

## ОСОБЕННОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ЦЕПИ РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА НА ЭЛЕКТРОИСКРОВУЮ НАГРУЗКУ С НЕЛИНЕЙНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Н.И. Супруновская, канд.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины,

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

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

*Исследованы закономерности изменения электрического сопротивления слоя металлических гранул между электродами в диэлектрической жидкости при протекании искроразрядных импульсов тока. Для параметрического синтеза цепи разряда конденсатора применяется математическая модель нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки, учитывающая его зависимость от величины и скорости изменения разрядного тока. Использование предложенной модели дает возможность исследовать переходные процессы в разрядных цепях с электроискровой нагрузкой и получать необходимые электродинамические характеристики (скорости изменения разрядного тока, импульсные мощности в нагрузке при нарастании и убывании тока, максимальные токи, длительности разрядных импульсов). Библ. 4, рис. 2.*

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

При разряде конденсатора на электроискровую нагрузку, представляющую собой слой металлических гранул между электродами в диэлектрической жидкости, в электрической цепи нагрузки возникают импульсы тока, имеющие форму затухающей полусинусоиды (рис. 1, а) [1, 2]. Из нижней осциллограммы на рис. 1, а видно, что изменение во времени падения напряжения  $u(t)$  на такой нагрузке имеет более сложную форму.

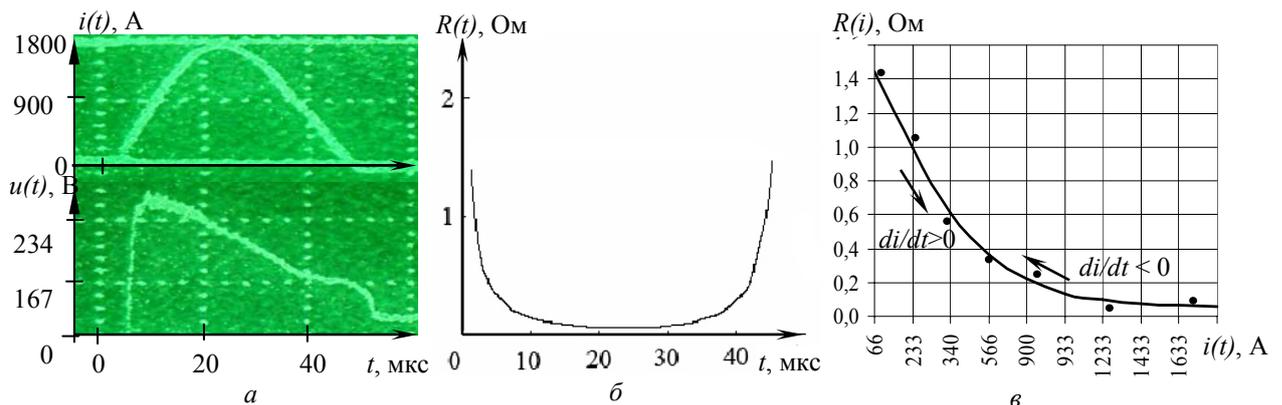


Рис. 1

В результате цифровой обработки осциллограмм (рис. 1, а) получены изменение во времени сопротивления электроискровой нагрузки  $R(t)$  (рис. 1, б) и нелинейная зависимость величины ее активного сопротивления  $R$  от величины разрядного тока  $i$  (т.е. зависимость  $R(i)$ , показанная на рис. 1, в).

Из рис. 1, б и рис. 1, в видно, что в отличие от активного сопротивления обычных электротермических нагрузок [3] сопротивление электроискровой нагрузки уменьшается при увеличении в ней разрядного тока, а при дальнейшем уменьшении тока – оно увеличивается. Многочисленные исследования показали, что эти нелинейные зависимости  $R(t)$  и  $R(i)$  имеют место при формировании электрических искрений и в незаполненной промежутке между двумя электродами, и в монослое из нескольких гранул, и в объемном слое из многих соприкасающихся металлических гранул [1, 2, 4]. При этом максимальные длительности и величины импульсных токов могут быть различными, но характер нелинейных зависимостей  $R(t)$  и  $R(i)$  сохраняется для всех электроискровых нагрузок.

