

УДК 621.314

**В.Я. Гуцалюк**, канд. техн. наук, **П.Ю. Герасименко**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

**Резонансные инверторы напряжения для установок индукционного нагрева с модульной структурой построения и системой управления на основе НЧ импульсной модуляции**

*Представлены результаты научных исследований отдела транзисторных преобразователей, направленные на разработку высокочастотных транзисторных преобразователей с модульной структурой построения для установок индукционных технологий, полученные в 2014 году. Показано, что применение несинфазного управления инверторными модулями при НЧ импульсной модуляции позволяет уменьшить размах пульсации амплитуды выходного тока, что особенно важно при низкой добротности выходного колебательного контура и необходимости обеспечения широкого диапазона регулирования выходного тока. Получена математическая модель резонансного инвертора напряжения с модульной структурой построения, которая позволяет проводить расчеты выходного тока при несинфазном управлении модулями и разных параметрах НЧ импульсной модуляции. Библ. 2, рис. 4.*

**Ключевые слова:** индукционный нагрев, транзисторный резонансный инвертор напряжения.

**V.Ya. Hutsaliuk, P.Yu. Herasymenko**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Resonant voltage inverter for induction heating equipment with a modular structure of construction and PDM based control system**

*The results of scientific research department of transistor converter for development of high-frequency transistor converters with a modular structure of construction for installations of induction technology, obtained in 2014, which have not been published are presented. It is shown that the using of non-inphase control of inverter modules at pulse density modulation allows to reduce ripple of output current, which is especially important at low quality factor of output oscillating circuit and the need for a wide control range of output current. The mathematical model of the resonant voltage inverter with a modular structure of construction which allows the calculation of output current at non-inphase management modules on different parameters of pulse density modulation was received. References 2, figures 4.*

**Key words:** induction heating, voltage-source series-resonant inverter.

Надійшла 23.04.2015

Received 23.04.2015

## **№ 16. ВІДДІЛ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ**

УДК 621.3.011:621.311

### **ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ РАЗРЯДА НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ДИСПЕРГИРОВАНИИ СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГРАНУЛ**

**Н.И. Супруновская**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина  
e-mail: iednat1@gmail.com

*Представлены новые научные результаты, полученные в отделе электропитания технологических систем Института электродинамики НАН Украины, при исследовании переходных процессов в электрических цепях разряда накопительных конденсаторов на электроискровую нагрузку, которой является слой металлических гранул, расположенных в диэлектрической жидкости между электродами технологического реактора. Показаны особенности протекания переходных процессов разряда конденсаторов на такую нагрузку и разработаны новые математические модели, учитывающие зависимости ее сопротивления от величины разрядного тока, скорости его изменения и длительности временной паузы между разрядными импульсами. Проведен анализ путей повышения энергетических и динамических характеристик импульсных токов в электроискровой нагрузке, возникающих при регулируемом разряде на нее накопительных конденсаторов генераторов разрядных импульсов. Исследования проводились в соответствии с планами НИР "ИМРОЗ". Библ. 16, рис. 6.*

**Ключевые слова:** конденсатор, разряд, переходные процессы, импульсный ток, электроискровая нагрузка, математическая модель.

**Введение.** По мнению профессора Э. Берковитца из Калифорнийского университета (США), искровая эрозия является одной из наиболее универсальных технологий для получения аморфных и наноструктурных частиц металлов, сплавов, композитов, полупроводников и керамик [13–15]. Для реализации электроискровых технологий применяют генераторы разрядных импульсов (ГРИ) с емкостными накопителями энергии (конденсаторами), которые сначала заряжают до необходимого напряжения, а затем разряжают на электроискровую нагрузку, в большинстве установок представляющая собой слой токопроводящих (металлических) гранул между электродами, погруженными в диэлектрическую жидкость.

