

УДК 621.396.6

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ ПРИ БЫСТРОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОДНИКОВ

В работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований временных параметров импульсных воздействий при применении явления быстрого электрического взрыва к проводникам. Построены зависимости длительности фронта и спада импульса от различных параметров электровзрывающих проводников.

**Ключевые слова:** электровзрывающийся проводник, быстрый электрический взрыв, взрывомагнитный генератор.

### Введение

Формирование мощных электромагнитных излучений (МЭМИ) наносекундной длительности возможно путем применения быстрого механизма электрического взрыва к проводникам. Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенных в работах [1, 2], показал, что данный механизм реализуется при плотностях тока  $j \approx 10^7$  А/см<sup>2</sup> для электровзрывающихся проводников (ЭВП) диаметром  $2a_0 \leq 0,2$  мм. Указанными параметрами генерируемого тока обладает спиральный взрывомагнитный генератор (ВМГ), в качестве нагрузки которого и можно использовать ЭВП.

Целью данной работы является исследование временных параметров МЭМИ, формируемых при быстром электрическом взрыве проводников.

### Основной материал

Структурно механизм быстрого электрического взрыва включает несколько этапов (рис. 1), определяющих временные параметры формируемого импульса (длительность фронта и спада).

Первый этап характеризуется началом нагрева проводника при вводе в систему больших плотностей тока вплоть до его перехода в жидкое состояние. Следовательно, длительность первого этапа (фронт импульса) при неизменных размерах ЭВП и заданном начальном токе будет определяться температурой плавления проводника.

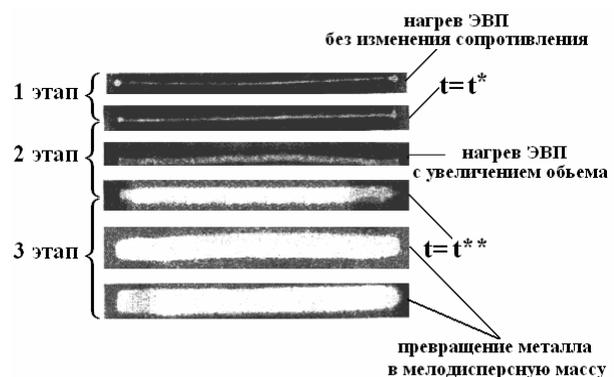


Рис. 1. Фотографии изменения состояния ЭВП диаметром 0,025 мм и длиной 0,7 см в различные моменты времени взрыва

На втором этапе, определяющем длительность спада формируемого импульса, сопротивление ЭВП начинает резко возрастать, сохраняя металлический характер до момента времени  $t^{**}$ . Кроме того, при  $t = t^*$  ЭВП начинает быстро расширяться, так что вблизи момента  $t^{**}$  металл оказывается превратившимся в мелкодисперсную массу (золь) с размером частиц меньше  $1000 \text{ \AA}$  (третий этап) [1].

Закон изменения тока на первом этапе электрического взрыва при расширении цилиндрического лайнера под воздействием продуктов детонации взрывчатого вещества (ВВ) можно записать, учитывая результаты исследований, проведенных в работах [1, 3]:

$$i_{\text{э}}(t) = I_2 R_{\text{ЭП}} \frac{3d^2}{\mu_0 \pi (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) K(r_{\text{н0}} / l^*)} \times \left[ \frac{2 \operatorname{arctgh} \left( \frac{mD(l^* - 2Dt)}{\sqrt{l^* m D^2 (m l^* - 4B(t))}} \cdot (2B(t)D - m l^* D) \right)}{2D \sqrt{l^* m D^2 (m l^* - 4B(t))}} \right] \times \left[ \frac{\ln \left[ \frac{m}{M l^*} \left( Dt - \frac{B(t)}{m} + \frac{D^2 t^2}{l^*} \right) \right]}{2D} \right] \quad (1)$$

