

ЦИКЛИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ  
УСТАНОВОК С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ РАЗРЯДНЫХ ТОКОВ  
И ПАУЗЫ МЕЖДУ НИМИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ НАГРУЗКИ

А.А. Щерба\*, чл.-корр. НАН Украины, Н.И. Супруновская\*\*, докт.техн.наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина. E-mail: [jednat1@gmail.com](mailto:jednat1@gmail.com)

*Проведен анализ циклических переходных процессов в зарядно-разрядных цепях конденсатора полупроводниковой электроразрядной установки с применением математической модели сопротивления электроискровой нагрузки, зависящего от величины разрядного тока, скорости его изменения и длительности временной паузы между разрядными импульсами. Математическая модель отражает U-образный характер изменения сопротивления такой нагрузки во времени (в частности, при объемном электроискровом диспергировании слоя токопроводящих гранул в диэлектрической жидкости), а также учитывает, что сопротивление может иметь различные значения в начале и конце процесса разряда конденсатора и изменяться в течение паузы между разрядными импульсами. Выполнено сравнение результатов исследования переходных процессов (длительности разрядного импульса, энергии, выделившейся в нагрузку, средней импульсной мощности и средней скорости нарастания тока в нагрузке за различные временные интервалы) в разрядных цепях с нелинейным сопротивлением электроискровой нагрузки и энергетически эквивалентным ему линейным сопротивлением. Проведен анализ путей повышения динамических характеристик импульсных токов в нагрузке при регулировании длительности разряда конденсатора установки. Библ. 17, рис. 4, табл. 2.*

**Ключевые слова:** нелинейное сопротивление, электроискровая нагрузка, импульс, переходные процессы, математическая модель.

**Введение.** Энергетические и электродинамические процессы в нагрузке большинства электроразрядных установок (ЭРУ) зависят от величины и скорости изменения в ней импульсного тока [1, 2, 4, 8, 9], длительности и частоты разрядных импульсов [3, 7, 9], потерь энергии в накопительных конденсаторах (НК) [5, 6], размеров и характеристик межэлектродного промежутка (МЭП) [4, 8, 11]. Но анализ и синтез ЭРУ обычно направлены лишь на определение среднестатистических амплитуд и длительности импульсных токов в цепях заряда и разряда их НК, а также характеристик диэлектрической жидкости в МЭП [1, 2, 17]. В то же время при объемном электроискровом диспергировании (ОЭИД) слоя металлических гранул важно учитывать динамику возникающих в нем электроискрений [4, 7, 9], влияющую на свойства получаемых частиц [12, 13], в частности, аморфных магнитомягких материалов [10], интерметаллидов с высокой плотностью энергии [16], твердых расплавов с повышенными термоэлектрическими характеристиками [15] и памятью формы [14].

Выявление и применение динамических закономерностей мобильности электроискрений в слое токопроводящих гранул [4, 9] при разряде на него НК позволило разработать принципы построения и стабилизации параметров полупроводниковых ЭРУ [7], которые реализуют высокую производительность получения искроэрозионных частиц путем формирования в МЭП большего количества электроискрений, быстро мигрирующих между контактами гранул за время одного разряда НК. Однако зависимость сопротивления слоя гранул  $R_n(t)$  от многих факторов затрудняла расчет переходных процессов в цепях ЭРУ, поэтому в течение длительности  $\tau$  протекания тока  $i(t)$  одного разряда НК такое сопротивление часто заменяют эквивалентным значением  $R_{\text{эКВ}}$ , определяемым как [1, 4, 7]:

$$R_{\text{эКВ}} = \frac{\int_0^{\tau} i^2(t) R_n(t) dt}{\int_0^{\tau} i^2(t) dt} . \quad (1)$$

Такое допущение позволяет достаточно точно учитывать потребление электроэнергии в слое гранул, но может быть недопустимым при определении длительности, максимального значения и скорости нарастания разрядного тока, а также средней импульсной мощности в МЭП и допустимой временной паузы между токами разрядов НК.

Поэтому целью данной работы был анализ циклических переходных процессов в цепях накопительных конденсаторов электроразрядных установок с учетом влияния величины и скорости нарастания их разрядных токов, а также паузы между ними на сопротивление электроискровой нагрузки для уточнения динамических параметров установок ОЭИД слоя токопроводящих гранул.

**Особенности изменения сопротивления слоя гранул при их ОЭИД в МЭП.** В данной работе при ОЭИД слоя гранул железа экспериментально исследованы особенности изменения его сопротивления. Колебательный заряд дозирующего НК емкостью  $C = 50$  мкФ в ЭРУ осуществлялся от формирователя постоянного напряжения (ФПН) 250 В с буферной конденсаторной батареей емкостью  $C_0 = 800$  мкФ. Выполнение условия  $C \ll C_0$  позволило не учитывать потери энергии при заряде дозирующего НК [5, 6]. Индуктивность разрядной цепи НК составляла  $\sim 3$  мкГн. Совокупность осциллограмм изменений токов  $i(t)$  и падений напряжений  $u_n(t)$  в МЭП с проточной водой, зафиксированных двухлучевым запоминающим осциллографом НАМЕГ–НМ–1507, показана на рис. 1, а.