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

Схема работает следующим образом. После включения коммутатора  $VT1$  начинается заряд конденсатора емкостью  $C$  от полупроводникового формирователя постоянного напряжения (ФПН) через дроссель индуктивностью  $L_1$  и активное сопротивление  $R_1$  зарядной цепи конденсатора. Величины  $C$ ,  $L_1$  и  $R_1$  выбирались такими, чтобы всегда выполнялось условие  $\sqrt{L_1/C}/R_1 = Q_1 > 20$ , где  $Q_1$  – добротность зарядной цепи конденсатора. В таком случае будет возникать колебательный режим заряда конденсатора  $C$  от ФПН, отличающийся малыми потерями электроэнергии. Если в момент начала заряда (т.е. при  $t=0$ ) напряжение на конденсаторе будет  $u_c(t=0) = 0$ , тогда при  $Q_1 > 20$  конденсатор зарядится до напряжения  $U_1 > 1,8 U_{\text{ФПН}}$  (где  $U_{\text{ФПН}}$  – напряжение на выходе ФПН), а потери электроэнергии на сопротивлении  $R_1$  составят менее 4 % от энергии, потребленной от ФПН [5].

После заряда конденсатора выдерживается временная пауза  $\tau_1 \geq (30\text{--}50)$  мкс для восстановления запирающих свойств тиристора  $VT1$  и лишь затем включается коммутатор  $VT2$  для разряда накопительного конденсатора  $C$  через элементы разрядной цепи  $L_2$  и  $R_2$  на электроискровую нагрузку, представленную на рис. 1 нелинейным активным сопротивлением  $R_n$ . Величины  $C$ ,  $L_2$ ,  $R_2$  и  $R_n$  обычно выбирают такими, чтобы конденсатор перезарядился до напряжения, составляющего 10...20 % от напряжения его заряда  $U_1 \approx 1,8 U_{\text{ФПН}}$ . Такой режим разряда позволяет передавать в сопротивление  $R_n$  более 95 % электрической энергии, накопленной в конденсаторе, и быстро выключать разрядный тиристорный коммутатор  $VT2$  после завершения разряда конденсатора [1, 3, 5, 6, 16].

Электрическая цепь  $VD - R_3$  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  $R_3$  и длительности паузы  $\tau_2$  между окончанием разряда конденсатора и началом его следующего заряда можно регулировать обратную связь по напряжению и осуществлять стабилизацию режимов электрических искрений в слое гранул.

Электрическая цепь  $VD - R_3$  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  $R_3$  и длительности паузы  $\tau_2$  между окончанием разряда конденсатора и началом его следующего заряда можно регулировать обратную связь по напряжению и осуществлять стабилизацию режимов электрических искрений в слое гранул.

Применение аналитических методов для анализа переходных процессов в цепях с электроискровой нагрузкой, активное сопротивление которой зависит от величины и скорости изменения тока, является сложным, поэтому для решения задач такого класса обычно применяют числовые методы и математическое моделирование активного сопротивления слоя гранул при разряде на него накопительных конденсаторов [2, 3, 7, 8, 9, 14].

**Особенности анализа переходных процессов в цепи с электроискровой нагрузкой.** Исследования показали, что величина электрического сопротивления  $R_n$  всех электроис-

