

УДК 621.396.6

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАУЗЫ ТОКА, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПОСЛЕ БЫСТРОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ЛЕГКОПЛАВКИХ ПРОВОДНИКОВ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований длительности существования паузы тока при использовании явления вторичного пробоя продуктов детонации электрического взрыва легкоплавких проводников различной длины.

**Ключевые слова:** электрический взрыв проводников, пауза тока, вторичный пробой.

### Введение

Явление быстрого «электрического взрыва» проводников (взрывообразное разрушение металлов при прохождении импульса тока большой плотности  $j \approx 10^7$  А/см<sup>2</sup>) уже долгие годы используется в различных технических приложениях (для получения нанопорошков, для генерации мягкого рентгеновского излучения и обострения электрической мощности в высоковольтной технике) [1-4]. Однако только в последнее время появились работы, направленные на теоретическое обоснование использования данного явления, а точнее эффекта вторичного пробоя продуктов детонации электровзрывающегося проводника (ЭВП), для создания быстроредействующих коммутаторов [1, 2].

Механизм работы таких коммутаторов будет включать в себя три основных этапа [1]. 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 (пауза тока). Третьему этапу соответствует вторичный пробой продуктов электрического взрыва (замыкание цепи ключом).

Время срабатывания коммутатора будет определяться длительностью существования паузы тока, которая, в свою очередь, зависит от скорости расширения, а, следовательно, и от давления (плотности) уже ионизированных продуктов электрического взрыва. В работе [1], основываясь на модели мгновенного сильного взрыва цилиндрической конфигурации, показано, что длительность существования паузы тока, прежде всего, определяется длиной ЭВП. Поэтому целью данной работы является экспериментальное подтверждение зависимости длительности существования паузы тока от длины электровзрывающегося проводника.

### Основной материал

Анализ результатов экспериментальных исследований, проведенный в работах [3, 4], 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 проволоки (по парам металла в воздухе) и эффективный перехват разрядного тока короной (цилиндрическая форма продуктов детонации расширяется незначительно) [3, 4]. При реализации данного вида вторичного пробоя на протяжении всей паузы тока разрядный промежуток только частично сохраняет свои изолирующие свойства. Следовательно, на втором этапе работы такого коммутатора невозможно полностью осуществить разрыв цепи.

Для легкоплавких и хорошо проводящих ЭВП (свинец, серебро, алюминий, медь, золото), длина которых  $l > 5 \cdot 10^{-3}$  м, характерно то, что 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 [2 – 4].

При увеличении длины ЭВП (от  $5 \cdot 10^{-3}$  м и выше) уменьшается скорость изменения давления продуктов детонации, а, следовательно, увеличивается пауза тока. Именно уменьшение давления продуктов детонации до критического значения  $P_{ПДкр}$  будет характеризовать длительность существования паузы тока [1 – 4]. Поэтому для проведения эксперимен-

тальных исследований длительности существования паузы тока (времени срабатывания коммутатора) при использовании явления вторичного пробоя продуктов детонации электрического взрыва было изготовлено 30 образцов медных и свинцовых ЭВП

( $P_{\text{ПДкр}} = 10,2 \text{ МПа}$ ) одинакового радиуса ( $0,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ) и различной длины (от  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  до  $0,06 \text{ м}$ ). Схема экспериментальных исследований представлена на рис. 1.

