

УДК 621.396.6

Д.Б. Кучер<sup>1</sup>, Т.В. Зонтова<sup>2</sup>, Б.Д. Кучер<sup>1</sup>, Е.А. Томишин<sup>1</sup><sup>1</sup> Севастопольский национальный технический университет, Севастополь<sup>2</sup> Академия военно-морских сил имени П.С. Нахимова, Севастополь

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ПРОБОЯ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОДНИКОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МОЩНЫХ ПОЛИИМПУЛЬСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В работе выявлена связь параметров электровзрывающихся проводников с длительностью паузы тока, которая определяет быстродействие коммутаторов, формирующих мощные полиимпульсные излучения наносекундной длительности.

**Ключевые слова:** электровзрывающийся проводник, вторичный пробой.

### Введение

Результаты многочисленных экспериментальных исследований стойкости современных радиоэлектронных средств (РЭС) показали их высокую чувствительность к воздействию периодически повторяющихся сверхкоротких электромагнитных импульсов (полиимпульсных излучений) [1 – 3]. В то же время современные генераторы мощных электромагнитных излучений (МЭМИ) способны излучать только моноимпульсное воздействие достаточно большой длительности (сотни микросекунд). Для ее уменьшения используется механизм электрического взрыва проводников, запитанных от генератора. Вопросы формирования мощных полиимпульсных излучений для энергетического воздействия на чувствительные элементы современных РЭС в современной литературе практически не рассматриваются. Это, прежде всего, связано с невозможностью использования существующих средств коммутации (газовых разрядников и варисторов) для формирования полиимпульсных излучений.

Основным недостатком разрядников является длительное время реакции (до единиц микросекунд), что делает невозможным их применение на всем интервале работы генератора МЭМИ [3]. К основным недостаткам варисторов можно отнести [3]:

- невозможность обеспечения работы варисторов при параллельном включении (необходимо строгое совпадение их ВАХ);
- значительное снижение характеристик при нагревах импульсными токами свыше 100 °С.

В этой связи наиболее перспективным способом осуществления коммутации при формировании последовательности мощных импульсных воздействий является вторичный пробой при электрическом взрыве проводников. Вторичный пробой возникает на третьем этапе электрического взрыва, когда материал проводника принимает свойства газа с высокой плотностью и температурой. Данный этап

характеризуется высокими значениями давления газообразных продуктов электрического взрыва ( $\approx 34 \cdot 10^3$  Атм) и малой средней длиной пробега. Поэтому пробой между электродами, удерживающими электровзрывающийся проводник (ЭВП), не возникает и образуется пауза тока [4, 5]. Длительность паузы тока характеризует время до образования вторичного пробоя и лежит достаточно в широком диапазоне [4, 5]. Поэтому целью данной работы является определение основных параметров ЭВП, отвечающих за длительность существования паузы тока.

### Основная часть

Для формирования последовательности импульсных воздействий наносекундной длительности можно предложить структуру (рис. 1), генератор МЭМИ, нагрузку (антенную систему) и набор ЭВП, последовательно включаемых в цепь ключами (коммутаторами). Наличие в схеме ЭВП обуславливается необходимостью обострения электрической мощности, передаваемой с генератора на нагрузку [1 – 3].

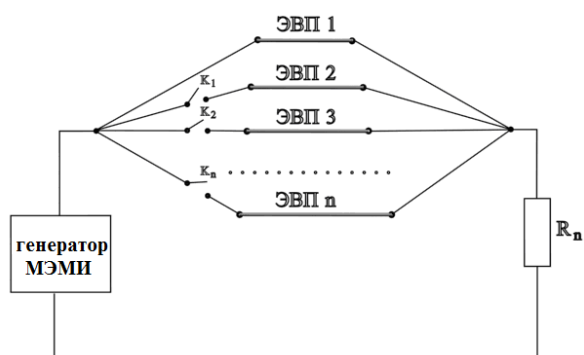


Рис. 1. Структурное расположение ЭВП для формирования последовательности мощных наносекундных импульсных воздействий

Момент времени срабатывания каждого ключа определяется длительностью нагрева ( $\tau_{\phi}$ ) и превращения предыдущего ЭВП в мелкодисперсную массу

и экспериментально определенным периодом повторения воздействий ( $T_{\text{повт}}$ ).

