

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ТА ЕНЕРГЕТИЧНЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

УДК 621.3.011:621.372

ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЯ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ ТОКОВ В НАГРУЗКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТАНОВОК**Н.И. Супруновская¹**, докт. техн. наук, **А.А. Щерба²**, чл.-корр. НАН Украины, **С.С. Розискулов³**, **Ю.В. Перетятко⁴**, канд. техн. наук

1,2,3 – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

4 – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского", пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина

Исследованы особенности изменения средней скорости нарастания тока в нагрузке при колебательном и аperiodическом разрядах накопительного конденсатора электроразрядной установки. Определены закономерности изменения средней скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при принудительном ограничении их длительности и изменении емкости разрядной цепи. Доказано, что увеличение емкости конденсатора уменьшает длительность нарастания разрядного тока от нуля до любого фиксированного значения, меньшего максимального значения тока. 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. Библ. 17, рис. 5, табл. 3.

Ключевые слова: переходной процесс, разрядный ток, емкость конденсатора, скорость нарастания тока.

При разработке новых разрядно-импульсных технологий одной из основных проблем являются повышение скорости нарастания токов в технологической нагрузке и уменьшение их длительности [2, 4, 13, 14, 16, 17]. Так, например, в установках объемного электроискрового диспергирования (ОЭИД) металлов и сплавов в диэлектрической жидкости увеличение скорости нарастания разрядных токов и уменьшение их длительности дает возможность уменьшать размеры получаемых дисперсных искроэрозионных частиц [1, 10–13]. Поэтому уменьшение длительности импульсных токов в нагрузке и увеличение скорости их нарастания могут быть положены в основу метода получения искроэрозионных наноразмерных порошков металлов и сплавов, а также электрохимически и биологически активных коллоидных систем.

Целью данной работы является анализ особенностей протекания переходных процессов разряда накопительного конденсатора на электроимпульсную технологическую нагрузку для выявления закономерностей, увеличивающих скорость нарастания разрядного тока и средней импульсной мощности в нагрузке.

Изменение скорости нарастания разрядных токов в электрической цепи искроэрозионной нагрузки. В электроразрядных установках (ЭРУ) получения искроэрозионных частиц в качестве технологической нагрузки применяют слой металлических гранул между электродами, погруженными в диэлектрическую жидкость. Исследования показали, что электрическое сопротивление $R_{\text{нагр}}$ всех типов электроискровых нагрузок является нелинейным. Его величина зависит от величины разрядного тока и скорости его изменения, длительности и частоты разрядных импульсов, физико-химических свойств гранул и жидкости, размеров гранул и слоя, конструктивных и технологических параметров электроразрядной камеры [6, 7, 10, 15, 8, 13]. Нелинейная зависимость сопротивления электроискровой нагрузки от многих параметров затрудняет применение точных аналитических методов для анализа переходных процессов в разрядной цепи установки, поэтому обычно применяют различные

способы линеаризации такого сопротивления. При проведении анализа в данной работе (как и в большинстве других работ по этой тематике) допускается, что электроискровая нагрузка имеет кусочно-линейное сопротивление, величина которого $R_n = \text{const}$ в течение каждого разряда, но может стохастически измениться во время паузы между разрядами. Сопротивление R_n является энергетически эквивалентным линейным сопротивлением, в котором потребляется такая же электрическая энергия, как и при разряде конденсатора на реальную нелинейную электроискровую нагрузку.

Наиболее простая электрическая схема замещения разрядного контура полупроводникового 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 полупроводникового ключа; L – индуктивность разрядного контура; C – емкость разряжаемого конденсатора. Известно, что максимальное значение колебательного разрядного тока I_{max} при добротности такого контура $Q > 2$ можно рассчитать как $I_{\text{max}} \approx U_{0C} \sqrt{C} / \sqrt{L}$, где U_{0C} – начальное напряжение на конденсаторе при его разряде [2, 4, 5]. Поэтому для увеличения разрядного тока 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. $\tau_{\text{PI}} \approx \pi \sqrt{LC}$) и, как следствие, – к увеличению размеров получаемых электроэрозионных порошков. Поэтому 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.

Анализ средней скорости нарастания колебательного разрядного тока до выбранного фиксированного значения, меньшего, чем возможные амплитудные значения при изменении емкости конденсатора. На рис. 1 показана электрическая схема формирователя разрядных импульсов (ФРИ) в установке ОЭИД 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 .

