

УДК 621.3.011:621.372

Супруновська Наталія Ігорівна, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, Україна, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна, +380677895043, iednat1@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЕЛЕКТРОРАЗРЯДНИХ УСТАНОВОК ІЗ НЕЛІНІЙНИМ ЕЛЕКТРОІСКРОВИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Досліджено циклічні перехідні процеси в зарядно-розрядних колах конденсаторів напівпровідникових генераторів розрядних імпульсів із застосуванням математичної моделі опору нелінійного електроіскрового навантаження, який залежить від величини розрядного струму, швидкості його змінення й тривалості часової паузи між розрядними імпульсами. Проведено аналіз шляхів підвищення динамічних характеристик імпульсних струмів у електроіскровому навантаженні, які виникають при регулюванні режимів розряду накопичувальних конденсаторів генераторів розрядних імпульсів.

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

Супруновская Наталия Игоревна, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, Киев, Украина, пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина, +380677895043, iednat1@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТАНОВОК С НЕЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ НАГРУЗКОЙ

Исследованы циклические переходные процессы в зарядно-разрядных цепях конденсаторов полупроводниковых генераторов разрядных импульсов с применением математической модели сопротивления нелинейной электроискровой нагрузки, зависящего от величины разрядного тока, скорости его изменения и длительности временной паузы между разрядными импульсами. Проведен анализ путей повышения динамических характеристик импульсных токов в электроискровой нагрузке, возникающих при регулировании режимов разряда накопительных конденсаторов генераторов разрядных импульсов.

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

Suprunovska Nataliia Igorivna, PhD, Senior Scientist, Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, prospect Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine, +380677895043, iednat1@gmail.com

MODELING AND TRANSIENT ANALYSIS IN ELECTRIC CIRCUITS OF SEMI-CONDUCTOR ELECTRO-DISCHARGE INSTALLATIONS WITH NONLINEAR ELECTRO-SPARK LOAD

The cyclic transients in charge-discharge circuits of capacitor of semiconductor generators of discharge pulses (GDP) using of mathematical model of resistance of the nonlinear electro-spark load, depending on discharge current, rate of its change and duration of the pause time between discharge pulses are studied. The considered model also takes into account that the load resistance can have different values at the beginning and end of the capacitor discharge and changes during the pause between the discharge pulses. The analysis of ways to improve the dynamic characteristics of pulse currents in the electro-spark load, arising during control of discharge condition of GDP's reservoir capacitors is carried out. The comparative analysis of time-varying characteristics of capacitor discharge circuit (electric resistance of electro-spark load, the voltage drop on it, the rate of rise of discharge currents and power consumed in the load) at modeling of electro-spark load by linear and nonlinear electric resistance is carried out.

Key words: discharge, the capacitor, pulse, electro-spark load, transients, mathematical model, nonlinear resistance.

Введение

Реализация новых электроимпульсных технологий основывается на применении генераторов разрядных импульсов (ГРИ) с емкостными накопителями энергии (конденсаторами), которые позволяют получать в технологической нагрузке большие импульсные токи и мощности [1–8]. В электроразрядных установках получения искроэрозионных частиц в качестве технологической нагрузки применяют слой металлических гранул между электродами, погруженными в диэлектрическую жидкость [1–8].

На рис. 1 приведена упрощенная электрическая схема такого ГРИ с тиристорными коммутаторами $VT1$ и $VT2$ в цепях заряда и разряда конденсатора емкостью C .

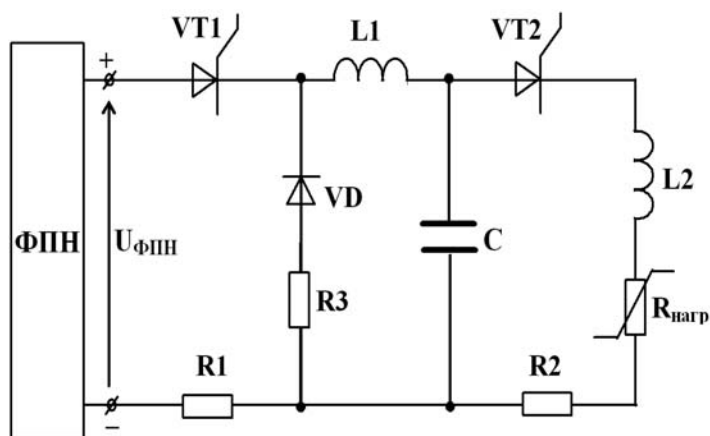


Рис. 1. Электрическая схема тиристорного ГРИ с емкостным накопителем энергии

Схема на рис. 1 работает следующим образом. После включения коммутатора $VT1$ начинается заряд конденсатора емкостью C от полупроводникового формирователя постоянного напряжения (ФПН) через дроссель индуктивностью $L1$ и активное сопротивление $R1$ зарядной цепи конденсатора. Величины C , $L1$ и $R1$ желательно выбирать такими, чтобы выполнялось условие $\sqrt{L1/C}/R1 = Q1 > 20$ (где $Q1$ – добротность зарядной цепи конденсатора). В таком случае будет возникать процесс колебательного

энергоэффективного заряда конденсатора C . Если в момент начала заряда напряжение на конденсаторе будет $u_c(t=0) = 0$, тогда при $Q1 > 20$ конденсатор зарядится до напряжения $U1 > 1,8 U_{ФПН}$ (где $U_{ФПН}$ – напряжение на выходе ФПН), а потери электроэнергии на сопротивлении $R1$ составят менее 4 % от энергии, потребленной от ФПН [6].

