

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ СИНТЕЗА ЦЕПИ РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА ПО ВРЕМЕННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

А.А.Щерба, чл.-корр. НАН Украины, Н.И.Супруновская, канд.техн.наук, Д.С.Ивашенко
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина, e-mail: iednat1@gmail.com

Разработана новая математическая модель нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки разрядно-импульсных установок объемного электроэрозионного диспергирования (ОЭЭД) слоя токопроводящих гранул в диэлектрической жидкости. С использованием такой модели исследованы переходные процессы в разрядной цепи накопительного конденсатора таких установок. Проведен сравнительный анализ изменяемых во времени характеристик разрядной цепи конденсатора (электрического сопротивления электроискровой нагрузки, падения на ней напряжения, скоростей нарастания и уменьшения разрядного тока, потребляемой в нагрузке мощности) при моделировании электроискровой нагрузки линейным и нелинейным электрическими сопротивлениями. Показано, что с изменением коэффициента использования электрической энергии накопительного конденсатора при его колебательном разряде на электроискровую нагрузку целесообразность моделирования ее нелинейным сопротивлением возрастает. Библ. 11, рис. 6, табл. 3.

Ключевые слова: разряд, конденсатор, импульс, ток, электроискровая нагрузка, нелинейное сопротивление, синтез.

Введение. В большинстве исследований электроэнергетических процессов в цепях формирователей разрядных импульсов с электроискровой нагрузкой принимается, что при протекании разрядного импульсного тока ее активное электрическое сопротивление $R_n = \text{const}$, но может измениться во время паузы между разрядами [1, 2, 5, 7–11]. Такое допущение позволяет определять не только закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке [8] и оценивать диапазоны изменения параметров разрядных импульсов при изменении величины R_n случайным образом [7], но и по заданным требованиям осуществлять синтез структуры и параметров разрядных цепей накопительных конденсаторов [2, 5, 9].

В то же время, в общем случае целью синтеза является поиск структуры электрической цепи и параметров её элементов, при которых электрический процесс наиболее точно удовлетворяет заданным требованиям с учетом всех свойств электрических цепей, включая изменение во времени таких их характеристик, как электрическое сопротивление нагрузки, падение напряжения, скорости нарастания и убывания разрядного тока, потребляемую в нагрузке электрическую мощность и т.п. При исследовании указанных временных зависимостей (динамических характеристик) установок объемного электроэрозионного диспергирования (ОЭЭД) слоя токопроводящих гранул в диэлектрической жидкости необходимо учитывать нелинейный характер сопротивления электроискровой нагрузки, который обычно оценивают на основании многих экспериментов и уточняют на математических моделях. Поэтому целесообразно разработать математическую модель электрического сопротивления электроискровой нагрузки, позволяющую осуществлять параметрический синтез цепи разряда конденсатора по указанным временным характеристикам и таким усредненным параметрам как средняя импульсная мощность, длительность искроразрядного процесса, скорость нарастания тока от нуля до максимального значения и его убывания от максимума до нуля.

Целью работы являлась разработка математической модели нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки, в частности, слоя токопроводящих гранул при их объемном электроэрозионном диспергировании для параметрического синтеза элементов разрядной цепи конденсатора электроразрядных установок по требуемым временным характеристикам.

Исследование изменения во времени электрического сопротивления слоя токопроводящих гранул при их объемном электроэрозионном диспергировании. Многочисленные экспериментальные исследования показали [10, 11], что при протекании в слое токопроводящих гранул одного искроразрядного импульса изменение во времени электрического сопротивления слоя характеризуется U-образной функцией $R_n(t)$, показанной кривой 1 на рис. 1.

Кривой 2 представлено линейное электрическое сопротивление R_{n0} , в котором при разряде конденсатора будет потребляться такая же электрическая энергия, как и при его разряде на сопротивление $R_n(t)$. При колебательном разряде конденсатора емкостью C через индуктивность L на активное сопротивление R_{n0} его величину можно определить из выражения [3, 4]

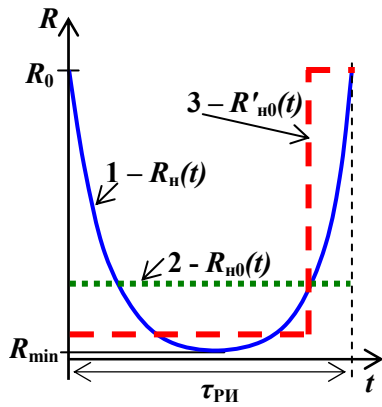


Рис. 1

$$R_{н0} = \frac{2\sqrt{L/C}}{\sqrt{(\pi/\ln|U_{0c}/U_{ост}|)^2 + 1}}, \quad (1)$$

где U_{0c} и $U_{ост}$ являются начальным и остаточным напряжениями на конденсаторе, которые не зависят от длительности разрядного импульсного тока $\tau_{ри}$.