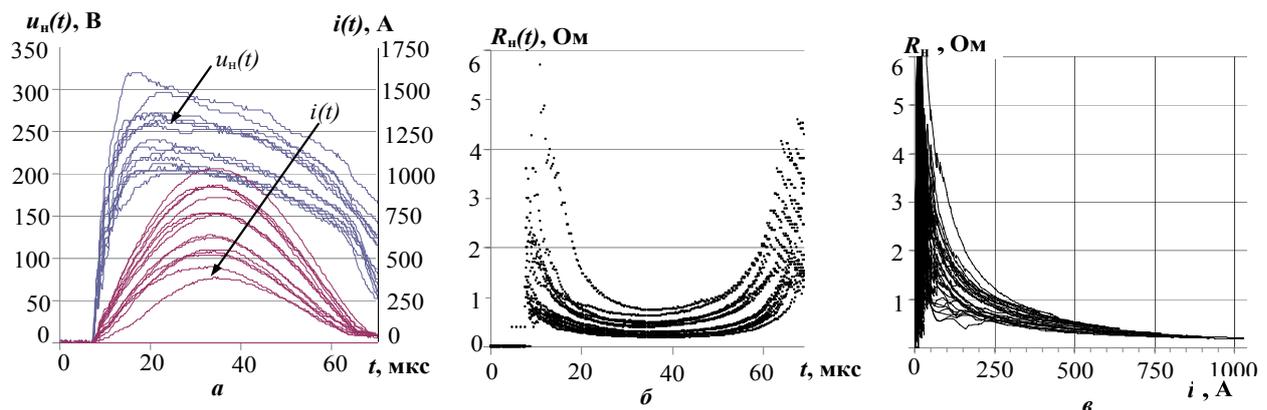


Рис. 1

Анализ осциллограмм показал, что токи  $i(t)$  при колебательных разрядах дозирующего НК на электроискровую нагрузку такого типа изменяются во времени как затухающие полусинусоиды. Изменения во времени расчетных электрических сопротивлений этой нагрузки, определенных как  $R_n(t) = u_n(t)/i(t)$ , представлены на рис. 1, б и имеют вид U-образных кривых. Уменьшение сопротивления  $R_n(t)$  на временном отрезке 8–35 мкс объясняется увеличением в МЭП тока и количества одновременно существующих электроискрений между гранулами [4, 7, 9], а дальнейшее увеличение  $R_n(t)$  на отрезке 35–65 мкс – уменьшением общего тока и количества искрений.

Зависимость сопротивления МЭП от тока (т.е. зависимость  $R_n(i)$  на рис. 1, в) имеет экспоненциальный характер как во время разрядов, так и в паузе между ними. Причем, если длительность такой паузы является достаточной для восстановления сопротивления слоя гранул в МЭП до первоначального значения, то изменение во времени сопротивления  $R_n(t)$  можно представить U-образной функцией, симметричной относительно вертикальной оси и имеющей равные по величине начальное и конечное значения. Если же длительность паузы станет меньшей критического значения, то начальное сопротивление МЭП в последующем разряде будет большим, чем в предыдущем. В таком случае начинается увеличение сопротивления МЭП от импульса к импульсу.

Анализ зависимостей на рис. 1 и обобщение результатов работ [4, 7–9] обосновывают, что при исследовании процессов ОЭИД слоя гранул в МЭП необходимо учитывать следующее:

- с увеличением тока в цепи разряда НК ЭРУ от нуля до максимального значения величина сопротивления МЭП экспоненциально уменьшается от начального значения  $R_0$  до минимального значения  $R_{min}$  ( $R_{min} < R_0$ );

- при уменьшении тока разряда НК от максимального значения до нуля сопротивление такой электроискровой нагрузки экспоненциально увеличивается (но более медленно, чем уменьшалось) до конечного значения  $R_1$ , которое всегда больше  $R_{min}$  ( $R_1 > R_{min}$ ), но может быть больше и начального сопротивления  $R_0$  – в таком случае выполняется условие  $R_1 > R_0 > R_{min}$ ;

- если в цепи разряда НК на электроискровую нагрузку есть полупроводниковый коммутатор и возникает перезаряд накопительных конденсаторов, то изменение разрядного тока конденсаторов  $i(t)$  является типичной затухающей полусинусоидой, и в целом процесс разряда можно характери-

зывать как колебательный, хотя в начале и в конце такого разряда изменение тока может иметь аperiodический, а не колебательный характер;

– поскольку сопротивление анализируемой электроискровой нагрузки нелинейно зависит от тока разряда НК, то переходные процессы в цепях ЭРУ для ОЭИД слоя гранул целесообразно исследовать с применением численных методов моделирования, реализованных в пакете MATLAB/SIMULINK;

– для оценки динамических характеристик электроискровой нагрузки математическая модель ее сопротивления должна учитывать его зависимость от значений разрядного тока  $i(t)$  и скорости его изменения  $di/dt$ .

**Особенности применения моделей сопротивления электроискровой нагрузки с учетом получаемых экспериментальных результатов.** Известна математическая модель, учитывающая зависимость сопротивления слоя токопроводящих гранул при их ОЭИД от тока  $i(t)$  и скорости его изменения  $di/dt$ , которая представлена в работе [6] экспоненциальной функцией

$$R_H(i, di/dt) = (R_0 - R_{min}) \cdot e^{-\varepsilon_1(1+k_1)^i} + R_{min}, \quad (2)$$

где ток  $i(t)$  для удобства записан как  $i$ ;  $R_0$  – сопротивление МЭП в момент начала разряда НК и возникновения ОЭИД гранул;  $R_{min}$  – минимальное сопротивление МЭП при максимальном токе  $I_{max}$  в цепи разряда НК;  $\varepsilon_1$  – коэффициент учета изменения сопротивления  $R_H$  при изменении тока  $i$ ;  $k_1$  – коэффициент, определяющий зависимость сопротивления  $R_H$  от скорости изменения тока  $di/dt$ .