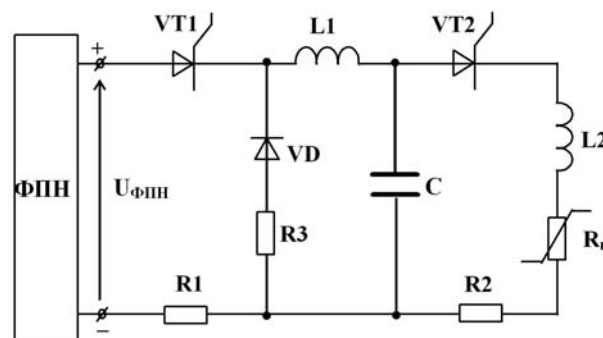


Рис. 1

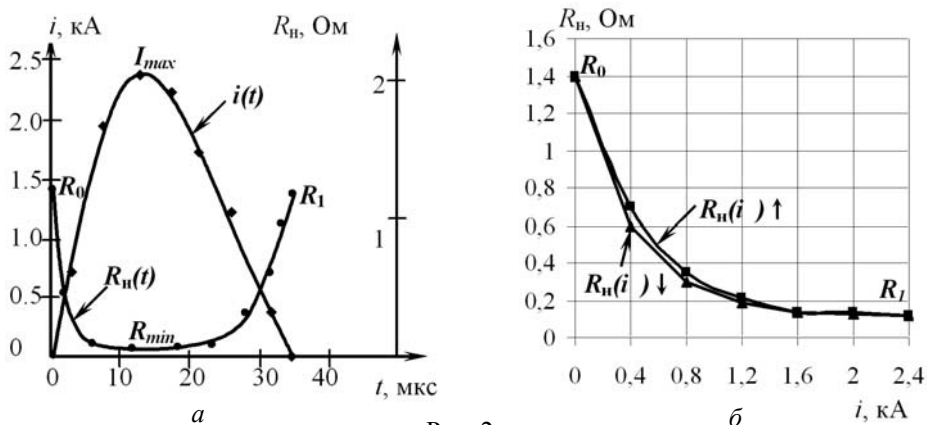


Рис. 2

крowych нагрузок зависит от величины протекающего в них тока, скорости его изменения, длительности и частоты разрядных импульсов, физико-химических характеристик гранул и жидкости, размеров гранул и слоя, конструктивных и технологических параметров электроразрядной камер-

ры [1–12, 16]. Нелинейная зависимость сопротивления электроискровой нагрузки от многих параметров затрудняет применение точных аналитических методов для анализа переходных процессов в разрядной цепи ГРИ. Поэтому в большинстве исследований допускается, что электроискровая нагрузка имеет кусочно-линейное сопротивление, величина которого  $R_{н\text{ лин}} = \text{const}$  в течение длительности каждого электроискрового разряда, но может стохастически измениться во время паузы между разрядами [1, 5, 10, 11]. В таком случае величину  $R_{н\text{ лин}}$  определяют по формуле

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

где  $i(t)$  – ток в цепи электроискровой нагрузки при  $n$ -м разряде конденсатора;  $R_n(t)$  – электрическое сопротивление нагрузки при протекании в ней  $n$ -го разрядного импульсного тока длительностью  $\tau$ .

Расчет линейного сопротивления  $R_{н\text{ лин}}$ , на котором выделяется электрическая энергия, такая же, как и при разряде конденсатора на электроискровую нагрузку, позволяет реализовать синтез цепей ГРИ для достижения необходимых энергетических характеристик ГРИ с ошибкой менее 10 % [9]. Такая линеаризация сопротивления нагрузки позволила разработать метод разностных уравнений для анализа переходных процессов в цепях электроразрядных установок с учетом стохастического изменения сопротивления нагрузки во время паузы между разрядами [11]. Но этот подход не учитывает динамические свойства нагрузки и влияние на них таких важных параметров разрядных импульсов, как частота.

В работах [1, 5, 8–12, 16] отмечено, что при колебательном разряде конденсатора на электроискровую нагрузку изменение во времени электрического тока  $i(t)$  можно представить в виде затухающей полусинусоиды, а сопротивления  $R_n(t)$  – U-образной кривой. Экспериментальные зависимости  $i(t)$  и  $R_n(t)$ , полученные при диспергировании слоя гранул свинца в воде, показаны на рис. 2 а [8, 12]. Их оцифровка позволила определить зависимость  $R_n(i)$ , представленную на рис. 2 б.

Из рис. 2 а видно, что с увеличением разрядного тока от нуля до максимального значения  $I_{max}$  величина сопротивления  $R_n$  экспоненциально уменьшается от начального значения  $R_0$  до минимального  $R_{min}$ , а затем при уменьшении тока от  $I_{max}$  до нуля сопротивление  $R_n$  более медленно увеличивается от нуля до конечного значения  $R_1 \approx R_0$ . Такой электрофизический процесс можно объяснить тем, что с увеличением тока в слое гранул увеличиваются количество и поперечное сечение микроплазменных каналов, что вызывает уменьшение общего электрического сопротивления слоя. При уменьшении тока происходит обратный процесс. Анализ кривых на рис. 2 б показывает, что сопротивление электроискровой нагрузки  $R_n$  за время длительности одного разряда конденсатора нелинейно зависит от величины протекающего в ней тока  $i$ , причем зависимость  $R_n(i)$  можно аппроксимировать убывающей экспонентой.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 2, и результатов экспериментов [1, 5, 8, 12] показывает, что при исследовании переходных процессов разряда накопительных конденсаторов на электроискровую нагрузку наблюдаются следующие закономерности:

1) изменение величины активного сопротивления электроискровой нагрузки от тока достаточно точно можно представлять убывающей экспоненциальной зависимостью;

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

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

4) если в цепи нагрузки есть полупроводниковый коммутатор и разряд конденсатора происходит с перезарядом (т.е. с изменением полярности напряжения на его обкладках), то изменение тока  $i(t)$  в нагрузке можно представить затухающей полусинусоидой, несмотря на то, что в начале и в конце разряда переходный процесс в цепи нагрузки может иметь не колебательный, а апериодический характер;

5) учитывая нелинейную зависимость сопротивления электроискровой нагрузки от тока, переходные процессы в цепях ГРИ целесообразно исследовать с применением числовых методов моделирования, например программ *Matlab/Simulink*;

6) во многих случаях при моделировании электроискровой нагрузки допустимо принимать, что значения  $R_1 \approx R_0$ , а кривая, отражающая изменение во времени сопротивления  $R_H(t)$ , имеет U-образную форму.