После окончания заряда конденсатора следует выдержать временную паузу $\tau1 \geq (30-50)$ мкс для восстановления запирающих свойств тиристора $VT1$. После выключения тиристорного коммутатора $VT1$ включают коммутатор $VT2$ для разряда конденсатора C через элементы разрядной цепи $L2$ и $R2$ на электроискровую нагрузку, представленную на рис. 1 сопротивлением $R_{нагр}$. Величины C , $L2$, $R2$ и $R_{нагр}$ целесообразно выбирать такими, чтобы конденсатор перезаряжался до напряжения, составляющего (10–20) % от напряжения его заряда $U1 \approx 1,8 U_{ФПН}$. Такой режим разряда позволяет передавать в сопротивление $R_{нагр}$ более 95 % энергии конденсатора и быстро (в течение 20–30 мкс) выключать тиристорный коммутатор $VT2$ после завершения разряда конденсатора [2, 4–7].

Электрическая цепь $VD - R3$ на рис. 1 предназначена для уменьшения величины отрицательного напряжения на конденсаторе за время паузы до начала следующего заряда конденсатора. Уменьшение отрицательного напряжения на конденсаторе уменьшает напряжение его заряда, а затем и перезаряда в следующем цикле. Таким образом, изменением величины резистора $R3$ и длительности паузы $\tau2$ между окончанием разряда конденсатора и началом его следующего заряда в схеме на рис. 1 можно регулировать обратную связь по напряжению и осуществлять стабилизацию режимов электрических искрений в нагрузке.

Применение аналитических методов для исследования переходных процессов в цепях с электроискровой нагрузкой, электрическое сопротивление которой зависит от величины и скорости изменения тока, является затруднительным, поэтому в большинстве случаев для решения задач такого класса применяют численные методы и математические модели нелинейных электрических сопротивлений [6, 7, 9, 10].

Особенности и закономерности изменения электрического сопротивления электроискровой нагрузки

Исследования показали, что электрическое сопротивление $R_{нагр}$ всех типов электроискровых нагрузок является нелинейным. Его величина зависит от величины разрядного тока и скорости его изменения, длительности и частоты разрядных импульсов, физико-химических свойств гранул и жидкости, размеров гранул и слоя, конструктивных и технологических параметров электроразрядной камеры [2–4, 6–8]. Нелинейная зависимость сопротивления электроискровой нагрузки от многих параметров затрудняет применение

точных аналитических методов для анализа переходных процессов в разрядной цепи ГРИ, поэтому обычно применяют различные способы линеаризации такого сопротивления. В большинстве работ допускается, что электроискровая нагрузка имеет кусочно-линейное сопротивление, величина которого $R_{\text{лин.нагр}} = \text{const}$ в течение каждого разряда, но может стохастически измениться во время паузы между разрядами [11].

Величину $R_{\text{лин.нагр}}$ обычно определяют по формуле [2, 6]:

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

где $i(t)$ – ток в цепи электроискровой нагрузки при разряде конденсатора;

$R_{\text{нагр}}(t)$ – ее электрическое сопротивление при протекании разрядного импульсного тока длительностью τ .

Расчет линейного сопротивления, на котором выделяется такая же электрическая энергия, как и при разряде конденсатора на электроискровую нагрузку, позволяет реализовать синтез цепей ГРИ для достижения необходимых энергетических характеристик ГРИ с ошибкой менее 10% [8]. Применение модели (1) позволяет также разработать метод разностных уравнений для анализа переходных процессов в цепях электроразрядных установок при стохастическом изменении сопротивления электроискровой нагрузки [11]. Но, для реализации современных электроискровых технологий важно исследовать динамические свойства нагрузки и влияние на них электрических параметров разрядных импульсов, чему и посвящена данная статья.

При исследовании динамических характеристик (электрического сопротивления нагрузки, падения напряжения, скорости нарастания и убывания разрядного тока, потребляемой в нагрузке электрической мощности и т.п.) установок объемного электроискрового диспергирования (ОЭИД) слоя токопроводящих гранул в диэлектрической жидкости необходимо учитывать нелинейный характер сопротивления электроискровой нагрузки. Его обычно оценивают на основании многих экспериментов и уточняют на математических моделях.

В работах [2–6, 9–11] отмечено, что при колебательном разряде конденсатора на электроискровую нагрузку изменение во времени электрического тока $i(t)$ можно представить в виде затухающей полусинусоиды, а сопротивление $R_{\text{нагр}}(t)$ – U-образной кривой. Экспериментальные зависимости $i(t)$ и $R_{\text{нагр}}(t)$, полученные при диспергировании слоя гранул свинца в воде, показаны на рис. 2а. Их оцифровка позволила определить зависимость $R_{\text{нагр}}(i)$, представленную на рис. 2б.

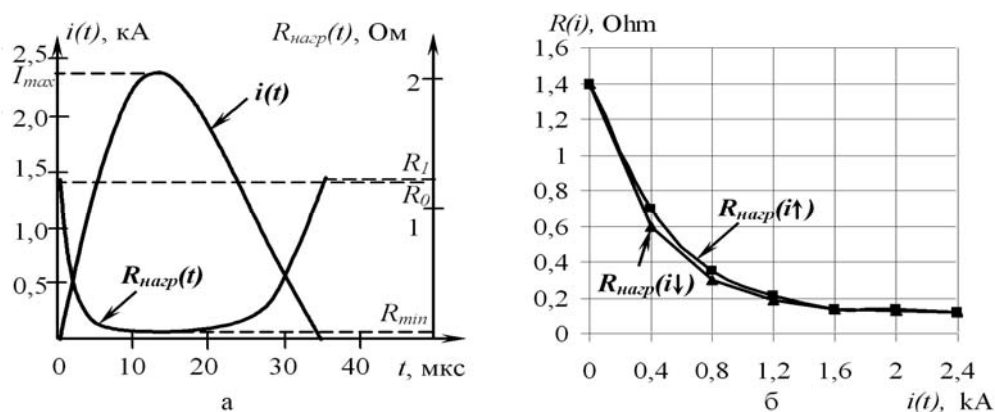


Рис. 2. Изменение электрических параметров электроискровой нагрузки при диспергировании слоя гранул свинца в воде: а – разрядного тока $i(t)$ и сопротивления $R_{\text{нагр}}(t)$, б – нелинейная зависимость $R_{\text{нагр}}(i)$

Из рис. 2а видно, что с увеличением разрядного тока от нуля до максимального значения I_{max} величина сопротивления $R_{\text{нагр}}$ экспоненциально уменьшается от начального значения R_0 до минимального R_{min} , а затем при уменьшении тока от I_{max} до нуля сопротивление $R_{\text{нагр}}$ более медленно увеличивается от нуля до конечного значения $R_l \approx R_0$.