Значения коэффициентов  $\varepsilon_1$  и  $k_1$  определяются по формулам

$$\varepsilon_1 = -\ln(\delta/(R_0 - R_{min}))/I_{max}, \quad k_1(di/dt) = \varepsilon_2 \cdot (di/dt) \cdot h(di/dt), \quad (3,4)$$

где  $\delta$  – сколь угодно малая величина;  $I_{max}$  – значение максимального тока в цепи разряда НК, определяемое как среднее значение не менее чем 10 максимальных значений экспериментальных разрядных токов;  $\varepsilon_2$  – постоянный коэффициент, а параметр  $h(di/dt)$  изменяется по закону

$$h(di/dt) = \begin{cases} 1, & (di/dt) \geq 0 \\ 0, & (di/dt) < 0 \end{cases}. \quad (5)$$

Введение коэффициента  $k_1$  позволило реализовать учет различия в скорости уменьшения сопротивления  $R_H$  (при нарастании величины разрядного тока  $i$  от нуля до максимального значения) и скорости его увеличения (при убывании тока после достижения им максимального значения).

Применение модели (2), реализованной в пакете MATLAB/SIMULINK, показало, что по сравнению с моделью (1) значения максимальных токов разряда НК увеличиваются на 4–15 %, а длительность их нарастания от нуля до максимальных значений – на 9–21 % при уменьшении длительности всего разрядного импульса на 5–30 %. При этом скорость нарастания тока от нуля до максимального значения уменьшается почти на 5 %, а максимальная мощность в нагрузке – на 2–8 % при увеличении средней импульсной мощности на 5–45 %. Но в модели допускалось, что сопротивление  $R_1$  на момент окончания разрядного тока возвращается к исходному значению  $R_0$  (т.е.  $R_1 = R_0$ ).

В то же время приведенные на рис. 2 экспериментальные осциллограммы тока  $i(t)$  в цепи разряда НК на слой гранул железа в МЭП и его расчетные сопротивления  $R_H(t)$  показали, что существуют режимы ОЭИД, при которых сопротивление слоя гранул на момент окончания разрядного тока больше, чем на момент его начала. Эти режимы были получены при увеличении емкости НК до 100 мкФ (т.е. в 2 раза).

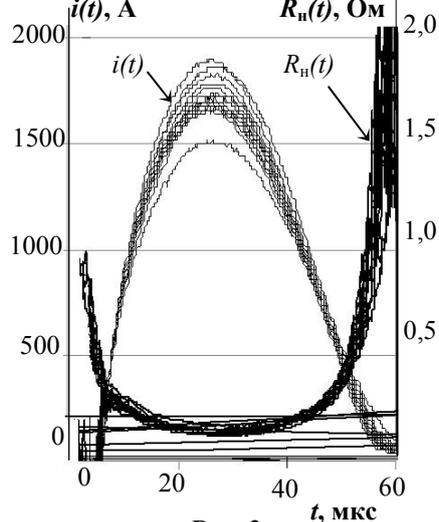


Рис. 2

Из рис. 2 видно, что за время протекания одного разряда НК сопротивление слоя гранул в МЭП сначала уменьшается от начальных до минимальных значений, а затем возрастает до значений, существенно превышающих начальные. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными результатами при ОЭИД в воде монослоя гранул свинца и железа [4, 9]. Такие режимы можно объяснить высокой мобильностью возникающих искроэрозионных порошков и сравнительно низкой подвижностью гранул, не позволяющей быстро восстанавливать в слое электрические контакты. Поэтому его сопротивление к окончанию разрядного импульсного тока может значительно увеличиться по сравнению с начальным сопротивлением.

Авторы усовершенствовали математическую модель (2) путем учета различия начального и конечного значений сопротивления слоя гранул в МЭП и изменения его сопротивления во

время паузы между разрядами, вызывающими ОЭИД. Введение дополнительных членов в модель (2) позволило получить новое уравнение для сопротивления исследуемой электроискровой нагрузки

$$R(i, di/dt) = (R_0 - R_{min}) \cdot \left( 1 + \left( \frac{(I_{max} - i) \cdot (R_{max} - R_{min})}{I_{max} \cdot (R_0 - R_{min})} \right) \cdot (1 - h(di/dt)) \right) e^{-\varepsilon_2(1+k_2) \cdot i} + R_{min}, \quad (6)$$

где  $R_{max} = R_1 \geq R_0$  – максимальное сопротивление нагрузки, достигаемое к моменту окончания разрядного тока;  $\varepsilon_2$  – положительный коэффициент (аналогичный коэффициенту  $\varepsilon_1$  в (2)), определяющий скорость уменьшения сопротивления нагрузки до  $R_{min}$  при увеличении разрядного тока до максимального значения  $I_{max}$  и скорость нарастания сопротивления нагрузки до  $R_{max}$  при уменьшении разрядного тока до нуля;  $k_2$  – коэффициент (аналогичный коэффициенту  $k_1$  в (2)), реализующий более медленное нарастание сопротивления нагрузки от  $R_{min}$  до  $R_{max}$  по сравнению с его уменьшением от  $R_0$  до  $R_{min}$ ;  $I_{max}$  – приблизительная оценка максимального значения тока в нагрузке, определяемая как среднее значение не менее чем 10 максимальных значений экспериментальных разрядных токов в электроискровой нагрузке.

