

УДК 621.396.6

Д.Б. Кучер<sup>1</sup>, Р.А. Шаров<sup>1</sup>, Л.В. Литвиненко<sup>1</sup>, Н.Н. Корощенко<sup>1</sup>, А.И. Фык<sup>2</sup><sup>1</sup> Одесская национальная морская академия, факультет Военно-Морских Сил, Одеса<sup>2</sup> Национальная академия Национальной гвардии Украины, Харьков

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОВЗРЫВАЮЩИХСЯ ПРОВОДНИКОВ НА ХАРАКТЕР ВТОРИЧНОГО ПРОБОЯ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ

*В работе рассматривается применимость явления вторичного пробоя продуктов детонации, образующихся при быстром электрическом взрыве легкоплавких проводников, для создания быстродействующих коммутаторов (ключей).*

**Ключевые слова:** электровзрывающийся проводник, этапы быстрого электрического взрыва, пауза тока, спиральный взрывомагнитный генератор, модель мгновенного сильного взрыва цилиндрической конфигурации, легкоплавкие и тугоплавкие проводники.

### Введение

С развитием высоких технологий расширяется круг объектов повышенного риска, к которым относятся тепловые, атомные и гидроэлектростанции, оборонные и космические системы. Безопасность таких объектов представляет особую задачу, решение которой невозможно без использования современных быстродействующих средств аварийной коммутации и ограничения опасных токов и напряжений.

Анализ параметров существующих средств коммутации (газовых разрядников и варисторов) показал ряд недостатков, значительно снижающих эффективность их применения в системах критического назначения [1]. Основным недостатком разрядников является длительное время их реакции (до единиц микросекунд). Применение в качестве коммутирующих устройств варисторов затрудняется невозможностью обеспечения их работы при параллельном включении и значительным снижением характеристик при нагревах импульсными токами свыше 100 °С [1]. В этой связи наиболее перспективным способом осуществления коммутации является вторичный пробой продуктов детонации, возникающий при электрическом взрыве проводников [2].

Вторичный пробой возникает на третьем этапе электрического взрыва, когда материал проводника принимает свойства газа с высокой плотностью (давление продуктов электрического взрыва  $\approx 34 \cdot 10^3$  Атм) и температурой ( $\approx 10^4$  К) [2, 3]. Данный этап характеризуется высокими значениями давления газообразных продуктов электрического взрыва и малой средней длиной пробега электронов. Поэтому пробой между электродами, удерживающими электровзрывающийся проводник (ЭВП), не возникает и образуется пауза тока [2, 3].

Для применения таких коммутаторов в различных элементах и системах времени их срабатывания, а, следовательно, и длительности пауз тока, должны

иметь различные величины [1]. Поэтому целью данной работы является определение параметров ЭВП влияющих на характер вторичного пробоя продуктов детонации.

### Основной материал

Механизм работы таких коммутаторов будет включать в себя три основных этапа [4]. На первом этапе происходит электрический взрыв ЭВП (разрыв коммутируемой цепи) подключаемого в цепь генератора. На втором этапе происходит расширение продуктов детонации электрического взрыва с уменьшением их давления и плотности и увеличением средней длины пробега (ключ открыт). Третьему этапу соответствует вторичный пробой продуктов электрического взрыва (замыкание цепи ключом) [4].

Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенный в работах [2, 3], показал, что ЭВП по типу вторичного пробоя можно разделить на две группы. Для каждой из групп он развивается по определенному сценарию, при этом образуются типичные для данной группы структуры продуктов детонации.

