

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ ЕГО ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ПРОТЕКАНИИ И ОТСУТСТВИИ РАЗРЯДНОГО ТОКА В НАГРУЗКЕ

**А.А.Щерба**, чл.-корр. НАН Украины, **Н.И.Супруновская**, канд.техн.наук, **Д.С.Иващенко**  
**Институт электродинамики НАН Украины,**  
**пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.**  
**e-mail: [sh1cherba@gmail.com](mailto:sh1cherba@gmail.com)**

*Разработана математическая модель нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки, учитывающая разные его значения в начале и конце разрядного тока, а также изменение в течение паузы между разрядными импульсами. Использование такой модели позволяет осуществлять параметрический синтез цепи формирователей разрядных токов в электроискровой нагрузке с учетом влияния на величину ее электрического сопротивления таких динамических параметров разрядных импульсов, как величина и скорость изменения разрядного тока, а также частоты и скважности разрядных импульсов. Библ. 4, рис. 1.*

**Ключевые слова:** нелинейное сопротивление, электроискровая нагрузка, конденсатор, разрядный контур, переходные процессы, математическая модель.

Математическое моделирование нелинейных элементов электрических цепей является актуальной задачей, поскольку во многих случаях позволяет обобщать основные зависимости между их параметрами в виде функции, которая упрощает анализ свойств таких цепей, а также их структурный и параметрический синтез по заданным техническим требованиям [1, 3]. Применение аналитических методов для исследования переходных процессов в цепях с электроискровой нагрузкой, сопротивление которой зависит от величины и скорости изменения тока, является затруднительным, поэтому в большинстве случаев для решения такого класса задач применяют численные методы и математические модели сопротивлений нелинейных элементов [1–4].

В работе [3] синтез электрических цепей проводился при допущении, что активное электрическое сопротивление электроискровой нагрузки  $R_n$  было кусочно-линейным (при протекании разрядного тока оно было неизменным, но могло стохастически измениться во время паузы между разрядными импульсами). Такое допущение позволяло оценивать энергетические режимы в нагрузке и осуществлять регулируемую параметрическую обратную связь по напряжению при изменении сопротивления нагрузки случайным образом.

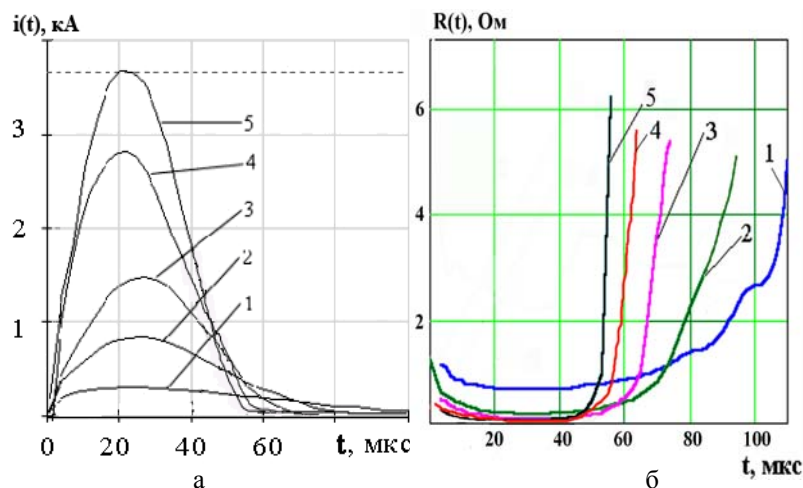
В работе [4] разработана модель сопротивления нагрузки, учитывающая его зависимость от величины и скорости изменения разрядного тока и позволяющая уточнять динамические параметры формируемых разрядных импульсов. В модели допускается, что сопротивление нелинейной нагрузки  $R_k$  в момент окончания разрядного тока длительностью  $\tau_l$  (т.е.  $R_k = R_n(t = \tau_l)$ ) возвращается к исходному значению  $R_0 = R_n(t=0)$ . В то же время мно-

гочисленные эксперименты показали (рис. 1), что это происходит не всегда [2].

**Целью данной работы** было создание математической модели сопротивления электроискровой нагрузки с учетом увеличения его значения  $R_k$  в момент окончания разрядного тока по сравнению с его значением  $R_0$  в момент начала разрядного процесса.

Проведен анализ экспериментальных зависимостей (рис. 1, б) величины сопротивления электроискровой нагрузки  $R_n$  от величины и скорости изменения разрядного тока. Результаты получены при электроискровом диспергировании моно слоя сферических гранул свинца в воде при пяти разных напряжениях заряда конденсатора [2].

Все элементы разрядного контура,



1– $U_3=400$  В; 2– $U_3=600$  В; 3– $U_3=800$  В; 4– $U_3=1000$  В; 5– $U_3=1200$  В.