Модель (6) предусматривает, что при нарастании тока сопротивление нагрузки уменьшается от  $R_0$  до  $R_{min}$  при достижении током значения  $I_{max}$ , а затем при уменьшении тока от  $I_{max}$  до нуля сопротивление нагрузки увеличивается от  $R_{min}$  до  $R_{max} = R_1 \geq R_0$ . Модель также учитывает, что скорость уменьшения сопротивления нагрузки превышает скорость ее нарастания.

Коэффициент  $k_2$  определяется по следующей формуле:

$$k_2(di/dt) = (1 - e^{-\varepsilon \cdot (di/dt)}) \cdot h(di/dt), \quad (7)$$

где  $\varepsilon$  – постоянный коэффициент, а параметр  $h(di/dt)$  изменяется по закону (5).

Для определения значений  $\varepsilon_2$  в модели (6) используется то же выражение, что и в модели (2) для вычисления аналогичной величины  $\varepsilon_1$  (формула (3)).

В течение паузы между разрядными импульсами длительностью  $\tau_n$  (т.е. когда ток в разрядной цепи конденсатора отсутствует и осуществляется процесс его заряда) сопротивление нагрузки достаточно медленно снижается от значения  $R_{max}$  до  $R_0$  в соответствии с выражением

$$R(t) = R_{max} \cdot e^{-k_3 \cdot t}, \quad (8)$$

где коэффициент  $k_3$  определяется из выражения

$$k_3 = -\ln(R_0/R_{max})/\tau_n. \quad (9)$$

Использование усовершенствованной модели, которая объединяет модели (6) и (8) (описывающие сопротивление нагрузки как во время разряда конденсатора, так и во время его заряда), позволило анализировать переходные процессы в цепи нагрузки с учетом не только возможных условий  $R_1 > R_0$ , но и снижения  $R$  в межтоковой паузе, а также определять такие динамические характеристики разрядных импульсов, как скорость изменения тока в нагрузке, длительность изменения тока до требуемого значения, изменение напряжения на конденсаторе, максимальный ток и импульсная мощность.

При реализации математических моделей в пакете MATLAB/SIMULINK сопротивление электроискровой нагрузки рассчитывалось с помощью блока встроенной функции MATLAB (Embedded MATLAB Function), в котором сопротивление нагрузки определялось выражением (6) во время разряда НК и формулой (8) во время его заряда. Предварительно были заданы различные значения  $R_0$ ,  $R_{min}$  и  $R_{max}$ , а затем (с помощью функциональных блоков) рассчитывались значения коэффициента  $\varepsilon_2$ ,  $k_2$  и  $k_3$  соответственно выражениям (3), (7) и (9).

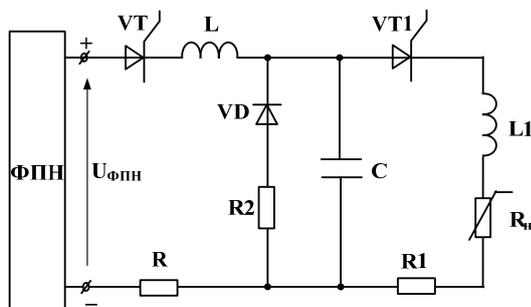


Рис. 3

Анализ циклических зарядно-разрядных переходных процессов проводился в цепях тиристорной ЭРУ, электрическая схема которой показана на рис. 3. Заряд накопительного конденсатора  $C$  в этой схеме осуществлялся от ФПН по контуру клемма "+" ФПН- $VT$ - $L$ - $C$ -клемма "-" ФПН, а разряд на нагрузку – по контуру  $C$ - $VT_1$ - $L_1$ - $R_n$ - $R_1$ - $C$ . Контур  $C$ - $R_2$ - $VD$ - $C$  использовался для обратного перезаряда конденсатора с целью регулирования глубины обратной связи по напряжению.

При моделировании параметры цепей ЭРУ выбирались такие же, как при экспериментальных исследованиях:  $U_{ФПН} = 250$  В,  $C = 10^{-4}$  Ф,  $L = 200 \cdot 10^{-6}$  Гн,

$L_1 = 3 \cdot 10^{-6}$  Гн,  $R = 0,1$  Ом,  $R_1 = 0,01$  Ом,  $R_2 = 0,2$  Ом. Нелинейное сопротивление нагрузки  $R_n$  задава-

лось тремя параметрами:  $R_0 = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_{min} = 0,1 \text{ Ом}$ ,  $R_{max} = 2 \text{ Ом}$ . Частота разрядных токов  $f = 1250 \text{ Гц}$ , а период следования разрядных импульсов равнялся  $8 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ . Отметим, что при такой частоте сопротивление нагрузки в течение межтоковой паузы успевает снизиться от  $R_{max}$  до  $R_0$ .