Кривой 3 на рис. 1 показано эквивалентное активное сопротивление $R'_{н0}$, на котором также будет потребляться такая же энергия, как и при разряде конденсатора на сопротивление $R_n(t)$. Но скачкообразное увеличение сопротивления $R'_{н0}$ может отражать изменение сопротивления электроискровой нагрузки в конце разрядного импульса при возникновении случайным образом так называемых холостых разрядов, то есть длительных разрядов конденсатора с малым током без электроискрений в слое гранул. При скачкообразном изменении сопротивления R'_n разряд конденсатора на новом временном интервале необходимо рассчитывать как новый переходной процесс с учетом начальных условий, определяемых из неизменности тока в индуктивности и напряжения на емкости [7].

Экспериментальные исследования также показали, что при ОЭЭД слоя токопроводящих гранул среднестатистический разрядный ток и потребляемая в слое электрическая мощность являются типичными затухающими полусинусоидами, а электрическое сопротивление $R_n(t)$ слоя токопроводящих гранул может изменяться не только во время протекания разрядных токов, но и в промежутках между разрядами [10]. Если длительность разрядных импульсов $\tau_{ри}$ гораздо меньше длительности временной паузы τ_n (т.е. $\tau_{ри} \ll \tau_n$) и начальные условия возникновения разрядных импульсов практически не изменяются, то электроискровая нагрузка может моделироваться симметричной U-образной функцией $R_n(t)$ (кривой 1 на рис. 1). В работах [3, 4, 7] показано, что при анализе переходных процессов разряда конденсатора на нагрузку и использовании указанных временных зависимостей наиболее целесообразно применять экспоненциальные функции, что будет сделано дальше при разработке нелинейной модели электроискровой нагрузки.

Разработка математической модели нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки. Проведенные исследования показали, что при моделировании нелинейного электрического сопротивления электроискровой нагрузки необходимо учитывать зависимость его величины R_n от значений импульсного разрядного тока $i(t)$ и скорости его изменения di/dt . В данной статье указанную зависимость предложено задавать экспоненциальной функцией вида

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

где R_0, R_{min} – соответственно сопротивление нагрузки на момент начала разрядного процесса и минимальное сопротивление нагрузки, достигаемое при максимальном разрядном токе; ε_1 – коэффициент, определяющий скорость изменения сопротивления R_n при изменении тока $i(t)$, k – коэффициент, определяющий зависимость сопротивления нагрузки R_n от скорости изменения тока di/dt .

Коэффициент k определяется выражением

$$k(di/dt) = \varepsilon_2 \cdot di/dt \cdot h(di/dt), \quad (3)$$

где ε_2 – постоянный коэффициент, а параметр $h(di/dt)$ изменяется в соответствии с выражением

$$h(di/dt) = \begin{cases} 1, & di/dt \geq 0 \\ 0, & di/dt < 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Введение коэффициента k позволяет реализовать учет различия в скорости уменьшения сопротивления нагрузки R_n при нарастании величины разрядного тока i в начале разряда конденсатора и увеличения сопротивления R_n при убывании тока i по мере разряда конденсатора. Кроме этого, коэффициент k был выбран таким образом, чтобы избежать скачкообразного изменения сопротивления R_n при достижении разрядным током своего максимального значения.

В данной модели значение нелинейного сопротивления нагрузки $R_n(i, di/dt)$, достигаемое при максимальном разрядном токе I_{max} , регулируется коэффициентом ε_1 . Чем больше ε_1 , тем меньше будет величина $R_n(i, di/dt)$ при I_{max} и наоборот.

Поскольку в реальных процессах сопротивление нагрузки, снижаясь при нарастании разрядного тока, достигает своего минимального значения при максимальном значении тока, то необходимо определить значение ε_1 , реализующее это условие.

