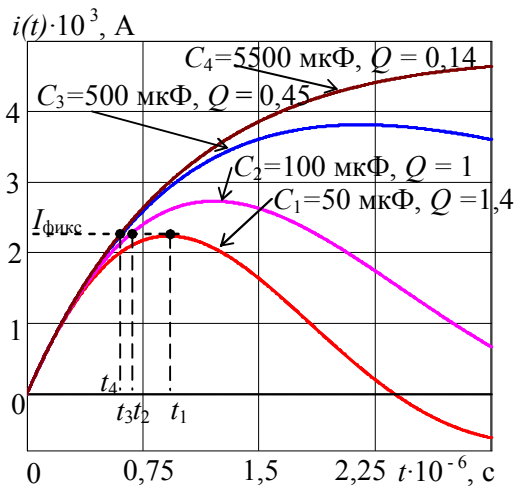


Рис. 3

коэффициента $k = t_{\text{фикс } C_{\text{min}}} / t_{\text{фикс } C_i}$ ($C_{\text{min}} \leq C_i$), показывающего, во сколько раз уменьшается время достижения током значения $I_{\text{фикс}}$ при увеличении емкости C от значения C_{min} до значения C_i . В ней также приведены добротности разрядной цепи, отражающие характер (апериодический или колебательный) процесса разряда.

Аналитические выкладки, приведенные для колебательного и апериодического разрядов конденсатора при увеличении его емкости, а также анализ результатов, представленных на рис. 3 и в таблице (как и результатов численного моделирования для частных случаев в [6]), показывает, что при увеличении емкости C время $t_{\text{фикс}}$ уменьшается независимо от характера разряда. Но необходимо отметить, что при многократном

C , мкФ	50	100	500	5500
Q_1	1,4	1	0,4	0,14
$t_{\text{фикс}}$, мкс	9,13	6,56	6,05	5,94
$k = t_{\text{фикс } C_{\text{min}}} / t_{\text{фикс } C_i}$	1	1,39	1,51	1,54

увеличении емкости C (и соответственно увеличении максимального значения тока) уменьшение $t_{\text{фикс}}$ становится все менее значимым. Так с увеличением емкости C от 50 до 100 мкФ (в 2 раза) значение

$t_{\text{фикс}}$ уменьшается на 28 %, а при ее дальнейшем увеличении от 500 до 5500 мкФ (в 11 раз) – всего на 2 %.

Таким образом, чем больше отличается максимальное возможное (при заданных параметрах элементов цепи) значение разрядного тока I_{max} и выбираемое фиксированное его значение в технологической нагрузке $I_{\text{фикс}}$, тем меньше увеличение емкости конденсатора C влияет на длительность достижения током значения $I_{\text{фикс}}$.

Учитывая, что средняя скорость нарастания тока от нуля до значения $I_{\text{фикс}}$ обратно пропорциональна длительности $t_{\text{фикс}}$, можно утверждать, что с увеличением емкости C в n раз средняя скорость нарастания тока $I_{\text{фикс}}/t_{\text{фикс}}$ будет также увеличиваться, но в m раз, где $m < n$. Отметим, что принудительное ограничение длительности разрядных токов позволяет использовать как колебательный, так и апериодический разряд конденсатора на нагрузку (который ранее не использовался из-за большой длительности переходного процесса разряда).

Однако, если емкость C превысит некоторое критическое значение $C_{\text{кр}}$ ($C > C_{\text{кр}}$), при котором $\alpha^2 \gg \omega_{01}^2$, то выражение (8) может быть преобразовано к виду

$$i(t) \approx A(1 - e^{-2\alpha t}) / 2\alpha \approx U_{0Cp} (1 - e^{-(R_H + R_1)t/L_1}) / (R_H + R_1), \quad (12)$$

из которого видно, что ток не зависит от величины емкости.

