

DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2020.2-60.1>

UDC 621.396.6

Д. Б. Кучер, доктор технічних наук, професор, професор кафедри Озброєння Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»

Л. В. Кучер, кандидат технічних наук, доцент кафедри Озброєння Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»

Н. Б. Смиринська, провідний науковий співробітник Науково-дослідного центру ЗС України «Державний океанаріум» Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»

Г. В. Лишак, старший викладач кафедри Озброєння Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОВИБУХАЮЧИХ ПРОВІДНИКІВ

Процес розвитку сучасних високовольтних систем нерозривно пов'язаний із задачами швидкодійної комутації струмів високої щільності на різних елементах.

Застосування існуючих високовольтних засобів перемикання (реле, газових розрядників, контакторів, варисторів тощо) для послідовної комутації елементів в високовольтних системах обмежується, перш за все, їх високою інерційністю і неможливістю чітких збігів вольтамперних характеристик при перерозподілі струмів високої щільності всередині різних елементів.

Найбільш перспективним методом перерозподілу енергії при послідовній комутації декількох елементів може бути швидкий електричний вибух тонких провідників, супроводжуваний вторинним пробоем продуктів детонації. Даний ефект виникає при введенні в тонкий провідник

© Д. Б. Кучер, Л. В. Кучер, Н. Б. Смиринська, Г. В. Лишак, 2020

досить великої щільності струму ($j \approx 10^7$ А/см²).

Реалізація механізму швидкого електричного вибуху супроводжується розширенням, перетворенням в золь і втратою провідності провідника в наносекундному діапазоні, що може дозволити сформуванню ланцюжок послідовних перемикань різних елементів усередині високовольтної системи.

Для практичного підтвердження застосовності даного ефекту в швидкодіючих комутуючих установках представлені результати експериментальних досліджень, проведених в два етапи.

При проведенні першого етапу експерименту, електричний вибух застосовувався до одиночних провідників, з різною температурою плавлення, площею перетину і довжиною. Аналіз отриманих результатів показав, що шляхом зміни теплофізичних і конструктивних параметрів провідників можливо отримувати необхідні значення тривалості ефекту швидкого електричного вибуху.

На другому етапі експерименту, ґрунтуючись на результатах щодо тривалості ефекту швидкого електричного вибуху, було досліджено спеціальну комплексну структуру швидкодіючих комутуючих елементів. До складу структури були включені свинцеві провідники, що виконують роль комутаторів і вольфрамові провідники, електричний вибух яких загострював імпульсну напругу, що подається з генератора. Аналіз отриманих даних показав можливість створення послідовної комутації за рахунок електричного вибуху свинцевих провідників з подальшим пробоем продуктів їх детонації.

Представлені в роботі результати експериментальних досліджень підтверджують працездатність теоретичних методик, пов'язаних з використанням явищ швидкого електричного вибуху і вторинного пробоем продуктів їх детонації, для створення швидкодіючих комутуючих елементів струмів високої щільності.

Ключові слова: комутація струмів високої щільності; електровибухаючі провідники; швидкий електричний вибух; вторинний електричний пробій продуктів детонації; загострювання імпульсів.

Процесс развития современных высоковольтных систем неразрывно связан с задачами быстройдействующей коммутации токов высокой плотности на различных элементах.

Применение существующих высоковольтных средств переключения (реле, газовых разрядников, контакторов, варисторов и т.д.) для последовательной коммутации элементов в высоковольтных системах ограничивается их, прежде всего, высокой инерционностью и невозможностью строгого совпадения вольтамперных характеристик при перераспреде-

нии токов высокой плотности внутри различных элементов.

Наиболее перспективным методом перераспределения энергии при последовательной коммутации нескольких элементов может являться быстрый электрический взрыв тонких проводников, сопровождаемый вторичным пробоем продуктов детонации. Данный эффект возникает при вводе в тонкий проводник достаточно больших плотностей тока ($j \approx 10^7$ А/см²).

Реализация механизма быстрого электрического взрыва сопровождается расширением, превращением в золь и потерей проводимости проводника в наносекундном диапазоне, что может позволить сформировать цепочку последовательных переключений различных элементов внутри высоковольтной системы.

Для практического подтверждения применимости данного эффекта в быстродействующих коммутирующих установках представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных в два этапа.

При проведении первого этапа эксперимента, электрический взрыв применялся к одиночным проводникам, с различной температурой плавления, площадью сечения и длиной. Анализ полученных результатов показал, что путём изменения теплофизических и конструктивных параметров проводников можно получать необходимых значений длительности эффекта быстрого электрического взрыва.

На втором этапе эксперимента, основываясь на результатах, длительности эффекта быстрого электрического взрыва, была исследована специальная комплексная структура быстродействующих коммутирующих элементов. В состав структуры были включены свинцовые проводники, выполняющие роль коммутаторов и вольфрамовые проводники, электрический взрыв которых обострял импульсное напряжение, подаваемое с генератора. Анализ полученных данных показал возможность создания последовательной коммутации за счет электрического взрыва свинцовых проводников с последующим пробоем его продуктов детонации.

Представленные в работе результаты экспериментальных исследований подтверждают работоспособность теоретических методик, связанных с использованием явлений быстрого электрического взрыва и вторичного пробоя продуктов детонации для создания быстродействующих коммутирующих элементов токов высокой плотности.

Ключевые слова: коммутация токов высокой плотности; электро-взрывающиеся проводники; быстрый электрический взрыв; вторичный электрический пробой продуктов детонации; обострение импульсов.

The development process of modern high-voltage systems is inextricably

linked with the tasks of high-speed switching of high-density currents on various elements.

The use of existing high-voltage switching means (relays, gas dischargers, contactors, varistors, etc.) for successive switching of elements in high-voltage systems is limited primarily by their high inertia and the impossibility of strict coincidence of voltampere characteristics when redistributing high-density currents inside various elements.

Fast electrical explosion of thin conductors accompanied by a secondary breakdown of detonation products can be the most promising method of energy redistribution during successive switching of several elements. This effect occurs when sufficiently high current densities are introduced into a thin conductor ($j \approx 10^7$ A/cm²).

The implementation of the fast electrical explosion mechanism is accompanied by expansion, transformation into a sol and loss of conductor conductivity in the nanosecond range, which may allow a chain of successive switching of various elements within the high-voltage system to be formed.

In order to practically prove the applicability of this effect in high-speed switching installations, the results of experimental studies carried out in two stages are presented.

At the first stage of the experiment, an electric explosion was applied to single conductors, with different melting temperature, cross-sectional area and length. The analysis of the obtained results showed that by changing the thermophysical and structural parameters of the conductors, it is possible to obtain the necessary values of the duration of the fast electrical explosion effect.

At the second stage of the experiment, based on the results of the duration of the fast electrical explosion effect, a special complex structure of high-speed switching elements was investigated. The structure included lead wires acting as switches and tungsten conductors whose electrical explosion sharpened the pulse voltage applied from the generator. Analysis of the obtained data showed the possibility of creating a successive commutation at the expense of the electric explosion of lead conductors with subsequent breakdown of its detonation products.

The results of experimental studies presented in the paper confirm the operability of theoretical methods related to the use of the phenomena of fast electrical explosion and secondary breakdown of detonation products to create high-speed switching elements of high-density currents.

Keywords: switching of high-density currents; electro-explosive conductors; fast electrical explosion; secondary electric breakdown of the detonation products; pulse sharpening.

Вступ. Сучасний етап розвитку систем спеціального й критичного призначення нерозривно пов'язаний з необхідністю вирішення нових завдань, одним з яких є можливість відведення або розподілу (комутації) високовольтної енергії всередині різних елементів.

Існуючі засоби комутації (реле, газові розрядники, контактори, варистори та інше) мають, перш за все, досить великі значення часу спрацьовування [1, 2] та є малоефективними для комутації імпульсних струмів наносекундної тривалості. В цьому відношенні найбільш перспективним методом перерозподілу енергії є вторинний пробій, що виникає при електричному вибуху провідників.

Постановка задачі. Аналіз результатів досліджень, наведених в роботах [3-7] показав, що для формування комутаційних процесів найбільш прийнятним є механізм швидкого електричного вибуху, який виникає за умови введення досить великої щільності струму ($j \approx 10^7$ А/см²) в провідник, діаметр якого складає $2a_0 \leq 0,2$ мм.

За реалізації даної умови електровибухаючий провідник (ЕВП) почне розширюватися без значних деформацій і перетворюється в золь, що складається з поперечних шарів конденсованого металу і ділянок низької щільності між ними (мікророзриви). Процес швидкого електричного вибуху незмінно супроводжується втратою провідності ЕВП в наносекундному діапазоні, що може дозволити сформувати ланцюжок перекомутацій навантаження при мікросекундному імпульсі з генератора [8, 9, 10].