Для первой группы, объединяющей металлы с высокой температурой плавления и высоким начальным удельным сопротивлением (палладий, вольфрам, молибден, титан), характерен быстрый шунтирующий пробой вдоль поверхности проводника (по парам металла в воздухе) и эффективный перехват разрядного тока короной (цилиндрическая форма продуктов детонации расширяется незначительно) [2, 3]. При реализации данного вида вторичного пробоя между электродами, к которым закреплялся ЭВП, не будет возникать сквозной канал высокой проводимости, то есть на протяжении всей паузы тока разрядный промежуток только частично сохраняет свои изолирующие свойства (рис. 1 а, в) [2, 3]. При дальнейшем увеличении приложенного напряжения ко-

ронный разряд будет переходить в дуговой, что означает окончание паузы тока (рис. 1, а, в).

Для легкоплавких и хорошо проводящих ЭВП (свинец, серебро, алюминий, медь, золото) характерно то, что шунтирование не происходит полностью, и ток до момента вторичного пробоя успевает расплавить, испарить и частично ионизовать вещество проволоочки [2, 3].

При малых значениях длины ЭВП ( $l \leq 5 \cdot 10^{-3}$  м) ток некоторое время продолжает течь через продукты детонации, что приводит к значительному, по

сравнению с тугоплавкими ЭВП, расширению цилиндрической формы [4 – 6]. При  $l > 5 \cdot 10^{-3}$  м пробой происходит только при уменьшении давления и плотности продуктов детонации до критических значений. До этого момента ток, протекающий через продукты электрического взрыва, равен нулю, а напряжение максимально (рис. 1, б, г).

Подобный сценарий вторичного разряда условно называют внутренним, имея в виду присутствие заметной доли разрядного тока «внутри» плотной части продуктов электрического взрыва [4 – 6].