где  $I_2$  – постоянный ток, протекающий в контуре до подрыва ВВ;  $R_{\text{ЭП}}$  – активное сопротивление ЭВП до начала плавления (первый этап);  $d$  – диаметр проволоки соленоида;  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы витков соленоида в начале и в конце спирали соответственно;  $l^* = dN^* + kN^*$  – первоначальная длина соленоида;  $N^*$  – первоначальное количество витков соленоида;  $k$  – расстояние между витками;  $K(r_{\text{ср}} / l^*)$  – поправочный множитель;  $r_0$  – начальный радиус заряда;  $m$  – масса ВВ;  $M$  – масса лайнера;  $D$  – скорость детонации;

$$B(t) = 2Mr_0 \cdot \sqrt{16 + \frac{2mD^2 t^2}{Mr_0^2} \cdot \frac{r_1 - r_2}{l^* - d}}$$

Основываясь на (1) и предполагая, что на интервале времени  $\tau \leq t < t^*$   $B(t) \ll m l^*$  и  $\frac{D^2 t^2}{l^*} \gg \frac{B(t)}{m} \ll Dt$ , запишем выражение для энергии, передаваемой от ВМГ к ЭВП на первом этапе:

$$W_{\text{ЭП}} = \frac{9I_2^2 R_{\text{ЭП}}^3 d^4}{\mu_0^2 \pi^2 (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)^2 K^2(r_{\text{н0}} / l^*)} \times \left[ \begin{aligned} & 4,186(t^* - \tau) - \\ & \left[ t^* \ln \left( \frac{mDt^*}{Ml^*} \right) \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \ln \left( \frac{mDt^*}{Ml^*} \right) \right) + 2 \right] + \\ & + \tau \ln \left( \frac{mD\tau}{Ml^*} \right) \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \ln \left( \frac{mD\tau}{Ml^*} \right) + 2 \right), \end{aligned} \right] \quad (2)$$

где  $\tau$  – длительность переходного процесса, возникающего при подключении источника питания к ВМГ.

Выражение (2) получено при условии, что на первом этапе электрического взрыва выполняется условие:

$$R_{\text{ЭП}} = \text{const при } \tau \leq t \leq t^* \quad (3)$$

На рис. 2 представлены графические зависимости температуры нагрева ЭВП на первом этапе от времени работы ВМГ. Данные зависимости получены для различных материалов ЭВП, обладающих

одинаковыми конструктивными характеристиками (длина и диаметр каждого проводника составляли 0,3 м и 0,1 мм соответственно).

Параметры ВМГ выбирались из условия, что плотность ввода тока в ЭВП составляла  $j \approx 10^8 \text{ А/см}^2$  [1].

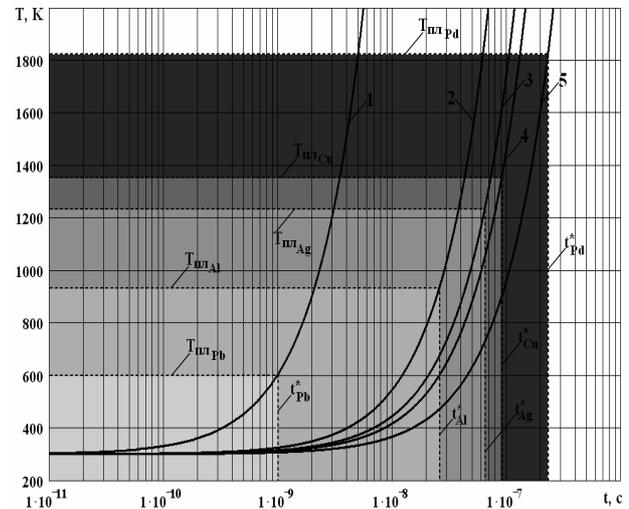


Рис. 2. Зависимости температуры нагрева проводника от времени работы ВМГ для различных материалов ЭВП: 1– свинец (Pb); 2– алюминий (Al); 3– серебро (Ag); 4– медь (Cu); 5– палладий (Pd)

Зависимости, представленные на рис. 2, показывают, что варьируя материал проводника, можно изменять длительность первого этапа электрического взрыва, зависящего от времени достижения температуры плавления ЭВП ( $T_{\text{пл}}$ ). Так как при генерации МЭМИ длительность первого этапа электрического взрыва характеризует фронт импульса, наименьший фронт будет при взрыве легкоплавких металлов ( $T_{\text{плPb}} = 600 \text{ К}$ ,  $t^* \approx 1,1 \text{ нс}$ ), а наибольший – тугоплавких ( $T_{\text{плPd}} = 1825 \text{ К}$ ,  $t^* \approx 0,23 \text{ мкс}$ ).