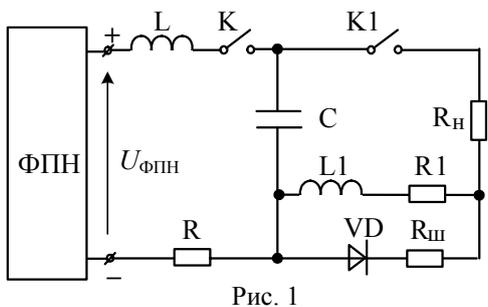


Рис. 1

Шунтирующая цепочка $R_{\text{ш}}-VD$ шунтирует индуктивность L_1 после размыкания K_1 . Обозначения в схеме: R, R_1, L, L_1 – активные сопротивления и индуктивности дросселей соответственно зарядной и разрядной цепей; R_n – линеаризованное сопротивление технологической нагрузки; C – емкость накопительного конденсатора; K, K_1 – полностью управляемые полупроводниковые ключи соответственно зарядной и разрядной цепей; $R_{\text{ш}}$ – сопротивление шунта; VD – диод.

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

На рис. 2 представлены зависимости разрядного тока в колебательных режимах разряда конденсатора на нагрузку при увеличении емкости конденсатора C (другие параметры разрядной цепи не изменялись: $U_{0C} = 500$ В, $L_1 = 10^{-6}$ Гн, $R_1 + R_n = 0,1$ Ом).

Был проведен анализ изменения средней скорости нарастания разрядных токов в нагрузке от нуля

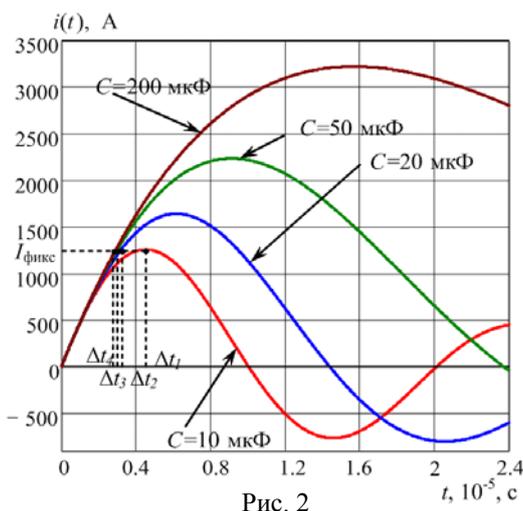


Рис. 2

до некоторого фиксированного значения, меньшего чем их амплитудные значения (это фиксированное значение тока принималось равным наименьшему из всех амплитудных значений – 1261 А).

В табл. 1 приведены результаты этого анализа. Как следует из данных табл. 1, с ростом величины емкости конденсатора при его колебательном разряде

на нагрузку время достижения током в нагрузке некоторого фиксированного значения, меньшего чем амплитудное значение, уменьшается, а следовательно, скорость нарастания тока в нагрузке от нуля до этого фиксированного значения $I_{\text{фикс}}$ увеличивается.

Так, например, при увеличении емкости конденсатора C от 10 до 20 мкФ средняя скорость нарастания тока до $I_{\text{фикс}}$ возрастает на 40 %, и при дальнейшем увеличении величины емкости до 50 (200) мкФ она продолжает возрастать соответственно на 50 (55) %.

Следовательно, можно заключить, что на временных интервалах, соответствующих увеличению разрядного тока от нуля до некоторого фиксированного значения ниже амплитудного, увеличение емкости разряжаемого конденсатора приводит к повышению средней скорости нарастания тока. При дальнейшем росте емкости конденсатора колебательный разрядный процесс становится все более затухающим и переходит в апериодический.

В общем случае для колебательных разрядов в контуре, добротность которого $Q_1 > 2$, можно провести следующие выкладки.

Разрядный ток такого контура может быть рассчитан по формуле [7]

$$i(t) = \frac{U_{0Cp} \sin(\omega_{01}t)}{L_1 \omega_{01}}, \quad (1)$$

где U_{0Cp} – начальное напряжение конденсатора при его разряде, $\omega_{01} = \sqrt{1/L_1 C}$.