На рис. 4 показаны результаты моделирования циклических взаимосвязанных переходных процессов (трех циклов заряда дозирующих НК ЭРУ с последующим его разрядом на МЭП, заполненный слоем гранул железа и проточной водой) с использованием математической модели сопротивления нагрузки (6) во время разряда НК и модели (8) во время его заряда. Изменение во времени сопротивления исследуемой электроискровой нагрузки  $R_H(t)$ , тока  $i(t)$  в разрядной цепи НК, электроэнергии, выделившейся в нагрузку  $W_H(t)$ , и зависимости сопротивления нагрузки  $R_H(i)$  от тока  $i(t)$  в цепи разряда НК представлены соответственно на рис. 4, а, б, в, г.

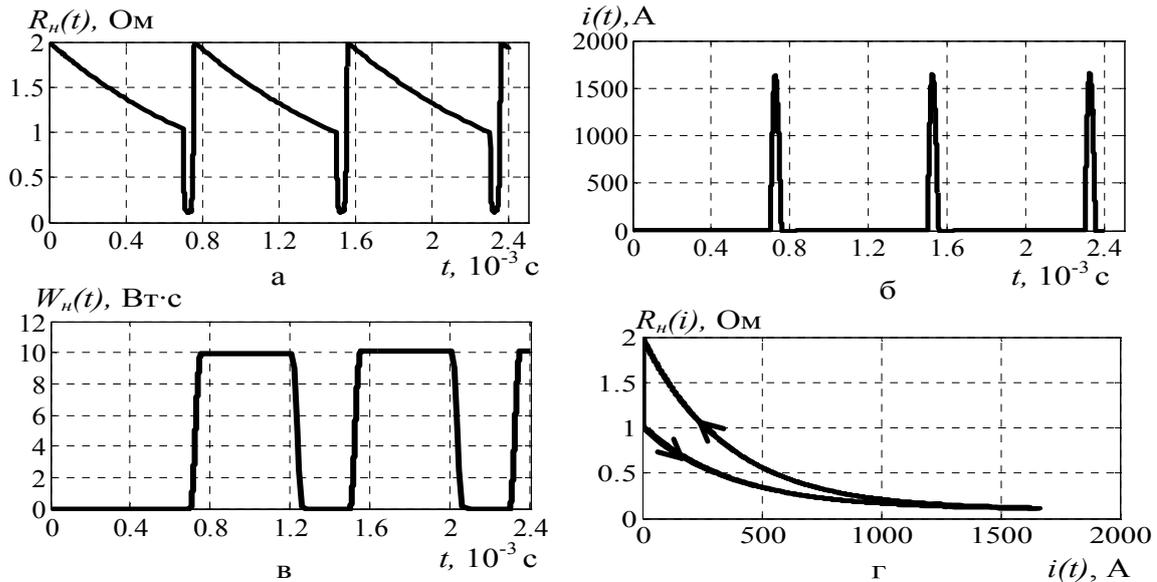


Рис. 4

При моделировании также можно получать такие изменяемые во времени характеристики разрядной цепи НК как падение напряжения на сопротивлении электроискровой нагрузки, скорость нарастания разрядного тока, потребляемая в нагрузке мощность и изменение напряжения на НК.

Для сравнения электрических и энергетических характеристик (средней импульсной мощности в нагрузке, длительности разрядного импульса, максимального разрядного тока и скоростей его нарастания) в цепях с нелинейным и эквивалентным ему линейным сопротивлением нагрузки проведен анализ переходных процессов в цепи разряда НК с использованием математической модели (6) для задания нелинейного сопротивления нагрузки и энергетически соответствующего ему линейного сопротивления  $R_{эКВ}$ , которое определялось по эмпирической формуле, применяемой при колебательном разряде конденсатора в цепи с полупроводниковыми ключами [7]

$$R_{эКВ} = 2\sqrt{L_1/C} / \sqrt{(\pi/\ln|U_{0C}/U_{ост}|)^2 + 1}, \quad (10)$$

где  $U_{0C}$  и  $U_{ост}$  – соответственно начальное и остаточное напряжение при разряде НК.

Результаты анализа этих переходных процессов представлены в табл. 1, где приняты обозначения:  $R_0$ ,  $R_{min}$  и  $R_{max}$  – сопротивления, характеризующие нелинейную нагрузку;  $R_{эКВ}$  – линейное сопротивление, энергетически эквивалентное нелинейному сопротивлению;  $I_{max}$  – максимальный ток;  $\Delta t_{max}$  и  $I_{max}/\Delta t_{max}$  – соответственно длительность и средняя скорость нарастания тока от 0 до  $I_{max}$ ;  $\Delta t_{max/2}$  и  $I_{max}/(2\Delta t_{max/2})$  – соответственно длительность и средняя скорость нарастания тока от 0 до  $I_{max}/2$ ;  $\tau$  – длительность разрядного импульса;  $W_H$  и  $P_{ср}$  – соответственно энергия и средняя импульсная мощность в нагрузке за время  $\tau$ ;  $U_{ост}$  – остаточное напряжение на конденсаторе после его разряда на нагрузку,  $k_{испC}$  – коэффициент использования энергии конденсатора, определяемый по формуле  $k_{испC} = 1 - U_{ост}^2 / U_{0C}^2$ .