Для подтверждения полученных теоретических результатов были проведены экспериментальные исследования временных характеристик импульсных воздействий при применении явления быстрого электрического взрыва к проводникам, обладающим различной температурой плавления и конструктивными параметрами (схема эксперимента представлена на рис. 3).

Структурно данная схема экспериментальных исследований включает в себя:

- генератор мощных электромагнитных излучений NSG 3060 (фирма TESEQ, Швейцария) для проверки линий электропитания на электромагнитную стойкость;
- ЭВП, размещенный между электродами в разрядной камере;

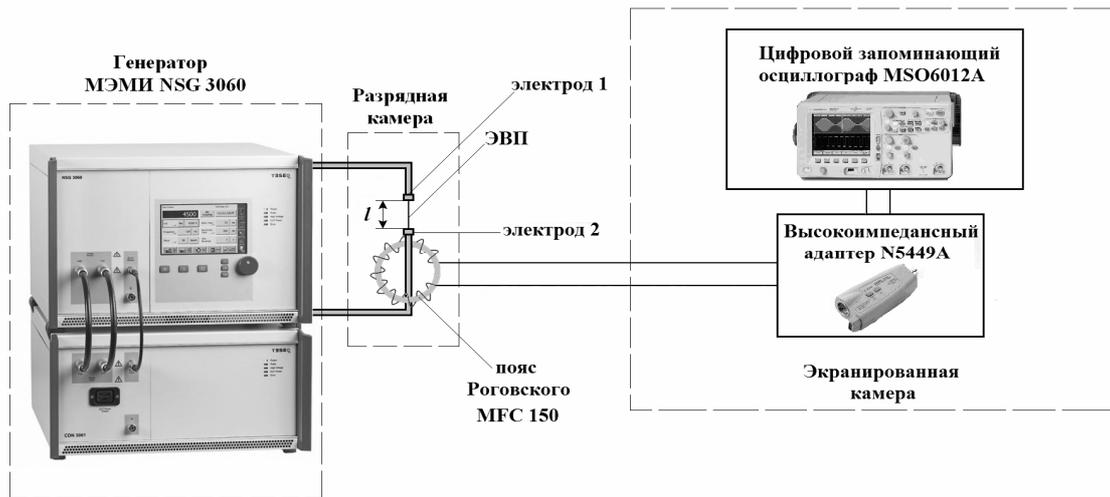


Рис. 3. Схема проведения эксперимента

– магнитный пояс или пояс Роговского (MFC 150), используемый для измерения тока, протекающего через ЭВП;

– экранированную камеру, в которой размещался цифровой запоминающий осциллограф MSO6012A, включенный в цепь через высокоимпедансный адаптер N5449A.

На рис. 4 представлены осциллограммы электрического взрыва проводников, обладающих различной температурой плавления и одинаковыми конструктивными параметрами.

Анализируя данные экспериментальные зависимости, необходимо заметить, что длительность фронта одиночного импульсного воздействия при неизменных конструктивных параметрах проводника будет принимать различное значение ( $\approx 19$  нс для свинца,  $\approx 970$  нс для меди и  $\approx 1,8$  мкс для вольфрама).

Кроме выбора материала проводника, длительность первого этапа (фронта МЭМИ) можно варьировать, изменяя площадь сечения ЭВП. На рис. 5 приведены графические зависимости, характеризующие нагрев свинцовых и палладиевых проводников различного сечения.

Следовательно, при неизменном выборе материала ЭВП путем варьирования площадью сечения можно менять в определенных пределах длительность первого этапа электрического взрыва как для легкоплавких ( $2,7 \cdot 10^{-11} \leq t^* \leq 1,8 \cdot 10^{-8}$  с), так и для тугоплавких ( $6 \cdot 10^{-9} \leq t^* \leq 3,8 \cdot 10^{-6}$  с) металлов. Выбор площади сечения ЭВП будет ограничен предельным значением радиуса  $r_0 \leq 0,1$  мм, превышение которого будет приводить к появлению микроскопических неоднородностей на первом этапе электрического взрыва [1 – 2].