Как отмечалось ранее, уменьшение индуктивности разрядного контура вызывает уменьшение длительности протекания разрядного тока и увеличение его максимального значения I_{max} . Однако уменьшение индуктивности разрядного контура имеет свой конструктивный предел. Для большинства электроискровых установок предельным наименьшим значением индуктивности разрядного контура является $L_1 \approx 10^{-6}$ Гн. Поэтому при определении закономерностей изменения параметров разрядных токов при ограничении их длительности и увеличении емкости разряжаемого конденсатора примем, что $L_1 = 10^{-6}$ Гн = const.

Согласно (1) $I_{\text{max}} = \frac{A}{\omega_{01}}$, где $A = \frac{U_{0Cp}}{L_1}$ – постоянный коэффициент. Время, за которое

ток будет достигать значения I_{max} при высокой добротности разрядной цепи $t_{\text{max}} \approx \frac{\pi \sqrt{L_1 C}}{2}$ [5].

Для фиксированного значения тока $I_{\text{фикс}} < I_{\text{max}}$ можно записать, что $I_{\text{фикс}} = \frac{A}{N}$, где постоянный коэффициент $N > \omega_{01}$. Значение $I_{\text{фикс}}$ будет достигнуто через время $t_{\text{фикс}} < t_{\text{max}}$. При этом на основании (1) будет верно

$$\frac{A \cdot \sin(\omega_{01} t_{\text{фикс}})}{\omega_{01}} = \frac{A}{N}. \quad (2)$$

Поскольку $N > \omega_{01}$, то (2) имеет решение, которое можно представить функцией $t_{\text{фикс}}(\omega_{01})$. С учетом того, что $A \neq 0$ и $\omega_{01} \neq 0$, уравнение (2) можно преобразовать к виду

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

Тогда решение уравнения (3) за первый период колебательного разряда можно записать как

$$t_{\text{фикс}}(\omega_{01}) = \frac{1}{\omega_{01}} \arcsin\left(\frac{\omega_{01}}{N}\right). \quad (4)$$

Таблица 1

C , мкФ	10	20	50	200
Q_1	3,2	2,2	1,4	0,7
$I_{\text{фикс}}$, А	1261	1261	1261	1261
$\Delta t_{\text{фикс } i}$, мкс	4,5	3,2	3,02	2,9
$I_{\text{фикс}} / \Delta t_{\text{фикс } i}$, А/мкс	278,6	390,8	418,2	430,9

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

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

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

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

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:

$$f'(\omega_{01}) = \frac{\omega_{01}^2}{N^3 \cdot \sqrt{\left(1 - (\omega_{01}/N)^2\right)^3}}. \quad (7)$$

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 $I_{\text{фикс}} < I_{\text{мах}}$. Поскольку величина ω_{01} обратно пропорциональна \sqrt{C} , то увеличение емкости C всегда вызывает уменьшение длительности разрядного тока до $I_{\text{фикс}} < I_{\text{мах}}$, а следовательно увеличение скорости нарастания тока до этого фиксированного значения.

Анализ средней скорости нарастания аperiodического разрядного тока до выбранного фиксированного значения, меньшего, чем возможные амплитудные значения при изменении емкости конденсатора. Для определения зависимости средней скорости нарастания тока в диапазоне от 0 до некоторого фиксированного значения $I_{\text{фикс}}$ (меньшего, чем амплитудное значение тока) от емкости конденсатора C рассмотрим несколько переходных процессов аperiodического разряда в цепи при разных значениях емкости C . Все параметры разрядной цепи, кроме емкости C , не изменялись.

На рис. 3 представлены графические зависимости разрядных токов в этих переходных процессах, а в табл. 2 – результаты их анализа (по параметрам, аналогичным параметрам табл. 1).

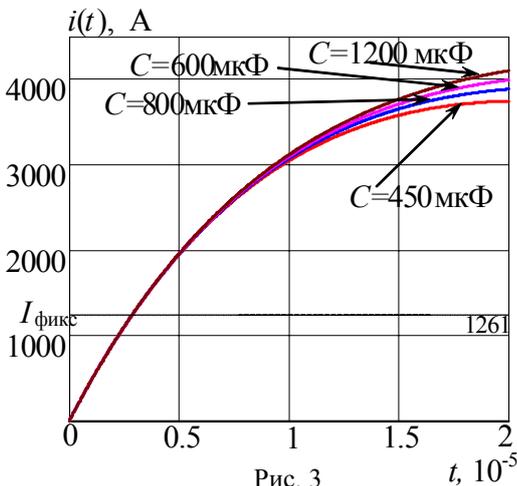


Рис. 3

Как следует из данных, приведенных в табл. 2, во временных интервалах, соответствующих увеличению разрядного тока от нуля до некоторого фиксированного значения ниже максимального, увеличение