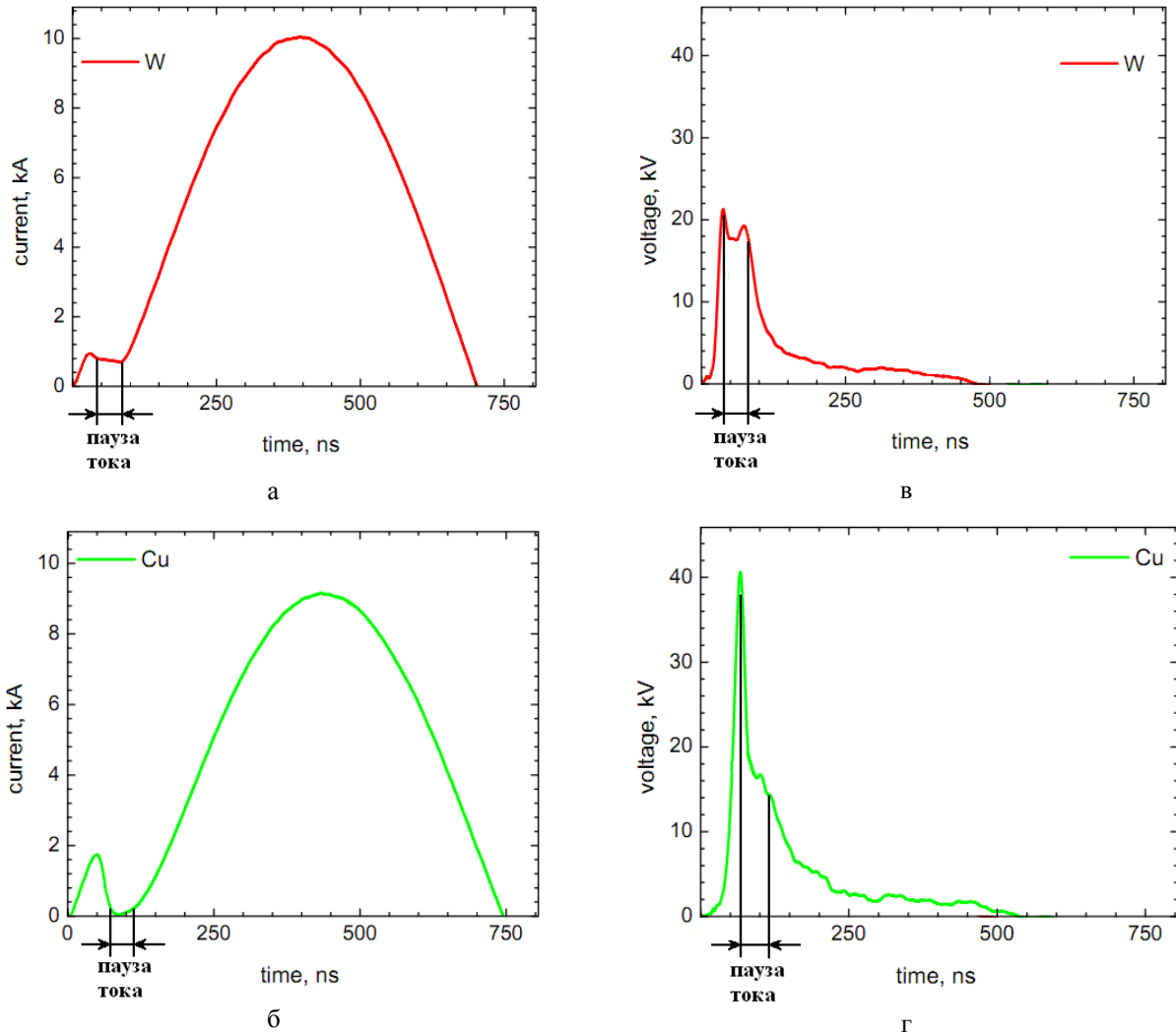


Рис. 1. Осциллограммы тока (а, б) и напряжения (в, г) при электрическом взрыве вольфрамового (а, в) и медного (б, г) проводников диаметром  $0,025 \cdot 10^{-3}$  м и длиной  $12 \cdot 10^{-3}$  м с учетом возникновения паузы тока и вторичного пробоя

Таким образом, для создания быстродействующих ключей наиболее подходит вторая группа ЭВП, несмотря на примерно одинаковую длительность существования паузы тока как для легкоплавких, так и для тугоплавких металлов (рис. 1). Это, прежде всего, объясняется тем, что при возникновении коронного разряда у тугоплавких ЭВП на границе плотных продуктов взрыва и воздуха на про-

тяжении всей паузы тока будет протекать электрический ток (рис. 1, а, в).

Следовательно, на втором этапе работы такого коммутатора невозможно полностью осуществить разрыв цепи.

В работе [4] было показано, что длительность паузы тока (второго этапа) при подключении ЭВП к спиральному взрывомагнитному генератору (СВМГ)

зависит от скорости расширения, а, следовательно, и от давления (плотности) уже ионизированных продуктов электрического взрыва.

В этом случае на единицу длины ЭВП при генерации ударной волны во временном интервале  $t^* \leq t < t^{**}$  затрачивается энергия [4]:

$$W_{yB} = \frac{A_2 l^2}{20 \cdot D^2} \times \left[ \frac{1}{(t^*)^5} \left( \ln \left( \frac{m \cdot D \cdot t^*}{M \cdot l^*} \right) - 0.6 \right)^2 - \frac{1}{(t^{**})^5} \left( \ln \left( \frac{m \cdot D \cdot t^{**}}{M \cdot l^*} \right) - 0.6 \right)^2 \right], \quad (1)$$

где

$$A_2 = \frac{9d^4 I_2^2 P_{ЭВП}^3 \rho_0^3}{8\pi^3 \rho_{ЭВП}^3 (W_L^*)^3 \left[ \mu_0 \pi (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) K(r_{cp} / l^*) \right]^2};$$

$I_2$  – постоянный ток, протекающий в контуре до подрыва взрывчатого вещества (ВВ) в СВМГ;

$R_{ЭВП}$  – активное сопротивление ЭВП до начала плавления;

$d$  – диаметр проволоки соленоиды СВМГ;

$r_1$  и  $r_2$  – радиусы витков соленоиды в начале и в конце спирали СВМГ соответственно,