Из табл. 1 видно, что в режимах с нелинейным сопротивлением нагрузки (по сравнению с режимами с эквивалентным линейным сопротивлением) максимальные разрядные токи больше на 0,8 %, длительности нарастания токов от нуля до максимума – на 13 %, средние импульсные мощнос-

**Таблица 1**

Режим	нелинейный	линейный
Сопротивление нагрузки, Ом	$R_0 = 1,0$ $R_{min} = 0,1$ $R_{max} = 2,0$	$R_{экв} = 0,131$
$I_{max}, A$	1661	1648
$\Delta t_{max} \cdot 10^{-6} c$	24,8	22,0
$I_{max}/\Delta t_{max} \cdot 10^6 A/c$	67,0	74,9
$\Delta t_{max/2} \cdot 10^{-6} c$	8,0	6,1
$I_{max}/(2\Delta t_{max/2}) \cdot 10^6 A/c$	104	135
$\tau, 10^{-5} c$	57,6	65,2
$W_n, Bт \cdot c$	10	10
$P_{cp} = W_n / \tau \cdot 10^6 Bт$	0,18	0,15
$U_{0c}, B$	477	477
$U_{ост}, B$	-73	-73
$k_{нел} C, \%$	97,7	97,7

ные интервалы, в течение которых ток в нагрузке достигает значений  $I_{max}$ ,  $I_{max}/2$ ,  $I_{max}/3$  и  $I_{max}/4$  для режимов с нелинейным и эквивалентным ему линейным сопротивлениями нагрузки. Согласно табл. 2 регулирование времени разряда конденсатора на нагрузку (при принудительном прерывании разряда при достижении тока  $I_{max}/2$ ,  $I_{max}/3$  и  $I_{max}/4$ ) позволяет повысить среднюю скорость нарастания в ней тока.

Временные зависимости, полученные при моделировании электроискровой нагрузки нелинейным сопротивлением, более точно отражают средние статистические значения, получаемые на установках ОЭИД слоя токопроводящих гранул в диэлектрической жидкости.

**Таблица 2**

Режим	нелинейный	линейный
Сопротивление нагрузки, Ом	$R_0 = 1,0$ $R_{min} = 0,1$ $R_{max} = 2,0$	$R_{экв} = 0,131$
$\Delta t_{max} \cdot 10^{-6} c$	24,78	22,00
$\Delta t_{max/2} \cdot 10^{-6} c$	8,01	6,10
$\Delta t_{max/3} \cdot 10^{-6} c$	4,97	3,81
$\Delta t_{max/4} \cdot 10^{-6} c$	3,54	2,78
$W_{n max}, Bт \cdot c$	4,65	4,32
$W_{n max/2}, Bт \cdot c$	0,60	0,20
$W_{n max/3}, Bт \cdot c$	0,23	0,06
$W_{n max/4}, Bт \cdot c$	0,12	0,02
$P_{cp max} \cdot 10^6 Bт$	0,188	0,196
$P_{cp max/2} \cdot 10^6 Bт$	0,075	0,033
$P_{cp max/3} \cdot 10^6 Bт$	0,046	0,014
$P_{cp max/4} \cdot 10^6 Bт$	0,034	0,009
$I_{max}/\Delta t_{max} \cdot 10^6 A/c$	67	75
$I_{max}/2\Delta t_{max/2} \cdot 10^6 A/c$	104	135
$I_{max}/3\Delta t_{max/3} \cdot 10^6 A/c$	111	144
$I_{max}/4\Delta t_{max/4} \cdot 10^6 A/c$	117	148

**Заключение.** С применением усовершенствованной математической модели сопротивления электроискровой нагрузки, которая учитывает его зависимость от величины и скорости изменения разрядного тока, различие начального и конечного значения сопротивления, а также длительности временной паузы между разрядами, проведен анализ циклических переходных процессов в зарядно-разрядных цепях НК полупроводниковой ЭРУ. Полученные результаты показали необходимость учета особенностей изменения сопротивления такой нагрузки, в частности того, что его конечное значение после разряда НК ЭРУ может быть больше, чем начальное. Причем разность между этими значениями может возрасти с увеличением паузы между разрядами НК. Применение такой модели электроискровой нагрузки (по сравнению с моделью энергетически эквивалентного линейного сопротивления) позволяет на 13–30 % повысить точность расчета длительности, максимального значения и скорости нарастания

ти – на 20 %, тогда как длительности всего разрядного импульса меньше на 12 %; средние скорости нарастания тока от нуля до значения  $I_{max}$  – на 11 %; средние скорости нарастания тока от нуля до значения  $I_{max}/2$  – на 30 %. При этом энергия, выделившаяся в нагрузке и коэффициент использования энергии конденсатора, не изменяются.

Уменьшение длительности импульсных токов в электроискровой нагрузке и увеличение скорости их нарастания уменьшают размеры получаемых электроэрозионных порошков [3, 7, 10, 11]. Поэтому были определены энергетические и динамические характеристики импульсных токов в электроискровой нагрузке при регулируемом разряде НК ЭРУ (при условии принудительного прерывания разряда при достижении тока в нагрузке величин, равных  $I_{max}$ ,  $I_{max}/2$ ,  $I_{max}/3$  и  $I_{max}/4$ ).