На рис. 6, 7 представлены осциллограммы электрического взрыва проводников с различной температурой плавления и площадью сечения, но одинаковой длиной.

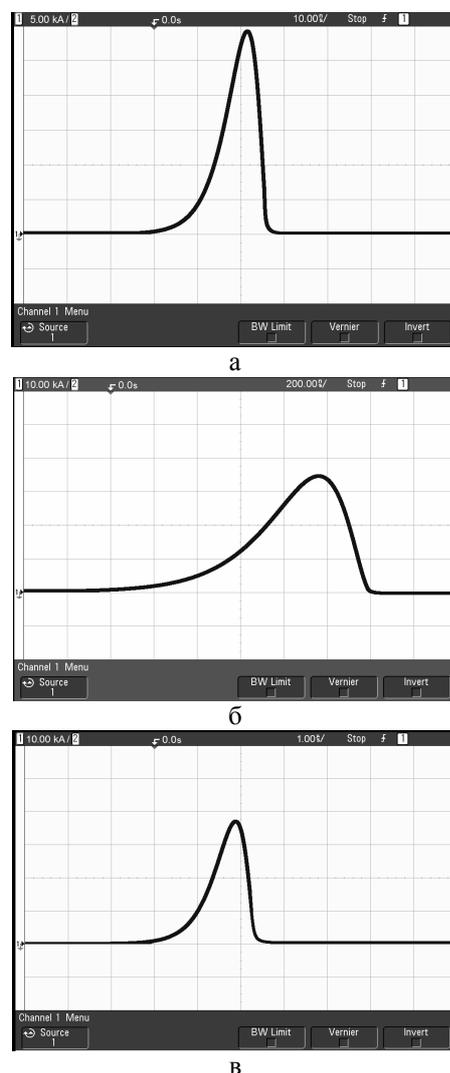


Рис. 4. Осциллограммы электрического взрыва проводников длиной 0,3 м и радиусом 0,1 мм:

- а – свинцовый  
(верт. разв. – 5 кА/дел, гориз. – 10 нс/дел);
- б – медный  
(верт. разв. – 10 кА/дел, гориз. – 2000 нс/дел);
- в – вольфрамовый  
(верт. разв. – 10 кА/дел, гориз. – 1 мкс/дел)