$l^* = d \cdot N^* + kN^*$  – первоначальная длина соленоиды СВМГ;

$m$  – масса ВВ,

$M$  – масса расширяющегося элемента СВМГ (лайнера);

$D$  – скорость детонации;

$\rho_{ЭВП}$  и  $\rho_0$  – плотности ЭВП и окружающего его газа,

$W_L^*$  – удельная энергия сублимации (образования золя);

$R_{ЭВП}$ ,  $l$  – удельное сопротивление и длина ЭВП соответственно;

$t^*$  – длительность этапа нагрева и плавления ЭВП;

$t^{**}$  – время превращения металла в мелкодисперсную массу (золь) с размером частиц меньше  $1000 \text{ \AA}$ .

Скорость движения  $v_{ПД}$ , плотность  $\rho_{ПД}$ , давление  $P_{ПД}$  и температуру  $T_{ПД}$  ионизированных продуктов детонации, можно определить, основываясь на модели мгновенного сильного взрыва цилиндрической конфигурации [4 – 6]:

$$\begin{cases} v_{ПД}(t) = \frac{2}{\gamma+1} v_{yB}(t) \left( 1 - \frac{c^2}{v_{yB}(t)^2} \right) = \\ = \frac{2}{\gamma+1} v_{yB}(t) f_1(t), \\ \rho_{ПД}(t) = \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \rho_0 \left( 1 + \frac{2}{\gamma-1} \frac{c^2}{v_{yB}(t)^2} \right) = \\ = \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \rho_0 f_2(t), \\ P_{ПД}(t) = \frac{2}{\gamma+1} \rho_0 v_{yB}(t)^2 \left( 1 - \frac{\gamma-1}{2\gamma} \frac{c^2}{v_{yB}(t)^2} \right) = \\ = \frac{2}{\gamma+1} \rho_0 v_{yB}(t)^2 f_3(t), \\ T_{ПД}(t) = \frac{P_{ПД}(t)}{R \rho_{ПД}(t)}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\rho_0$  и  $c$  – плотность газа и скорость звука перед ударной волной соответственно,

$v_{yB}$  – скорость ударной волны,

$\gamma$  – показатель адиабаты,

$R$  – газовая постоянная.

Поправочные функции  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  позволяют учитывать противодавление и зависят от соотношения  $c^2/v_{yB}(t)^2$ .

Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенный в работах [5, 6], показал, что для скорости движения фронта ударной волны, на всем интервале времени расширения продуктов детонации электрического взрыва как легкоплавких ( $v_{yB_{Cu \min}} = 3200 \text{ М/с}$ ), так и тугоплавких ( $v_{yB_{W \min}} = 4000 \text{ М/с}$ ) проводников, выполняется соотношение:

$$v_{yB}(t)^2 > c^2, \quad (3)$$

что дает возможность не учитывать противодавление ( $f_1 \approx f_2 \approx f_3 \approx 1$ ).

В работах [5, 6] приводится закон изменения радиуса цилиндрической ударной волны

$$r_{yB}(t) = \left( \frac{W_{yB} t^2}{\rho_0} \right)^{1/4}, \text{ который можно связать со}$$

скоростью ее распространения и давлением за фронтом (см. выражение 2) через энергию, передаваемую от СВМГ, взрывающемуся проводнику на интервале времени  $t^* \leq t < t^{**}$  (см. выражение 1) с учетом (3):

$$v_{yB}(t) = \frac{1}{2\sqrt{t}} \sqrt[4]{\frac{W_{yB}}{\rho_0}}, \quad (4)$$

$$P_{ПД}(t) = \frac{1}{2t(\gamma+1)} \sqrt{W_{yB} \rho_0} \text{ или} \quad (5)$$

$$P_{\text{ПД}}(t) = \frac{\rho_0^2 l}{2t(\gamma+1)} \frac{3d^2 I_2}{2D \left[ \mu_0 \pi (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) K(r_{\text{CP}}/l^*) \right]} \times \sqrt{\frac{P_{\text{ЭВП}}^3}{40\pi^3 \rho_{\text{ЭВП}}^3 (W_L^*)^3}} \times \left[ \frac{1}{(t^*)^5} \left( \ln \left( \frac{m \cdot D \cdot t^*}{M \cdot l^*} \right) - 0.6 \right)^2 - \frac{1}{(t^{**})^5} \left( \ln \left( \frac{m \cdot D \cdot t^{**}}{M \cdot l^*} \right) - 0.6 \right)^2 \right] \quad (6)$$