У роботах [11, 12, 13] наведено результати теоретичних досліджень, які дозволяють зробити висновок, що для створення послідовних перемикачів необхідно підключати до генератора тугоплавкі ЕВП спеціалізованими комутаторами, принцип дії яких заснований на явищі вторинного пробію продуктів детонації електричного вибуху легкоплавких провідників.

Мета. Метою даної роботи є експериментальне підтвердження можливості створення швидкодіючих комутуючих елементів, здатних забезпечити послідовне перемикачання на навантаження імпульсних струмів високої щільності ($j \approx 10^7$ А/см²).

Результати дослідження. Експериментальні дослідження комплексної структури проводилися в два етапи.

На першому етапі досліджень, електричний вибух застосовувався до одиночних провідників з різною температурою плавлення, площею перети-

ну та довжиною. Вибір різних температурних та конструктивних параметрів ЕВП дозволив отримати різні значення загострення (зміни тривалості фронту і спаду) імпульсних сигналів, що подаються з генератора.

На другому етапі замість одиночних ЕВП до генератора підключалася комплексна структура, здатна підключати до генератора тугоплавкі ЕВП комутуючими елементами, принцип дії яких заснований на явищі вторинного пробою продуктів детонації електричного вибуху легкоплавких провідників.

Структурно ця схема експериментальних досліджень включає в себе (див. рис. 1):

- високовольтний генератор NSG 3060, розроблений фірмою TESEQ (Швейцарія) для перевірки ліній електроживлення на електромагнітну стійкість;

- ЕВП, що підключається до генератора на першому етапі досліджень. Даний провідник розміщувався між електродами в розрядній камері;

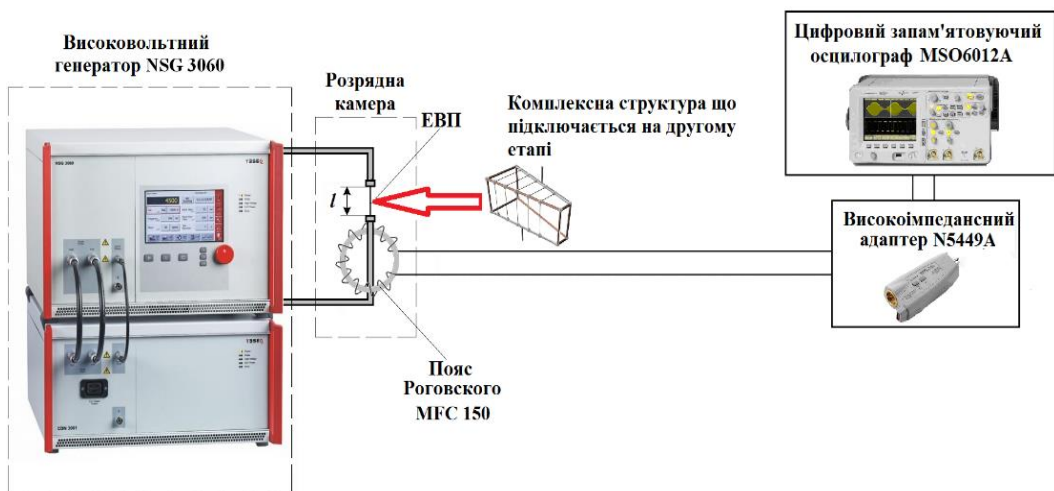


Рис. 1. Схема проведення експериментальних досліджень комплексної структури електровибухаючих провідників

- комплексну структуру, яка формує послідовне підключення до високовольтного генератора тугоплавких ЕВП комутуючими елементами;

- магнітний пояс або пояс Роговського (MFC 150), який використовується для вимірювання струму, що протікає через ЕВП ;

- цифровий запам'ятовуючий осцилограф MSO6012A, ввімкнений в ланцюг через високоімпедансний адаптер N5449A.

Джерело струмів високої щільності NSG 3060 (рис. 2) являє собою високовольтний генератор імпульсної напруги модульного типу.

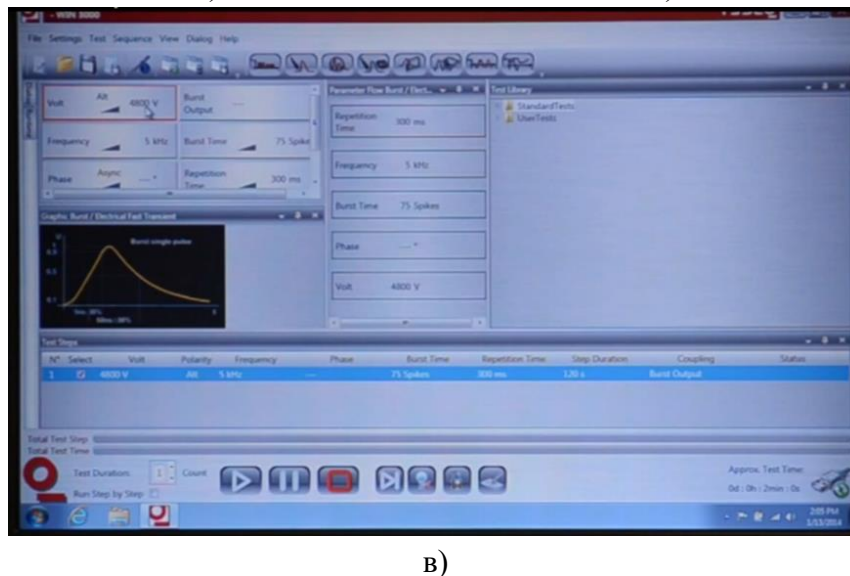


Рис. 2. Зовнішній вигляд генератора NSG 3060 (а) і порядок введення амплітудних і часових параметрів імпульсної напруги на навантаженні з використанням вбудованого (б) та зовнішнього інтерфейсу (в)

Для проведення експериментальних досліджень використовувалися чотири модуля (каскади), які дозволяють отримати розрядну напругу до 66 кВ (табл. 1), що було достатнім для реалізації механізму швидкого елект-

ричного вибуху металевих провідників. Управління генератором здійснюється за допомогою стандартизованого операторського інтерфейсу (див. рис. 2б) або Ethernet для підключення зовнішнього ПК або комп'ютерної мережі (див. рис. 2в), що дозволяє формувати на навантаженні імпульсну (або синусоїдальну) напругу з необхідними амплітудними і часовими параметрами.

Таблиця 1.

Основні параметри високовольтного генератора NSG 3060

Діапазон змін напруги одного модуля, В	від 200 до $6,6 \cdot 10^3$
Вихідна напруга чотирьох модулів, В	до $66 \cdot 10^3$
Діапазон змін розрядного струму одного модуля, А	від 100 до $3,3 \cdot 10^3$
Діапазон змін тривалості імпульсу струму, мкс	від 1 до 200
Час повторення імпульсу, с	до 4200 (70 хв.)

Для визначення значень загострення (зміни тривалості фронту і спаду) імпульсних сигналів, що подаються з генератора, було виготовлено 30 зразків свинцевих, алюмінієвих, мідних і вольфрамових електровибухаючих провідників, що мають різну температуру плавлення (див. табл. 2) і конструктивні параметри (див. табл. 3 і 4).

Таблиця 2.

Теплові та енергетичні характеристики електровибухаючих провідників

Матеріал ЕВП	Температура плавлення, °С	Питома енергія електричного вибуху, $\frac{Дж}{г}$	Питома енергія випаровування (сублімації), $\frac{Дж}{г}$
Свинець	327	$60,7 \cdot 10^3$	$1,67 \cdot 10^3$
Алюміній	660	$44,4 \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^3$
Мідь	1083	$20,1 \cdot 10^3$	$7,05 \cdot 10^3$
Вольфрам	3422	$7,4 \cdot 10^3$	$10,23 \cdot 10^3$

Таблиця 3.

Конструктивні характеристики електровибухаючих провідників для експериментальних досліджень тривалості фронту імпульсних струмів, що подаються з генератора

Довжина ЕВП, м	Радіус ЕВП, м	Кількість зразків ЕВП
Свинцеві		
0,3	$0,06 \cdot 10^{-3}$	30
0,3	$0,08 \cdot 10^{-3}$	30
0,3	$0,1 \cdot 10^{-3}$	30
Алюмінієві		
0,3	$0,06 \cdot 10^{-3}$	30
0,3	$0,08 \cdot 10^{-3}$	30
0,3	$0,1 \cdot 10^{-3}$	30
Мідні		
0,3	$0,06 \cdot 10^{-3}$	30
0,3	$0,08 \cdot 10^{-3}$	30
0,3	$0,1 \cdot 10^{-3}$	30
Вольфрамові		
0,3	$0,06 \cdot 10^{-3}$	30
0,3	$0,08 \cdot 10^{-3}$	30
0,3	$0,1 \cdot 10^{-3}$	30

Таблиця 4.