C , мкФ	450	600	800	1200
Q_1	0,47	0,4	0,35	0,29
$I_{\text{фикс}}$, А	1261	1261	1261	1261
$\Delta t_{\text{фикс } i}$, мкс	2,916	2,914	2,912	2,910
$I_{\text{фикс}} / \Delta t_{\text{фикс } i}$, А/мкс	432,44	432,74	433,04	433,33

емкости разряжаемого конденсатора также приводит к повышению средней скорости нарастания тока.

Сравнивая данные табл. 1 и 2, необходимо отметить, что средние скорости нарастания тока до фиксированного значения ниже максимального (1261 А), в апериодических разрядах выше, чем в колебательных. Так, при увеличении емкости конденсатора от 10 (колебательный режим) до 450 мкФ (апериодический режим) средняя скорость нарастания тока $I_{\text{фикс}}/\Delta t_{\text{фикс}i}$ увеличивается на 55 %.

В общем случае для апериодических разрядов в контуре можно провести следующие выкладки.

При анализе, как и ранее, принимаем, что индуктивность $L_1 = 10^{-6}$ Гн = const. Ток апериодического разряда конденсатора для рассматриваемой цепи определяется функцией [7]

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

где $\alpha = (R_n + R_1)/2L_1$.

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

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

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

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

Ясно, 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 $\forall t > 0$ исследуем ее производную:

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

Поскольку $t > 0$ и $\sqrt{\alpha^2 - \omega_{01}^2} > 0$, то выражение $\text{sh}\left(t \cdot \sqrt{\alpha^2 - \omega_{01}^2}\right) > 0$. 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, а следовательно, также и производная $\frac{di(\omega_{01})}{d\omega_{01}} < 0$ для $\forall t > 0$, $\omega_{01} \in (0, \alpha)$. Поэтому функция $i(\omega_{01})$ для любого

текущего момента времени t_k (т.е. любого фиксированного значения, меньшего амплитудного) 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. 4, на котором 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. 4 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 $t_2 < t_1$.

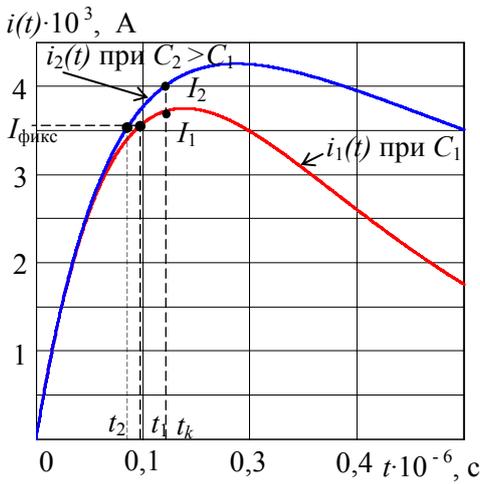


Рис. 4

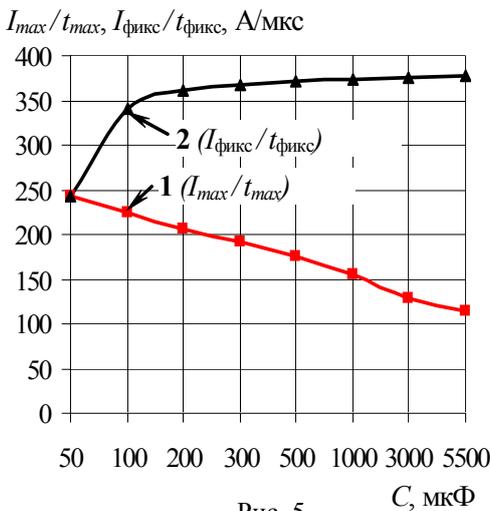


Рис. 5

Таким образом, можно сделать вывод, что при апериодических режимах разряда конденсатора увеличение его емкости также уменьшает длительность нарастания разрядного тока от нуля до любого фиксированного значения, если оно меньше максимального значения тока.