Это можно объяснить тем, что с увеличением тока в слое гранул увеличивается количество и сечение искроплазменных каналов. Это вызывает уменьшение общего электрического сопротивления слоя, а при уменьшении тока происходит обратный процесс.

Анализ кривых на рис. 2б показывает, что сопротивление электроискровой нагрузки $R_{нагр}$ за время длительности одного разряда конденсатора нелинейно зависит от величины протекающего в ней тока i , причем зависимость $R(i)$ является убывающей экспонентой.

Анализ зависимостей на рис. 2 и экспериментальных данных работ [2–6, 10] показывает, что при анализе переходных процессов разряда конденсатора на электроискровую нагрузку, необходимо учитывать следующие закономерности:

- зависимость сопротивления электроискровой нагрузки от тока является убывающей экспоненциальной функцией;

- с увеличением тока в нагрузке от нуля до максимального значения величина ее сопротивления экспоненциально уменьшается от начального значения R_0 до минимального значения $R_{min} < R_0$;

- при уменьшении тока от максимального значения до нуля сопротивление нагрузки экспоненциально увеличивается (но более медленно, чем уменьшалось) от значения R_{min} до конечного значения $R_1 > R_{min}$;

- если в цепи нагрузки есть полупроводниковый коммутатор (как на рис. 1) и разряд конденсатора происходит с перезарядом, то изменение тока $i(t)$ в нагрузке можно представить затухающей полусинусоидой, но в начале и в конце разряда изменение тока может иметь не колебательный, а аperiodический характер;

- учитывая нелинейную зависимость сопротивления электроискровой нагрузки от тока переходные процессы в цепях ГРИ целесообразно исследовать с применением численных методов моделирования и программ Matlab/Simulink.

- во многих моделях электроискровой нагрузки допустимо принимать, что значения $R_1 \approx R_0$, а функция $R_{нагр}(t)$ имеет U-образную форму.

С учетом таких закономерностей была создана математическая модель нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки, зависящего от тока i и скорости его изменения di/dt [6].

Такую модель можно представить в виде функции:

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

где R_0 и R_{min} – соответственно начальное (оно же конечное) и минимальное сопротивления нагрузки;

ε_1 – коэффициент, определяющий скорость уменьшения (увеличения) сопротивления при изменении тока $i(t)$,

k_1 – коэффициент, отображающий зависимость изменения сопротивления нагрузки от скорости изменения тока di/dt .

В модели допускается, что сопротивление нелинейной нагрузки R_1 в момент окончания разрядного тока длительностью τ возвращается к исходному значению R_0 . В то же время многочисленные эксперименты показали (см. рис. 3), что это происходит не всегда [9]. Из рис. 3б видно, что за время протекания в электроискровой нагрузке разрядных импульсных токов амплитудой 0,3 – 3,8 кА, представленных на рис. 3а, ее сопротивление сначала уменьшается от начального сопротивления R_0 до минимального значения R_{min} , а затем возрастает до значения $R_1 = R_{max} > R_0$.

Такие результаты были получены при электроискровом диспергировании монослоя сферических гранул свинца в воде при пяти разных напряжениях заряда конденсатора (1–400 В; 2–600 В; 3–800 В; 4–1000 В; 5–1200 В). Исследования подтвердили возможное увеличение сопротивления слоя гранул при их низкой подвижности и высокой скорости вынесения искроэрозионных порошков из зон искрений. В таком случае за время искроразрядного импульса гранулы не успевают восстановить электрические контакты,

разорванные при электроискровой эрозии. Поэтому сопротивление R_I слоя гранул к окончанию разрядного тока может быть больше сопротивления R_0 при его начале.

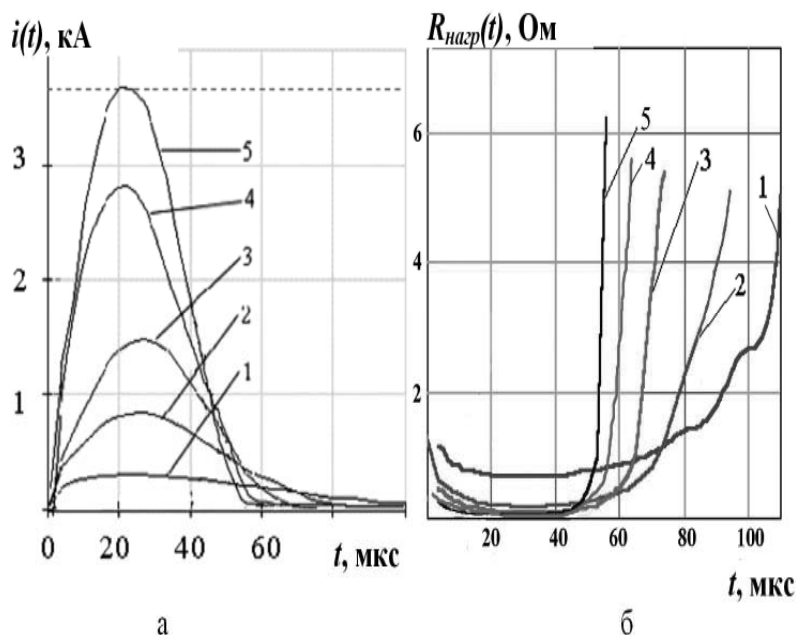


Рис. 3. Экспериментальные зависимости, полученные при электроискровом диспергировании монослоя сферических гранул свинца в воде при разных напряжениях заряда конденсатора (1–400 В; 2 – 600 В; 3 –800 В; 4 – 1000 В; 5 – 1200 В): а – токи в слое, б – сопротивление слоя

максимальной частотой их следования $f_{кр}$. При частоте разрядных токов $f > f_{кр}$, сопротивление слоя гранул в начале следующего разряда не успевает снижаться до значения R_0 и будет больше, чем в начале предыдущего.