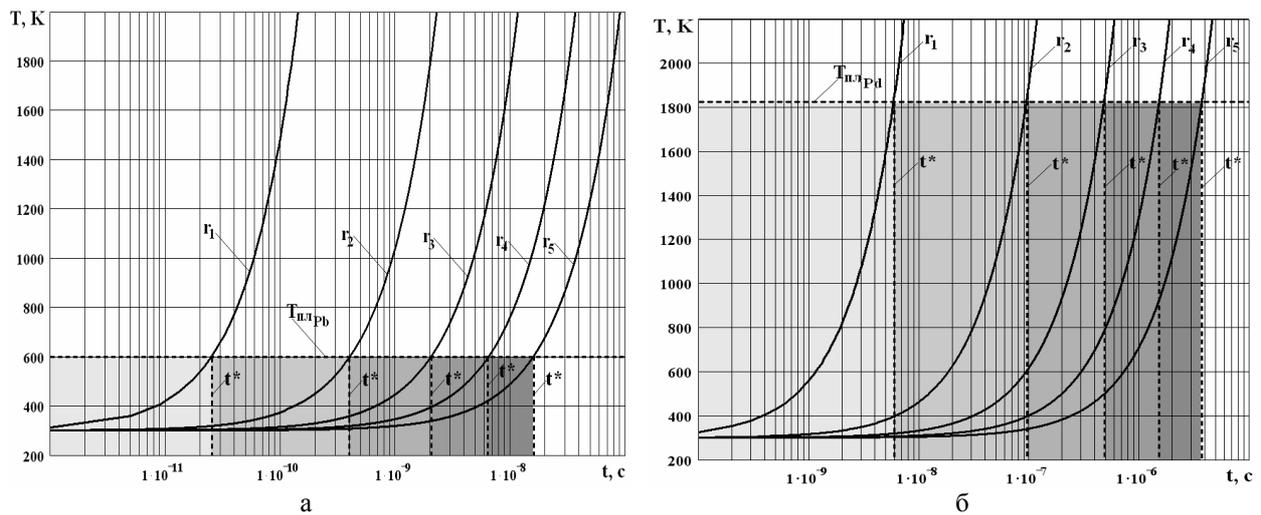


Рис. 5. Зависимости температуры нагрева свинцовых (а) и палладиевых (б) ЭВП различного радиуса от времени работы ВМГ:  $r_1 = 0,02$  мм;  $r_2 = 0,04$  мм;  $r_3 = 0,06$  мм;  $r_4 = 0,08$  мм;  $r_5 = 0,1$  мм

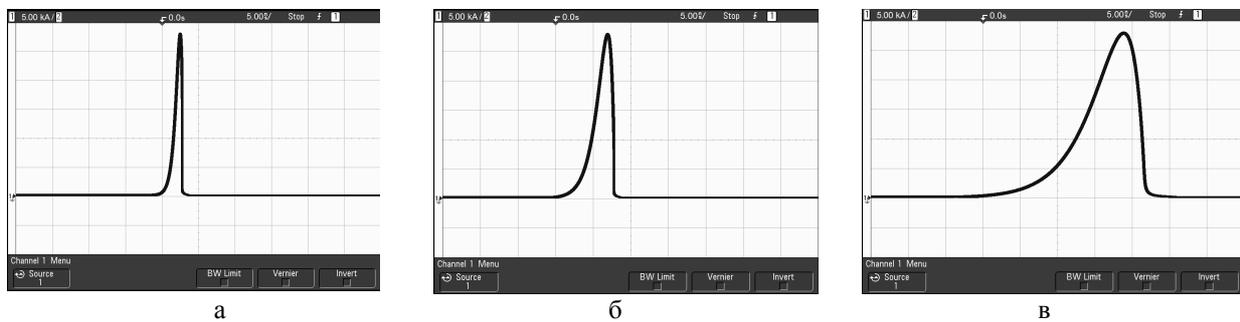


Рис. 6. Осциллограммы (вертикальная развертка 5 кА/дел, горизонтальная – 5 нс/дел) электрического взрыва свинцовых проводников длиной 0,3 м и радиусами: а – радиус - 0,06 мм, б – радиус - 0,08 мм, в – радиус - 0,1 мм

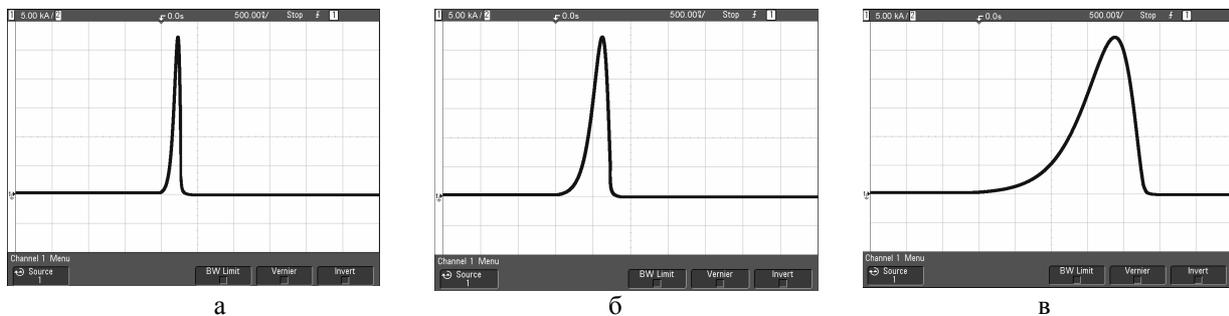


Рис. 7. Осциллограммы (вертикальная развертка 5 кА/дел, горизонтальная – 500 нс/дел) электрического взрыва вольфрамовых проводников длиной 0,3 м и радиусами: а – радиус - 0,06 мм, б – радиус - 0,08 мм, в – радиус - 0,1 мм

Таким образом, при применении механизма быстрого электрического взрыва к проводникам, обладающим различными радиусами сечения (от 0,06 до 0,1 мм) можно варьировать длительностью фронта формируемого воздействия: для легкоплавких (свинцовых) ЭВП  $\approx 2,1 \div 18$  нс (см рис. 6); для тугоплавких (вольфрамовых) проводников  $\approx 0,17 \div 1,8$  мкс (см. рис. 7).