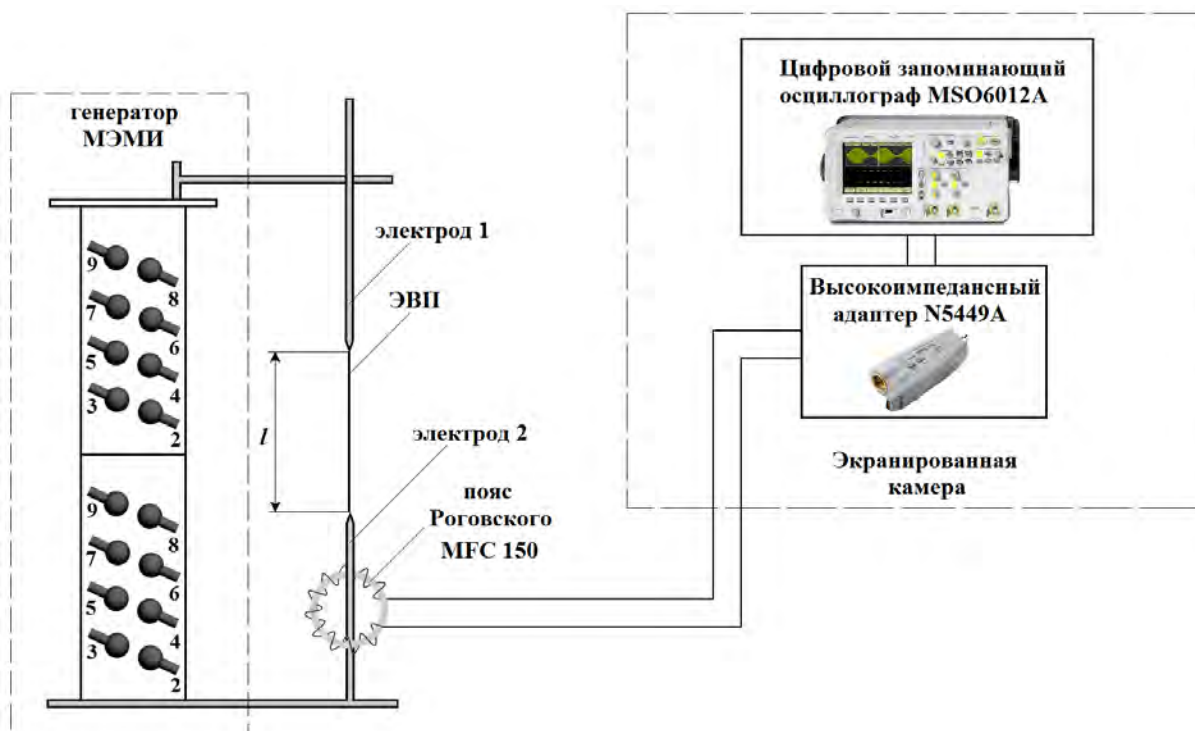


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

Источником тока выступал генератор мощных электромагнитных излучений (генератор Аркадьева-Маркса), выполненный по 10-ти каскадной схеме. Последовательное включение башен позволило получить разрядное напряжение 750 кВ при токе до 200 кА между выходными острыми электродами 1 и 2 (рис. 1).

Для регистрации токов, протекающих через ЭВП, вокруг острейшего электрода 2 размещался гибкий токовый преобразователь MFC 150 (рис. 1), основанный на принципе Роговского. Данный токовый преобразователь предназначен для измерения переменного тока в диапазоне от миллиампер до сотен килоампер в комбинации с высокоимпедансным адаптером N5449A и цифровым запоминающим осциллографом MSO6012A (рис. 1).

На рис. 2 и 3 представлены осциллограммы вторичного пробоя продуктов детонации медных и свинцовых ЭВП различной длины.

Анализируя зависимости, представленные на рис. 2, 3, можно заметить, что длительностью паузы тока, характеризующей время до образования вторичного пробоя, можно варьировать, изменяя длину ЭВП, в достаточно широких пределах:

- от  $\approx 19 \cdot 10^{-9} \text{ с}$  до  $\approx 2,3 \cdot 10^{-7} \text{ с}$  для медных проводников (см. рис. 2);

- от  $\approx 80 \cdot 10^{-9} \text{ с}$  до  $\approx 8,8 \cdot 10^{-7} \text{ с}$  для свинцовых проводников (см. рис. 3).

Это, прежде всего, определяется тем, что длительность существования паузы тока зависит от скорости расширения уже ионизированных продуктов электрического взрыва, а не от времени запаздывания разряда, характерного для пробоя обычных газов [3, 4].

При величинах междуэлектродного зазора (длины ЭВП) менее  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  через газообразные продукты электрического взрыва как медных, так и свинцовых ЭВП, будет протекать слабый ток (см. рис. 2а и 3а), который обусловлен наличием ионов, возникающих в процессе термоэлектронной и термоионной ионизации.