Анализ результатов, отраженных на рис. 2 и 3 и в табл. 1 и 2, показывает, что при увеличении емкости C время $t_{\text{фикс}}$ уменьшается независимо от характера разряда. Но необходимо отметить, что при многократном увеличении емкости C (и соответственно уменьшении добротности контура) уменьшение $t_{\text{фикс}}$ становится все менее значимым. Так, с увеличением емкости C от 10 до 50 мкФ (в 5 раз) значение $t_{\text{фикс}}$ уменьшается на 50 %, а при ее дальнейшем увеличении от 50 до 1200 мкФ (в 24 раза) – всего на 3 %.

На рис. 5 показаны зависимости средней скорости нарастания разрядного тока от величины емкости конденсатора (изменяющейся в диапазоне 50...5500 мкФ) для двух случаев: нарастания тока от 0 до I_{max} (кривая 1) и от 0 до $I_{\text{фикс}} = 2238$ А – наименьшего из всех амплитудных значений – (кривая 2).

В табл. 3 приведены максимальные значения разрядных токов, длительности нарастания токов от нулевого до фиксированного значения, равного наименьшему из максимальных значений (2238 А) и скорости нарастания токов до этого фиксированного значения при увеличении емкости разряжаемого конденсатора от 50 до 5500 мкФ.

Из табл. 3 следует, что чем больше отличается значение $I_{\text{фикс}}$ от максимально возможного разрядного тока I_{max} , тем меньше увеличение емкости конденсатора C изменяет скорость нарастания тока до значения $I_{\text{фикс}}$. Так, если значение $I_{\text{max}} > 2I_{\text{фикс}}$, то при увеличении емкости C в 11 раз (от 500 до 5500 мкФ) значение I_{max} увеличивается в 1,24 раза, а скорость нарастания тока до значения $I_{\text{фикс}} = 2238$ А увеличивается всего в 1,02 раза.

Наилучшие результаты по повышению средней скорости нарастания тока получаются для таких фиксированных его значений, которые ниже возможных максимальных значений тока не более чем в 1,5...2 раза.

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

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

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

Таким образом при $C > C_{\text{кр}}$ и дальнейшем увеличении емкости C кривая разряд-

C , мкФ	50	100	200	300	500	1000	3000	5500
I_{max} , А	2238	2731	3224	3497	3812	4172	4577	4719
$t_{\text{фикс}}$, мкс	9,13	6,56	6,20	6,10	6,05	5,98	5,95	5,94
$I_{\text{фикс}}/t_{\text{фикс}}$, А/мкс	245,1	341,2	361,0	366,9	370,0	374,3	376,1	376,7

ного 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 являются 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 [2–4, 7, 13, 16, 17].

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) [9]. 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_n).

Выводы. 1. Для фиксированного значения разрядного тока ЭРУ ($I_{\text{фикс}}$), меньшего по величине, чем максимально возможное его значение при данных параметрах разрядной цепи (I_{max}), т.е. для любого $I_{\text{фикс}} < I_{\text{max}}$ 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 соответственно $I_{\text{фикс}}$ и I_{max}).

2. 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 $I_{\text{фикс}}$ или допустимой длительности $t_{\text{фикс}}$. Прерывание тока в цепи разряда конденсатора на нагрузку осуществляется полностью управляемым тиристорным или транзисторным ключом.

3. Реализация этого метода позволяет использовать апериодический разряд конденсатора, который ранее не применялся в искроразрядных технологиях из-за недопустимо больших длительностей переходного процесса разряда.

4. 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 уменьшает значение $t_{\text{фикс}}$ и скорость нарастания тока $I_{\text{фикс}}/t_{\text{фикс}}$.