Конструкційні характеристики електровибухаючих провідників для експериментальних досліджень загострення тривалості спаду імпульсних струмів, що подаються з генератора

Довжина ЕВП, м	Радіус ЕВП, м	Кількість зразків ЕВП
0,05	$0,06 \cdot 10^{-3}$	30
0,1	$0,06 \cdot 10^{-3}$	30
0,3	$0,06 \cdot 10^{-3}$	30
0,5	$0,06 \cdot 10^{-3}$	30

Кожен із досліджуваних ЕВП поміщався в розрядний ланцюг генера-

тора за допомогою знімних електродів (рис. 3а), встановлених у струмопровідні шини за допомогою спеціальних муфт (рис. 3б).

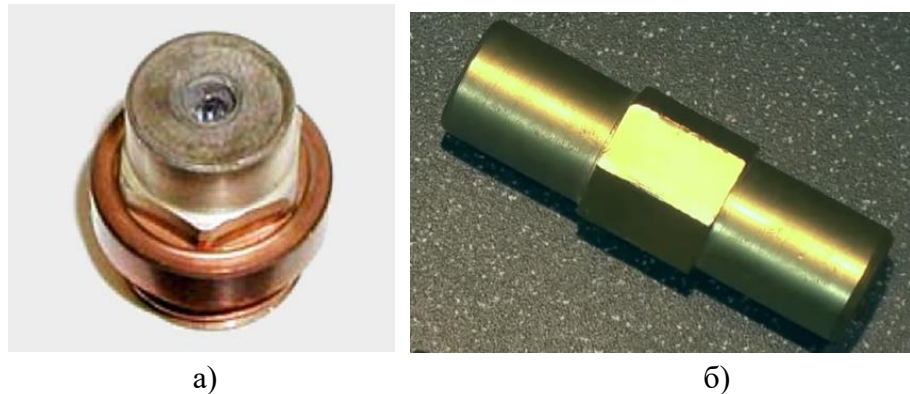


Рис. 3. Розрядні електроди для кріплення ЕВП в ланцюг генератора (а) й муфти їх кріплення на струмопровідні шини (б)

Для проведення другого етапу експерименту, замість одиночних ЕВП до генератора підключалася комплексна структура, здатна послідовно комутувати в ланцюг генератора тугоплавкі ЕВП (див. рис. 1 і 4).

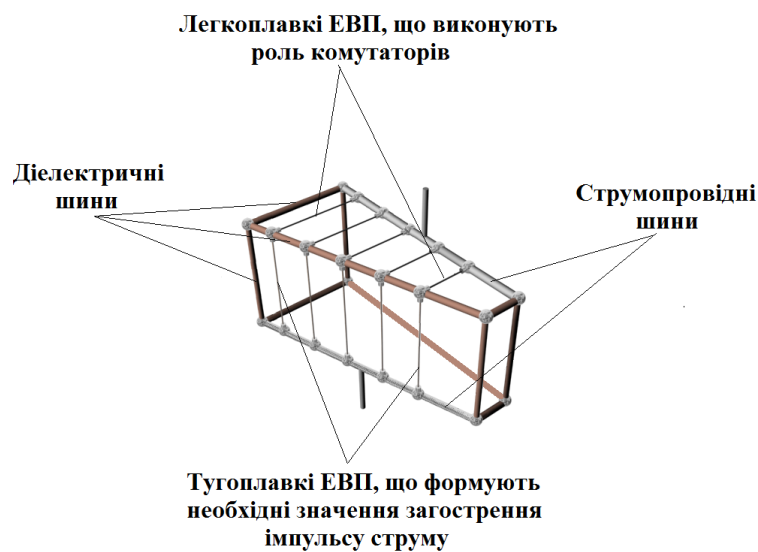


Рис. 4. Комплексна експериментальна структура послідовної комутації тугоплавких ЕВП в ланцюг генератора

До складу структури входять (рис. 4):

- легкоплавкі ЕВП, що виконують роль комутаторів і визначають не-

обхідну частоту слідування імпульсів у послідовності;

- тугоплавкі ЕВП, що формують необхідні часові параметри кожного імпульсу в послідовності;

- струмопровідні шини, безпосередньо зв'язані з електродами генератора й ЕВП;

- діелектричні шини, що розділяють струмопровідні шини.

Струмопровідні шини експериментальної структури здійснювали безпосередній контакт між виводами генератора та електродами, в яких розміщувалися ЕВП (див. рис. 5а, б). Діелектричні шини (див. рис. 5в), які виконані зі склопластику (СПП-ЕІ Т-155), просоченого сполучним розчином епоксидних смол (див. табл. 5), здійснювали розділення провідних елементів експериментальної структури.

Конструктивні розміри свинцевих (легкоплавких) ЕВП, вторинний пробій продуктів детонації яких визначає комутацію тугоплавких провідників, відповідають значенням, представленим у табл. 6.

У якості тугоплавких ЕВП застосовувалися вольфрамові дротинки однакової довжини та площі перетину (радіус $0,06 \cdot 10^{-3}$ м).

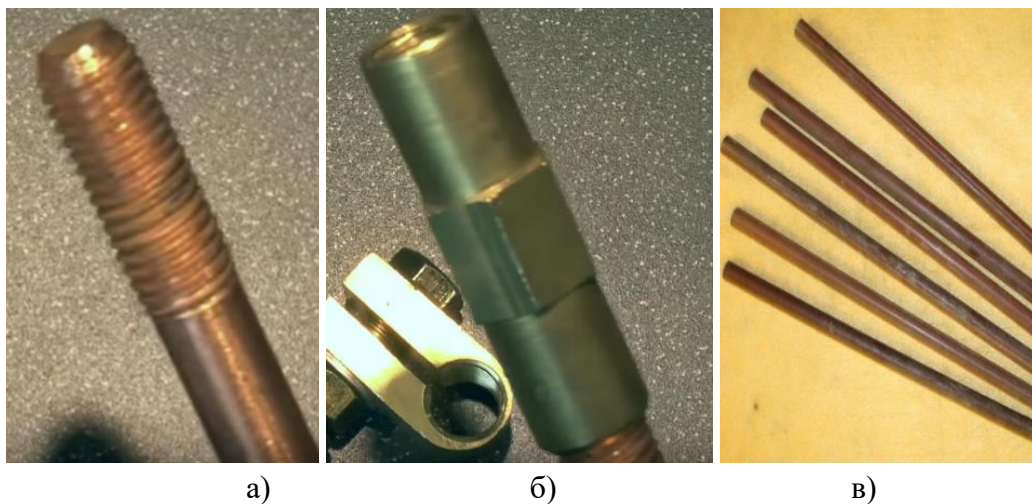


Рис. 5. Струмопровідна шина (а), сполучна муфта для кріплення електродів, закріплена на струмопровідній шині (б), елементи діелектричних шин (в)

Таблиця 5.

Основні характеристики СПП-ЕІ Т-155 (склопластику профільного електроізолюючого)

Найменування характеристики	Значення
Густина склопластика, кг/м ³	1900-2100
Руйнуюче напруження при розтягуванні, МПа, не менше	800
Питомий поверхневий електричний опір у вихідному стані, Ом, не менше	$1 \cdot 10^{12}$
Стійкість до нагріву, °С, протягом 24 год	200±2

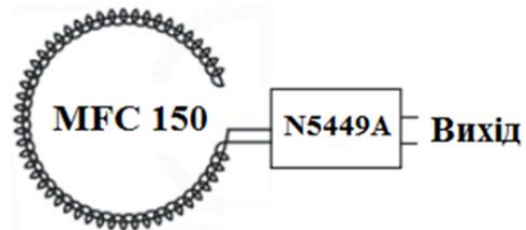
Таблиця 6.

Конструкційні характеристики електровибухаючих провідників, що виконують функцію швидкодіючих комутаторів

Довжина ЕВП, м	Радіус ЕВП, м
0,007	$0,06 \cdot 10^{-3}$
0,02	$0,06 \cdot 10^{-3}$
0,04	$0,06 \cdot 10^{-3}$
0,06	$0,06 \cdot 10^{-3}$
0,08	$0,06 \cdot 10^{-3}$



а)



б)

Рис. 6. Гнучкий струмовий перетворювач MFC 150 (пояс Роговського)
а – фотографія; б – схема підключення

Для реєстрації струмів, що протікають через ЕВП, навколо муфти електрода розміщувався гнучкий струмовий перетворювач MFC 150 (див. рис. 1, б), що функціонує на основі принципу Роговського й призначений для вимірювання змінного струму в діапазоні від міліампер до сотень кілоа-

мпер (див. табл. 7), у комбінації з високоімпедансним адаптером N5449A й вимірювальними приладами.

Таблиця 7.