**Рис. 1**

включая слой свинцовых гранул, оставались неизменными. На основании экспериментальных результатов разработана математическая модель нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки в виде аналитического выражения, удовлетворяющего свойствам анализируемых разрядных цепей с требуемой для работы точностью.

Из рис. 1, б видно, что за время протекания в электроискровой нагрузке разрядных импульсных токов амплитудой 0,3 – 3,8 кА, представленных на рис. 1, а, ее сопротивление сначала уменьшается от начального сопротивления  $R_0$  до минимального значения  $R_{min}$ , а затем возрастает до значения  $R_n(t=\tau) = R_\kappa = R_{max} > R_0$ .

Было отмечено также, что уменьшение и увеличение сопротивления нагрузки  $R_n$  во время протекания разрядного тока имеет экспоненциальный характер, а за время паузы между разрядными импульсами сопротивление  $R_n$  уменьшается.

Если длительность паузы  $\tau_n$  будет не меньше критического значения  $\tau_{кр}$  (т.е. при  $\tau_n \geq \tau_{кр}$ ), то сопротивление  $R_n(t=\tau) = R_\kappa = R_{max}$  к началу следующего разрядного импульса уменьшится до значения  $R_0$  (т.е. будет  $R_n(t=\tau + \tau_n) = R_0$ ). Если же  $\tau_n < \tau_{кр}$ , то в момент начала следующего разрядного импульса оно будет  $R_n(t=\tau + \tau_n) > R_0$ , причем чем меньше будет длительность паузы  $\tau_n$ , тем больше будет значение  $R_n(t=\tau + \tau_n)$ . По сути, описанные свойства отражают зависимость сопротивления электроискровой нагрузки от частоты и скважности разрядных импульсов.

Математическая модель электроискровой нагрузки, предложенная в работе [4], имеет вид

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

где  $R_0$  и  $R_{min}$  – начальное и минимальное сопротивление нагрузки,  $\varepsilon_1$  – положительный коэффициент, определяющий скорость уменьшения сопротивления нагрузки до  $R_{min}$  при увеличении разрядного тока до максимального значения  $I_{max}$  и  $k$  – коэффициент, реализующий более медленное нарастание сопротивления нагрузки  $R_n$  от  $R_{min}$  до  $R_\kappa = R_{max}$  по сравнению с его уменьшением от  $R_0$  до  $R_{min}$ . В модели допускалось, что  $R_0 = R_\kappa = R_{max}$ .

Введением дополнительных членов в модель (1) получено уравнение для новой модели нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки в виде

$$R(i, di/dt) = (R_0 - R_{min}) \cdot \left( 1 + \left( \frac{(I_{max} - i) \cdot (R_{max} - R_{min})}{I_{max} \cdot (R_0 - R_{min})} \right) \cdot (1 - h(di/dt)) \right) e^{-\varepsilon_2(I+k_2)i} + R_{min}, \quad (2)$$

где  $R_{max} = R_\kappa \geq R_0$  – максимальное сопротивление нагрузки, достигаемое к моменту окончания разрядного тока;  $\varepsilon_2$  и  $k_2$  – коэффициенты, аналогичные коэффициентам  $\varepsilon_1$  и  $k$  в модели (1);  $I_{max}$  – максимальное значение импульсного тока в нагрузке при колебательном разряде на нее конденсатора, равное максимальному значению разрядного тока, который протекал бы в цепи при линейном сопротивлении нагрузки, равном  $R_{min}$ .

Данная модель предусматривает, что по мере нарастания тока в разрядной цепи сопротивление нагрузки уменьшается от величины  $R_0$  до величины, близкой к  $R_{min}$ , достигаемой при увеличении тока до своего максимального значения  $I_{max}$ , а затем по мере уменьшения тока от  $I_{max}$  до нуля сопротивление нагрузки увеличивается от  $R_{min}$  до  $R_{max} = R_\kappa \geq R_0$ . Эта модель также учитывает, что скорость уменьшения сопротивления нагрузки превышает скорость ее нарастания.

Для определения значений  $k_2$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $I_{max}$  в модели (2) используются те же выражения, что и в модели (1) для вычисления аналогичных величин  $k$ ,  $\varepsilon_1$  и  $I_{max}$

$$k_2(di/dt) = (1 - e^{-\varepsilon \cdot (di/dt)}) \cdot h(di/dt), \quad h(di/dt) = \begin{cases} 1, & (di/dt) \geq 0 \\ 0, & (di/dt) < 0 \end{cases} \quad (3,4)$$

где  $\varepsilon$  – постоянный коэффициент.

Получена формула, позволяющая определить величину коэффициента  $\varepsilon_2$ , при котором нелинейное сопротивление нагрузки будет достигать величины  $R_{min}$  при максимальном токе в разрядной цепи с точностью до малой величины  $\delta$

$$\varepsilon_2 = -\ln(\delta / (R_0 - R_{min})) / I_{max}, \quad (5)$$

где  $\delta$  – сколь угодно малая величина.