С учетом таких закономерностей была создана математическая модель нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки, зависящего от тока  $i$  и скорости его изменения  $di/dt$  [9–11, 16].

В результате была синтезирована функция  $R_H(i, di/dt)$  вида

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

где  $R_0$  и  $R_{\min}$  – соответственно начальное и минимальное сопротивления нагрузки;  $\varepsilon_1$  – положительный коэффициент, определяющий скорость уменьшения сопротивления по мере увеличения тока и наоборот;  $k$  – коэффициент, реализующий более быстрое падение сопротивления нагрузки до минимума, по сравнению с его нарастанием от минимума до первоначальной величины (для этого коэффициент  $k$  при увеличении тока должен быть больше, чем при его уменьшении, причем при смене знака производной  $di/dt$ , т.е. при переходе от увеличения к уменьшению тока коэффициент  $k$  не должен изменяться скачком).

Коэффициент  $\varepsilon_1$  рассчитывался по формуле

$$\varepsilon_1 = -\ln(\delta / (R_0 - R_{\min})) / I_{\max}, \quad (3)$$

где  $\delta$  – малая величина, равная погрешности расчета;  $I_{\max}$  – оценка максимального тока при допущении, что он протекает в цепи при линейном сопротивлении нагрузки, равном  $R_{\min}$ .

Выражение для оценки тока  $I_{\max}$  при указанном допущении записывается как

$$I_{\max} = U_0 \exp(-\alpha \cdot t_{I_{\max}}) \cdot \sin \omega t_{I_{\max}} / L\omega, \quad (4)$$

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

Коэффициент  $k$  определялся выражением

$$k(di/dt) = \varepsilon_2 \cdot di/dt \cdot h(di/dt), \quad (5)$$

где  $\varepsilon_2$  – постоянный коэффициент, а параметр  $h(di/dt)$  изменялся по закону

$$h(di/dt) = \begin{cases} 1, & di/dt \geq 0 \\ 0, & di/dt < 0 \end{cases}. \quad (6)$$

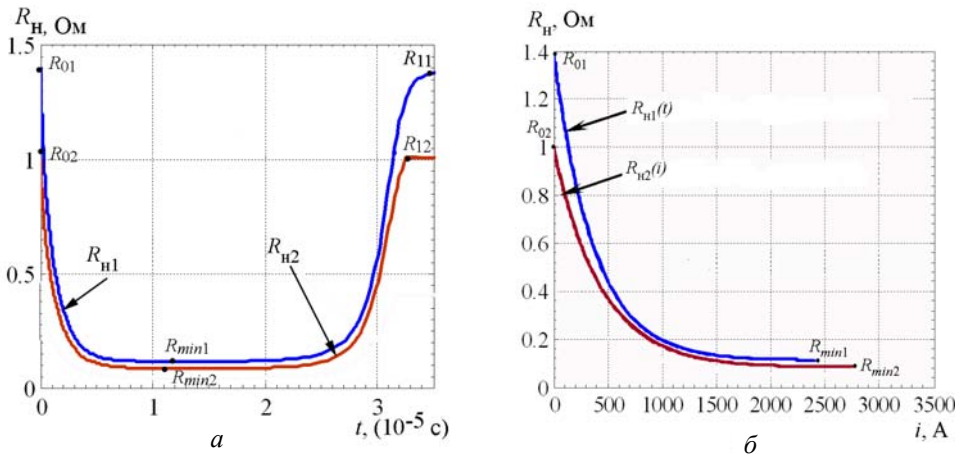


Рис. 3

На рис. 3 а представлены две расчетные U-образные кривые, отражающие изменение во времени сопротивления электроискровой нагрузки  $R_n(t)$  при значениях  $R_0 \approx R_1 \approx 1,4 \text{ Ом}$ ,  $R_{\min} = 0,11 \text{ Ом}$  и  $R_0 \approx R_1 \approx 1,0 \text{ Ом}$ ,  $R_{\min} = 0,08 \text{ Ом}$ . Эти кривые доста-