Второй этап электрического взрыва определяет длительность спада формируемого импульса. Поэтому для спирального ВМГ, учитывая, что на вы-

бранном интервале времени ( $t^* \leq t < t^{**}$ ) соотно-

шение  $\frac{53mDt}{Ml^*} \gg 1$ , запишем выражение для длительности второго этапа

$$t^{**} \approx \sqrt[3]{\frac{m^2 D^2 A_2 l^3 (t^*)^5}{M^2 l^{*2} \left[ A_2 l^3 \left( \ln \left( \frac{mDt^*}{Ml^*} \right) - 0.6 \right)^2 - 20W^{**} D^2 (t^*)^5 \right]}} \quad (4)$$

Следовательно, длительность спада каждого импульса будет определяться конструктивными параметрами ВМГ и ЭВП, типом ВВ, материалом и размерами проводника, а также средой, в которой он расположен.

На втором этапе электрического взрыва существенное влияние на длительность процесса будет оказывать длина ЭВП. На рис. 8 представлены зависимости длительности второго этапа электрического взрыва различных материалов от длины проводника (радиус ЭВП – 0,1 мм).

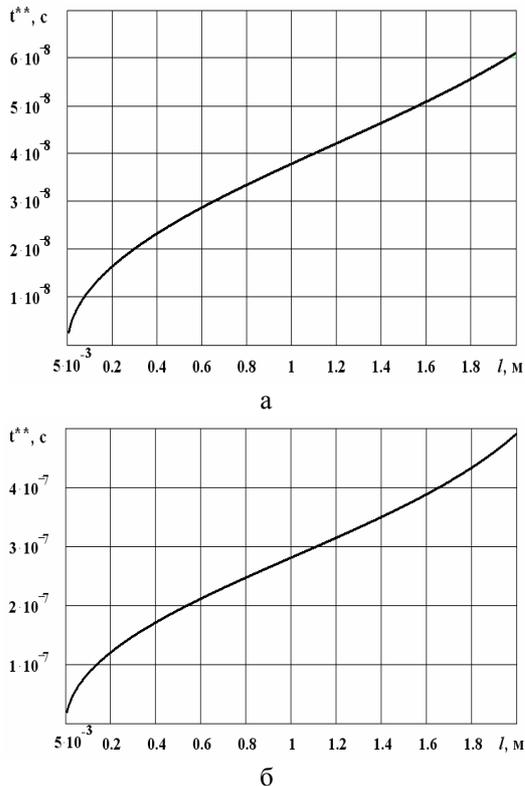


Рис. 8. Зависимости длительности второго этапа электрического взрыва от длины ЭВП, выполненного из свинца (а) и вольфрама (б)

Анализируя данные зависимости, необходимо заметить, что при изменении длины ЭВП от 5 мм до 2 м длительность второго этапа электрического взрыва будет возрастать в 5 – 6 раз.

На рис. 9, 10 представлены осциллограммы электрического взрыва проводников с различной длиной и температурой плавления, но одинаковой площадью сечения.

Анализируя данные экспериментальные зависимости, необходимо заметить, что при применении механизма быстрого электрического взрыва к ЭВП, обладающим различной длиной (от 0,05 до 0,5 м), можно варьировать длительностью спада импульса в следующих пределах:

- свинцовые ЭВП  $\approx 0,5 \div 1,8$  нс (см. рис. 9);
- вольфрамовые ЭВП  $\approx 30 \div 200$  нс (см. рис. 10).

Полученные экспериментальные данные изменения длительности фронта и спада одиночного им-

пульса хорошо согласуются с результатами теоретических исследований первого и второго этапов электрического взрыва.