В табл. 2 приведены значения энергии, импульсной мощности и скорости нарастания тока в нагрузке за времен-

ные интервалы, в течение которых ток в нагрузке достигает значений  $I_{max}$ ,  $I_{max}/2$ ,  $I_{max}/3$  и  $I_{max}/4$  для режимов с нелинейным и эквивалентным ему линейным сопротивлениями нагрузки. Согласно табл. 2 регулирование времени разряда конденсатора на нагрузку (при принудительном прерывании разряда при достижении тока  $I_{max}/2$ ,  $I_{max}/3$  и  $I_{max}/4$ ) позволяет повысить среднюю скорость нарастания в ней тока. Временные зависимости, полученные при моделировании электроискровой нагрузки нелинейным сопротивлением, более точно отражают средние статистические значения, получаемые на установках ОЭИД слоя токопроводящих гранул в диэлектрической жидкости. Так при расчете процессов разряда конденсатора на нагрузку, сопротивление которой представлялось линеаризованной моделью (10), средняя скорость нарастания тока в нагрузке повышалась на 73–102 %. При представлении сопротивления нагрузки более точной моделью (6), учитывающей его нелинейную зависимость от величины и скорости нарастания тока в нагрузке, средняя скорость нарастания в ней тока повышалась на 55–80 %, что более точно согласуется с экспериментальными данными, полученными из осциллограмм, приведенных на рис. 1, а.

Однако при принудительном прерывании разряда НК снижается средняя импульсная мощность в нагрузке по сравнению с величиной, которую можно было бы получить при данных параметрах разрядной цепи без использования прерывания. Другими словами, применение регулирования времени разряда конденсатора на электроискровую нагрузку снизит коэффициент использования его энергии, но это приемлемый недостаток для технологических процессов, целью которых является получение высокодисперсных микро- и нано-размерных электроэрозионных порошков.

тока разряда накопительных конденсаторов на электроискровую нагрузку, а также повысить точность расчета потребляемой в ней импульсной мощности.

1. Вовченко А.И., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно-импульсных технологий. *Збірн. наук. праць Національного університету кораблебудування*. Миколаїв, 2010. № 4. С. 118–124.
2. Волков И.В., Вакуленко В.М. Источники электропитания лазеров. К.: Техника, 1976. 176 с.
3. Петриченко С.В. Динамика искроэрозионных процессов при разряде в слое токопроводящих гранул. Матер. XI междунар. науч. конференции *Физика импульсных процессов в конденсированных средах*. Николаев, Украина, 22-26 августа 2003. С. 42–43.
4. 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. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 23–25.
5. Щерба А.А., Штомпель И.В. Анализ электрических параметров и динамики искровых разрядов в слое токопроводящих гранул. *Стабилизация параметров электрической энергии*. К.: ИЭД АН Украины, 1991. С. 65–74.
6. Захарченко С.Н., Кондратенко И.П., Перекоз 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.
7. Щерба А.А. Принципы построения и стабилизации параметров полупроводниковых электроимпульсных систем электроискрового диспергирования слоя токопроводящих материалов. *Стабилизация параметров электрической энергии*. К.: ИЭД АН Украины, 1991. С. 12–30.
8. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Закономерности изменения потерь энергии в RL-цепях, соединяющих конденсаторы, заряженные до разных напряжений. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 6. С. 3–7.
9. Супруновская Н.И., Щерба А.А., Иващенко Д.С., Белецкий О.А. Процессы обмена энергией между нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторов. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 5. С. 3–11.
10. Berkowitz A.E., Walter J.L. Spark Erosion: A Method for Producing Rapidly Quenched Fine powders. *J. of Mater. Res.* 1987. March/April. 2 (2). Pp. 277–288.
11. 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 5th International Conference on *Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*. Singapore, 17-20 November 2003. Vol. 1. Pp. 659 – 664.
12. Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E. Spark-eroded particles: Influence of processing parameters. *Journal of Applied Physics*. 2004. Vol. 95. No 3. Pp. 823–829. <https://doi.org/10.1063/1.1635973>
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. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.842992>
14. 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. January. Vol. 254–255. Pp. 1–6.
15. Nguyen, P.-K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 115. Iss. 17. Pp. 17A756-1.
16. 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  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  nanoparticles with enhanced thermoelectric performance. *Nanotechnology*. 2012. No 23. Pp. 1–7. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/41/415604>
17. Kokorin V.V., Perekos A.O., Tshcherba A.A., Babiy O.M., Efimova T.V. Intermartensitic phase transitions in Ni-Mn-Ga alloy, magnetic field effect. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006. Vol. 302. Iss. 1. Pp. 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.08.010>

УДК 621.3.011:621.372

## ЦИКЛІЧНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЛАНЦЮГАХ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ НАРОСТАННЯ РОЗРЯДНИХ СТРУМІВ ТА ПАУЗИ МІЖ НИМИ НА ОПІР НАВАНТАЖЕННЯ

А.А. Щерба, чл.-кор. НАН України, Н.І. Супруновська, докт.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: [iednat1@gmail.com](mailto:iednat1@gmail.com)

Проведено аналіз циклічних перехідних процесів у зарядно-розрядних ланцюгах конденсатора напівпровідникової електророзрядної установки із застосуванням математичної моделі опору електроіскрового навантаження, що залежить від величини розрядного струму, швидкості його зміни й тривалості часової паузи між розрядними імпульсами. Математична модель відображує U-подібний характер зміни опору такого навантаження в часі (зокрема при об'ємному електроіскровому диспергуванні шару струмопровідних гранул у діелектричній рідині), а також урахує, що опір може мати різні значення на початку й кінці процесу розряду конденсатора та змінюватися протягом паузи між розрядними імпульсами. Виконано порівняння результатів дослідження перехідних процесів (тривалості розрядного імпульсу, енергії, що виділилася у навантаженні, середньої імпульсної потужності й середньої швидкості наростання струму в навантаженні за різні часові інтервали) у розрядних ланцюгах з нелінійним опором електроіскрового навантаження й енергетично еквівалентним йому лінійним опором. Проведено аналіз шляхів підвищення динамічних характеристик імпульсних струмів у навантаженні при регулюванні тривалості розряду конденсатора установки. Бібл. 17, рис. 4, табл. 2.