точно точно отражают изменение во времени экспериментальных значений  $R(t)$  на рис. 2 а (среднее квадратичное отклонение от значений  $R(t)$  составляет не более 5 %). На рис. 3 б показаны расчетные зависимости  $R_n(i, di/dt)$ , которые также достаточно точно отражают кривые на рис. 2 б, полученные с использованием оцифрованных экспериментальных значений  $i(t)$  и  $R(t)$ .

Применение математической модели сопротивления электроискровой нагрузки в виде функции (2) позволяет анализировать переходные процессы в разрядном контуре только при допущении, что сопротивление нагрузки в начале разрядного импульса равно ее сопротивлению после окончания разряда (т.е. при  $R_1 \approx R_0$ ).

В то же время такое допущение не позволяет анализировать переходные процессы при многократном увеличении частоты разрядных импульсов  $f$ , при котором активное сопротивление нагрузки уже зависит и от частоты [1, 5, 6, 12, 16]. В таком случае необходимо создавать модель сопротивления нагрузки с применением функций типа  $R_n(i, di/dt, f)$ .

**Учет зависимости сопротивления  $R_n(i, di/dt)$  от частоты разрядных импульсов  $f$ .**

В работах [1, 5, 6, 12, 16] отмечалось, что при разряде конденсатора на электроискровую нагрузку и постоянном периоде повторения зарядно-разрядных циклов, начиная с некоторого увеличения частоты разрядных импульсов (и соответственно уменьшения длительности временной паузы между предыдущим и последующим импульсами искроразрядного тока), среднее статистическое сопротивление нагрузки начинает увеличиваться. Дальнейшие исследования подтвердили, что в таком случае после окончания разрядного тока сопротивление  $R_1$  слоя металлических гранул между электродами становится больше их начального сопротивления  $R_0$  (т.е.  $R_1 > R_0$ ).

Этот случай отражен на рис. 4 кривыми изменения сопротивлений  $R_{Pb}(t)$  слоя (высотой 40...50 мм) сферических гранул свинца (диаметром 2 мм) в воде и  $R_{Fe}(t)$  слоя (высотой 20...25 мм) сферических гранул железа (диаметром 2 мм) в керосине.

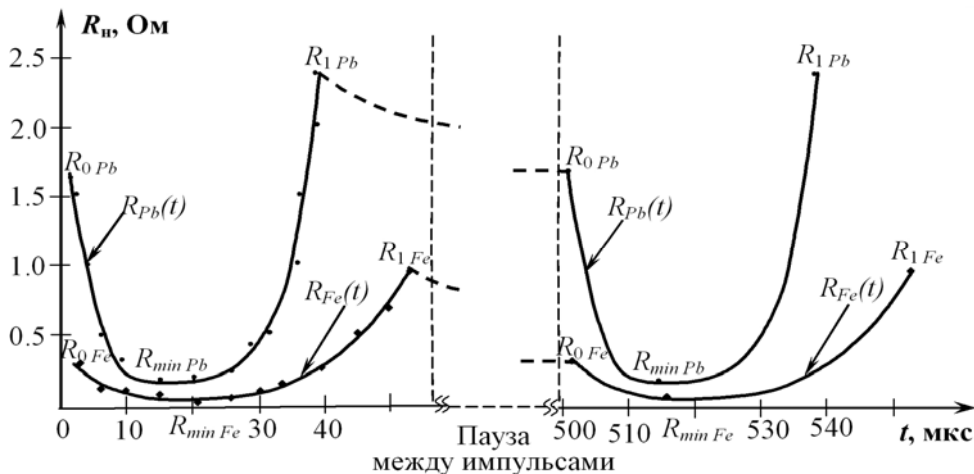


Рис. 4

После оцифровки значений на рис. 4 были определены нелинейные зависимости  $R_{Pb}(i)$  и  $R_{Fe}(i)$ , приведенные на рис. 5.

Анализ кривых на рис. 3 и 4 показывает, что они подтверждают приведенные ранее закономерности, кроме того, что  $R_1 \approx R_0$ . При высокочастотном электроискровом диспергировании слоев гранул свинца в воде и железа в керосине было получено, что  $R_{1Pb} > R_{0Pb}$  и  $R_{1Fe} > R_{0Fe}$ .