Для анализа таких переходных процессов в цепях электроискровых нагрузок необходимо разработать математическую модель, учитывающую различие начального и конечного значения сопротивления нагрузки и его изменение во время паузы между разрядами.

Введением новых членов в модель (2), предложенную в [6], получено уравнение для сопротивления нагрузки в виде:

$$R(i, di/dt) = (R_0 - R_{min}) \cdot \left(1 + \left(\frac{(I_{max} - i) \cdot (R_{max} - R_0)}{I_{max} \cdot (R_0 - R_{min})} \right) \cdot (1 - h(di/dt)) \right) e^{-\epsilon_2(1+k_2)i} + R_{min}, \quad (3)$$

где $R_{max} = R_I \geq R_0$ – максимальное сопротивление нагрузки, достигаемое к моменту окончания разрядного тока;

ϵ_2 – положительный коэффициент, 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, 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 максимальное значение колебательного разряда конденсатора на нагрузку с линейным сопротивлением равным R_{min} .

Модель (3) предусматривает, что при нарастании тока сопротивление нагрузки уменьшается R_0 до R_{min} , достигаемого при достижении током значения I_{max} , а затем при

В работах [2, 4] отмечено, что в электроискровых установках возможно такое большое увеличение частоты разрядных импульсов (и уменьшение длительности паузы между окончанием разрядного тока в нагрузке и началом следующего), при котором начальное сопротивление нагрузки от импульса к импульсу может увеличиваться.

Если длительность паузы $\tau_{паузы}$ между окончанием разрядного тока и началом следующего больше некоторого критического значения $\tau_{кр}$, то значение R_I успевает уменьшиться до значения R_0 к началу следующего разрядного тока. При длительности разрядных токов $\tau \approx const$ значение $\tau_{кр}$ задается допустимой

уменьшении тока от I_{max} до нуля, сопротивление нагрузки увеличивается от R_{min} до $R_{max} = R_l \geq R_0$. Модель также учитывает, что скорость уменьшения сопротивления нагрузки превышает скорость ее нарастания и что $\tau_{паузы} > \tau_{кр}$.

Для определения значений k_2 , ε_2 , I_{max} в модели (3) используются те же выражения, что и в модели (2) для вычисления аналогичных величин k_1 , ε_1 и I_{max} :

$$k_2(di/dt) = (1 - e^{-\varepsilon \cdot (di/dt)}) \cdot h(di/dt), \quad (4)$$

где ε – постоянный коэффициент, а параметр $h(di/dt)$ изменяется по следующему закону:

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

Формула, позволяющая определить величину коэффициента ε_2 , при котором нелинейное сопротивление нагрузки будет достигать величины R_{min} при максимальном токе в разрядной цепи с точностью до малой величины δ :

$$\varepsilon_2 = -\ln(\delta / (R_0 - R_{min})) / I_{max}, \quad (6)$$

где δ – сколь угодно малая величина.

Выражение для оценки максимального тока I_{max} при колебательном разряде конденсатора в схеме, представленной на рис. 1, и условии, что в этот момент сопротивление нагрузки не изменяется (т.е. оно является линейным и равным R_{min}), запишется как

$$I_{max} = U_0 e^{-\alpha \cdot t_{I_{max}}} \sin(\omega t_{I_{max}}) / L_2 \omega, \quad (7)$$

где $t_{I_{max}} = (\pi - \arccos(-\alpha / \sqrt{\alpha^2 + \omega^2})) / \omega$, $\alpha = (R_{min} + R_2) / 2L_2$, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$, $\omega_0 = \sqrt{1/L_2 C}$.

В течение паузы между разрядными импульсами длительностью $\tau_{паузы}$ (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 выбирается из выражения

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

Использование модели (3) позволяет анализировать переходные процессы в цепи нагрузки с учетом возможных условий $R_l > R_0$ и $\tau_{паузы} > \tau_{кр}$ и 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.

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 $R_{нагр}(i, di/dt)$ определялась выражением (3). Предварительно были заданы различные значения R_0 , R_{min} и R_{max} , а затем (с помощью функциональных блоков) рассчитывались значения максимума тока в цепи I_{max} и коэффициента ε_2 соответственно выражениям (7) и (6).

При математическом моделировании параметры разрядной цепи выбирались следующими: $U_{ФПН} = 250$ В, $C = 10^{-4}$ Ф, $L_1 = 200 \cdot 10^{-6}$ Гн, $L_2 = 3 \cdot 10^{-6}$ Гн, $R_l = 0,1$ Ом, $R_2 = 0,01$ Ом, $R_3 = 0,2$ Ом, $R_0 = 1$ Ом, $R_{min} = 0,1$ Ом, $R_{max} = 2$ Ом. Частота разрядных токов $f = 1250$ Гц, а период следования разрядных импульсов $8 \cdot 10^{-4}$ с.

На рис. 4 показаны результаты моделирования переходных процессов (трех циклов заряда конденсатора ГРИ с последующим его разрядом на электроискровую нагрузку) в схеме, представленной на рис. 1, с использованием математической модели (3) нелинейного

сопротивления нагрузки. Зависимости сопротивления нагрузки $R_{нагр}(t)$, тока в разрядной цепи $i(t)$, энергии, выделенной на нагрузке $W_{нагр}(t)$ и сопротивления нагрузки от протекающего в ней тока $R_{нагр}(i)$ представлены соответственно на рис. 4 а, б, в, г.