Основні параметри MFC 150 (пояс Роговського)

Довжина, м	0,35
Вага, г	90
Частотний діапазон, Гц	$8 - 1,5 \cdot 10^9$
Максимальна вхідна напруга, В	$30 \cdot 10^6$
Максимальний вимірюваний струм, А	$250 \cdot 10^3$
Точність вимірів при температурі 23 °С	$\pm 2\%$

На виході токового перетворювача формується низьковольтний сигнал, завдяки чому вихідна обмотка не представляє небезпеки. На відміну від трансформатора струму, MFC 150 не має магнітного сердечника, що забезпечує йому широку частотну характеристику (див. табл. 7).

Для реєстрації результатів вимірювань часових характеристик на різних етапах електричного вибуху застосовувався цифровий запам'ятовуючий осцилограф MSO6012A, який характеризується високою надійністю, точністю показань, широкою смугою пропускання, високою частотою дискретизації та забезпечує одночасний збір даних за двома каналами (див. табл. 8).

Таблиця 8.

Основні характеристики цифрового запам'ятовуючого осцилографа MSO6012A

Смуга пропускання (на рівні -3 ДБ), Гц	від 0 до 10^9
Час наростання перехідної характеристики (0,35/смуги пропускання), с	$350 \cdot 10^{-12}$
Число аналогових каналів	2
Максимальна вхідна напруга, В	500 (пікове значення)
Частота дискретизації, Гц	$4 \cdot 10^9$
Похибка вимірювань	$\mp 2\%$

Результати вимірювань відображалися осцилографом MSO6012A у вигляді графіків, які зберігалися на зовнішньому носії інформації.

Експериментальні дослідження часових характеристик (див. рис. 1) проводилися шляхом застосування механізму швидкого електричного вибу-

ху до провідників, які мають різні температурні плавлення й конструктивні параметри (див. табл. 3, 4, 6).

Осцилограми іскрового розряду, який формується високовольтним генератором NSG 3060 в атмосфері (між вістрями електродів) представлено на рис. 7.

Зміна струму при іскровому розряді в атмосфері між голчатими електродами носить коливальний характер (див. рис. 7а). Це, перш за все, пов'язано з тим, що загасання $\Delta = \frac{R_n}{2L_{\text{конт}}}$ еквівалентного контуру розрядного ланцюга генератора досить мале, щоб забезпечити повільний спад амплітуди коливань струму.

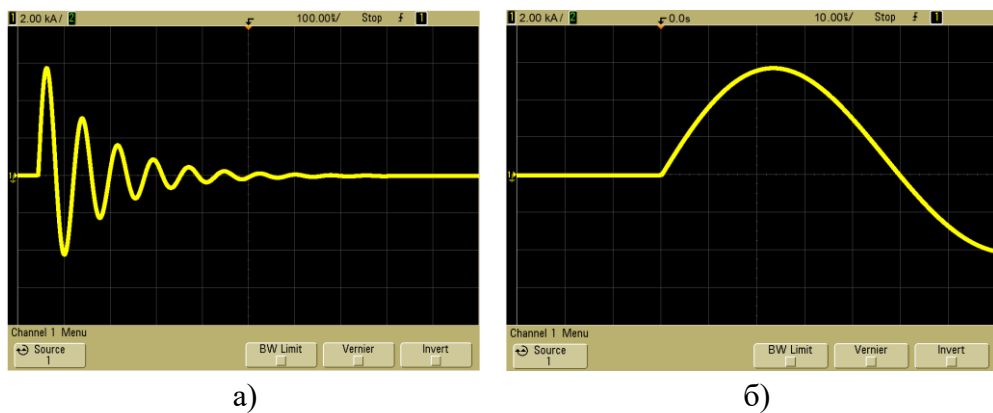


Рис. 7. Осцилограми іскрового розряду, який формується генератором NSG 3060 між вістрями електродів: а) вертикальна розгортка 2 кА / поділ, горизонтальна - 100 мкс / поділ; б) вертикальна розгортка 2 кА / поділ, горизонтальна - 10 мкс / поділ

Однак, згідно з результатами теоретичних досліджень, проведених у роботі [12], при включенні між електродами ЕВП, механізм швидкого електричного вибуху буде реалізовуватися саме на часовому етапі першого півперіоду коливань струму генератора (див. рис. 7б).

На рис. 8 представлені осцилограми електричного вибуху металевих провідників, які мають різні температури плавлення й однакові конструктивні параметри. Згідно з отриманими експериментальними залежностями, можна зробити висновок, що тривалість фронту імпульсу загострення при

постійних конструктивних параметрах ЕВП буде приймати різне значення ($\approx 19 \cdot 10^{-9}$ с для свинця, $\text{ЕВП} \approx 17 \cdot 10^{-8}$ с для алюмінію, $\text{ЕВП} \approx 97 \cdot 10^{-8}$ с для міді та $\text{ЕВП} \approx 18 \cdot 10^{-7}$ с для вольфраму). Це пояснюється різною температурою плавлення матеріалів ЕВП (див. табл. 2), оскільки фронт імпульсу буде формуватися на першому етапі електричного вибуху, для якого характерний перехід металу з твердої фази в рідку.

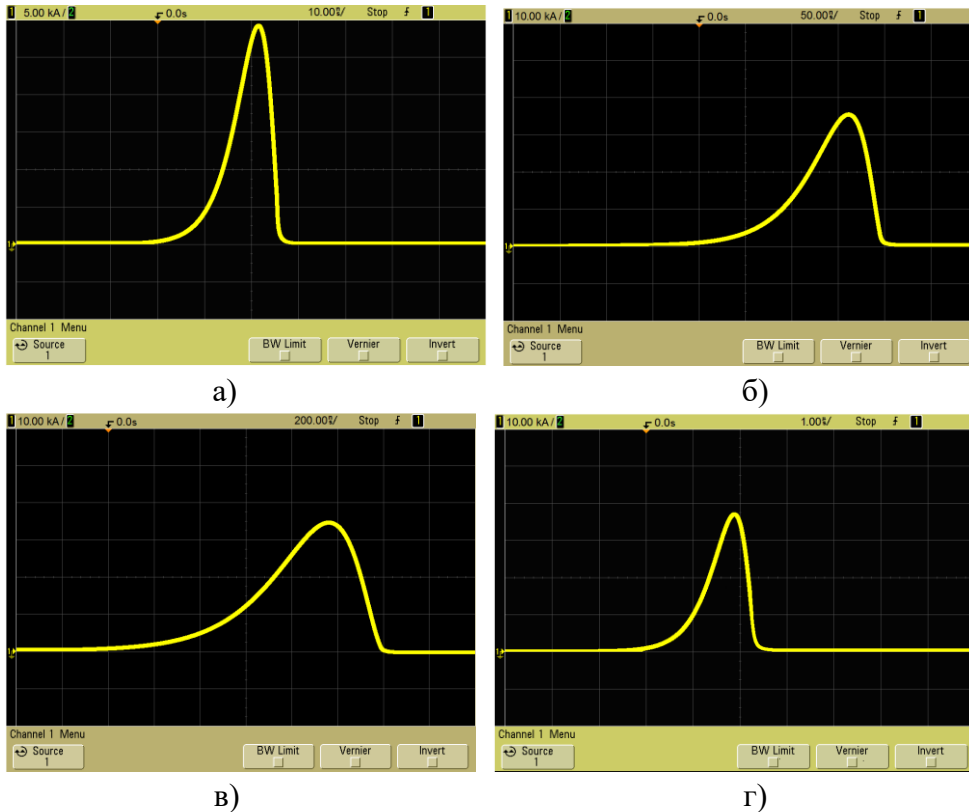


Рис. 8. Осцилограми електричного вибуху провідників довжиною 0,3 м і радіусом $0,1 \cdot 10^{-3}$ м: а) свинцевий провідник (вертикальна розгортка 5 кА/поділ, горизонтальна – 10 нс/поділ); б) алюмінієвий провідник (вертикальна розгортка 10 кА/поділ, горизонтальна – 50 нс/поділ); в) мідний провідник (вертикальна розгортка 10 кА/поділ, горизонтальна – 2000 нс/поділ); г) вольфрамовий провідник (вертикальна розгортка 10 кА/поділ, горизонтальна – 1 мкс/поділ)

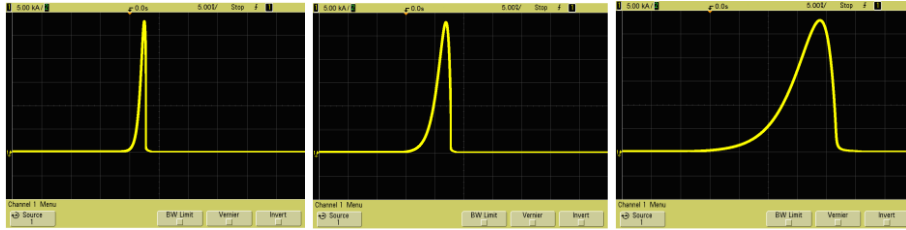
Тривалість спаду імпульсного впливу при незмінних конструктивних параметрах провідника також буде приймати різне значення ($\approx 2,6 \cdot 10^{-9}$ с для свинцю, $\approx 2,4 \cdot 10^{-8}$ с для алюмінію, $\approx 23 \cdot 10^{-8}$ с для міді та $\approx 0,72 \cdot 10^{-6}$ с для вольфраму). Це, перш за все, пояснюється різною енергією сублімації матеріалів ЕВП (див. табл. 2), при якій утворюється дрібнодисперсна маса, що викликає втрату провідності.