Дальнейшие исследования подтвердили возможное увеличение сопротивления слоя гранул при их низкой подвижности и высокой скорости вынесения искроэрозионных порошков из зон искровой эрозии электрических контактов между гранулами. В таком случае за время искроразрядного импульса гранулы не успевают восстановить электрические контакты, разорванные при электроискровой эрозии. Поэтому сопротивление  $R_1$  слоя гранул к окончанию разрядного тока может быть больше сопротивления  $R_0$  при его начале.

Если длительность паузы  $\Delta t_3$  между окончанием первого и началом следующего разрядного тока будет больше некоторого значения  $\Delta t_0$  (т.е.  $\Delta t_3 > \Delta t_0$ ), то значение  $R_1$  успеет уменьшиться до значения  $R_0$ , как показано на рис. 4. Если длительность разрядных токов  $\tau \approx \text{const}$ , то значение  $\Delta t_0$  выбирается из значения допустимой максимальной частоты  $f_0$  следования разрядных импульсов. При частоте разрядных импульсов  $f > f_0$  сопротивление слоя гранул в начале следующего разряда будет больше значения  $R_0$ .

Для анализа переходных процессов в цепях электроискровых нагрузок, характеристики которых представлены на рис. 4 и 5, была разработана математическая модель с учетом того, что  $R_1 > R_0$  и  $\Delta t_3 < \Delta t_0$ .

Путем введения новых членов в модель (2) было получено уравнение для сопротивления нагрузки в виде [16]

$$R(i, di/dt) = (R_0 - R_{\min}) \cdot \left( 1 + \left( \frac{(I_{\max} - i) \cdot (R_{\max} - R_{\min})}{I_{\max} \cdot (R_0 - R_{\min})} \right) \cdot (1 - h(di/dt)) \right) e^{-\varepsilon_2(1+k_2) \cdot i} + R_{\min}, \quad (7)$$

где  $R_{\max} = R_1 \geq R_0$  – максимальное сопротивление нагрузки, достигаемое к моменту окончания разрядного тока;  $\varepsilon_2$  и  $k_2$  – коэффициенты, аналогичные коэффициентам  $\varepsilon_1$  и  $k$  в модели (2);  $I_{\max}$  – максимальное значение тока колебательного разряда конденсатора на нагрузку, равное максимальному значению тока при условии, что в этот момент сопротивление нагрузки не изменяется (т.е. оно является линейным и равным  $R_{\min}$ ).

Модель (7) предусматривает, что при нарастании тока сопротивление нагрузки уменьшается от  $R_0$  до  $R_{\min}$ , достигаемого при достижении током значения  $I_{\max}$ , а затем при уменьшении тока от  $I_{\max}$  до нуля сопротивление нагрузки увеличивается от  $R_{\min}$  до  $R_{\max} = R_1 \geq R_0$ . Модель также учитывает, что скорость уменьшения сопротивления нагрузки превышает скорость ее нарастания и что она верна, даже если  $\Delta t_3 < \Delta t_0$ . Для определения значений  $k_2$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $I_{\max}$  в модели (7) используются те же выражения, что и в модели (2) для вычисления аналогичных величин  $k$ ,  $\varepsilon_1$  и  $I_{\max}$ .

В течение паузы между разрядными импульсами, длительность которой равна  $\Delta t_3$  (т.е. когда ток в нагрузке отсутствует), сопротивление нагрузки медленно уменьшается от значения  $R_{\max}$  до  $R_0$  согласно выражению