В работах [1 – 3] показано, что функциональное поражение современных элементов РЭС полиимпульсными воздействиями наблюдалось при выполнении следующего условия:

$$\tau_{\text{ф}}/T_{\text{повт}} \geq 5 \cdot 10^{-7}. \quad (1)$$

Для создания быстродействующих коммутаторов (рис. 1) можно также использовать явление электрического взрыва, а точнее явление вторичного пробоя. Механизм работы таких коммутаторов будет включать в себя три основных этапа. 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 увеличе-

нием средней длины пробега (ключ открыт). Третьему этапу соответствует вторичный пробой продуктов электрического взрыва (замыкание цепи ключом).

Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенный в работах [4, 5], 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 (до  $10^{-14} \div 10^{-13}$  с) шунтирующий пробой вдоль поверхности проволоочки (по парам металла в воздухе) и эффективный перехват разрядного тока коронной (рис. 2, а, в) [4].

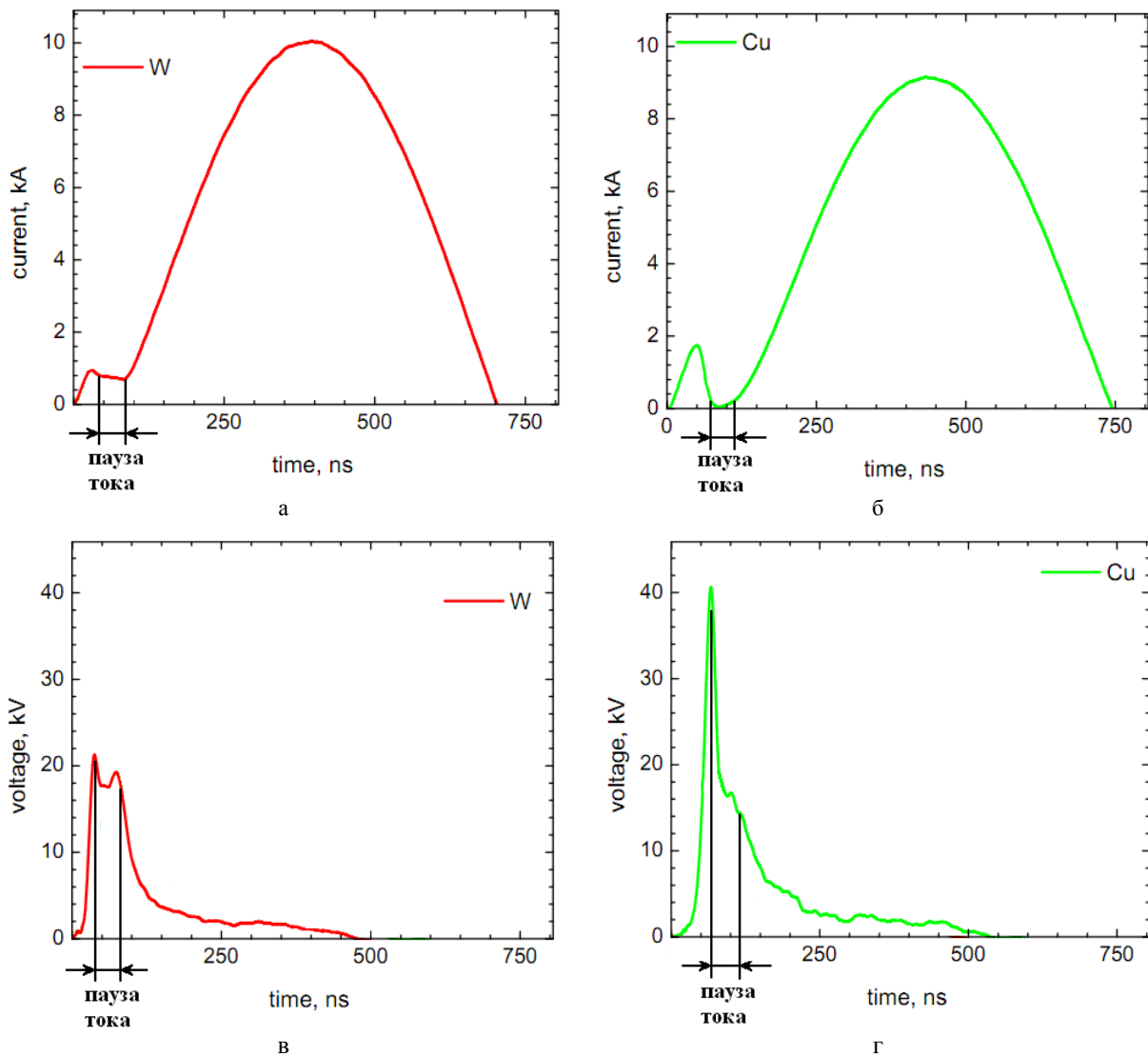


Рис. 2. Осциллограммы тока (а, б) и напряжения (в, г) при электрическом взрыве вольфрамового (а, в) и медного (б, г) проводников диаметром  $0,025 \cdot 10^{-3}$  м и длиной  $12 \cdot 10^{-3}$  м с учетом возникновения паузы тока и вторичного пробоя

При реализации данного вида вторичного пробы на протяжении всей паузы тока разрядный промежуток только частично сохраняет свои изолирующие свойства (рис. 2, а, в), следовательно, на втором этапе работы такого коммутатора невозможно полностью осуществить разрыв цепи.

Для второй группы, объединяющей легкоплавкие и хорошо проводящие металлы (свинец, серебро, алюминий, медь, золото) характерно то, что вторичный 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. 2, б, г) [4].

Таким образом, для создания быстродействующих ключей наиболее подходит вторая группа ЭВП, для которых длительность паузы тока (второго этапа) зависит от скорости расширения, а, следовательно, и от давления (плотности) уже ионизированных продуктов электрического взрыва.

В качестве генератора МЭМИ выберем спиральный взрывомангнитный генератор (ВМГ), рассмотренный в работе [6]. В этом случае на единицу длины легкоплавкого ЭВП при генерации ударной волны во временном интервале  $t^* \leq t < t^{**}$  затрачивается энергия:

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

где  $t^*$  и  $t^{**}$  – времена достижения температуры плавления и превращения ЭВП в мелкодисперсную массу;

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

где  $I_2$  – постоянный ток, протекающий в контуре ВМГ до подрыва взрывчатого вещества (ВВ);  $P_{\text{ЭВП}}$ ,  $\rho_{\text{ЭВП}}$  и  $l$  – удельное сопротивление, плотность и длина ЭВП соответственно;  $\rho_0$  – плотность окружающего ЭВП газа;  $W_L^*$  – удельная энергия сублимации ЭВП;  $d$  – диаметр проволоки соленоида ВМГ;  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы витков соленоида ВМГ в начале и в конце спирали соответственно;  $l^* = d \cdot N^* + kN^*$  – первоначальная длина соленоида ВМГ;  $N^*$  – первоначальное количество витков соленоида;  $k$  – расстояние между витками,  $K(r_{\text{ср}} / l^*)$  –

поправочный множитель;  $r_0$  и  $m$  – начальный радиус заряда и масса ВВ,  $M$  – масса лайнера ВМГ,  $D$  – скорость детонации ВВ.

Скорость движения  $v_{\text{ПД}}$ , плотность  $\rho_{\text{ПД}}$ , давление  $P_{\text{ПД}}$  и температуру  $T_{\text{ПД}}$  ионизированных продуктов детонации при электрическом взрыве можно определить, основываясь на модели мгновенного сильного взрыва цилиндрической конфигурации [4, 5]:

$$\begin{cases} v_{\text{ПД}}(t) = \frac{2}{\gamma+1} v_{\text{УВ}}(t) \left( 1 - \frac{c^2}{v_{\text{УВ}}(t)^2} \right) = \frac{2}{\gamma+1} v_{\text{УВ}}(t) f_1(t), \\ P_{\text{ПД}}(t) = \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \rho_0 \left( 1 + \frac{2}{\gamma-1} \frac{c^2}{v_{\text{УВ}}(t)^2} \right) = \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \rho_0 f_2(t), \\ \begin{cases} P_{\text{ПД}}(t) = \frac{2}{\gamma+1} \rho_0 v_{\text{УВ}}(t)^2 \left( 1 - \frac{\gamma-1}{2\gamma} \frac{c^2}{v_{\text{УВ}}(t)^2} \right) = \\ = \frac{2}{\gamma+1} \rho_0 v_{\text{УВ}}(t)^2 f_3(t), \\ T_{\text{ПД}}(t) = \frac{P_{\text{ПД}}(t)}{R \rho_{\text{ПД}}(t)}, \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

где  $\rho_0$  и  $c$  – плотность газа и скорость звука перед ударной волной соответственно;  $v_{\text{УВ}}$  – 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  $\frac{c^2}{v_{\text{УВ}}(t)^2}$ .

Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенный в работах [4, 5], показал, что для скорости движения фронта ударной волны на всем интервале времени расширения продуктов детонации электрического взрыва как легкоплавких ( $v_{\text{УВCu min}} = 3200 \text{ М/с}$ ), так и тугоплавких ( $v_{\text{УВW min}} = 4000 \text{ М/с}$ ) проводников, выполняется соотношение:

$$v_{\text{УВ}}(t)^2 > c^2, \quad (4)$$

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

В работе [4] приводится закон изменения радиуса цилиндрической ударной волны  $r_{\text{УВ}}(t) = \left( \frac{W_{\text{УВ}} t^2}{\rho_0} \right)^{1/4}$ , который можно связать с давлением за фронтом (см. выражение 3) через энергию, передаваемую от ВМГ, взрывающемуся проводнику на интервале времени  $t^* \leq t < t^{**}$ :

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

На рис. 3 представлены временные зависимости изменения давления продуктов детонации, образующихся при электрическом взрыве медных проводников различной длины. В качестве источника тока рассматривался спиральный ВМГ, параметры которого выбирались из условия реализации механизма быстрого электрического взрыва (плотность тока вводимого в проводник  $j \approx 10^8 \text{ А/см}^2$ ). 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 [4, 5] получены численные значения критического давления ( $P_{\text{ПДкр}} = 10,2 \text{ МПа}$ ), при котором происходил электрический пробой продуктов детонации электрического взрыва медных проводников (рис. 3).

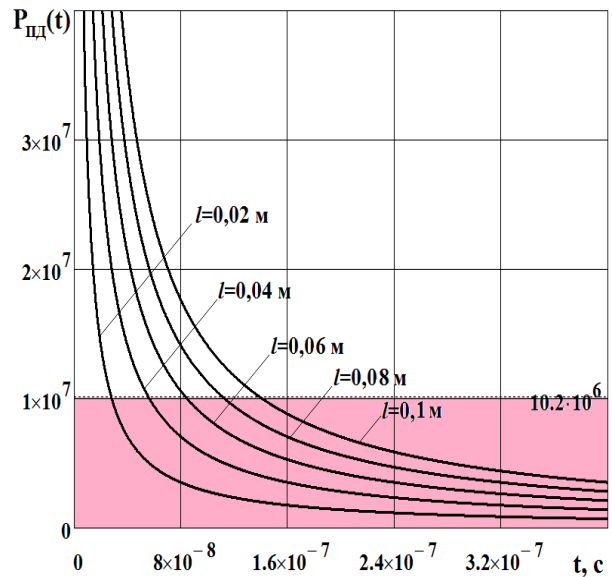


Рис. 3. Временные зависимости изменения давления продуктов детонации, образующихся при электрическом взрыве медных проводников одинакового радиуса ( $r_0 = 0,08 \text{ мм}$ ) и различной длины

В этом случае выражение (5) можно переписать для определения длительности существования паузы тока:

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

На рис. 4 представлена зависимость длительности паузы тока для медного ЭВП радиусом  $r_0 = 0,08 \text{ мм}$ .

Как и в предыдущем случае, источником тока являлся спиральный ВМГ.

Анализируя зависимость, представленную на рис. 4, необходимо заметить, что, варьируя длину медного ЭВП, можно изменять длительность паузы тока (время срабатывания ключа) от наносекундного (для  $l \leq 0,025 \text{ м}$ ) до микросекундного (для  $l > 0,025 \text{ м}$ ) диапазонов.

### Вывод

Таким образом, учитывая полученные зависимости для длительности паузы тока, можно сделать вывод о применимости явления вторичного пробоя продуктов детонации при электрическом взрыве легкоплавких проводников для создания быстродействующих ключей (рис. 4). При этом время срабатывания каждого ключа, определяемое длительностью первого и второго этапа электрического взрыва предыдущего ЭВП, можно варьировать в широком диапазоне путем изменения длины легкоплавкого проводника.