Проведенные исследования показали, что при математическом моделировании указанных зависимостей  $R(t)$  и  $R(i)$  наиболее целесообразно применять экспоненциальные функции [1, 4]. Исследования также подтвердили, что максимальные размеры получаемых электроэрозионных порошков и стабильность процессов электроискрового диспергирования во многом определяются такими динамическими параметрами разрядных импульсов, как максимальная длительность импульсных токов в нагрузке, скорости их нарастания и убывания, импульсные мощности потребления в ней электроэнергии. Поэтому главной особенностью (целевой функцией)

параметрического синтеза цепей разряда конденсатора на электроискровую нагрузку в большинстве электроразрядных установок является реализация оптимальных динамических параметров разрядных токов в нагрузке [1, 2, 4].

Одним из наиболее сложных этапов при решении такой задачи является предварительный анализ переходных процессов в цепях электроразрядных установок с учетом сопротивления нагрузки, нелинейно зависящего от величины тока и скорости его нарастания [1–4]. Аналитические исследования таких процессов сопряжены с большими трудностями из-за сложности точного математического описания возникающих электрофизических процессов. Для упрощения исследований целесообразно использовать математические модели, учитывающие нелинейность электрического сопротивления нагрузки. Оценка пределов изменения сопротивления нагрузки при разработке таких моделей обычно осуществляется экспериментально и направлена на выявление закономерностей этого изменения и определения характера связи между электрическими и технологическими параметрами.

В данной работе отражены особенности параметрического синтеза цепи разряда конденсатора на электроискровую нагрузку с применением математической модели ее нелинейного сопротивления. При разработке математической модели был выполнен предварительный анализ экспериментальных зависимостей величины сопротивления нелинейной нагрузки от величины протекающего в ней тока.

В результате проведенного анализа определены следующие основные закономерности изменения активного сопротивления электроискровой нагрузки:

- при возникновении электрических искрений в слое металлических гранул ток в разрядном контуре увеличивается до максимального значения (рис. 1, *a*), а электрическое сопротивление слоя уменьшается от начального значения до минимального (рис. 1, *б*);
- при дальнейшем уменьшении тока (рис. 1, *a*) сопротивление слоя гранул увеличивается от минимального до максимального значения (рис. 1, *б*), которое обычно равно электрическому сопротивлению слоя гранул при протекании небольших токов, не вызывающих искрений между ними;
- кривая, отображающая изменение сопротивления электроискровой нагрузки во времени  $R(t)$ , во многих случаях имеет U-образную форму;
- зависимость нелинейного сопротивления от тока  $R(i)$  достаточно точно описывается экспоненциальной функцией [4].

Аналитическое выражение, реализующее описанные выше закономерности, имеет вид [4]

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

где  $R_0$  и  $R_{min}$  – соответственно начальное (оно же максимальное) и минимальное сопротивления нагрузки,  $\varepsilon_1$  – коэффициент, определяющий скорость уменьшения (увеличения) сопротивления при изменении тока  $i(t)$ ,  $k$  – коэффициент, отображающий изменение сопротивления нагрузки от скорости изменения тока  $di/dt$ .

Исследовалось применение двух вариантов зависимости коэффициента  $k$  от значений  $di/dt$ :

$$k(di/dt) = \varepsilon_2 \cdot (di/dt) \cdot h(di/dt) \quad \text{и} \quad k(di/dt) = (1 - e^{-\varepsilon_2 \cdot (di/dt)}) \cdot h(di/dt),$$

где  $\varepsilon_2$  – постоянный коэффициент, а  $h(di/dt) = \begin{cases} 1, & (di/dt) \geq 0 \\ 0, & (di/dt) < 0 \end{cases}$ .

Для определения коэффициента  $\varepsilon_1$  использовалось условие, что разрядный ток в нагрузке  $i(t)$  стремится к максимальному значению  $I_{max}$  при уменьшении сопротивления нагрузки  $R(i, di/dt)$  до значения  $R_{min}$

$$\varepsilon_1 = -\ln(\delta / (R_0 - R_{min})) / I_{max}, \quad (2)$$

где  $\delta$  – задаваемая малая величина, определяющая точность выполнения вышеприведенного условия.