Таким образом, при $C > C_{\text{кр}}$ и дальнейшем увеличении емкости C кривая разрядного тока асимптотически приближается к кривой, описанной выражением (12). Поэтому чрезмерное увеличение емкости C конденсатора, разряжаемого на линейную нагрузку, все меньше изменяет значения $t_{\text{фикс}}$ и скорость нарастания тока $I_{\text{фикс}}/t_{\text{фикс}}$. При $C < C_{\text{кр}}$ увеличение емкости разряжаемых конденсаторов и принудительное прерывание разрядного тока является эффективным методом уменьшения значения $t_{\text{фикс}}$ и увеличения значения $I_{\text{фикс}}/t_{\text{фикс}}$ как для колебательных, так и апериодических режимов разряда конденсатора на линейную нагрузку.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о целесообразности использования метода формирования разрядных импульсов с повышенной скоростью нарастания токов в нагрузке за счет увеличения емкости разряжаемых конденсаторов и принудительного прерывания разрядного тока раньше, чем он достигнет своего максимального значения.

Современные высокочастотные полностью управляемые полупроводниковые ключи (например, ГТО модули) позволяют прерывать токи в сотни – тысячи ампер за время 0,1–10 мкс. Использование таких ключей позволяет принудительно отключать токи в контуре разряда накопительных конденсаторов гораздо раньше, чем они достигнут своих максимально возможных значений. Это позволяет значительно увеличивать емкость конденсатора, в результате чего колебательный разряд становится все более затухающим и переходит в апериодический разряд, при котором средняя скорость нарастания тока выше по сравнению с колебательными режимами.

Ранее апериодический режим разряда являлся неприемлемым для электроискровых технологий из-за недопустимо большой длительности протекания разрядного импульса и, как следствие, невозможности реализации высоких частот технологических зарядно-разрядных циклов [1–3, 6, 8, 13, 14].

Для установок ОЭИД металлов эффективность указанного метода повышается, поскольку сопротивление электроискровой нагрузки не является постоянным, а изменяется по закону U-образной функции (при увеличении тока до максимального значения сопротивление нагрузки уменьшается до минимальной величины, а после – при уменьшении разрядного тока опять увеличивается) [7]. Для таких установок по мере уменьшения сопротивления нагрузки при нарастании импульсного тока уменьшается длительность разрядного импульса, а, следовательно, и длительность достижения током фиксированного значения ($t_{\text{фикс}}$), что является дополнительным фактором, влияющим на уменьшение $t_{\text{фикс}}$ при увеличении емкости конденсатора. Кроме того, характерное повышение величины сопротивления нагрузки к окончанию разрядного импульса будет существенно уменьшать динамические потери в запираемых полупроводниковых ключах, поскольку при той же величине разрядного тока падение напряжения на сопротивлении нагрузки будет увеличиваться, а, следовательно, в нем будет выделяться и большая мощность (по сравнению с мощностью при разряде конденсатора на линейное сопротивление R_H).

Реализация путей повышения скорости нарастания тока в выходных цепях полупроводниковых электроразрядных установок с накопительными конденсаторами. Длительность разрядного импульса при условии его принудительного прерывания полностью управляемым ключом определяется временем протекания тока в разрядной цепи, состоящем из времени достижения тока

величины $I_{\text{фикс}}$ (определяется параметрами разрядной цепи) и времени запирающего ключа (зависит от динамических характеристик самого ключа и параметров цепей измерения и управления).

Необходимо отметить, что особенностью электроискровой нагрузки является то, что ее сопротивление (которое в течение разрядного импульса принимается линейным) может изменяться от импульса к импульсу (то есть во время зарядов конденсатора между его разрядами). Поэтому при многократных разрядах конденсатора на нагрузку одновременно фиксировать и скорость нарастания разрядных токов и их длительность невозможно.

На основании приведенных выше исследований можно предложить два пути реализации разрядных импульсов с повышенной скоростью нарастания тока: 1) регулирование (фиксация) длительности разрядных импульсов и 2) регулирование (фиксация) скорости нарастания разрядных токов.

Соответственно алгоритм системы управления ФРИ при использовании этих двух путей осуществляется по двум разным принципам:

1). Задается фиксированная длительность разрядного тока $\tau_{\text{фикс}}$ (согласно технологическим требованиям), при достижении которой процесс разряда должен принудительно прерываться.