При длинах ЭВП более  $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  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 (см. рис. 2, б-г и 3, б-г).

Варьируя материал проводника, можно изменять длительность электрического взрыва легкоплавкого проводника (первый этап работы коммутатора).



Начало электрического взрыва (фронт импульса) зависит от времени достижения температуры плавления ЭВП. Длительность спада (окончание электрического взрыва) наименьшее у наиболее легкоплавких (свинцовых) ЭВП. При этом значения удельной энергии быстрого электрического взрыва наименьшие у тугоплавких и наибольшие у легкоплавких [1]. Это объясняется различной энергией сублимации материалов ЭВП, при которой образуется мелкодисперсная масса (золь), вызывающая потерю проводимости [1 – 4].

Наиболее приемлемыми для создания коммутаторов являются свинцовые ЭВП, обладающие наиболее низкой температурой плавления и удельной энергией сублимации, что позволяет уменьшить длительность первого этапа работы коммутатора до единиц наносекунд. Кроме того, у свинцовых проводников наибольшие значения плотности вещества, что после электрического взрыва будет приводить к увеличению временного интервала, за который давление продуктов детонации достигает критического значения. Именно это позволяет варьировать паузу тока, возникающую после электрического взрыва свинцовых проводников, вплоть до микросекундного диапазона (рис. 3).

### Выводы

1. Для создания коммутаторов наиболее подходят легкоплавкие и хорошо проводящие ЭВП длиной  $l > 5 \cdot 10^{-3}$  м. В этом случае вторичный пробой (этап коммутации) 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.

2. Длительностью паузы тока, характеризующей время до образования вторичного пробоя, можно варьировать, изменяя длину легкоплавкого ЭВП.

3. При длинах ЭВП менее  $5 \cdot 10^{-3}$  м через газообразные продукты электрического взрыва как медных, так и свинцовых проводников, будет протекать слабый ток, который обусловлен наличием ионов, возникающих в процессе термоэлектронной и термоионной ионизации.

4. Наиболее приемлемыми для создания коммутаторов являются свинцовые ЭВП, обладающие меньшей длительностью электрического взрыва и возможностью варьировать паузой тока от наносекундного до микросекундного диапазона.

### Список литературы

1. Кучер Д.Б. Использование явления вторичного пробоя при электрическом взрыве проводников для формирования мощных полиимпульсных излучений / Д.Б. Кучер, Т.В. Зонтова // Системы обработки информации, вып. 3(101), том 2. – Х.: ХУПС, 2012. – С. 73 – 78.
2. Кучер Д.Б. Длительность механизма быстрого электрического взрыва проводников под воздействием токов спирального взрывомагнитного генератора / Д.Б. Кучер, Т.В. Зонтова // Збірник наукових праць АВМС ім. П.С.Нахімова, вип. 1(9). – Севастополь, АВМС, 2012. – С. 130 – 135.
3. Пикуз С.А. Интерпретация экспериментальных данных по электрическому взрыву тонких проволочек в воздухе / С.А. Пикуз, Д.А. Ткаченко, Д.А. Баршпольцев и др. // Письма в ЖТФ. – 2007. – Том 33 вып. 15. – С. 47 – 55.
4. 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.

Поступила в редколлегию 28.06.2012.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.В. Капустин, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАУЗИ СТРУМУ, ЩО ВИНИКАЄ ПІСЛЯ ШВИДКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ВИБУХУ ЛЕГКОПЛАВКИХ ПРОВІДНИКІВ

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

*В роботі наведено результати експериментальних досліджень тривалості існування паузи струму при використанні явища вторинного пробоя продуктів детонації електричного вибуху легкоплавких провідників різної довжини.*

**Ключові слова:** електричний вибух провідників, пауза струму, вторинний пробій.

### EXPERIMENTAL RESEARCH OF PAUSE IN CURRENT OCCURED AFTER RAPID ELECTRICAL EXPLOSION OF EASILY MELTING CONDUCTORS

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

*The results of experimental research of duration of the existence of a pause of the current using phenomenon of secondary breakdown of detonation products of electrical explosion in easily melting conductors of different lengths.*

**Keywords:** electric explosion of conductors, pause of the current, secondary breakdown.