Отримані експериментальні дані зміни тривалості фронту одиночного імпульсу добре узгоджуються з результатами теоретичних досліджень першого етапу електричного вибуху, які представлені в роботах [11, 12], оскільки амплітудні і часові характеристики впливів, що формуються NSG 3060 та вибухомагнітним генератором зі згаданих вище робіт [11, 12], дуже близькі.

При побудові системи перемикаючих елементів необхідно враховувати, що час спрацьовування кожного комутатора визначається тривалістю двох процесів. Перший пов'язаний безпосередньо з електричним вибухом легкоплавкого провідника, а другий визначається паузою струму, що виникає до електричного пробою продуктів детонації легкоплавкого провідника [11-13].

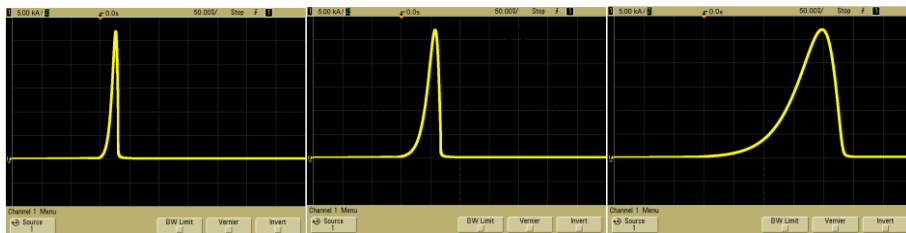
Таким чином, при послідовному з'єднанні двох ЕВП (легкоплавкого і тугоплавкого), можна досягти ефекту, коли електричний вибух буде відбуватися тільки у провіднику, що має меншу температуру плавлення ($T_{пл}$) та енергію сублімації (W_L^*). При цьому, у провідниках з високими значеннями $T_{пл}$ та W_L^* електричний вибух не буде відбуватися, оскільки нагрівання і перетворення легкоплавкого ЕВП в дрібнодисперсну масу відбудеться набагато швидше (див. рис. 8 а, б, в), ніж тугоплавкий елемент перейде з твердої фази в рідку (див. рис. 8 г).

На рис. 9-12 наведено осцилограми електричного вибуху провідників, що мають різні температури плавлення і площі перетину, але однакову довжину (див. таб. 3).



а) б) в)

Рис. 9. Осцилограми електричного вибуху свинцевих провідників однакової довжини (0,3 м) і різних радіусів: а) радіус - $0,06 \cdot 10^{-3}$ м (вертикальна розгортка 5 кА/поділ, горизонтальна – 5 нс/поділ); б) радіус - $0,08 \cdot 10^{-3}$ м (вертикальна розгортка 5 кА/поділ, горизонтальна – 5 нс/поділ); в) радіус - $0,1 \cdot 10^{-3}$ м (вертикальна розгортка 5 кА/поділ, горизонтальна – 5 нс/поділ)

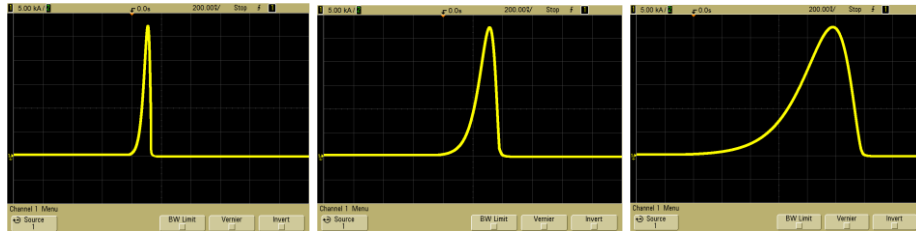


а) б) в)

Рис. 10. Осцилограми електричного вибуху алюмінієвих провідників однакової довжини (0,3 м) і різних радіусів: а) радіус - $0,06 \cdot 10^{-3}$ м (вертикальна розгортка 5 кА/ поділ, горизонтальна – 50 нс/ поділ); б) радіус - $0,08 \cdot 10^{-3}$ м (вертикальна розгортка 5 кА/ поділ, горизонтальна – 50 нс/ поділ); в) радіус - $0,1 \cdot 10^{-3}$ м (вертикальна розгортка 5 кА/ поділ, горизонтальна – 50 нс/ поділ)

Згідно з отриманими експериментальними даними, можна зробити висновки, що при застосуванні механізму швидкого електричного вибуху до легкоплавких провідників, які мають різні радіуси перетину (від $0,06 \cdot 10^{-3}$ до $0,1 \cdot 10^{-3}$ м), можливо варіювати тривалість фронту сформованого імпульсу загострення наступним чином:

- для свинцевих ЕВП від $\approx 2,1 \cdot 10^{-9}$ с до $\approx 18 \cdot 10^{-9}$ с (див. рис. 9);
- для алюмінієвих ЕВП від $\approx 19 \cdot 10^{-9}$ с до $\approx 170 \cdot 10^{-9}$ с (див. рис. 10);
- для мідних ЕВП від $\approx 87 \cdot 10^{-9}$ с до $\approx 97 \cdot 10^{-8}$ с (див. рис. 11).



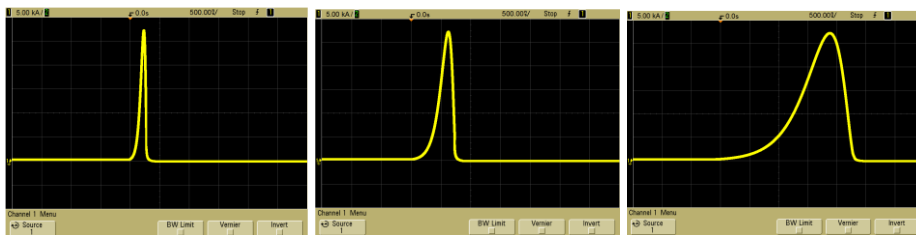
а)

б)

в)

Рис. 11. Осцилограми електричного вибуху мідних провідників однакової довжини (0,3 м) і різних радіусів: а) радіус - $0,06 \cdot 10^{-3}$ м (вертикальна розгортка 5 кА/ поділ, горизонтальна – 200 нс/ поділ); б) радіус - $0,08 \cdot 10^{-3}$ м (вертикальна розгортка 5 кА/ поділ, горизонтальна – 200 нс/ поділ); в) радіус - $0,1 \cdot 10^{-3}$ м (вертикальна розгортка 5 кА/ поділ, горизонтальна – 200 нс/ поділ)

У випадку з тугоплавкими (вольфрамовими) провідниками зміна радіусу поперечного перерізу призводить до зміни тривалості фронту від $\approx 138 \cdot 10^{-9}$ с до $\approx 180 \cdot 10^{-8}$ с (див. рис. 12).



а)

б)

в)

Рис. 12. Осцилограми електричного вибуху вольфрамових провідників однакової довжини (0,3 м) і різних радіусів: а) радіус - $0,06 \cdot 10^{-3}$ м (вертикальна розгортка 5 кА/ поділ, горизонтальна – 500 нс/поділ); б) радіус - $0,08 \cdot 10^{-3}$ м (вертикальна розгортка 5 кА/ поділ, горизонтальна – 500 нс/поділ); в) радіус - $0,1 \cdot 10^{-3}$ м (вертикальна розгортка 5 кА/поділ, горизонтальна - 500 нс/поділ)

Для формування послідовності перемикачів необхідно, щоб електричний вибух легкоплавких провідників, які використовуються в якості комутаторів, відбувався набагато раніше, ніж тугоплавкі ЕВП перейдуть з твердої фази в рідку. Досягти цього ефекту можна двома шляхами. Перший пов'язаний зі зменшенням тривалості електричного вибуху легкоплавких ЕВП, яка в основному визначається часом нагріву провідника. Другий пов'язаний зі збільшен-

ням часу нагріву тугоплавкого провідника. Технічна реалізація обох варіантів можлива шляхом зміни площі перетину ЕВП.

Таким чином, при послідовному з'єднанні провідників з різною температурою плавлення, необхідно вибирати найменшу площу перетину легкоплавких ЕВП, які формують процес комутації тугоплавких елементів.