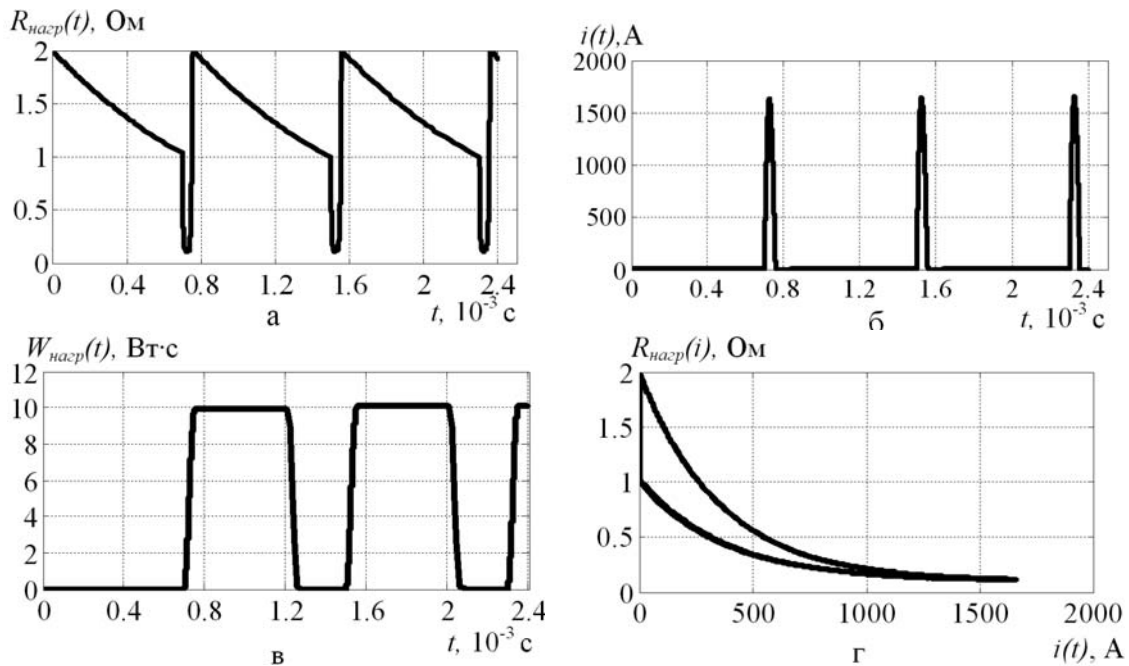


Рис. 4. Результаты моделирования переходных процессов трех циклов заряда конденсатора ГРИ с последующим его разрядом на электроискровую нагрузку с использованием модели ее нелинейного сопротивления (3), где: а – $R_{нагр}(t)$, б – $i(t)$, в – энергия в нагрузке $W_{нагр}(t)$, г – $R_{нагр}(i)$

В рассмотренном режиме длительность паузы между окончанием разрядного тока и началом следующего достаточна, для того, чтобы значение сопротивления нагрузки успевало уменьшиться от R_{max} 2 Ом до R_0 1 Ом к началу следующего разрядного тока.

Модель также позволяет исследовать режимы, когда частота следования разрядных импульсов настолько велика, что значение сопротивления нагрузки в паузе между ними не успевает снизиться до величины R_0 (т.е. когда $\tau_{паузы} < \tau_{кр}$). На рис. 5 а, б показаны осциллограммы тока и сопротивления нагрузки для такого режима работы. Из рис. 5 а видно, что сопротивление нагрузки к окончанию заряда конденсатора уменьшается до 1,5 Ом, не успевая снизиться до величины $R_0 = 1$ Ом.

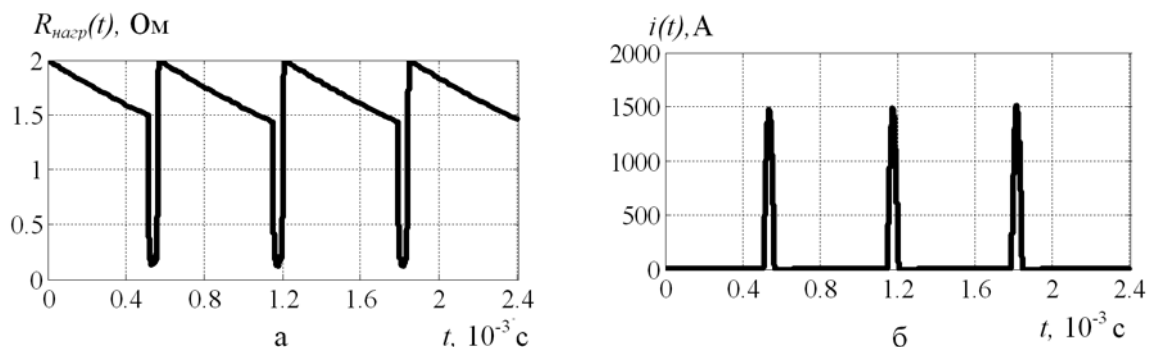


Рис.5. Осциллограммы тока и сопротивления нагрузки для режима $R_0 = 1$ Ом, $R_{min} = 0,1$ Ом, $R_{max} = 2$ Ом, когда $\tau_{паузы} < \tau_{кр}$

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

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 линейным сопротивлениями нагрузки исследовались переходные процессы с использованием математической модели (3) для случаев $R_{max} > R_0$ и $R_{max} = R_0$, а также в схемах с соответствующими им эквивалентными линейными сопротивлениями нагрузки $R_{лин.нагр}$, определяемым по формуле (1).