Условие равенства $R_n(i, di/dt) = R_{\min}$, при $i = I_{\max}$ записывается как $R_n(I_{\max}) = R_{\min}$. Используя выражение (2), получим

$$(R_0 - R_{\min}) \cdot e^{-\varepsilon_1(1+k)I_{\max}} + R_{\min} = R_{\min}, \quad (5)$$

откуда следует, что

$$(R_0 - R_{\min}) \cdot e^{-\varepsilon_1(1+k)I_{\max}} = 0. \quad (6)$$

Так как в момент достижения током максимума его производная $di/dt = 0$, то коэффициент k , согласно (3), также равен 0. Значит выражение (6) можно упростить

$$(R_0 - R_{\min}) \cdot e^{-\varepsilon_1 I_{\max}} = 0. \quad (7)$$

Отметим, что при $R_0 \neq R_{\min}$ равенство (7) при конечном значении коэффициента ε_1 не может быть выполнено, поскольку левая часть уравнения при увеличении ε_1 будет стремиться к нулю, не достигая его. Поэтому можно говорить о выполнении равенства (7) с некоторой погрешностью δ .

Зададим некоторую малую величину δ и примем допущение, что при

$$(R_0 - R_{\min}) \cdot e^{-\varepsilon_1 I_{\max}} = \delta \quad (8)$$

поставленное условие ($R_n(i, di/dt) = R_{\min}$ при $i = I_{\max}$) выполняется.

Прологарифмируем выражение (8) и получим выражение для определения коэффициента ε_1

$$\varepsilon_1 = -I_{\max}^{-1} \ln[\delta(R_0 - R_{\min})^{-1}], \quad (9)$$

позволяющее найти величину коэффициента ε_1 , при которой нелинейное сопротивление нагрузки с точностью до малой величины δ будет достигать величины R_{\min} при токе I_{\max} .

Для расчета коэффициента ε_1 согласно выражению (9) необходимо знать значение максимального тока I_{\max} , протекающего в разрядной цепи конденсатора с электроискровой нагрузкой.

На рис. 2 показана схема разрядной цепи формирователя разрядных импульсов установок ОЭЭД слоя токопроводящих гранул в диэлектрической жидкости. Конденсатор C разряжается на нелинейное сопротивление нагрузки R_n через разрядный тиристор VT , индуктивность L и активное сопротивление R разрядного контура.

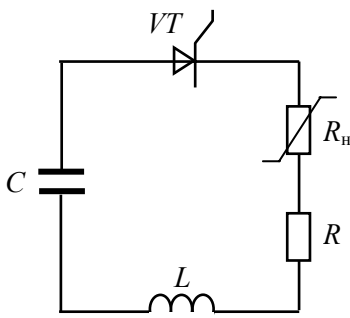


Рис. 2

Точное значение I_{\max} аналитически получить сложно, так как для этого потребуется решить нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее переходный процесс в цепи второго порядка (с двумя реактивными элементами – индуктивностью и конденсатором) с нелинейным сопротивлением. В то же время можно дать некоторую оценку величине I_{\max} , приняв допущение, что I_{\max} примерно равно максимуму тока, который протекал бы в линейной цепи при линейном сопротивлении нагрузки, равном R_{\min} .

Ток при колебательном разряде конденсатора C в линейной цепи второго порядка на активное сопротивление R_{\min} и индуктивность L определяется выражением [4]

$$i(t) = U_0 e^{-\alpha t} \sin(\omega t) / L\omega, \quad (10)$$

где U_0 – начальное напряжение на конденсаторе, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$, $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$, $\alpha = R_{\min}/2L$.

Для определения времени $t_{I_{\max}}$ достижения током своего максимального значения продифференцируем выражение (10) по времени и решим уравнение $di/dt = 0$

$$U_0 (\omega e^{\alpha t} \cos \omega t - \alpha e^{-\alpha t} \sin \omega t) / L\omega = 0. \quad (11)$$

Поскольку начальное напряжение на конденсаторе при его разряде не может быть равным нулю, то $U_0/L\omega \neq 0$, и уравнение (11) можно упростить, получив выражение

$$\omega e^{\alpha t} \cos \omega t - \alpha e^{-\alpha t} \sin \omega t = 0. \quad (12)$$

Применив формулу вспомогательного аргумента, получим

$$e^{\alpha t} \sqrt{\alpha^2 + \omega^2} \sin(\omega t + \arccos(-\alpha/\sqrt{\alpha^2 + \omega^2})) = 0. \quad (13)$$

Поскольку первые два множителя в выражении (13) больше нуля, то его можно привести к виду

$$\sin(\omega t + \arccos(-\alpha/\sqrt{\alpha^2 + \omega^2})) = 0. \quad (14)$$

Решением уравнения (14) будет

$$t = \omega^{-1} \left(\pi n - \arccos(-\alpha/\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}) \right), \quad (15)$$

где $n \in Z$ (множеству целых чисел).