На рис. 2 представлены временные зависимости изменения давления продуктов детонации, образующихся при электрическом взрыве медных проводников различной длины. В качестве источника тока рассматривался СВМГ, параметры которого выбирались из условия реализации механизма быстрого электрического взрыва (плотность тока вводимого в проводник  $j \approx 10^8 \text{ А/см}^2$ ).

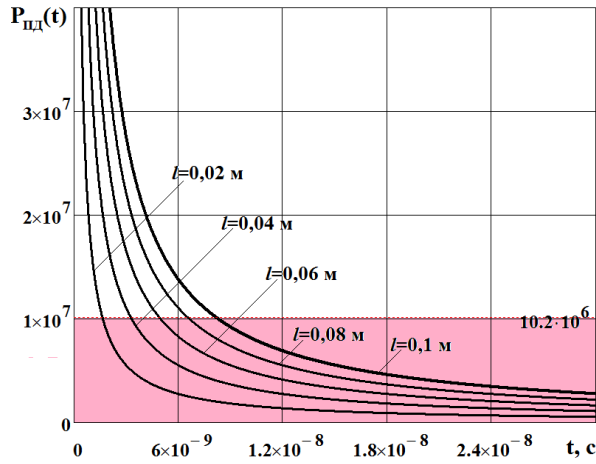


Рис. 2. Временные зависимости изменения давления продуктов детонации, образующихся при электрическом взрыве медных проводников одинакового радиуса ( $r_0 = 0,08 \text{ мм}$ ) и различной длины

Анализируя данные зависимости, необходимо заметить, что при уменьшении длины медного ЭВП увеличивается скорость изменения давления продуктов детонации, а, следовательно, уменьшается пауза тока. Именно уменьшение давления продуктов детонации до критического значения  $P_{\text{ПДкр}}$  будет характеризовать длительность существования паузы тока. При  $P_{\text{ПД}} = P_{\text{ПДкр}}$  расширение газообразных продуктов детонации приводит к тому, что и средняя длина пробега достигает критического значения, число носителей заряда быстро увеличивается, возникает электрическая дуга и начинается вторичный пробой.

В экспериментальных работах [5, 6] получены численные значения критического давления

( $P_{\text{ПДкр}} = 10,2 \text{ МПа}$ ), при котором происходил электрический пробой продуктов детонации электрического взрыва легкоплавких проводников (рис. 2). В этом случае выражение (6) можно переписать для определения длительности существования паузы тока:

$$t_{\text{ПТ}} = \frac{\rho_0^2 l}{2P_{\text{ПДкр}}(\gamma+1)} \frac{3d^2 I_2}{2D \left[ \mu_0 \pi (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) K(r_{\text{CP}}/l^*) \right]} \times \sqrt{\frac{P_{\text{ЭВП}}^3}{40\pi^3 \rho_{\text{ЭВП}}^3 (W_L^*)^3}} \times \left[ \frac{1}{(t^*)^5} \left( \ln \left( \frac{m \cdot D \cdot t^*}{M \cdot l^*} \right) - 0.6 \right)^2 - \frac{1}{(t^{**})^5} \left( \ln \left( \frac{m \cdot D \cdot t^{**}}{M \cdot l^*} \right) - 0.6 \right)^2 \right] \quad (7)$$

Показатель адиабаты  $\gamma$  определяется следующим соотношением [5, 6]:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}, \quad (8)$$

где  $c_v = \frac{iR}{2}$  и  $c_p = \frac{(i+2)R}{2}$  – теплоемкости газа при постоянном объеме и давлении соответственно,  $i$  – число степеней свободы газа.