Выражение для оценки максимального тока  $I_{max}$  для колебательной RLC цепи запишется как

$$I_{max} = \frac{U_0}{L\omega} \cdot e^{-\alpha \cdot t_{I_{max}}} \sin(\omega t_{I_{max}}), \quad (6)$$

где  $t_{I_{max}} = \frac{\pi - \arccos(-\alpha / \sqrt{\alpha^2 + \omega^2})}{\omega}$ ,  $\alpha = \frac{R_{min}}{2L}$ ,  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ ,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ .

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

$$R(t) = R_{max} \cdot e^{-k_3 \cdot t}, \quad (7)$$

где коэффициент  $k_3$  выбирается из выражения

$$k_3 = -\ln(R_0 / R_{max}) / t_{zar} \quad (8)$$

таким образом, чтобы сопротивление  $R_n$  за время  $t_{zar} = \tau_n \geq \tau_{кр}$  успевало уменьшиться от  $R_{max}$  до величины  $R_0$ .

Разработанная математическая модель была реализована в пакете MATLAB/SIMULINK.

Использование предложенной модели нелинейного сопротивления позволяет более точно определять характеристики разрядных импульсов (среднюю импульсную мощность, максимальный ток, скорость нарастания и убывания разрядного тока, остаточное напряжение на разряжаемом конденсаторе, а также длительности нарастания и убывания тока в нагрузке) с целью параметрического синтеза разрядных цепей полупроводниковых формирователей импульсных токов по заданным техническим требованиям, учитывающим особенности нагрузки.

Таким образом, проведенные исследования обеспечили разработку математической модели нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки с учетом его нелинейной зависимости от величины и скорости изменения тока во время протекания разрядного тока и паузы между разрядными импульсами.

Результаты моделирования в пакете MATLAB/SIMULINK достаточно точно отражают свойства реальной нелинейной электроискровой нагрузки.

1. Вовченко А.А., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно-импульсных технологий // Збірн. наук. праць Національного університету кораблебудування. – 2010. – № 4. – С. 118–124.

2. Щерба А.А., Петриченко С.В. Влияние параметров электрических разрядов на динамику искроразрядных каналов при объемной электроискровой обработке плоского слоя токопроводящих гранул // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2002. – Ч. 3. – С. 61–65.

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

4. 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.

УДК 621.3.011:621.372

#### МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНОГО ОПОРУ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ЙОГО ЗМІНЕННЯ ПРИ ПРОТІКАННІ Й ВІДСУТНОСТІ РОЗРЯДНОГО СТРУМУ В НАВАНТАЖЕННІ

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

Інститут електродинаміки НАН України,

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

e-mail: [sh1cherba@gmail.com](mailto:sh1cherba@gmail.com)

*Розроблено математичну модель нелінійного опору електроіскрового навантаження, яка враховує різні його значення на початку й кінці розрядного струму, а також змінення протягом паузи між розрядними імпульсами. Використання такої моделі дозволяє здійснювати параметричний синтез кола формувачів розрядних струмів в електроіскровому навантаженні з урахуванням впливу на величину його електричного опору таких динамічних параметрів розрядних імпульсів, як величина й швидкість змінення розрядного струму, а також частоти й скважності розрядних імпульсів. Бібл. 4, рис. 1.*

**Ключові слова:** нелінійний опір, електроіскрове навантаження, конденсатор, розрядний контур, перехідні процеси, математична модель.

#### 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

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

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

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

e-mail: [sh1cherba@gmail.com](mailto:sh1cherba@gmail.com)

*The mathematical model of nonlinear resistance of the electro-spark load, taking in account its different values in the beginning and the end of a discharge current, as well as change during a pause between discharge pulses is developed. Use of such model allows carrying out parametrical synthesis of a circuit of shapers of discharge currents in electro-spark load, taking into account an influence on its electric resistance value such dynamic parameters of discharge pulse, as value and rate of change of a discharge current, as well as frequency and on-off time ratio of discharge pulses. References 4, figure 1.*

**Keywords:** nonlinear resistance, electro-spark load, capacitor, discharge circuit, transients, mathematical model.

1. Vovchenko A.I., Tertilov R.V. Synthesis of nonlinear parametric capacitive energy sources for a discharge pulse technologies // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablobuduvannia. – 2010. – № 4. – Pp. 118–124. (Rus)

2. Shcherba A.A., Petrichenko S.V. The influence of electrical discharge parameters on spark channel dynamics during volumetric spark treatment of flat layer of current-conducting granules // Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Sylova elektronika ta enerhoeffektyvnist". – 2002. – Part 3. – Pp. 61–65. (Rus)

3. 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)

4. Shcherba A.A., Suprunovskaia N.I., Ivashchenko D.S. Modeling of nonlinear resistance of electro-spark load for synthesis of discharge circuit of capacitor by time parameters // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – № 3. – Pp. 12–18. (Rus)

Надійшла 04.02.2014