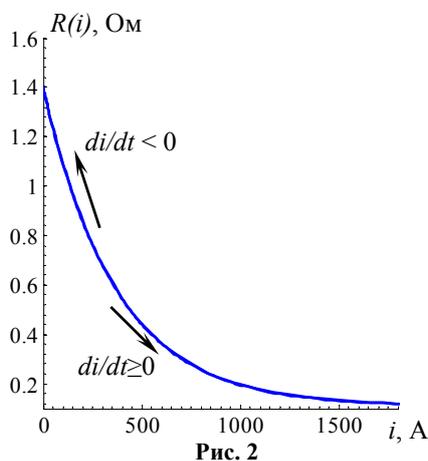


Рис. 2

Точное значение  $I_{max}$  в формуле (2) получить затруднительно, поскольку требуется решить нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка для переходных процессов в разрядном контуре с нелинейным сопротивлением  $R(i, di/dt)$ . Поэтому в работе  $I_{max}$  определялось как среднее значение не менее, чем 10 максимальных значений экспериментальных разрядных токов в электроискровой нагрузке, осциллограмма одного из которых показана на рис. 1, *a*. Математическая модель была реализована в пакете MATLAB/SIMULINK.

На рис. 2 показана зависимость нелинейного сопротивления нагрузки от тока в разрядном контуре, переходные процессы в котором исследовались с использованием математической модели сопротивления нагрузки, описываемой выражением (1). Сравнение кривых на рис. 2 и рис. 1, *б* показывает, что применение выражения (1) позволяет достаточно точно отражать свойства реальной нелинейной электроискровой нагрузки.

Таким образом, исследование переходных процессов в разряд-

ном  $CLR$  контуре, в котором нелинейное сопротивление электроискровой нагрузки представляется математической моделью (1), позволяет выполнять параметрический синтез электрических цепей электроразрядных установок для реализации необходимых динамических характеристик разрядных импульсов (в частности, максимальной длительности импульсных токов в нагрузке, скорости их нарастания и убывания, а также импульсной мощности потребления в нагрузке электроэнергии) с учетом нелинейной зависимости сопротивления нагрузки от величины и скорости изменения разрядного тока.

1. Вовченко А.И., 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., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Ушаков В.И. Компьютерное моделирование электротепловых процессов и термомеханических напряжений при индукционном нагреве движущихся медных слитков // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 2. – С. 10–18.
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. 3–11.

УДК 621.3.011:621.372

#### ОСОБЛИВОСТІ ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ КОЛА РОЗРЯДУ КОНДЕНСАТОРА НА ЕЛЕКТРОІСКРОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ З НЕЛІНІЙНИМ ОПОРОМ

**Н.І.Супруновська**, канд.техн.наук

**Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.**

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

*Досліджено закономірності зміни електричного опору шару металевих гранул між електродами в діелектричній рідині при протіканні искророзрядних імпульсів струму. Для параметричного синтезу кола розряду конденсатора застосовується математична модель нелінійного опору електроіскрового навантаження, яка враховує його залежність від величини й швидкості зміни розрядного струму. Використання запропонованої моделі дає можливість досліджувати перехідні процеси в розрядних колах з електроіскровим навантаженням й одержувати необхідні електродинамічні характеристики (швидкості зміни розрядного струму, імпульсні потужності в навантаженні при наростанні й убаванні струму, максимальні струми, тривалості розрядних імпульсів). Бібл. 4, рис. 2.*

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

#### FEATURES OF PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE CIRCUIT OF CAPACITOR DISCHARGE ON ELECTRO-SPARK LOAD WITH NONLINEAR RESISTANCE

**N.I.Suprunovska**

**Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.**

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

*Regularity of change of electric resistance of a layer of metal granules between electrodes in a dielectric liquid at flow of current pulses is investigated. The mathematical model of nonlinear resistance of the electro-spark load, taking into consideration a dependence this resistance on magnitude and speed of change of a discharge current is applied for parametric synthesis of a circuit of capacitor discharge. Use of the offered model allows to investigate transients in discharge circuits with electro-spark load and to obtain necessary electro-dynamic characteristics (speeds of change of a discharge current, pulse powers in load at a build-up of current and current decrease, the maximal currents, duration of a discharge pulses). References 4, figures 2.*

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

1. Vovchenko A.I., Tertilov R.V. Synthesis of nonlinear parametric capacitive energy sources for a discharge pulse technologies // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnogo Universitetu Korablebuduvannya. – 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 enerhoefektyvnist". – 2002. – Vol. 3. – Pp. 61–65. (Rus)
3. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheriavai I.M., Ushakov V.I. Computer modeling of electrothermal processes and thermomechanical stress at induction heating of moving copper ingots // Tekhnichna elektrodynamika. – 2013. – № 2. – Pp. 10–18. (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