Поскольку в рассматриваемой разрядной цепи имеется полупроводниковый (тиристорный) ключ, разрывающий цепь после первого колебания тока, то окончательным решением уравнения (15) будет первое положительное значение t . Следовательно, для $t_{I_{\max}}$ имеем

$$t_{I_{\max}} = \left(\pi - \arccos \left(-\alpha / \sqrt{\alpha^2 + \omega^2} \right) \right) / \omega. \quad (16)$$

Тогда выражение для оценки максимального тока в цепи I_{\max} запишется как

$$I_{\max} = U_0 \cdot e^{-\alpha t_{I_{\max}}} \sin(\omega t_{I_{\max}}) / L\omega. \quad (17)$$

Полученная оценка максимального тока позволяет рассчитать по формуле (9) значение коэффициента ε_1 , при котором нелинейное сопротивление нагрузки будет с точностью до малой величины δ достигать своего минимального значения R_{\min} при максимальном разрядном токе I_{\max} .

Разработанная математическая модель была реализована в пакете MATLAB/SIMULINK.

Нелинейное сопротивление нагрузки было реализовано с помощью блока встроенной функции MATLAB (Embedded MATLAB Function), в котором задаваемая функция $R(i, di/dt)$ определялась выражением (2). Предварительно были заданы различные значения R_0 и R_{\min} и рассчитывались (с помощью подпрограммы) значения оценки максимума тока в цепи I_{\max} и коэффициента ε_1 соответственно выражениям (17) и (9).

При математическом моделировании параметры разрядной цепи были следующими: $U_0 = 500$ В, $C = 10^{-4}$ Ф, $L = 10^{-6}$ Гн, $R = 10^{-6}$ Ом, $R_0 = \text{var}(0,6 - 1,4 \text{ Ом})$, $R_{\min} = \text{var}(0,06 - 0,11 \text{ Ом})$.

На рис. 3 и 4 показаны результаты моделирования переходных процессов в разрядной цепи с нелинейным сопротивлением нагрузки:

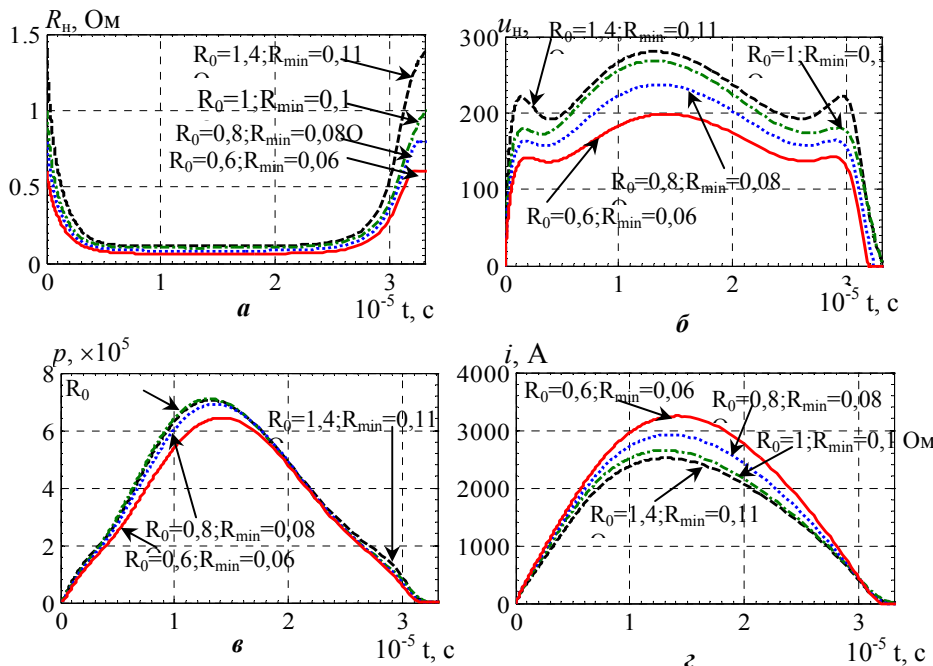


Рис. 3

на рис. 3 – осциллограммы сопротивления нагрузки $R_n(t)$ (рис. 3, а) и напряжения на ней $u_n(t)$ (рис. 3, б), мгновенной мощности, выделяемой на нагрузке $p(t)$ (рис. 3, в) и тока в разрядной цепи $i(t)$ (рис. 3, г).

На рис. 4 показано изменение во времени энергии, выделенной на нагрузке $W_n(t)$ (рис. 4, а), и напряжения на конденсаторе U_C во время переходного процесса его разряда на нагрузку (рис. 4, б), а также нелинейные зависимости сопротивления нагрузки от тока в разрядной цепи (рис. 4, в).