Вследствие изменения сопротивления искроэрозионной нагрузки от разряда к разряду, в течение этого времени ($\tau_{\text{фикс}}$) ток будет нарастать до различных величин. Таким образом, значения тока и скорость его нарастания будут изменяться в некотором диапазоне. В этом случае при увеличении емкости конденсатора необходимо учесть возможность того, что при значительном уменьшении сопротивления нагрузки величина тока может превысить технологически допустимое значение. Поэтому кроме $\tau_{\text{фикс}}$ задается и предельно допустимое значение тока $I_{\text{доп}}$, при достижении которого процесс разряда должен быть принудительно прерван.

При реализации такого пути формирования разрядных импульсов с повышенной скоростью нарастания тока увеличение емкости конденсатора ЭРУ приводит не только к увеличению разрядного тока и скорости его нарастания, но и к увеличению средней импульсной мощности, выделяемой в нагрузку.

2). Задается фиксированная величина тока $I_{\text{фикс}}$ (согласно технологическим требованиям), при достижении которой процесс разряда должен быть прерван. Изменение сопротивления нагрузки в этом случае приведет к изменению длительности $t_{\text{фикс}}$ (время нарастания тока до $I_{\text{фикс}}$) и скорости нарастания тока в некотором диапазоне. Тогда при увеличении емкости конденсатора необходимо учесть возможность того, что при значительном увеличении сопротивления нагрузки значение $t_{\text{фикс}}$ может превысить технологически допустимое. Поэтому кроме $I_{\text{фикс}}$ задается и предельно допустимое значение длительности $t_{\text{доп}}$, при достижении которого процесс разряда также должен быть принудительно прерван.

В общем случае длительность импульса определяется скоростью нарастания тока (зависящей от параметров цепи, формирователя импульса, нагрузки) и временем отключения ключа. Система управления должна начинать срабатывать несколько раньше (так называемая система управления прогнозного типа), чтобы учесть время отключения ключа, за которое ток будет еще протекать в цепи.

В обоих способах подбирается и фиксируется рабочее значение одного параметра (либо заданное значение разрядного тока, либо его длительность), а второй параметр может изменяться в допустимых пределах.

Выводы.

1. Предложен метод повышения средней скорости нарастания тока в нагрузке при разряде на нее конденсатора, реализуемый увеличением емкости конденсатора и принудительным прерыванием тока при достижении задаваемого значения тока или допустимой длительности. Прерывание тока в цепи разряда конденсатора на нагрузку осуществляется полностью управляемым тиристорным или транзисторным ключом.

2. Для фиксированного значения тока, меньшего чем максимальное его значение $I_{\text{фикс}} < I_{\text{max}}$, аналитически доказано, что $I_{\text{фикс}}/t_{\text{фикс}} > I_{\text{max}}/t_{\text{max}}$ (где $t_{\text{фикс}}$ и t_{max} – время нарастания тока от нуля до $I_{\text{фикс}}$ и I_{max} соответственно).

Необходимо учитывать, что при выбранном значении тока $I_{\text{фикс}}$ увеличение емкости конденсатора C выше критического значения $C_{\text{кр}}$ может быть малоэффективным, поскольку в этом случае величина емкости практически не влияет на значение тока.

3. Метод увеличения емкости разряжаемых конденсаторов и принудительного прерывания разрядного тока раньше, чем он достигнет своего максимального значения, может быть еще более эффективен для установок, в которых сопротивление электроискровой нагрузки нелинейно уменьшается при нарастании разрядного тока (в частности для установок ОЭИД металлов).

Полученные результаты обосновывают хорошие перспективы для повышения средней скорости нарастания тока в нагрузке. При применении современных транзисторных полностью управляемых ключей в разрядной цепи нагрузки можно формировать импульсные токи длительностью 1–5 мкс, что важно для реализации режимов получения наноразмерных порошков и устойчивых коллоидных систем в установках ОЭИД металлов.