5. 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). 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. Асанов У.А., Цой А.Д., Щерба А.А., Казекин В.И. Электроэрозионная технология химических соединений и порошков металлов (главы 2 и 3). – Фрунзе: Илим, 1990. – 255 с.
2. Вовченко А.И., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно-импульсных технологий // Зб. наук. пр. Нац. ун-ту кораблебудування. – 2010. – № 4. – С. 118–124.
3. 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.
4. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 6. – С. 70–75.
5. Круг К.А. Физические основы электротехники. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1946. – 472 с. – (Основы электротехники; т.1).
6. Шидловский А.К., Щерба А.А., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в цепях заряда и разряда конденсаторов электроимпульсных установок. – К.: Интерконтиненталь-Украина, 2009. – 208 с.
7. 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.
8. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки для синтеза цепи разряда конденсатора по временным характеристикам // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 3. – С. 12–18.
9. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки с учетом его изменения при протекании и отсутствии разрядного тока в нагрузке // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 5 – С. 23–25.
10. Berkowitz A.E., Hansen M.F., Parker F.T., Vecchio K.S., Spada F.E., Lavernia E.J., Rodriguez R. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion // J. of Magnetism and Magnetic Materials. – 2003. – Vol. 254–255. – P. 1–6.
11. Berkowitz A.E., Walter J.L. Sparc Erosion: A Method for Producing Rapidly Quenched Fine powders // J. of Mater. Res. – March/April, 1987. – № 2 (2). – P. 277–288.
12. Cabanillas E.D., Lopez M., Pasqualini E.E., Cirilo Lombardo D.J. Production of uranium-molybdenum particles by spark-erosion // J. of Nuclear Materials. – 2004. – № 324. – P. 1–5.
13. 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. – P. 361–369.
14. Mysinski W. Power supply unit for an electric discharge machine // 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. – P. 1–7.
15. Nguyen P.K., Lee K.H., Moon J., Kim K.A., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S. and 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, 23 (2012). – P. 1–7.
16. 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. – P. 659–664.
17. 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. – P. 45–48.

УДК 621.3.011:621.372

Н.І. Супруновська¹, докт. техн. наук, **А.А. Щерба**², чл.-кор. НАН України, **С.С. Розіскулов**³, **Ю.В. Перетятко**³, канд. техн. наук

1,2,3 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

4 – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського",

пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна

Особливості підвищення швидкості наростання струмів у навантаженні напівпровідникових електро-розрядних установок

Досліджено особливості зміни середньої швидкості наростання струму в навантаженні при коливальному й аперіодичному розряді накопичувального конденсатора електророзрядної установки. Визначено закономірності зміни середньої швидкості наростання розрядних струмів у навантаженні при примусовому обмеженні їхньої тривалості й зміні ємності розрядного кола. Доведено, що збільшення ємності конденсатора зменшує тривалість наростання розрядного струму від нуля до будь-якого фіксованого значення, меншого за максимальне значення струму. Базуючись на цьому, запропоновано метод підвищення швидкості наростання імпульсних струмів у навантаженні, заснований на збільшенні ємності конденсатора, що розряджається, і примусовому перериванні струму в навантаженні при досягненні заданого фіксованого значення (або тривалості) струму. Бібл. 17, рис. 5, табл. 3.

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

N.I. Suprunovska¹, A.A. Shcherba², S.S. Roziskulov³, Yu.V. Peretiatko⁴

1,2,3 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

4 – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Peremohy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine

Features of rate of current raise in the load of semi-conductor electro-discharge installations

The features of the change in the average rate of current rise in the load during oscillatory and aperiodic discharge of a reservoir capacitor of electric discharge installations are studied. The regularities of the change in the average rate of discharge currents rise in the load at forced limitation of currents durations and a change in the capacitance of the discharge circuit are determined. It is proved that increasing the capacity of the capacitor 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. References 17, figures 5, tables 3.

Key words: transient, discharge current, capacitor capacitance, rate of current rise.

Надійшла 26.05.2017

Received 26.05.2017

УДК 621.315.2 : 004.94

ВЛИЯНИЕ МИКРОДЕФЕКТОВ В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В НЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

И.Н. Кучерявая, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

rB.irinan@gmail.com

Путем дву- и трехмерного компьютерного моделирования исследовано электрическое поле в полиэтиленовой изоляции с характерными микроразмерными включениями – упрощенными ветвями водного триинга, а также органическими и неорганическими, одиночными и множественными загрязнениями. Показано усиление электрического поля вблизи инородных включений и влияние их друг на друга. Для одиночных включений численным путем и по аналитической формуле рассчитан коэффициент усиления поля. Выявлено, что характер распределения поля в изоляции зависит от электрических свойств, формы и взаимного расположения микровключений. Результаты работы позволяют расширить знания о причинах деградации полиэтиленового материала, широко используемого в качестве материала изоляции современных высоковольтных кабелей. Библ. 15, рис. 5, табл. 2.

Ключевые слова: полиэтиленовая изоляция, водный триинг, инородные микровключения, электрическое поле, компьютерное моделирование.

Введение. В настоящее время наиболее распространенным материалом для изготовления изоляции силовых кабелей всех классов напряжения является сшитый полиэтилен