

## ВРЕМЕННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАЗМЕННО-ЭРОЗИОННОГО РАЗМЫКАТЕЛЯ ДЛЯ ЦЕПЕЙ БЫСТРОГО РАЗРЯДА

© 2020 г. П. С. Анциферов<sup>a,b,\*</sup>, Л. А. Дорохин<sup>a</sup>, А. А. Павлов<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Институт спектроскопии РАН

Россия, 108408, Москва, Троицк, ул. Физическая, 5

<sup>b</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)  
Россия, 141701, Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9

\*e-mail: ants@isan.troitsk.ru

Поступила в редакцию 18.12.2019 г.

После доработки 26.12.2019 г.

Принята к публикации 29.12.2019 г.

Излагаются результаты экспериментального исследования характеристик плазменно-эрозионного размыкателя, предназначенного для работы в разрядных цепях с индуктивным накоплением энергии. Определены временные зависимости сопротивления размыкателя, скачок которого достигает 3 Ом, а также перенапряжения, достигающего до 60 кВ при начальном напряжении основной емкости 30 кВ. Размыкатель обеспечивает скорость нарастания тока  $0.5 \cdot 10^{12}$  А/с в нагрузке с индуктивностью до 50 нГн.

DOI: 10.31857/S0032816220030155

### ВВЕДЕНИЕ

Размыкатель тока — коммутационный элемент, применяемый в разрядных цепях с индуктивным накоплением энергии [1, 2]. Плазменно-эрозионный размыкатель (п.э.р.), описанный в [3], был успешно использован в ряде экспериментов с быстрыми разрядами, в которых изучалась кумуляция сходящихся сферических и конических ударных волн [4, 5]. В этих работах был применен разрядный контур с индуктивным накоплением энергии, позволивший получать в разрядной полости с рабочим газом ток в несколько десятков килоампер со скоростью нарастания порядка  $10^{12}$  А/с, что принципиально важно для генерации ударных волн [6]. Описываемая конструкция п.э.р. возникла в результате экспериментов по применению плазменного фокуса в качестве размыкателя [7].

Использование емкостного накопителя в разрядной цепи с полной индуктивностью порядка 100 нГн требует для получения таких скоростей нарастания тока рабочих напряжений порядка 100 кВ. Начальное напряжение основной емкости разрядного контура с индуктивным накопителем [3] составило всего 30 кВ, что существенно упростило работу с установкой. Дальнейшее улучшение характеристик размыкателя требует детального изучения его параметров и, в частности, за-

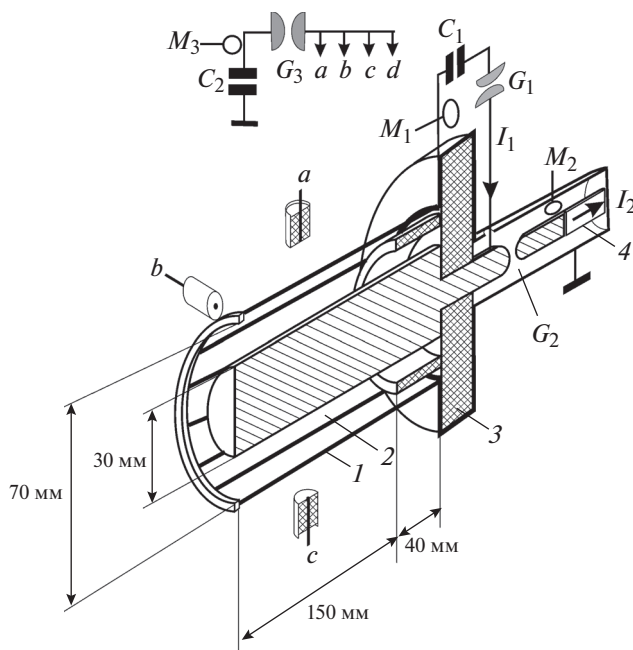


Рис. 1. Схематический чертеж разрядного контура с плазменно-эрозионным размыкателем. 1 — катод; 2 — анод; 3 — изолятор; 4 — нагрузка.  $C_2$ – $G_3$  — разрядный контур плазменных пушек  $a$ – $d$ .