В табл. 1 представлены результаты анализа этих переходных процессов, где обозначено R_0 и R_{\min} – сопротивления нелинейной нагрузки; I_{\max} , А – максимальный ток; $\Delta t_{\max} \cdot 10^{-5}$ с – длительность нарастания тока от 0 до I_{\max} ; $I_{\max} / \Delta t_{\max}$ – средняя скорость нарастания тока; P_{\max} – максимальная мощность в нагрузке; $\tau_{\text{РИ}}$ – длительность разрядного импульса; W_n – энергия в нагрузке за время $\tau_{\text{РИ}}$; $P_{\text{ср}}$ – средняя импульсная мощность за время $\tau_{\text{РИ}}$; $U_{\text{ост}}$ – остаточное напряжение на конденсаторе, $k_{\text{исп.с}}$ – коэффициент использования энергии конденсатора (под которым понимается отношение энергии, отобранной от конденсатора к энергии первоначально в нем накопленной), определяемый по формуле $k_{\text{исп.с}} = 1 - U_{\text{ост}}^2 / U_0^2$.

Для сравнения электрических характеристик (импульсной мощности, длительности разрядного импульса, максимального тока, скоростей нарастания разрядного тока) в моделях с нелинейными и линейными сопротивлениями нагрузки были промоделированы переходные процессы в схеме с эквивалентными линейными сопротивлениями нагрузки.

Таблица 1

R_0 и R_{\min} , Ом	I_{\max} , А	Δt_{\max} , 10^{-5} с	$I_{\max}/\Delta t_{\max}$, 10^5 А/с	P_{\max} , 10^5 Вт	τ_{PI} , 10^{-5} с	$W_{н\tau}$, Вт·с	$P_{\text{ср}}$, 10^5 Вт	$U_{\text{ост}}$, В	$k_{\text{исп С}}$, %
$R_0=1,4; R_{\min}=0,11$	2516	1,32	1909	7,05	3,33	12,4	3,71	-13,1	99,9
$R_0=1; R_{\min}=0,1$	2649	1,31	2028	7,10	3,31	12,3	3,71	-41,3	99,3
$R_0=0,8; R_{\min}=0,08$	2918	1,36	2148	6,91	3,23	11,9	3,68	-90,7	96,7
$R_0=0,6; R_{\min}=0,06$	3245	1,41	2301	6,44	3,19	11,1	3,50	-152,6	90,7

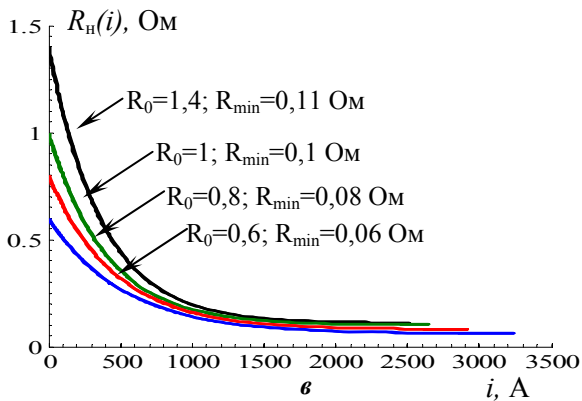
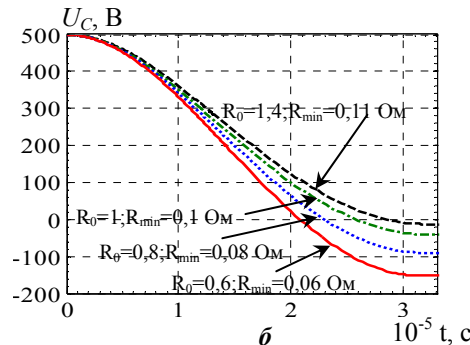
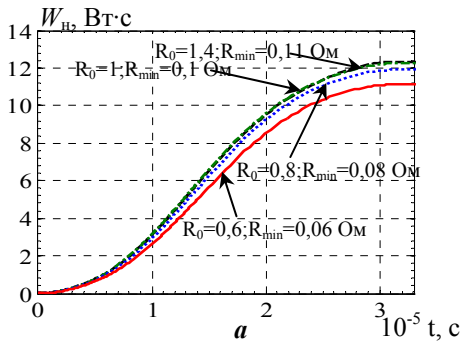


Рис. 4

$R_{н0}$ в модели линейной нагрузки, соответствующие R_0, R_{\min} в модели нелинейной нагрузки.