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

где коэффициент  $k_3$  выбирается из формулы

$$k_3 = -\ln(R_0/R_{\max})/\Delta t_3. \quad (9)$$

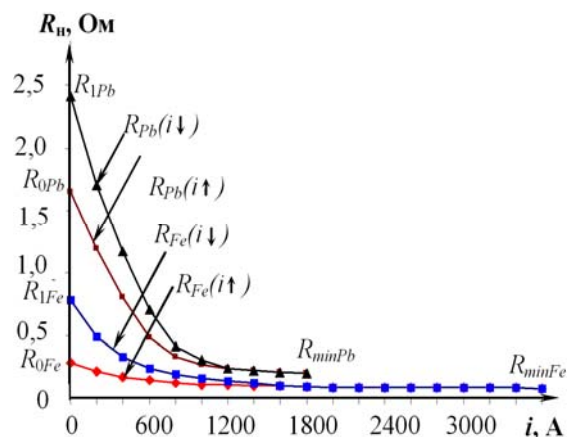


Рис. 5

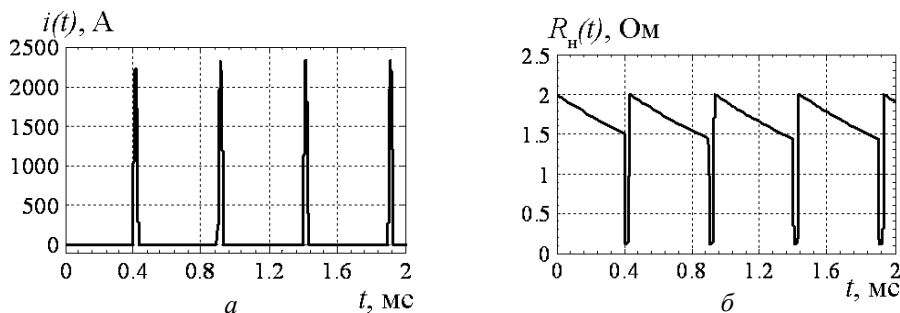


Рис. 6

Значение коэффициента  $k_3$  выбирается из условия, чтобы за время паузы между разрядными токами  $\Delta\tau_3 > \Delta\tau_0$  сопротивление нагрузки  $R_1$  успевало уменьшиться до значения  $R_0$ .

На рис. 6 приведены расчетные временные зависимости тока в нагрузке  $i(t)$  и изменение ее сопротивления  $R_n(t)$ , полученные с применением модели (7).

Использование модели (7) позволяет анализировать переходные процессы в цепи нагрузки с учетом возможных условий  $R_1 > R_0$  и  $\Delta\tau_3 < \Delta\tau_0$  и определять влияние на величину активного сопротивления слоя токопроводящих гранул между электродами таких характеристик разрядных импульсов, как скорость изменения тока в нагрузке, длительность разрядного импульса, длительность изменения тока до требуемого значения, изменение напряжения на конденсаторе, значение максимального разрядного тока и импульсной мощности.

**Выводы.** 1. Показаны особенности моделирования и анализа переходных процессов в цепях разряда накопительных конденсаторов полупроводниковых генераторов разрядных импульсов на электроискровую нагрузку, которой является слой металлических гранул между электродами, погруженными в диэлектрическую жидкость. Особенности состоят в том, что при математическом моделировании такой нелинейной нагрузки необходимо учитывать, что ее активное сопротивление зависит от величины разрядного тока, скорости его изменения и длительности временной паузы между разрядными импульсами.

2. В работе также отражена возможность моделирования активного сопротивления слоя металлических гранул между электродами для случаев многократного повышения частоты следования разрядных импульсов, при котором активное сопротивление слоя гранул начинает повышаться и соответственно характер разряда накопительных конденсаторов на электроискровую нагрузку становится менее колебательным (т.е. конденсатор начинает отдавать в нагрузку больше накопленной в нем электрической энергии).

3. Использование разработанных моделей позволяет анализировать переходные процессы в цепи электроискровой нагрузки с учетом разных условий изменения ее нелинейного сопротивления и определять влияние на характер электроискровых процессов в слое металлических гранул таких характеристик разрядных импульсов, как амплитуда, длительность и скорость изменения разрядного тока, напряжение на конденсаторе и импульсная электрическая мощность, выделяемая в слое гранул за все время протекания импульсного тока.