В табл. 1 представлены результаты анализа этих переходных процессов, где R_0 , R_{min} и R_{max} – сопротивления, характеризующие нелинейную нагрузку; $R_{лин.нагр}$ – эквивалентное линейное сопротивление нагрузки; I_{max} – максимальный ток; Δt_{max} – длительность нарастания тока от 0 до I_{max} ; $I_{max}/\Delta t_{max}$ – средняя скорость нарастания тока от 0 до I_{max} ; $\Delta t_{max/2}$ – длительность нарастания тока от 0 до $I_{max}/2$; $I_{max}/2\Delta t_{max/2}$ – средняя скорость нарастания тока от 0 до $I_{max}/2$; $\tau_{РИ}$ – длительность разрядного импульса; W_n – энергия в нагрузке за время $\tau_{РИ}$; P_{cp} – средняя импульсная мощность за время $\tau_{РИ}$; $U_{ост}$ – остаточное напряжение на конденсаторе после его разряда на нагрузку; $k_{исп.с}$ – коэффициент использования энергии конденсатора (под которым понимается отношение энергии, отобранной от конденсатора к энергии первоначально в нем накопленной), определяемый по формуле $k_{исп.с} = 1 - U_{ост}^2 / U_{0с}^2$.

Таблица 1

Результаты анализа переходных процессов

Режим	Сопротивление нагрузки, Ом	I_{max} , А	Δt_{max} , 10^{-6} с	$I_{max}/\Delta t_{max}$, 10^6 А/с	$\Delta t_{max/2}$, 10^{-6} с	$I_{max}/2\Delta t_{max/2}$, 10^6 А/с	$\tau_{РИ}$, 10^{-5} с	W_n , Вт	$P_{cp} = W_n / \tau_{РИ}$, 10^6 Вт	$U_{0с}$, В	$U_{ост}$, В	$k_{исп.с}$, %
1 нел.	$R_0=1,0$; $R_{min}=0,1$; $R_{max}=2,0$	1661	24,8	67,0	8,0	104	57,6	10	0,18	477	-73	97,7
1 лин.	$R_{лин.нагр} = 0,131$	1648	22,0	74,9	6,1	135	65,2	10	0,15	477	-73	97,7
2 нел.	$R_0 = R_{max}=1,0$; $R_{min}=0,1$	1656	25,5	65,1	8,0	104	57,5	10	0,18	477	-73	97,7
2 лин.	$R_{лин.нагр} = 0,135$	1629	20,9	77,9	6,0	135	65,5	10	0,15	477	-70	97,8

Из табл. 1 видно, что в режимах с нелинейными сопротивлениями нагрузки

- максимальные разрядные токи выше на 0,8–1,6 %;
- длительности нарастания токов от нуля до максимума больше на 12,7–22,0 %;
- длительности всего разрядного импульса меньше на 11,7–12,2 %;
- средние скорости нарастания тока от нуля до значения I_{max} меньше на 10,5–16,4 %;
- средние скорости нарастания тока от нуля до значения $I_{max}/2$ меньше на 30 %;
- средние импульсные мощности больше 20 %.

При этом энергия, выделенная на нагрузке и коэффициент использования энергии конденсатора, не изменяются.

Были определены энергетические и динамические характеристики импульсных токов в электроискровой нагрузке при регулируемом разряде накопительного конденсатора ГРИ (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, выделившейся в нагрузке, средней импульсной мощности и средней скорости нарастания тока в нагрузке за временные интервалы, за которые ток в нагрузке достигает значений I_{max} , $I_{max}/2$, $I_{max}/3$ и $I_{max}/4$ для режимов с нелинейными и эквивалентными им линейными сопротивлениями нагрузки.

Полученные временные зависимости при моделировании электроискровой нагрузки нелинейными сопротивлениями более точно отражают средние статистические их значения, получаемые на экспериментальных установках объемного электроэрозионного диспергирования слоя токопроводящих гранул в диэлектрической жидкости.

Таблица 2

Режим	1 нел.	1 лин.	2 нел.	2 лин.
Сопротивление нагрузки, Ом	$R_0=1,0; R_{min}=0,1; R_{max}=2,0$	$R_{лин.нагр} = 0,131$	$R_0 = R_{max}=1,0; R_{min}=0,1$	$R_{лин.нагр} = 0,135$
$\Delta t_{max}, \cdot 10^{-6}$ с	24,78	22,00	25,45	20,89
$\Delta t_{max/2}, \cdot 10^{-6}$ с	8,01	6,10	7,98	6,04
$\Delta t_{max/3}, \cdot 10^{-6}$ с	4,97	3,81	4,95	3,75
$\Delta t_{max/4}, \cdot 10^{-6}$ с	3,54	2,78	3,53	2,58
$W_{н max},$ Вт	4,65	4,32	4,9	3,98
$W_{н max/2},$ Вт	0,60	0,20	0,57	0,20
$W_{н max/3},$ Вт	0,23	0,06	0,22	0,06
$W_{н max/4},$ Вт	0,12	0,02	0,12	0,03
$P_{ср max}, 10^6$ Вт	0,188	0,196	0,193	0,191
$P_{ср max/2}, 10^6$ Вт	0,075	0,033	0,071	0,033
$P_{ср max/3}, 10^6$ Вт	0,046	0,014	0,045	0,015
$P_{ср max/4}, 10^6$ Вт	0,034	0,009	0,034	0,009
$I_{max}/\Delta t_{max}, 10^6$ А/с	67	75	65	78
$I_{max}/2\Delta t_{max/2}, 10^6$ А/с	104	135	104	135
$I_{max}/3\Delta t_{max/3}, 10^6$ А/с	111	144	112	145
$I_{max}/4\Delta t_{max/4}, 10^6$ А/с	117	148	117	158

На рис. 6 показаны зависимости скорости нарастания импульсного тока в нагрузке (рис. 6 а) и изменение средней импульсной мощности в нагрузке (рис. 6 б) с изменением в ней импульсного тока (приведенного к его максимальному значению I/I_{max}) при моделировании сопротивления нагрузки нелинейной (зависимой от величины тока) функцией и эквивалентной ей линейной функцией.