Таблица 2

R_0 , Ом	1,4	1	0,8	0,6
R_{\min} , Ом	0,11	0,1	0,08	0,06
$R_{н0}$, Ом	0,151	0,124	0,095	0,071

При моделировании задавались те же параметры цепи (кроме сопротивления нагрузки $R_{н0}$): $U_0 = 500$ В, $C = 10^{-4}$ Ф, $L = 10^{-6}$ Гн, $R = 10^{-6}$ Ом, $R_{н0} = \text{var}(0,071-0,151)$ Ом).

На рис. 5 показаны результаты моделирования переходных процессов в разрядной цепи с линейными сопротивлениями нагрузки: осциллограммы напряжения и мгновенной мощности, выделяемой на нагрузке (рис. 5, а, б), изменение энергии, выделенной на нагрузке в течение одного разрядного импульса τ_{PI} (рис. 5, в), тока в разрядной цепи (рис. 5, г).

В табл. 3, аналогично табл. 1, представлены результаты анализа этих переходных процессов.

Таблица 3

$R_{н0}$, Ом	I_{\max} , А	Δt_{\max} , 10^{-5} с	$\Delta I_{\max}/\Delta t_{\max}$, 10^5 А/с	P_{\max} , 10^5 Вт	τ_{PI} , 10^{-5} с	$W_{н\tau}$, Вт·с	$P_{\text{ср}}$, 10^5 Вт	$U_{\text{ост}}$, В	$k_{\text{исп С}}$, %
0,151	2183	1,10	2002	7,19	4,83	12,4	2,56	-11,9	99,9
0,124	2437	1,15	2119	7,36	4,02	12,3	3,05	-39,5	99,4
0,095	2780	1,23	2260	7,34	3,58	11,9	3,33	-88,7	96,9
0,071	3139	1,30	2414	7,00	3,37	11,2	3,33	-147,8	91,3

грузку с нелинейным (рис. 6, а) и линейным (рис. 6, б) сопротивлениями.

Сравнивая данные табл. 1 и табл. 3 можно отметить, что с увеличением коэффициента использования энергии конденсатора при его разряде на электроискровую нагрузку возрастает различие временных характеристик переходных процессов в цепях с нелинейными сопротивлениями и эквивалентными линейными сопротивлениями нагрузки. При разряде конденсатора на нагрузку с нелинейными сопротивлениями (по сравнению с его разрядом на эквивалентные линейные сопротивления) выявлено, что значения максимальных разрядных токов увеличивается на 4–15 %; длительность нарастания тока от нуля до

Эквивалентное сопротивление $R_{н0}$, представляющее собой такое линейное сопротивление на-

грузки, потребляемая мощность которого при прочих равных условиях эквивалентна мощности, потребляемой соответствующим нелинейным сопротивлением $R(i, di/dt)$, можно определить из энергетических условий

$$\int i^2(t)R(t)dt = \int i^2(t)R_{н0}dt,$$

откуда

$$R_{н0} = \frac{\int i^2(t)R(t)dt}{\int i^2(t)dt}. \quad (18)$$

Однако проще рассчитать значения эквивалентных линейных сопротивлений нагрузки, используя полученные значения $U_{\text{ост}}$, по формуле (1). В табл. 2 приведены результаты расчетов

На рис. 6 показаны зависимости изменения скорости нарастания токов di/dt при разряде конденсатора на на-

максимального значения увеличивается на 9–21%, а длительность всего разрядного импульса уменьшается на 5–30%; средние скорости нарастания тока от нуля до максимального значения уменьшаются почти на 5%; максимальные мощности в нагрузке уменьшаются на 2–8%; средние импульсные мощности увеличиваются на 5–45%.

Заключение. 1. Разработана математическая модель электрического сопротивления электроискровой нагрузки, которая отражает нелинейный характер его изменения при объемном электроискровом диспергировании слоя токопроводящих гранул в диэлектрической жидкости. Эту модель целесообразно использовать при параметрическом синтезе элементов колебательной цепи разряда накопительного конденсатора на электроискровую нагрузку.

2. С использованием разработанной модели нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки исследованы переходные процессы в электрической цепи колебательного разряда конденсатора на такую нагрузку. Выполнено сравнение результатов исследования переходных процессов в разрядных цепях с нелинейными и энергетически эквивалентными им линейными сопротивлениями электроискровой нагрузки. Установлено, что с увеличением коэффициента использования энергии конденсатора при его разряде на электроискровую нагрузку возрастает различие временных характеристик переходных процессов в цепях с нелинейными сопротивлениями и эквивалентными линейными сопротивлениями нагрузки. Полученные временные зависимости более точно отражают средние статистические их значения, получаемые на экспериментальных установках объемного электроэрозионного диспергирования слоя токопроводящих гранул в диэлектрической жидкости.