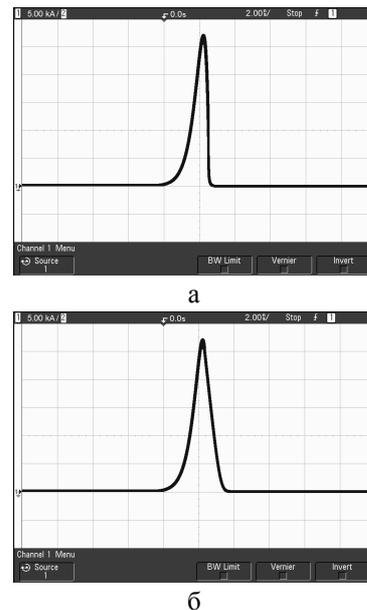


Рис. 9. Осциллограммы (вертик. развертка 5 кА/дел, гориз. – 2 нс/дел) электрического взрыва свинцовых ЭВП радиусом 0,06 мм и различной длины: а – 0,05 м, б – 0,5 м

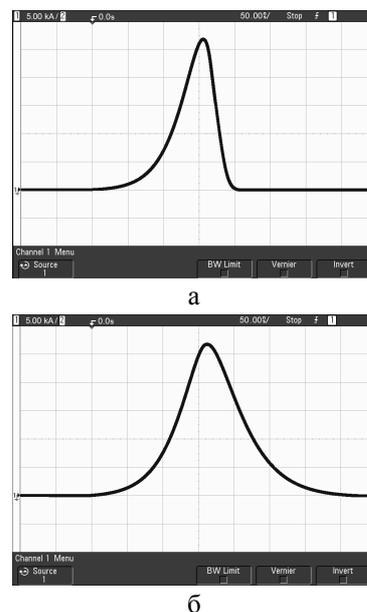


Рис. 10. Осциллограммы (вертик. развертка 5 кА/дел, гориз. – 50 нс/дел) электрического взрыва вольфрамовых ЭВП радиусом 0,06 мм и длиной: а – 0,05 м, б – 0,5 м

## Выводы

Таким образом, при реализации механизма быстрого электрического взрыва проводников можно изменять длительность фронта и спада формируемого импульсного воздействия путем выбора материала и конструктивных параметров ЭВП.

## Список литературы

1. Лебедев С.В. Металлы в процессе быстрого нагревания электрическим током большой плотности / С.В. Лебедев, А. И. Савватимский // Успехи физических наук. – Т. 144, Вып. 2. – 1984. – С. 215-250.

2. Иваненков Г.В. Обзор литературы по моделированию процессов электрического взрыва тонких проволок (часть 1) / Г.В. Иваненков, С.А. Пикуз, Т.А. Шелковенко и др. – М.: ФИАН, 2004. – 26 с.

3. Кучер Д.Б. Особенности формирования последовательности импульсных электромагнитных воздействий

при реализации механизма электрического взрыва проводников / Д.Б. Кучер, Л.В. Литвиненко, Т.В. Зонтова // 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние перспективы», Т. 1. Часть 2. Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии. – Х.: ХНУРЕ, 2011. – С. 233-236.

Поступила в редколлегию 1.08.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.Л. Афонин, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСНИХ ВПЛИВІВ, ФОРМОВАНИХ ПРИ ШВИДКОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ВИБУХУ ПРОВІДНИКІВ

С.В. Пашков, Д.Б. Кучер, Т.В. Зонтова, Л.В. Литвиненко

*У роботі наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень часових параметрів імпульсних впливів при застосуванні явища швидкого електричного вибуху до провідників. Побудовані залежності тривалості фронту і спаду імпульсу від різних параметрів електровибухових провідників.*

**Ключові слова:** електровибуховий провідник, швидкий електричний вибух, вибухомагнітний генератор.

## TIME PARAMETERS RESEARCH FOR THE IMPULSE INFLUENCES FORMED WITH FAST ELECTRICAL EXPLOSION OF CONDUCTORS

Ye.V. Pashkov, D.B. Kucher, T.V. Zontova, L.V. Litvinenko

*The results of theoretical and experimental research for time parameters of impulse influences caused by fast explosion of electrical conductors are presented in the work. The dependences of the front time and fall time of the various parameters of electrical explosion conductors are achieved.*

**Keywords:** electrical explosion conductors, fast electrical explosion, explosion magnetic generator.