Принимая допущение, что взрыв ЭВП происходит в среде, состоящей из двухатомных молекул (воздух в основном представляет собой смесь двухатомных молекул: азот  $\approx 79\%$  и кислород  $\approx 21\%$ ), можно положить, что  $i = 5$ . Следовательно, учитывая, что  $c_v = \frac{5R}{2}$ ,  $c_p = \frac{7R}{2}$  и  $\gamma = \frac{7}{5}$ , выражение (7)

можно переписать в следующем виде:

$$t_{\text{ПТ}} = \frac{5\rho_0^2 l}{24P_{\text{ПДкр}}} \frac{3d^2 I_2}{2D \left[ \mu_0 \pi (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) K(r_{\text{CP}}/l^*) \right]} \times \sqrt{\frac{P_{\text{ЭВП}}^3}{40\pi^3 \rho_{\text{ЭВП}}^3 (W_L^*)^3}} \times \left[ \frac{1}{(t^*)^5} \left( \ln \left( \frac{m \cdot D \cdot t^*}{M \cdot l^*} \right) - 0.6 \right)^2 - \frac{1}{(t^{**})^5} \left( \ln \left( \frac{m \cdot D \cdot t^{**}}{M \cdot l^*} \right) - 0.6 \right)^2 \right] \quad (9)$$

На рис. 3 и 4 представлены зависимости длительности паузы тока для медного и свинцового ЭВП радиусом  $r_0 = 0,08 \text{ мм}$  (условие реализации быстрого механизма электрического взрыва). Как и в предыдущем случае, источником тока являлся спиральный ВМГ, параметры которого выбирались из второго условия реализации механизма быстрого электрического взрыва (плотность тока вводимого в ЭВП  $j \approx 10^8 \text{ А/см}^2$ ).

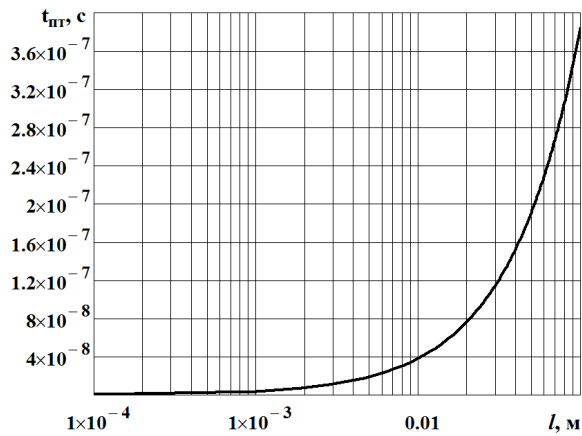


Рис. 3. Зависимость времени существования паузы тока от длины медного ЭВП радиусом  $r_0 = 0,08$  мм

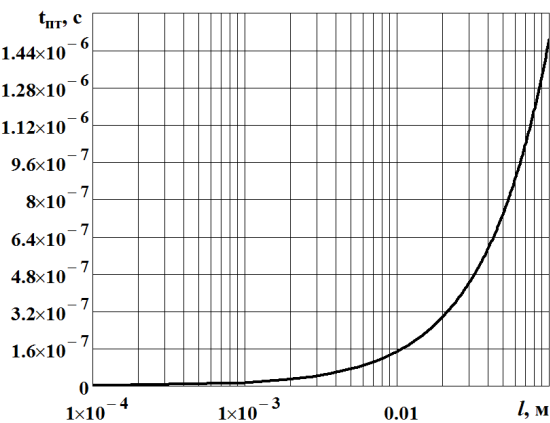


Рис. 4. Зависимость времени существования паузы тока от длины свинцового ЭВП радиусом  $r_0 = 0,08$  мм

## Выводы

Анализируя зависимости, представленные на рис. 3 и 4, необходимо заметить, что, варьируя материал и длину ЭВП, можно изменять длительность паузы тока (время срабатывания ключа) от наносекундного (для  $l \leq 0,025$  м) до микросекундного (для  $l > 0,025$  м) диапазонов.

## ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОВИБУХОВИХ ПРОВІДНИКІВ НА ХАРАКТЕР ВТОРИННОГО ПРОБОЮ ПРОДУКТІВ ДЕТОНАЦІЇ

Д.Б. Кучер, Р.А. Шаров, Л.В. Литвиненко, М.М. Коросченко, О.І. Фик

В роботі розглядається можливість застосування явища вторинного пробоя продуктів детонації, що виникають при швидкому електричному вибуху легкоплавких провідників, для створення швидкодіючих комутаторів (ключів).

**Ключові слова:** електровибуховий провідник, етапи швидкого електричного вибуху, пауза струму, спіральний вибухомігнотний генератор, модель миттєвого сильного вибуху циліндричної конфігурації, легкоплавкі та тугоплавкі провідники.

## THE INFLUENCE OF ELECTRICAL EXPLOSION CONDUCTORS PARAMETERS ON CHARACTER OF SECONDARY BREAKDOWN DETONATION PRODUCTS

D.B. Kucher, R.A. Sharov, L.V. Litvinenko, N.N. Koroschenko, A.I. Fyik

The applicability of the secondary breakdown of detonation products, generated by rapid electrical explosion of easily-melting conductors, to create a high-speed switches (keys) is presented in this work.

**Keywords:** electrical explosion conductor, stages of rapid electrical explosion, pause of the current, spiral explosion generator, the model of momentary strong explosion of a cylindrical configuration, easily and hardly melting conductors.

Таким образом, можно сделать вывод о применимости явления вторичного пробоя продуктов детонации при электрическом взрыве легкоплавких проводников для создания быстродействующих ключей. При этом время срабатывания каждого ключа можно варьировать в широком диапазоне путем изменения материала и длины легкоплавкого проводника.

## Список литературы

1. Кравченко В.И. Радиозлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В.И. Кравченко, Е.А. Болотов, Н.И. Летунова; Под ред. В.И. Кравченко. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
2. Бурцев В.А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В.А. Бурцев, И.В. Калинин, А.В. Лучинский. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 342 с.
3. Ткаченко С.И. Возможные сценарии развития вторичного пробоя при электрическом взрыве проводников в вакууме и воздухе / С.И. Ткаченко, А.Р. Мингалеев, Романова и др. // Материалы Научно-коорд. сессии «Исследования неидеальной плазмы» под рук. академика В.Е. Фортва. – М.: ОИВТ РАН, 2007. – С. 46-52.
4. Кучер Д.Б. Длительность механизма быстрого электрического взрыва проводников под воздействием токов спирального взрывомігнотного генератора / Д.Б. Кучер, Т.В. Зонтова // Збірник наукових праць Академії ВМС імені П.С. Нахімова. – Севастополь: АВМС імені П.С. Нахімова, 2012. – Вип. 1(9). – С. 130-135.
5. Баршпольцев Д.В. Отличия генерации ударных волн и развития вторичного пробоя при электрическом взрыве в воздухе тонких проводников из различных материалов / Д.В. Баршпольцев, С.Ю. Гуськов, Г.В. Иваненков и др. // Материалы XXXIV между. (Звенигородской) конференции по физике плазмы м УТС, 2007. – С. 78-79.
6. Джонс Д. Измерения фронта ионизации цилиндрических ударных волн, возникающих при взрыве проволочек, методом микроволнового доплеровского смещения / Д. Джонс, Р. Галлет // Электрический взрыв проводников; под ред. А.А. Рухадзе. – М.: Мир, 1965. – С. 157-171.

Поступила в редколлегию 12.08.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.