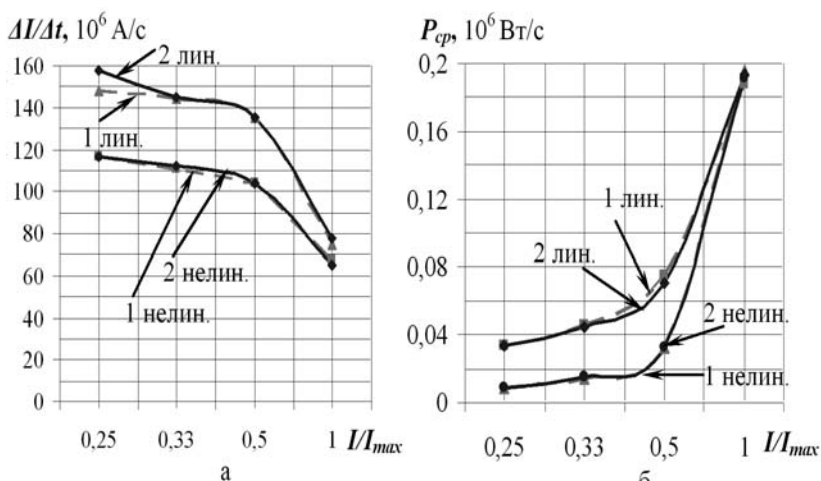


Рис. 6. Динамические и энергетические характеристики электроискровой нагрузки: а – зависимости скорости нарастания импульсного тока, б – изменение средней импульсной мощности в нагрузке с изменением в ней импульсного тока

Исследования показывают, что уменьшение длительности импульсных токов в электроискровой нагрузке и увеличение скорости их нарастания уменьшает размеры получаемых электро-эрозионных порошков и повышает энергоэффективность электро-импульсных установок, реализующих такие технологии [2, 4, 11–14]. Согласно табл. 2 и рис. 6 а регулирование времени разряда конденсатора на электроискровую 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. Так при расчете процессов разряда конденсатора на нагрузку, сопротивление которой представлялось линеаризованной моделью (1), средняя скорость нарастания тока в нагрузке повышалась на 73 – 102 %. При представлении

сопротивления нагрузки более точной моделью (3), учитывающей его нелинейную зависимость от величины тока в нагрузке, средняя скорость нарастания в ней тока повышалась на 55 – 80 %. Но при таком регулировании снижается средняя импульсная мощность в нагрузке по сравнению с величиной, которую можно было бы получить при данных параметрах разрядной цепи без использования регулирования. Другими словами применение регулирования времени разряда конденсатора на электроискровую нагрузку снизит коэффициент использования энергии конденсатора, но это приемлемый недостаток для технологического процесса, целью которого является получение высоко дисперсных микро- и нано-размерных электроэрозионных порошков.

Выводы

1. Разработана математическая модель электрического сопротивления электроискровой нагрузки, которая отражает нелинейный характер его изменения при объемном электроискровом диспергировании слоя токопроводящих гранул в диэлектрической жидкости. Данная модель учитывает зависимость сопротивления электроискровой нагрузки от величины разрядного тока, скорости его изменения и длительности временной паузы между разрядными импульсами. Модель также учитывает, что сопротивление нагрузки может иметь различные значения в начале и конце процесса разряда конденсатора и изменяется в течение паузы между разрядными импульсами.

2. С использованием разработанной модели нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки исследованы циклические переходные процессы в зарядно-разрядных цепях полупроводникового генератора разрядных импульсов в установке объемного электроискрового диспергирования металлических гранул в диэлектрической жидкости. Такую модель целесообразно использовать при параметрическом синтезе элементов колебательной цепи разряда накопительного конденсатора на электроискровую нагрузку.

3. Выполнено сравнение результатов исследования переходных процессов в разрядных цепях с нелинейными и энергетически эквивалентными им линейными сопротивлениями электроискровой нагрузки. Установлено, что различие динамических характеристик разрядной цепи конденсатора (скоростей нарастания разрядных токов) при моделировании электроискровой нагрузки нелинейными и эквивалентными им линейными электрическими сопротивлениями достигает 30 %.

Полученные временные зависимости при моделировании электроискровой нагрузки нелинейными сопротивлениями более точно отражают средние статистические их значения, получаемые на экспериментальных установках объемного электроэрозионного диспергирования слоя токопроводящих гранул в диэлектрической жидкости.

Список использованной литературы

1. A. E. Berkowitz, M. F. Hansen, F. T. Parker, K. S. Vecchio, F. E. Spada, E. J. Lavernia, R. Rodriguez Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion // *J. of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2003. – January, V. 254–255. – P. 1–6.
2. Асанов У. А., Цой А. Д., Щерба А. А., Казекин В. И. Электроэрозионная технология соединений и порошков металлов. Фрунзе: Илим, 1990, 256 с.
3. Berkowitz A. E., Walter J. L. Sparc Erosion: A Method for Producing Rapidly Quenched Fine powders // *J. of Mater. Res.* – 1987. – March/April, 2 (2). – P. 277–288.
4. Шидловский А. К., Щерба А. А., Супруновская Н. И. Энергетические процессы в цепях заряда и разряда конденсаторов электроимпульсных установок // К.: Интерконтиненталь-Украина, 2009. – 208 с.
5. Nguyen P. K., Lee K. H., Moon J., Kim K. A., Ahn K. A., Chen L. H., Lee S. M., Chen R. K., Jin S. and Berkowitz A. E., "Spark erosion: a high production rate method for producing Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te₃ nanoparticles with enhanced thermoelectric performance", *Nanotechnology*, 23 (2012), P.1-7.
6. Щерба А. А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки для синтеза цепи разряда конденсатора по временным характеристикам // *Техн. электродинамика*. – 2014. – № 3. – С. 12–18.
7. 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.