1. *Вовченко А.И., Тертилов Р.В.* Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно-импульсных технологий // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – 2010. – № 4. – С. 118–124.
2. *Захарченко С.Н., Кондратенко И.П., Перекос А.Е., Залуцкий В.П., Козырский В.В., Лопатько К.Г.* Влияние длительности разрядных импульсов в слое гранул железа на размеры и структурно-фазовое состояние его электроэрозионных частиц // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 6. – № 5(60). – С. 66–72.
3. *Кравченко В.И., Петков А.А.* Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 6. – С. 70–75.
4. *Круг К.А.* Физические основы электротехники. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1946. – 472 с.
5. *Супруновская Н.И., Щерба А.А., Иващенко Д.С., Белецкий О.А.* Процессы обмена энергией между нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторов // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 5. – С. 3–11.
6. *Щерба А.А., Супруновская Н.И.* Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 3–9.
7. *Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С.* Моделирование нелинейного сопротивления электродинамической нагрузки с учетом его изменения при протекании и отсутствии разрядного тока в нагрузке // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 23–25.
8. *Casanueva R., Azcondo F.J., Branas C., Bracho S.* Analysis, design and experimental results of a high-frequency power supply for spark erosion // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2005. – Vol. 20. – Pp. 361–369.
9. *Mysinski W.* Power supply unit for an electric discharge machine // 13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE '09, 1-3 Sept., 2009, Poznan, Poland. – Pp. 1–7.
10. *Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E.* Spark Erosion: a High Production Rate Method for Producing Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ Nanoparticles With Enhanced Thermoelectric Performance // Nanotechnology. – 2012. – Vol. 23. – Pp. 415604-1 – 415604-7.
11. *Nguyen P.K., Sungho J., Berkowitz A.E.* MnBi particles with high energy density made by spark erosion // J. Appl. Phys. – 2014. – Vol. 115. – Iss. 17. – Pp. 17A756-1.
12. *Perekos A.E., Chernenko V.A., Bunyaev S.A., Zalutskiy V.P., Ruzhitskaya T.V., Boitsov O.F., Kakazei G.N.* Structure and Magnetic Properties of Highly Dispersed Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion / J. Appl. Phys. – 2012. – Vol. 112. – Pp. 093909-1 – 093909-7.
13. *Sen B., Kiyawat N., Singh P.K., Mitra S., Ye J.H., Purkait P.* Developments in electric power supply configurations for electrical-discharge-machining (EDM) / The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003. – Vol. 1. – Pp. 659–664.
14. *Suprunovska N.I., Shcherba A.A.* Features of the Energy Interchange Between Capacitors in the Circuit Using Unidirectional Commutator or Bidirectional One / Proceedings of 2016 IEEE 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – 2016. – Pp. 45–48.

УДК 621.3.011:621.372

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОСТІ НАРОСТАННЯ СТРУМУ В НАВАНТАЖЕННІ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК

А.А. Щерба, чл.-кор. НАН України, **Н.І. Супруновська**, докт.техн.наук, **В.К. Синицин**
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. Е-mail: iednat1@gmail.com

На основі аналізу перехідних процесів коливального й аперіодичного розрядів накопичувального конденсатора електророзрядної установки на навантаження показано, що збільшення його ємності зменшує тривалість наростання розрядного струму від нуля до будь-якого фіксованого значення, меншого максимального значення струму. Базуючися на цьому, запропоновано метод підвищення швидкості наростання імпульсних струмів у навантаженні, заснований на збільшенні ємності конденсатора, що розряджається, і примусового переривання струму в навантаженні при досягненні заданого фіксованого значення (або тривалості) струму. Примусове обмеження тривалості розряду здійснюється повністю керуванням напівпровідниковим ключем. Застосування

методу є актуальним, зокрема в електророзрядних установках для одержання дисперсних електроерозійних порошків, оскільки дозволяє зменшувати їхні розміри. Запропоновано два способи реалізації методу.

Бібл. 14, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: перехідний процес, розрядний імпульс, ємність конденсатора, швидкість наростання струму.