На рис. 13-16 представлені осцилограми електричного вибуху провідників, що мають різну довжину й температуру плавлення, але однакову площу перетину (див. табл. 4).

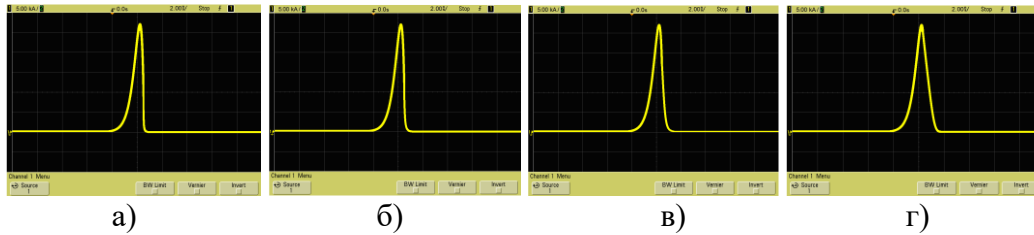


Рис. 13. Осцилограми електричного вибуху свинцевих провідників однакового радіусу ($0,06 \cdot 10^{-3}$) та різної довжини: а) довжина - 0,05 м; б) довжина - 0,1 м; в) довжина - 0,3 м; г) довжина - 0,5 м. Вертикальна розгортка 5 кА/поділ, горизонтальна – 2 нс/поділ

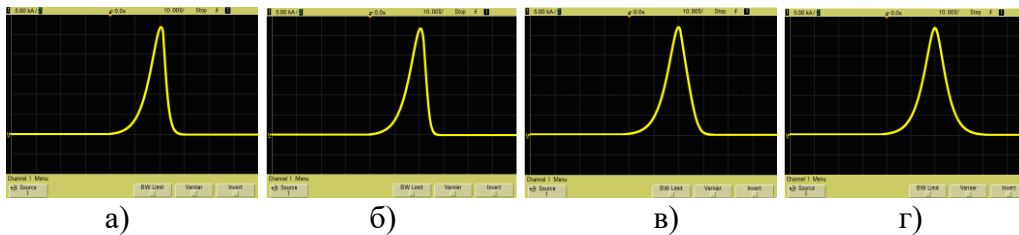


Рис. 14. Осцилограми електричного вибуху алюмінієвих провідників однакового радіусу ($0,06 \cdot 10^{-3}$) та різної довжини: а) довжина - 0,05 м; б) довжина - 0,1 м; в) довжина - 0,3 м; г) довжина - 0,5 м. Вертикальна розгортка 5 кА/поділ, горизонтальна – 10 нс/поділ

Аналізуючи експериментальні залежності, представлені на рис. 13-16, необхідно зауважити, що довжина ЕВП буде чинити істотний вплив тільки на другому етапі електричного вибуху (тривалість спаду кожного імпульсу). При застосуванні механізму швидкого електричного вибуху до провідників, які мають різну довжину (від 0,05 до 0,5 м) можливо варіювати тривалість спаду формуємого впливу в наступних межах:

- для свинцевих ЕВП від $\approx 0,5 \cdot 10^{-9}$ с до $\approx 1,8 \cdot 10^{-9}$ с (див. рис. 13);
- для алюмінієвих ЕВП від $\approx 5 \cdot 10^{-9}$ с до $\approx 16 \cdot 10^{-9}$ с (див. рис. 14);
- для мідних ЕВП від $\approx 19 \cdot 10^{-9}$ с до $\approx 57 \cdot 10^{-9}$ с (див. рис. 15);
- для вольфрамових ЕВП від $\approx 30 \cdot 10^{-9}$ с до $\approx 200 \cdot 10^{-9}$ с (див. рис. 16).

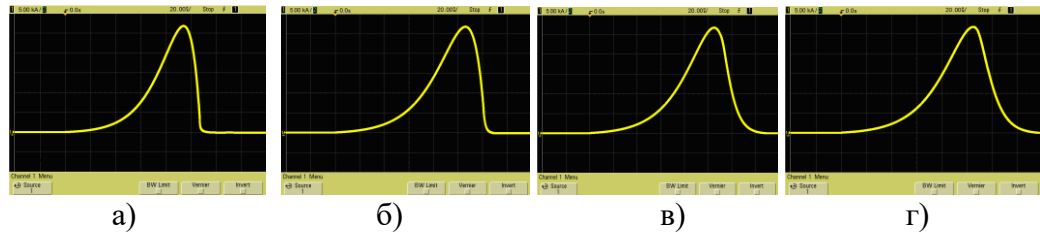


Рис. 15. Осцилограми електричного вибуху мідних провідників однакового радіусу ($0,06 \cdot 10^{-3}$) та різної довжини: а) довжина - 0,05 м; б) довжина - 0,1 м; в) довжина - 0,3 м; г) довжина - 0,5 м. Вертикальна розгортка 5 кА/ поділ, горизонтальна – 20 нс/ поділ

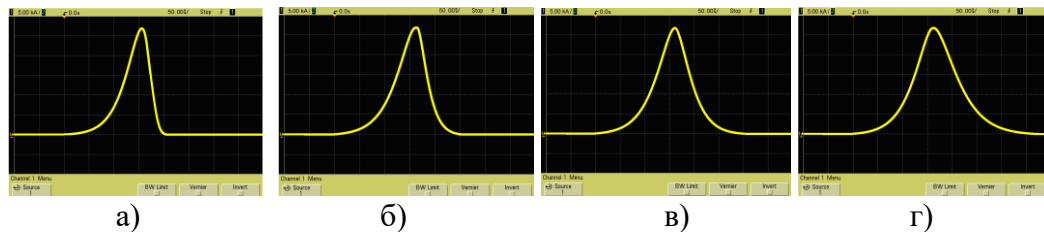


Рис. 16. Осцилограми електричного вибуху вольфрамових провідників однакового радіусу ($0,06 \cdot 10^{-3}$) та різної довжини: а) довжина - 0,05 м; б) довжина - 0,1 м; в) довжина - 0,3 м; г) довжина - 0,5 м. Вертикальна розгортка 5 кА/ поділ, горизонтальна – 50 нс/ поділ

Крім того, процес електричного вибуху всіх типів провідників залишив відповідні характерні сліди і пошкодження на розрядних електродах (див. рис. 17). Такого плану сліди та пошкодження утворюються під час вибуху, коли матеріал тонких провідників, що вибухнув, набуває властивостей газу з високою щільністю (тиск продуктів електричного вибуху $\approx 34 \cdot 10^3$ Атм) і температурою $\approx 10^4$ К [7]. Досить високі щільності струму, викликають розплавлення, часткове випаровування та іонізацію речовини провідника (утворення продуктів детонації). Дані продукти електричного вибуху мають циліндричну форму (див. рис. 17), яка швидко розширюється, гене-

руючи ударну хвилю, швидкість руху фронту якої підпорядковується параболічному закону подібно до моделі сильного вибуху [7, 8].

Для легкоплавких (свинцевих) ЕВП характерна висока щільність металевого іонізованого золю на початкових етапах електричного вибуху, що призводить до утворення безлічі локальних пробоїв практично по всій поверхні електрода (див. рис. 17а). Розрив ланцюга відбувається тільки при достатньо великому розширенні продуктів детонації (розміри циліндричної області перевищують розміри розрядного електрода), що супроводжується зменшенням тиску й щільності іонізованого золю (див. рис. 17а).

Для тугоплавких (вольфрамових) ЕВП характерне незначне розширення продуктів детонації, великі розміри частинок металевого золю і газонаповнених проміжків, що виключає можливість формування електричних пробоїв на поверхні електрода (див. рис. 17б). Область осадження частинок вольфрамового золю, що утворюються в ході електричного вибуху, характеризується двома найбільш інтенсивними концентричними слідами. Перший слід характеризує початок утворення металевого золю з провідника (рис. 17б). Другий – максимальне розширення продуктів детонації (рис. 17б) і повну втрату провідності розрядного проміжку.



Рис. 17. Зовнішній вигляд розрядних електродів після електричного вибуху свинцевого (а) і вольфрамового (б) провідників

Для проведення експериментальних досліджень швидкодіючих комутуючих елементів, що здатні забезпечити послідовне перемикання на навантаження імпульсних струмів високої щільності, до генератора підключалася комплексна структура, здатна послідовно комутувати в ланцюг генератора

тугоплавкі ЕВП (див. рис. 1 і 4). Відстань між провідниками (легкоплавкими і тугоплавкими) ($\geq 0,3\text{ м}$) вибиралася виходячи з умови відсутності пошкоджень сусідніх ЕВП ударною хвилею під час електричного вибуху [14].