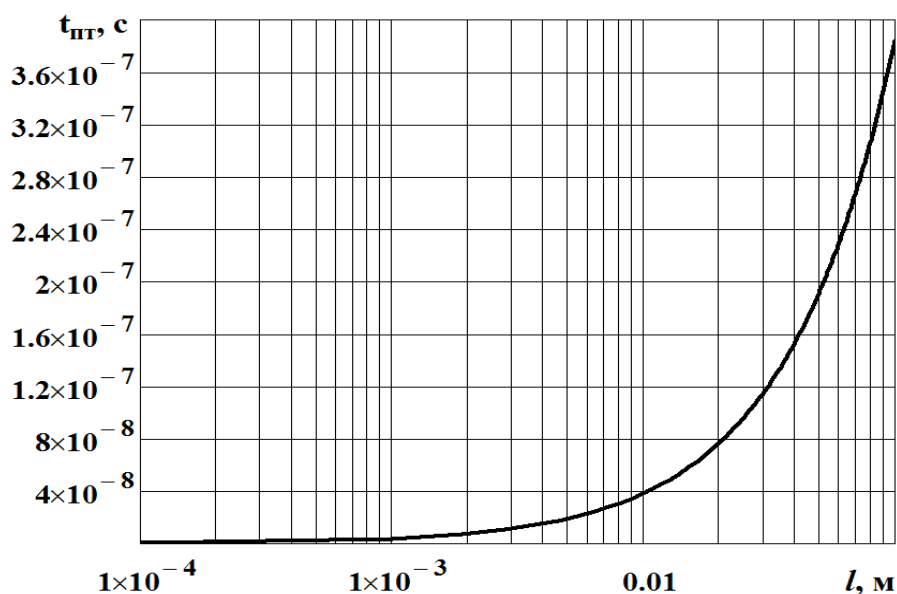


Рис. 4. Зависимость времени существования паузы тока от длины медного ЭВП радиусом  $r_0 = 0,08$  мм

### Список литературы

1. К исследованиям электромагнитной стойкости при короткоимпульсных воздействиях / В.В. Жук, Ю.Ф. Лонин, А.В. Столярчук [и др.] // *Механика та машинобудування*. – Х.: ХДПУ, 2005. – № 2. – С. 287-295.
2. Здухов Л. Вероятностный анализ устойчивости канала передачи данных к действию периодически повторяющейся импульсной помехи / Л. Здухов, Ю. Парфенов, Б. Титов // *Технологии ЭМС, Издательский дом «Технологии»*. – 2009. – №1 (28). – С. 25-32.
3. Кравченко В.И. *Электромагнитное оружие* / В.И. Кравченко. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 185 с.
4. Интерпретация экспериментальных данных по электрическому взрыву тонких проволок в воздухе / С.А. Пикуз, Д.А. Ткаченко, Д.А. Баршпольцев и др. // *Письма в ЖТФ*. – 2007. – Том 33, вып. 15. – С. 47-55.

5. Лебедев С.В. *Металлы в процессе быстрого нагревания электрическим током большой плотности* / С.В. Лебедев, А.И. Савватимский // *Успехи физических наук*. – Том 144, вып.2. – С. 215-248.

6. Кучер Д.Б. Особенности генерирования мощных электромагнитных помех спиральным взрывомагнитным генератором / Д.Б. Кучер, С.В. Тараненко, А.И. Харланов, Ю.М. Бусяк // *Системы обработки информации*. – Х.: ХУ ПС, 2009. – Вып. 4(78). – С. 86-90.

Поступила в редколлегию 1.03.2012

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

### ВИКОРИСТАННЯ ЯВИЩА ВТОРИННОГО ПРОБОЮ ПРИ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ВИБУХУ ПРОВІДНИКІВ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ПОТУЖНИХ ПОЛІІМПУЛЬСНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

Д.Б. Кучер, Т.В. Зонтова, Б.Д. Кучер, Є.О. Томішин

У роботі виявлений зв'язок параметрів електровибухових провідників із тривалістю паузи струму, що визначає швидкодію комутаторів, що формують потужні поліімпульсні випромінювання наносекундної тривалості.

**Ключові слова:** електровибуховий провідник, вторинний пробій.

### THE PHENOMENON OF SECOND BREAKDOWN DURING THE ELECTRIC EXPLOSION CONDUCTORS FOR FORMING POWERFUL MANY PULSE RADIATION

D.B. Kucher, T.V. Zontova, B.D. Kucher, Ye.A. Tomishin

In this work, the connection parameters of electrical explosion conductor with the duration of the pause current, which determines the performance of switches that form the powerful many pulse radiation of nanosecond duration.

**Keywords:** electrical explosion conductor, the second breakdown.