WAYS TO INCREASE THE RATE OF CURRENT RISE IN THE LOAD OF ELECTRIC DISCHARGE INSTALLATIONS

A.A. Shcherba, N.I. Suprunovska, V.K. Synytsyn

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: iednat1@gmail.com

On the basis of transient analysis of the oscillatory and aperiodic discharges of the reservoir capacitor of electric discharge installations on the load, it is shown that an increase in its capacitance reduces the duration of the rise of the discharge current from zero to any fixed value less than the maximum value of the current. Based on this, it is proposed the method for increasing the rate of rise of pulsed currents in the load, which is founded on increasing the capacity of the discharged capacitor and forced interrupting the current in the load when a specified fixed value (or duration) of the current is reached. Forced limitation of the discharge duration is carried out by a fully controlled semiconductor key. This is the actual method, in particular in electric discharge installations for the production of dispersed electro-eroded powders, since it allows to reduce their sizes. Two ways to implement the method are offered.

References 14, figures 3, table 1.

Keywords: transient, discharge pulse, capacity of capacitor, rate of current rise.

1. Vovchenko A.I., Tertilov R.V. Synthesis of capacitive non-linear- parametrical energy sources for discharge-pulse technologies // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia. – 2010. – No 4. – Pp. 118–124. (Rus)

2. Zakharchenko S.N., Kondratenko I.P., Perekos A.Ye., Zalytsky V.P., Kozyrsky V.V., Lopatko K.G. Influence of duration of discharge pulses in a layer of iron granules on the sizes and a structurally-phase state of its electro-eroded particles // Vostochno-Evropeiskii Zhurnal peredovykh tekhnologii. – 2012. – Vol. 6. – No 5 (60). – Pp. 66–72. (Rus)

3. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametrical synthesis of high-voltage pulse test device with capacitive energy storage // Electrical engineering & Elektromechanics. – 2007. – No 6. – Pp. 70–75. (Rus)

4. Krug K.A. Basis of electrical engineering. – Moskva-Leningrad: Gosenergoizdat, 1946. – 472 p. (Rus)

5. Suprunovska N.I., Shcherba A.A., Ivashchenko D.S., Beletsky O.A. Processes of energy exchange between nonlinear and linear links of electric equivalent circuit of supercapacitors // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2015. – No 5. – Pp. 3–11. (Rus)

6. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Increasing regularities of rate of current rise in the load at limiting its maximal values // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 5. – Pp. 3–9. (Rus)

7. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivashchenko D.S. Modeling of Nonlinear Resistance of Electro-Spark Load Taking into Account its Changes During Discharge Current Flowing in the Load and et Zero Current in it // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – No 5. – Pp. 23–25. (Rus)

8. Casanueva R., Azcondo F.J., Branas C., Bracho S. Analysis, design and experimental results of a high-frequency power supply for spark erosion // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2005. – Vol. 20. – Pp. 361–369.

9. Mysinski W. Power supply unit for an electric discharge machine // 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09, Poznan, Poland, 01-03 September, 2009. – Pp. 1–7.

10. Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E. Spark Erosion: a High Production Rate Method for Producing Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ Nanoparticles With Enhanced Thermoelectric Performance // Nanotechnology. – 2012. – Vol. 23. – Pp. 415604-1 – 415604-7.

11. Nguyen, P.-K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion // J. Appl. Phys. – 2014. – Vol. 115. – Iss. 17. – Pp. 17A756-1.

12. Perekos A.E., Chernenko V.A., Bunyaev S.A., Zalutskiy V.P., Ruzhitskaya T.V., Boitsov O.F., Kakazei G.N. Structure and Magnetic Properties of Highly Dispersed Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion // J. Appl. Phys. – 2012. – Vol. 112. – Pp. 093909-1 – 093909-7.

13. Sen B., Kiyawat N., Singh P.K., Mitra S., Ye J.H., Purkait P. Developments in electric power supply configurations for electrical-discharge-machining (EDM) // The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003, Singapore, 17-20 November 2003. – Vol. 1. – Pp. 659–664.

14. Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Features of the Energy Interchange Between Capacitors in the Circuit Using Unidirectional Commutator or Bidirectional One / Proceedings of 2016 IEEE 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). Kyiv, Ukraine. – 2016. – Pp. 45–48.

Надійшла 11.05.2017

Остаточний варіант 24.05.2017