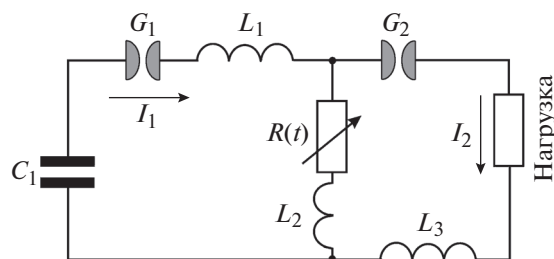


Рис. 2. Эквивалентная схема разрядного контура с индуктивным накопителем и п.э.р.

висимости его сопротивления от времени. В данной работе представлены результаты измерений временных зависимостей сопротивления размыкателя, полученные с помощью моделирования кривых тока в разрядной цепи, полученных с помощью магнитных зондов.

### ОПИСАНИЕ РАЗРЯДНОГО КОНТУРА

Общая схема разрядного контура и схематический чертеж плазменного размыкателя приведены на рис. 1. П.э.р. представляет собой систему из двух коаксиальных электродов, откачанную до остаточного давления  $10^{-3}$  Па. В пространство между электродами инжектируется плазма, обеспечивающая начальную проводимость размыкателя. Основные электротехнические характеристики экспериментальной установки описаны в работе [3], отличия представляемого варианта конструкции заключаются в увеличении общей длины электродов размыкателя с целью усиления изолятора до 190 мм и уменьшении основной разрядной емкости  $C_1$  до 0.625 мкФ.

Разряд начинается со срабатывания плазменных коаксиальных плазменных пушек  $a-d$  (рис. 1, пушка  $d$  на представленном сечении чертежа не видна, она расположена симметрично остальным), обеспечивающих инжекцию начальной плазмы в объем между коаксиальными анодом и катодом размыкателя. Разрядный контур плазменных пушек является емкостным накопителем  $C_2 = 0.47$  мкФ, рабочее напряжение 15 кВ. Цилиндрический катод собран из металлических стержней, что позволяет инжектировать начальную плазму в пространство между катодом и анодом.

С задержкой 2–5 мкс срабатывает разрядник  $G_1$ , и начинается разряд основной емкости  $C_1$ , приводящий к накоплению энергии в конструктивной индуктивности разрядного контура. По достижении разрядным током, протекающим через начальную плазму в объеме размыкателя, критического значения сопротивление размыкателя скачкообразно возрастает и происходит переброс разрядного тока в нагрузку.