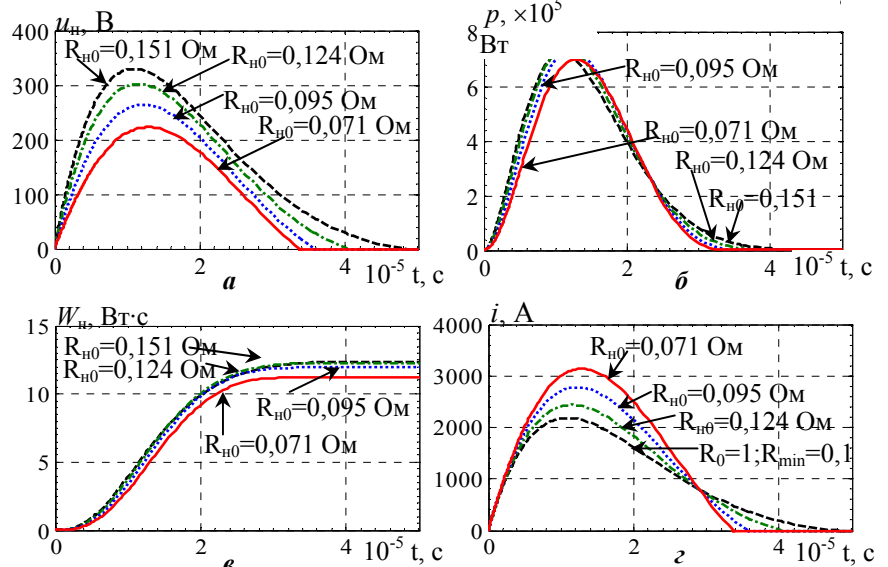


Рис. 5

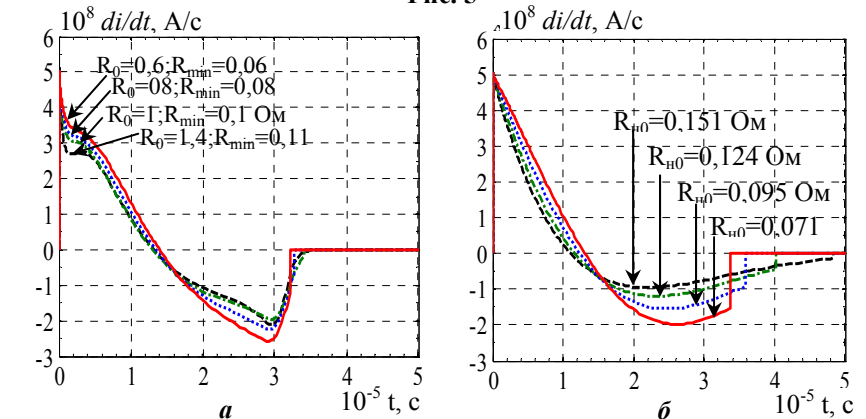


Рис. 6

1. Вовченко А.А., Посохов А.А. Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах. – К.: Наук. думка, 1992. – 168 с.
2. Вовченко А.А., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно-импульсных технологий // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – 2010. – № 4. – С. 118–124.
3. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. – Том 1. – СПб.: Питер, 2009. – 512 с.
4. Карпов Ю.О., Ведмицький Ю.Г., Кухарчук В.В., Кацив С.Ш. Теоретичні основи електротехніки. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 530 с.
5. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 6. – С. 70–75.
6. Кузнецов А.М. Синтез параметров и допусков элементов электрических цепей // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей. Междунар. сб. научн. трудов. – 2012. – Вып. 10. – С. 3–13.
7. Щерба А.А., Иващенко Д.С., Супруновская Н.И. Развитие метода разностных уравнений для анализа переходных процессов в цепях электроразрядных установок при стохастическом изменении сопротивления нагрузки // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 3. – С. 3–12.
8. 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.

9. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Синтез электрических цепей с емкостными накопителями энергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов // Техн. электродинамика. – 2014. – № 1. – С. 3–11.

10. Щерба А.А., Штомпель И.В. Анализ электрических параметров и динамики искровых разрядов в слое токопроводящих гранул // Стабилизация параметров электрической энергии. – К.: ИЭД НАН Украины, 1991. – С. 65–74.

11. J. Carrey, H.B. Radousky, A.E. Berkowitz Spark-eroded particles: Influence of processing parameters // Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol. 95. – № 3. – Pp. 823–829.