При роботі даної структури, тривалість фронту кожного імпульсу, переданого на навантаження електропідривними комутаторами, буде визначатися площею перетину вольфрамових ЕВП (радіус провідників $\approx 0,06 \cdot 10^{-3}$) і, відповідно до результатів, отриманих на першому етапі експерименту, не буде перевищувати $138 \cdot 10^{-9}$ с (див. рис. 12 і 16). Період повторення комутації тугоплавких ЕВП в ланцюг генератора буде визначитися тривалістю електричного вибуху вольфрамового провідника (див. рис. 16) довжиною $0,1\text{ м}$ ($\tau_i \approx 168 \cdot 10^{-9}$) і паузою струму ($\tau_{ПС} \approx 90 \cdot 10^{-9}$) свинцевого (комутуючого) провідника, який має мінімально можливу довжину ($7 \cdot 10^{-3}$ м), при якій відбувається повний розрив ланцюга [8].

З огляду на конструкцію й розміщення легкоплавких і тугоплавких провідників в обраній структурі, запишемо вираз для часу спрацьовування (вторинного пробую) N-го комутатора:

$$t_{СП_N} = N \cdot t_{ПС_1} + (N - 1) \cdot \tau_i, \quad (1)$$

де

$t_{ПС_1}$ - тривалість паузи струму першого (найменшого) ЕВП комутатора (свинцевого провідника);

τ_i - тривалість імпульсу, який формується при електричному вибуху тугоплавкого провідника.

На рис. 18 і 19 наведена осцилограма й пояснювальний рисунок, що характеризують послідовну швидкодіючу комутацію п'яти вольфрамових провідників в ланцюг високовольтного генератора.

Процес комутації вольфрамових провідників, починається з електричного вибуху легкоплавких (свинцевих) провідників (див. рис. 13), який викликає розрив всього ланцюга, який підключається до високовольтного генератора (див. рис. 18 і 19).

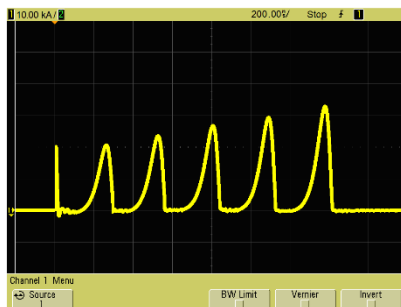


Рис. 18. Осцилограма послідовності послідовного підключення та електричного вибуху п'яти вольфрамових провідників однакової довжини і площі перетину (вертикальна розгортка 10 кА/поділ, горизонтальна - 200 нс/поділ)

Оскільки в обраній структурі всі легкоплавкі провідники мали однако-ву площу перетину, а довжини їх різнилися незначно ($l_1 = 0,007$ м, $l_2 = 0,02$ м, $l_3 = 0,04$ м, $l_4 = 0,06$ м, $l_5 = 0,08$ м), їх електричний вибух відбу-вався практично одночасно (див. рис. 18 і 19).

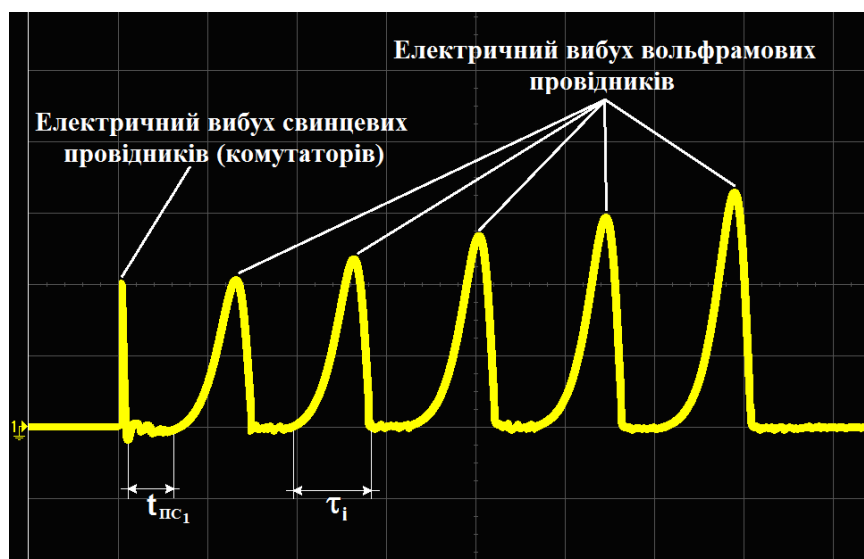


Рис. 19. До визначення особливостей послідовної комутації

Розширення продуктів детонації електричного вибуху кожного з п'яти свинцевих провідників призвело до утворення паузи струму (див. рис. 18 і 19). Час, за який тиск продуктів детонації кожного зі свинцевих провідників

знизиться до критичного значення, буде визначати початок вторинного пробою (закінчення паузи струму) і, відповідно, послідовну комутацію кожного вольфрамового ЕВП в структурі.

Мінімальне значення паузи струму ($t_{лс1}$) виникає після електричного вибуху найменшого свинцевого провідника (див. рис. 18). Вторинний пробій продуктів детонації першого (найменшого) свинцевого ЕВП призведе до включення в ланцюг генератора наступного за ним вольфрамового провідника (див. рис. 4, 16, 18). Струм генератора, що протікає через підключений вольфрамовий провідник, призведе до його швидкого електричному вибуху, формуючи перший імпульс, який передається на навантаження (див. рис. 18 і 19). Тривалість сформованого імпульсу (τ_i) буде визначатися конструктивними параметрами вольфрамового провідника (площею перетину і довжиною). Оскільки в обраній структурі (див. рис. 4) вольфрамові провідники мали однакові довжини і площі перетину, всі сформовані імпульси в послідовності мають однакову тривалість ($\tau_i \approx 168 \cdot 10^{-9} \text{ с}$).

По закінченню електричного руйнування вольфрамового провідника, ланцюг генератора знову розривається до початку вторинного пробою продуктів детонації наступного за довжиною свинцевого провідника, комутуючи для вибуху другий тугоплавкий провідник і так далі (див. рис. 19).

Висновки. В результаті проведення експериментальних досліджень була практично підтверджена можливість створення швидкодіючих комутуючих елементів, здатних забезпечити послідовне перемикання імпульсних струмів високої щільності ($j \approx 10^7 \text{ А/см}^2$).

На першому етапі експерименту були отримані різні значення загострення (зміни тривалості фронту і спаду) імпульсних сигналів, що подаються з генератора. Для цього випадку електричний вибух застосовувався до одиночних провідників, з різною температурою плавлення, площею перетину й довжиною.

Вибір різних температурних і конструктивних параметрів ЕВП дозволив зробити висновок, що при застосуванні механізму швидкого електричного вибуху до провідників, які мають різні радіуси перетину (від $0,06 \cdot 10^{-3}$ до $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$), можливо варіювати тривалість фронту сформованого імпульсу загострення від $\approx 2,1 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ до $\approx 180 \cdot 10^{-8} \text{ с}$.

Вибір значення тривалості спаду імпульсного впливу буде визначатися, в основному, різною енергією сублимації матеріалів ЕВП і може варіюватися в діапазоні від $\approx 2,6 \cdot 10^{-9}$ с до $\approx 0,72 \cdot 10^{-6}$ с.

Експериментальне визначення значень загострення електричним вибухом провідників імпульсних сигналів, що подаються з генератора, дозволило синтезувати комплексну структуру швидкодіючих комутуючих елементів. До складу структури були включені свинцеві ЕВП, що виконують роль комутаторів і вольфрамові провідники, електричний вибух яких загострював імпульсну напругу, що подається з генератора.

Електричний вибух легкоплавких провідників і подальший пробій його продуктів детонації дозволив сформувати послідовний порядок підключення вольфрамових провідників в ланцюг генератора, пов'язаний з первинною довжиною свинцевого провідника.

Отримані експериментальні результати добре узгоджуються з теоретичними, що представлені в роботі [12]. Отримані в ході експерименту залежності часу спрацювання комутаторів від первинної довжини свинцевих ЕВП (для довжини 0,007 м - $t_{СП1} \approx 90 \cdot 10^{-9}$ с; для 0,02 м - $t_{СП2} \approx 352 \cdot 10^{-9}$ с; для 0,04 м - $t_{СП3} \approx 610 \cdot 10^{-9}$ с; для 0,06 м - $t_{СП4} \approx 868 \cdot 10^{-9}$ с; для 0,08 м - $t_{СП5} \approx 1125 \cdot 10^{-9}$ с), розходяться з теоретичними не більш, ніж на 12%.