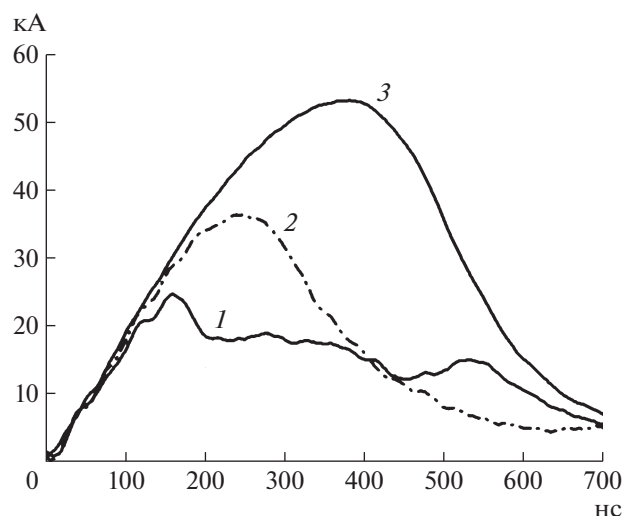


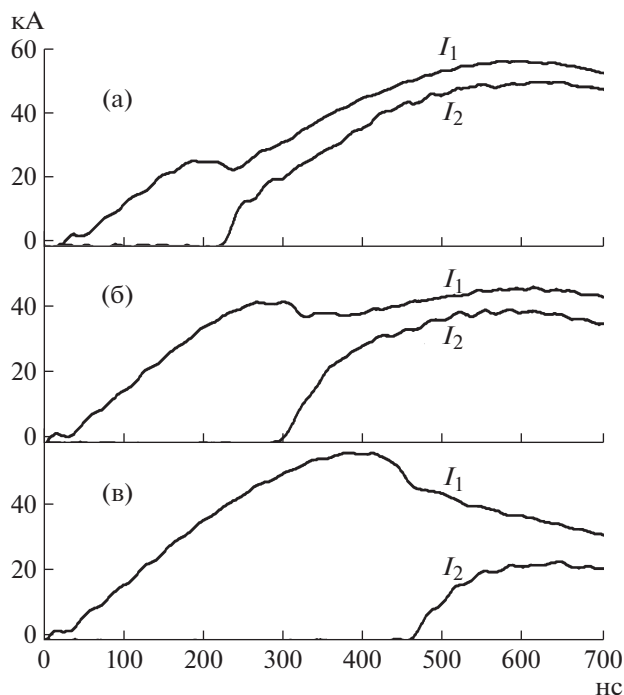
Рис. 3. Разрядный ток  $I_1$  при заблокированном разряднике  $G_2$  для различных временных задержек начала основного разряда относительно момента срабатывания плазменных пушек: 2.3 мкс (1), 3.5 мкс (2), 5.5 мкс (3).

Калиброванные магнитные зонды  $M_1-M_3$  представляют собой витки провода, соединенные с аналоговым интегратором. Зонды  $M_1$  и  $M_2$  позволяют измерять ток разряда  $I_1$  основной емкости  $C_1$  и ток нагрузки  $I_2$ . Магнитный зонд  $M_3$  контролирует ток разряда в контуре плазменных пушек, что необходимо для определения задержки срабатывания основного разрядника  $G_1$ . Разрядник  $G_2$  отсекает нагрузочную цепь от цепи основного разряда и срабатывает при возникновении перенапряжения на электродах п.э.р.

Эквивалентная схема разрядного контура с индуктивным накопителем приведена на рис. 2. Сумма конструктивной индуктивности  $L_1$  и индуктивности  $L_2$  п.э.р., определенная из периода колебаний разрядного тока при заблокированном разряднике  $G_2$ , составляет 150 нГн. Величина  $L_2$  оценивается как 40 нГн. Индуктивность нагрузки  $L_3$  зависит от вида нагрузки и лежит в пределах 20–50 нГн. Размыкатель показан на схеме в виде зависящего от времени сопротивления  $R(t)$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Информация о временном ходе сопротивления размыкателя получена на основе численного анализа тока  $I_1$ , регистрируемого с помощью магнитного зонда. Поскольку нас интересовала зависимость от времени сопротивления размыкателя  $R(t)$ , разрядник  $G_2$  был заблокирован (в его зазор введен диэлектрик) и разрядный ток в нагрузку не поступал. Были получены кривые разрядного тока с различным количеством инжектированной начальной плазмы в объем между электродами



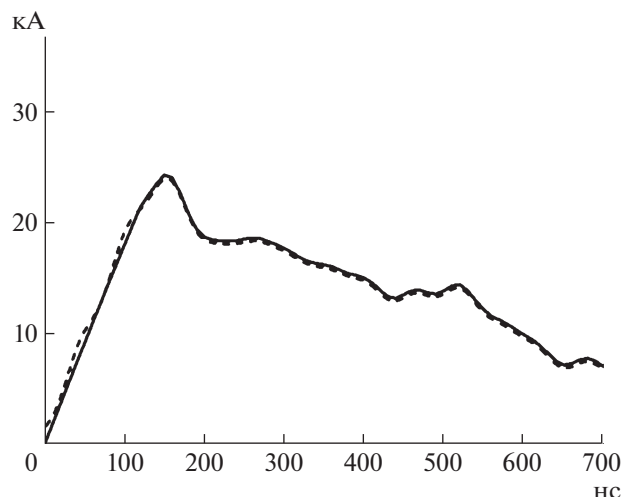
**Рис. 4.** Полный ток  $I_1$  и ток в нагрузке  $I_2$  для различных задержек начала основного разряда относительно момента срабатывания плазменных пушек; (а)–(в) соответствуют кривым 1–3 на рис. 3.