**Ключові слова:** нелінійний опір, електроіскрове навантаження, імпульс, перехідні процеси, математична модель.

# CYCLIC TRANSIENTS IN THE CIRCUITS OF ELECTRIC DISCHARGE INSTALLATIONS TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF MAGNITUDE AND RATE OF DISCHARGE CURRENTS RISE ON RESISTANCE OF ELECTRIC SPARK LOAD

**A.A. Shcherba, N.I. Suprunovska**  
**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,**  
**pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.**  
**E-mail: [jednat1@gmail.com](mailto:jednat1@gmail.com)**

*The cyclic transients in the charge-discharge circuits of capacitor of semiconductor electrical discharge installation using the mathematical model of resistance of the electrical spark load, which depends on magnitude of discharge current, rate of its change and duration of the time pause between discharge pulses are studied. The mathematical model reflects the U-shaped character of the change in the resistance of such load in time (in particular, in the case of volumetric electro-spark dispersion of a layer of current-conductive granules in a dielectric liquid). Also this model takes into account that the load resistance can have different values at the beginning and end of the discharge process of the capacitor and varies during the pause between the discharge pulses. A comparison of the transient results (discharge pulse duration, released in the load energy, average pulse power and rate of current rise in the load) in the discharge circuits with a nonlinear resistance of spark load and the energy-equivalent linear resistance is made. The analysis of ways to improve the dynamic characteristics of pulse currents in the load in the case of control of capacitor discharge duration is carried out. References 17, figures 4, tables 2.*

**Keywords:** nonlinear resistance, electric spark load, pulse, transients, mathematical model.

1. Vovchenko A.I., Tertilov R.V. Synthesis of capacitive non-linear-parametrical energy sources for discharge-pulse technologies. *Zbirnyk naukovykh pratz Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia*. Mykolaiv, 2010. No 4. Pp. 118–124. (Rus)
2. Volkov I.V., Vakulenko V.M. Sources for power supply of lasers. Kyiv: Tekhnika, 1976. 176 p. (Rus)
3. Petrichenko S.V. Dynamics of spark-erosion processes during discharge in current-conducting granular layer. Proc. 11th International Conference on *Physics of Impulse Processes in Condensed Media*. Mykolaiv. Ukraine, 22–26 August 2003. Pp. 42–43. (Rus)
4. 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 at zero current in it. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 5. Pp. 23–25. (Rus)
5. Shcherba A.A., Shtompel I.V. Analysis electrical parameters and dynamics of spark discharges in a layer of current-conducting granules. *Stabilizatsiia parametrov elektricheskoi energii*. Kiev: IED AN Ukrainy, 1991. Pp. 65–74. (Rus)
6. Zakharchenko S.N., Kondratenko I.P., Perekos A.Ye., Zalytsky V.P., Kozyrsky V.V., Lopat'ko 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)
7. Shcherba A.A. Principles of construction and parameters stabilization of semi-conductor electro-pulse systems for electro-spark dispersion of current-conducting materials layer. *Stabilizatsiia parametrov elektricheskoi energii*. Kiev: IED AN Ukrainy, 1991. Pp. 12–30. (Rus)
8. Suprunovska N.I., Shcherba A.A. Regularity of change of the energy loss in RL – circuits connecting capacitors, charged to different voltage. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 6. Pp. 3–7. (Rus)
9. 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)
10. Berkowitz A.E., Walter J.L. Spark Erosion: A Method for Producing Rapidly Quenched Fine powders. *J. of Mater. Res.* 1987. March/April. 2 (2). Pp. 277–288.
11. 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 5th International Conference on *Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*. Singapore, 17–20 November 2003. Vol. 1. Pp. 659 – 664.
12. Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E. Spark-eroded particles: Influence of processing parameters. *Journal of Applied Physics*. 2004. Vol. 95. No 3. Pp. 823–829. <https://doi.org/10.1063/1.1635973>
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. Pp. 361 – 369. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.842992>
14. 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. January. Vol. 254–255. Pp. 1–6.
15. Nguyen, P.-K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 115. Iss. 17. Pp. 17A756-1.
16. 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<sub>0.5</sub>Sb<sub>1.5</sub>Te<sub>3</sub> nanoparticles with enhanced thermoelectric performance. *Nanotechnology*. 2012. No 23. Pp. 1–7. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/41/415604>
17. Kokorin V.V., Perekos A.O., Tshcherba A.A., Babiy O.M., Efimova T.V. Intermartensitic phase transitions in Ni-Mn-Ga alloy, magnetic field effect. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006. Vol. 302. Iss. 1. Pp. 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2005.08.010>

Надійшла 20.09.2017  
Остаточний варіант 09.10.2017