8. 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. электродинамика. – 2013. – № 3. – С. 3–12.
9. Щерба А.А., Петриченко С.В. Влияние параметров электрических разрядов на динамику искроразрядных каналов при объемной электроискровой обработке плоского слоя токопроводящих гранул // Техн. электродинамика. Тем. вып. "Силовая электроника и энергоэффективность". – 2002. – Ч. 3. – С. 61–65.
10. Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I. Study Features Of Transients In The Circuits Of Semiconductor Discharge Pulses Generators With Nonlinear Electro-Spark Load / Proceedings IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2014), June 2-6, 2014, Kyiv, Ukraine, PP. 50–54.
11. 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.
12. Sen B., Kiyawat N., Singh P.K., Mitra S., Ye J.H., Purkait P. Developments in electric power supply configurations for electrical-discharge-machining (EDM) // The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems. – 2003, PEDS 2003. – Vol. 1. – P. 659–664.
13. J. Carrey, H.B. Radousky, A.E. Berkowitz Spark-eroded particles: Influence of processing parameters // Journal of Applied Physics. – 1 February 2004. – V. 95. – № 3. – P. 823–829.
14. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений // Техн. электродинамика. – 2012. – № 5. – С. 3–9.

References

1. Berkowitz, A. E., Hansen, M. F., Parker, F. T., Vecchio, K. S., Spada, F. E., Lavernia, E. J., Rodriguez, R. (2003), "Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion", *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, V. 254–255, P. 1–6.
2. Asanov, U. A., Tsoi, A. D., Shcherba, A. A., Kazekin, V. I. (1990), *Electroerosive technology of compounds and metal powders*. [Elektroerozionnaya tehnologiya soedineniy i poroshkov metallov], Ilim, Frunze, 256 p.
3. Berkowitz, A. E., Walter, J. L. (1987), "Spark Erosion: A Method for Producing Rapidly Quenched Fine powders", *J. of Materials Research*, No. 2 (2), P. 277–288.
4. Shidlovskiy, A. K., Shcherba, A. A., Suprunovskaya, N. I. (2009), *Power processes in the electropulse installations with capacitive energy storages [Energeticheskie protsessy v tsepyah zaryada i razryada kondensatorov elektroimpul'snykh ustanovok]*, Intercontinental-Ukraine, Kiev, 208 p.
5. 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. (2012), "Spark erosion: a high production rate method for producing Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ nanoparticles with enhanced thermoelectric performance", *Nanotechnology*, No 23, P.1–7.
6. Shcherba, A. A., Suprunovskaya, N. I., Ivashchenko, D. S. (2014), "Modeling of nonlinear resistance of electro-spark load for synthesis of discharge circuit of capacitor by time parameters" [Modelirovanie nelineynogo soprotivleniya elektroiskrovoy nagruzki dlya sinteza tsepi razryada kondensatora po vremennym harakteristikam], *Tekhnichna elektrodynamika*, No 3, P. 12–18.
7. Shcherba, A. A., Suprunovskaya, N.I. (2014), "Synthesis of electrical circuits with capacitive energy storages in semiconductor formers of power discharge pulses" [Sintez elektricheskikh tsepey s emkostnymi nakopitelyami energii v polyprovodnikovyykh formirovatelyakh moshchnykh razryadnykh impul'sov], *Tekhnichna Elektrodynamika*, No 1, P. 3–11.
8. Shcherba, A. A., Ivashchenko, D. S., Suprunovskaya, N. I. (2013), "Development of difference equations method for analysis of transient processes in the circuits of electro-discharge systems at stochastic changing of load resistance" [Razvitie metoda raznostnykh uravneniy dlya analiza perehodnykh protsessov v tsepyakh elektrorazryadnykh ustanovok pri stohasticheskom izmenenii soprotivleniya nagruzki], *Tekhnichna elektrodynamika*, No 3, P. 3–12.
9. Shcherba, A. A and Petrichenko, S. V. (2002), "The influence of electrical discharge parameters on spark channel dynamics during volumetric spark treatment of flat layer of current-conducting granules" [Vliyanie parametrov elektricheskikh razryadov na dinamiku iskrorazryadnykh kanalov pri obyomnoy elektroiskrovoy obrabotke ploskogo sloya tokoprovodyashchih granul], *Tekhnichna Elektrodynamika, special issue "Silovaya elektronika i energoeffektivnost"*, part 3, P. 61–65.
10. Shcherba, A. A., Suprunovskaya, N. I. (2014), "Study Features Of Transients In The Circuits Of Semiconductor Discharge Pulses Generators With Nonlinear Electro-Spark Load", Proceedings IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2014), June 2-6, 2014, Kyiv, Ukraine, P. 50–54.
11. Casanueva, R., Azcondo, F.J., Branas, C., Bracho, S. (2005), "Analysis, design and experimental results of a high-frequency power supply for spark erosion", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 20, pp. 361–369.
12. Sen, B., Kiyawat, N., Singh, P.K., Mitra, S., Ye, J.H., Purkait, P. (2003), "Developments in electric power supply configurations for electrical-discharge-machining (EDM)", *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, PEDS 2003, Vol. 1, P. 659–664.
13. Carrey, J., Radousky, H. B., Berkowitz, A. E. (2004), "Spark-eroded particles: Influence of processing parameters", *Journal of Applied Physics*, V. 95, No. 3, P. 823–829.
14. Shcherba, A. A., Suprunovskaya, N. I. (2012), "Increasing regularities of rate of current rise in the load at limiting its maximal values" [Zakonomernosti povysheniya skorosti narastaniya razryadnykh tokov v nagruzke pri ogranichenii ih maksimalnykh znacheniy], *Tekhnichna Elektrodynamika*, No. 5, P. 3–9.

Поступила в редакцию 20.07 2014 г.