Список використаних джерел:

1. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Под ред. В.И. Кравченко. М.: Радио и связь, 1987. 256 с.
2. Кравченко В.И. Электромагнитное оружие. Х.: НТУ «ХПИ», 2008. 185 с.
3. Лебедев С.В., Савватимский А. И. Металлы в процессе быстрого нагревания электрическим током большой плотности. Успехи физических наук. Т. 144, Вып. 2. 1984. С. 215-250. doi:10.3367/UFNr.0144.198410b.0215
4. Бурцев В.А., Калинин И.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энерго-атомиздат, 1990. 342 с.
5. Иваненков Г.В., Пикуз С.А., Шелковенко Т.А. и др. Обзор литературы по моделированию процессов электрического взрыва тонких проволок (часть 1). М.: ФИАН, 2004. 26 с.
6. Ткаченко С.И., Мингалева А.Р., Романова В.М. и др. Возможные

сценарии развития вторичного пробоя при электрическом взрыве проводников в вакууме и воздухе. Материалы Научно-коорд. сессии «Исследования неидеальной плазмы» под рук. академика В.Е. Фортова. М.: ОИВТ РАН, 2007. С. 46-52.

7. Пикуз С.А., Ткаченко Д.А., Барিশпольцев Д.А. и др. Интерпретация экспериментальных данных по электрическому взрыву тонких проволочек в воздухе. Письма в ЖТФ. 2007. Том 33, вып. 15. С. 47-55.

8. Кучер Д.Б., Литвиненко Л.В., Зонтова Т.В. Экспериментальные исследования паузы тока, возникающей после быстрого электрического взрыва легкоплавких проводников. Системи обробки інформації: Збірник наукових праць, 2012. Вип. 6(104). С.62–65.

9. Кучер Д.Б., Литвиненко Л.В., Зонтова Т.В. Экспериментальные исследования временных характеристик одиночных импульсных воздействий, формируемых при электрическом взрыве проводников. Системи управління навігації та зв'язку: наукове періодичне видання / Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління. Київ, 2012. Вип. 2(22). С. 75–81.

10. A.E. Ter-Oganesyan, S.I. Tkachenko, V.M. Romanova, A.R. Mingaleev, T.A. Shelkovenko, and S.A. Pikuz. Nanosecond electric explosion of a tungsten wire in different media. Plasma Physics Reports, Vol. 31, No. 11, 2005, pp. 919–926. doi:10.1134/1.2131128.

11. Кучер Д.Б., Зонтова Т.В., Кучер Б.Д., Томишин Е.А. Использование явления вторичного пробоя при электрическом взрыве проводников для формирования мощных полиимпульсных излучений. Системи обробки інформації: Збірник наукових праць / Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. Харків, 2012. Вип. 3(101). Т. 2. С.73–77.

12. Кучер Д. Б., Смиринська Н. Б. Особливості конструкції пристрою формування послідовності потужних електромагнітних випромінювань в системах обмеженого об'єму. Озброєння та військова техніка: Науково-технічний журнал / Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України. Київ, 2017. №2 (14). С.84-89. doi:10.34169/2414-0651.2017.2(14).84-89.

13. V.M. Romanova, A.R. Mingaleev, A.E.Ter-Oganesyan, T.A. Shelkovenko, G.V. Ivanenkov, and S.A. Pikuz. Core structure and secondary breakdown of an exploding wire in the current-pause regime. Matter and Radiation at Extremes. Vol. 4, Issue 2, March 2019, 026401. doi:10.1063/1.5085487.

14. Беннет Ф., Шир Д. Ударные волны, возбуждаемые с помощью

взрывающихся проволок при низком давлении окружающего газа/ Электрический взрыв проводников / под ред. А. А. Рухадзе. М.: Мир, 1965. С. 209-225.

References

1. Kravchenko, V.I., Bolotov, E.A., Letunova, N.I.: Radioelektronnye sredstva i moshchnye elektromagnitnye pomekhi (Radioelectronic equipment and powerful electromagnetic interference): V.I. Kravchenko (ed). Radio i svyaz, Moscow (1987).

2. Kravchenko, V.I.: Elektromagnitnoe oruzhie (Electromagnetic weapon). NTU «KhPI», Kharkiv (2008).

3. Lebedev, S.V., Savvatimskiy, A. I.: Metally v protsesse bystrogo nagrevaniya elektricheskim tokom bolshoy plotnosti (Metals during rapid heating by dense currents). Uspekhi fizicheskikh nauk. Vol. 144 (2), 215-250 (1984). doi:10.3367/UFNr.0144.198410b.0215

4. Burtsev, V.A., Kalinin, I.V., Luchinskiy, A.V.: Elektricheskiy vzryv provodnikov i ego primeneniye v elektrofizicheskikh ustanovkakh (Electrical explosion of the conductors and its application in electrophysical installations). Energo-atomizdat, Moscow (1990).

5. Ivanenkov, G.V., Pikuz, S.A., Shelkovenko, T.A., Romanova, V.M., Glazyrin, I.V., Kotova, O.G. and Slesareva, A.N.: Obzor literatury po modelirovaniyu protsessov elektricheskogo vzryva tonkikh provolochek (Literature review on modeling the processes of the electric explosion of the thin wires) (Part 1). Working paper FIAN, Moscow (2004).

6. Tkachenko, S.I., Mingaleev, A.R., Romanova, V.M. et al: Vozmozhnye tsenarii razvitiya vtornichnogo proboya pri elektricheskoy vzryve provodnikov v vakuume i vozduke (Possible scenarios for the development of secondary breakdown in the electric explosion of conductors in vacuum and air). Materialy Nauchno-kooord. sessii «Issledovaniya neidealnoy plazmy» V.E. Fortova (ed). p.p.46-52. OIVT RAN, Moscow (2007).

7. Pikuz, S.A., Tkachenko, D.A., Barishpoltsev, D.A., Ivanenkov, G.V., Mingaleev, A.R., Romanova, V.M., Ter-Oganesyan, A.E. and Shelkovenko, T.A.: Interpretatsiya eksperimentalnykh dannykh po elektricheskoy vzryvu tonkikh provolochek v vozduke (Interpretation of experimental data on the electrical explosion of thin wires in air). JTP Letters. vol. 33 (15), p.p. 47-55 (2007).

8. Kucher, D.B., Litvinenko, L.V., Zontova, T.V.: Eksperimentalnye issledovaniya pauzy toka, vznikayushchey posle bystrogo elektricheskogo vzryva legkoplavkikh provodnikov (Experimental research of pause in current occurred after rapid electrical explosion of easily melting conductors).

Information Processing Systems. Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University (KNAFU), 6(104), 62–65 (2012).

9. Kucher, D.B., Litvinenko, L.V., Zontova, T.V.: Eksperimentalnye issledovaniya vremennykh kharakteristik odinochnykh impulsnykh vozdeystviy, formiruemykh pri elektricheskom vzryve provodnikov (Experimental studies of the temporal characteristics of single impulse influences formed during the electric explosion of conductors). *Systemy upravlinnja navighaciji ta zv'jazku: naukovе periodychnе vydannja. Centralnyj naukovо-doslidnyj instytut navighaciji ta upravlinnja.* 2(22), 75–81 (2012).

10. Ter-Oganesyan, A. E., Tkachenko, S. I., Romanova, V. M., Mingaleev, A. R., Shelkovenko, T. A. and Pikuz, S. A. Nanosecond electric explosion of a tungsten wire in different media. *Plasma Physics Reports*, 31(11), 919-926 (2005). doi:10.1134/1.2131128.

11. Kucher, D.B., Zontova, T.V., Kucher, B.D., Tomishin, E.A.: Ispolzovanie yavleniya vtorichnogo proboya pri elektricheskom vzryve provodnikov dlya formirovaniya moshchnykh poliimpulsnykh izlucheny (The phenomenon of second breakdown during the electric explosion conductors for forming powerful many pulse radiation). *Information Processing Systems.* 3(101/2), 73–77 (2012).

12. Kucher, D. B., Smyrynska, N. B.: Osoblyvosti konstrukciji prystroju formuvannja poslidoynosti potuzhnykh elektromaghnitnykh vyprominjuvanj v systemakh obmezhenogho ob'jemu (Features of construction of device for forming the sequence of powerful electromagnetic radiation in systems of limited volume). *Weapons and military equipment: Naukovо-tekhnichnyj zhurnal. Central research institute of weapons and military equipment of the Armed Forces of Ukraine.* 14(2), 84-89 (2017). doi:10.34169/2414-0651.2017.2(14).84-89.

13. Romanova, V.M., Mingaleev, A.R., Ter-Oganesyan, A.E., Shelkovenko, T.A., Ivanenkov, G.V. and Pikuz, S.A.: Core structure and secondary breakdown of an exploding wire in the current-pause regime *Matter and Radiation at Extremes.* 4 (2), 026401 (2019). doi:10.1063/1.5085487.

14. Bennet, F., Shir, D.: Udarnye volny, vzbuzhdaemye s pomoshchyu vzryvayushchikhsya provolochek pri nizkom davlenii okruzhayushchego gaza (Strike waves generated by exploding wires at low ambient gas pressures). In: Rukhadze, A. A. (ed) *Elektricheskiy vzryv provodnikov*, 209-225. Mir, Moscow (1965).