1. Асанов У.А., Цой А.Д., Щерба А.А., Казекин В.И. Электроэрозионная технология химических соединений и порошков металлов (главы 2 и 3). – Фрунзе: Илим, 1990. – 255 с.
2. Захарченко С.Н., Кондратенко И.П., Перекос А.Е., Залуцкий В.П., Козырский В.В., Лопатько К.Г. Влияние длительности разрядных импульсов в слое гранул железа на размеры и структурно-фазовое состояние его электроэрозионных частиц // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – 2012. – № 6/5. – С. 66–72.
3. Супруновская Н.И. Моделирование и анализ переходных процессов в электрических цепях полупроводниковых электроразрядных установок с нелинейной электроискровой нагрузкой // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2014. – Спец. вып. – Т. 1. – № 9 (128). – С. 34–44.
4. Супруновская Н.И. Особенности параметрического синтеза цепи разряда конденсатора на электроискровую нагрузку с нелинейным сопротивлением // Техн. электродинамика. – 2014. – № 4 – С. 20–22.
5. 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.
6. Щерба А.А. Принципы построения и стабилизация параметров полупроводниковых электроимпульсных систем электроискрового диспергирования слоя токопроводящих материалов // Стабилизация параметров электрической энергии. – Киев: ИЭД АН Украины, 1991. – С. 12–30.
7. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Лопатько К.Г., Шевченко Н.И., Ломко Н.А. Разрядно-импульсные системы производства нанокolloидных растворов биологически активных металлов методом объемного



- электроискрового диспергирования // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2010. – Вип. 26. – С. 152–160.
8. Щерба А.А., Петриченко С.В. Физическое моделирование и анализ динамики процессов при электроэрозионном диспергировании токопроводящих гранул в жидкости // Техн. електродинаміка. – 2004. – № 3. – С. 12–18.
  9. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Синтез электрических цепей с емкостными накопителями энергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 1. – С. 3–12.
  10. 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.
  11. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки с учетом его изменения при протекании и отсутствии разрядного тока в нагрузке // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 23–25.
  12. Щерба А.А., Штомпель И.В. Анализ электрических параметров и динамики искровых разрядов в слое токопроводящих гранул // Стабилизация параметров электрической энергии, 1991. – С. 65–74.
  13. Berkowitz A.E., Walter J.L. Spark erosion: A method for producing rapidly quenched fine powders // Journ. of Mater. Res. – Vol. 2. – No. 2. – Mar/Apr 1987. – P. 277–288.
  14. Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E. Spark-eroded particles: Influence of processing parameters // Journal of Applied Physics, Vol. 95, Num. 3, 1 February 2004. – P. 823–829.
  15. Nguyen Ph.-Kh., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 115. – Issue 17. – P. 17A756-1.
  16. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-spark load // Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2014, Kyiv, Ukraine. – P. 50–54.

УДК 621.3.011:621.311

**Н.І. Супруновська**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

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

**Особливості аналізу перехідних процесів у ланцюгах розряду накопичувальних конденсаторів при електроіскровому диспергуванні шару металевих гранул**

*Представлено нові наукові результати, отримані у відділі електроживлення технологічних систем Інституту електродинаміки НАН України при дослідженні перехідних процесів в електричних ланцюгах розряду накопичувальних конденсаторів на електроіскрове навантаження, яким є шар металевих гранул, розміщених у діелектричній рідині між електродами технологічного реактора. Показано особливості протікання перехідних процесів розряду конденсаторів на таке навантаження й розроблено нові математичні моделі, що враховують залежності його опору від величини розрядного струму, швидкості його зміни й тривалості часової паузи між розрядними імпульсами. Проведено аналіз шляхів підвищення енергетичних і динамічних характеристик імпульсних струмів у електроіскровому навантаженні, що виникають при регульованому розряді на нього накопичувальних конденсаторів генераторів розрядних імпульсів. Дослідження проводилися відповідно до планів НДР "ІМРОЗ". Бібл. 16, рис. 6.*

**Ключові слова:** конденсатор, розряд, перехідні процеси, імпульсний струм, електроіскрове навантаження, математична модель.

**N.I. Suprunovska**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Features of analysis of transients in circuits of discharge of reservoir capacitors at the electro-spark dispersion of layer of metal granules**

*The new scientific results gained in the Institutes of electrodynamics during study of transients in electric circuits of discharge of reservoir capacitors on electro-spark load, which is the layer of the metal granules placed in a dielectric liquid between electrodes of the technological reactor are represented in the paper. Features of transients of capacitors discharge on such load are shown and the new mathematical models considering dependences of load resistance from magnitude of a discharge current, rate of its change and duration of a time interval between discharge pulses are developed. The analysis of ways to increase the power and dynamic characteristics of pulse currents, which are generated in electro-spark load at the controllable discharge of reservoir capacitors of discharge pulses generators, was carried out. Researches were carried out according to plans research work "IMROZ". References 16, figures 6.*

**Key words:** capacitor, discharge, transients, pulse current, electro-spark load, mathematical model.

Надійшла 27.05.2015

Received 27.05.2015