УДК 621.3.011:621.372

МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНОГО ОПОРУ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ СИНТЕЗУ КОЛА РОЗРЯДУ КОНДЕНСАТОРА ЗА ЧАСОВИМИ ПАРАМЕТРАМИ

А.А.Щерба, чл.-кор. НАН України, Н.І.Супруновська, канд.техн.наук, Д.С.Івашченко

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

e-mail: iednat1@gmail.com

Розроблено нову математичну модель нелінійного опору електроіскрового навантаження розрядно-імпульсних установок об'ємного електроерозійного диспергування (ОЕЕД) шару струмопровідних гранул у діелектричній рідині. З використанням такої моделі досліджено перехідні процеси в розрядному колі накопичувального конденсатора таких установок. Проведено порівняльний аналіз змінюваних у часі характеристик розрядного кола конденсатора (опору електроіскрового навантаження, падіння на ньому напруги, швидкостей наростання та зменшення розрядного струму, споживаної у навантаженні потужності) при моделюванні електроіскрового навантаження лінійними й нелінійними електричними опорами. Показано, що зі змінням коефіцієнта використання електричної енергії накопичувального конденсатора при його коливальному розряді на електроіскрове навантаження доцільність моделювання його нелінійним опором зростає. Бібл. 11, табл. 3, рис. 6.

Ключові слова: розряд, конденсатор, імпульс, струм, електроіскрове навантаження, синтез, параметр.

MODELING OF NONLINEAR RESISTANCE OF ELECTRO-SPARK LOAD FOR SYNTHESIS OF DISCHARGE CIRCUIT OF CAPACITOR BY TIME PARAMETERS

A.A.Shcherba, N.I.Suprunovska, D.S.Ivashchenko

Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,

e-mail: iednat1@gmail.com

The new mathematical model of nonlinear resistance of electro-spark load of discharge-pulse installations for volumetric electro-erosive dispersion (VEED) of layer of current-conducting granules in a dielectric liquid is developed. The transients in a discharge circuit of the reservoir capacitor of such installations are investigated with use of such model. The comparative analysis of changed in a time characteristics of a discharge circuit of the capacitor (electric resistance of electro-spark load, voltage drop on this load, rate of rise of the discharge current and its descent rate and power consumed in load) is carried out at modeling of electro-spark load by linear electric resistance and nonlinear one. It is shown, that with changing of available electric energy factor of the reservoir capacitor at its oscillatory discharge on electro-spark load the expediency of its modeling by nonlinear resistance increases.

References 11, figures 6, tables 3.

Keywords: discharge, capacitor, pulse, electro-spark load, synthesis, parameter.

1. Vovchenko A.I., Posokhov A.A. Operated electro-explosive processes of transformation of energy in the condensed medium. – Kyiv: Naukova dumka, 1992. – 168 p. (Rus)

2. 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. – № 4. – Pp. 118–124. (Rus)

3. Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. Electrical engineering theory. – Vol. 1. – Sankt-Peterburg: Piter, 2009. – 512 p. (Rus)

4. Karpov Ju.O., Vedmitskiy Yu.H., Kukharchuk V.V., Katsyv S.Sh. Theoretical Foundations of Electrical Engineering. – Vinnytsia: Vinnytskyi Natsionalnyi Tekhnichnyi Universytet, 2011. – 530 p. (Ukr)

5. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametrical synthesis of high-voltage pulse test device with capacitive energy storage // Elektrotehnika i elektromekhanika. – 2007. – № 1. – Pp. 70–75. (Rus)

6. Kuznetsov A.M. Synthesis of parameters and tolerances of electrical circuit elements // Mezhdunarodnyi sbornik nauchnykh trudov "Sintez, analiz i diagnostika elektronnykh tsepei". – 2012. – Issue 10. – Pp. 3–13. (Rus)

7. Shcherba A.A., Ivashchenko D.S., Suprunovskaia N.I. Development of difference equations method for analysis of transient processes in the circuits of electro-discharge systems at stochastic changing of load resistance // Tekhnichna elektrodynamika. – 2013. – № 3. – Pp. 3–12. (Rus)

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

9. Shcherba A.A., Suprunovskaia N.I. Synthesis of electrical circuits with capacitive energy storages in semiconductor formers of power discharge pulses // Tekhnichna elektrodynamika. – 2014. – № 1. – Pp. 3–11. (Rus)

10. 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. – Kyiv: Instytut Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 1991. – Pp. 65–74. (Rus)

11. J. Carrey, H.B. Radousky, A.E. Berkowitz Spark-eroded particles: Influence of processing parameters // Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol. 95. – № 3. – Pp. 823–829.

Надійшла 15.01.2014