размыкателя (рис. 3). Это количество определялось временем работы плазменных пушек до момента срабатывания основного разрядника  $G_1$  и начала разрядного тока.

Увеличение плотности начальной плазмы в размыкателе приводило к увеличению времени задержки скачка сопротивления относительно начала разрядного тока (см. рис. 3). Зависимость тока  $I_1$  от времени определяется осцилляциями в основном разрядном контуре и временным ходом сопротивления размыкателя. Если разблокировать разрядник  $G_2$  (убрать диэлектрик из зазора), то возникающее на размыкателе перенапряжение перебросит ток в нагрузку (см. рис. 4). Временная зависимость тока  $I_1$  теперь будет отличаться от приведенной на рис. 3, так как параллельно размыкателю теперь включена нагрузка.

### РЕЗУЛЬТАТ

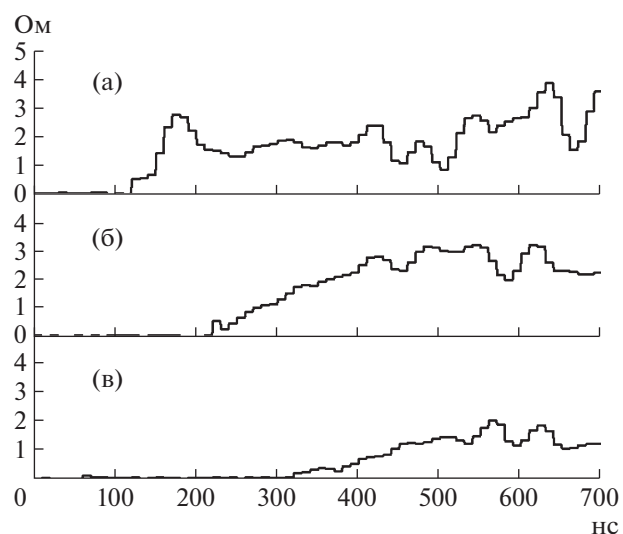
При помощи численного моделирования эквивалентной схемы рис. 2 с заблокированным разрядником  $G_2$  ( $I_2 = 0$ ) был восстановлен временной ход сопротивления размыкателя. Зависимость сопротивления размыкателя от времени подбиралась таким образом, чтобы моделирующие кривые воспроизводили экспериментальные кривые токов  $I_1$ . При численном решении диффе-



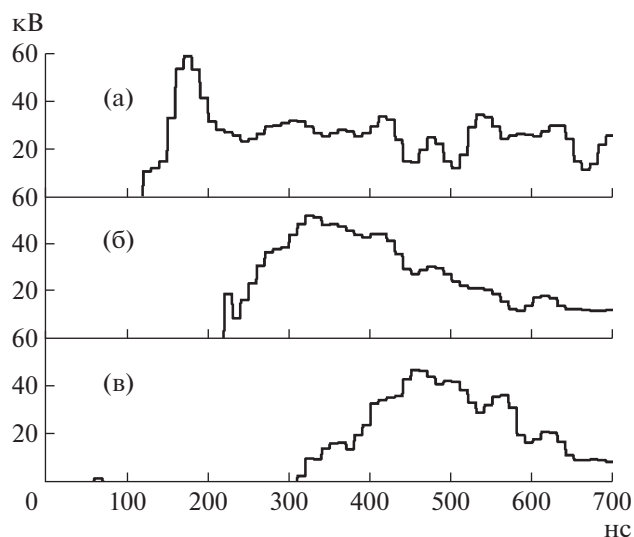
**Рис. 5.** К расчету зависимости сопротивления п.э.р. от времени: штриховая линия соответствует кривой  $I$  тока  $I_1$  на рис. 3, сплошная – смоделированной кривой тока.

ренциальных уравнений была использована не-явная разностная схема.

Пример расчета, соответствующего кривой тока  $I$  на рис. 3, приведен на рис. 5. Восстановленные зависимости сопротивления п.э.р. от времени, соответствующие кривым тока на рис. 3, даны на рис. 6. Видно, что скачок сопротивления в момент достижения током  $I_1$  критического значения достигает 3 Ом. Перенапряжение на размыкателе определяется в основном произведением тока  $I_1$  и текущего значения сопротивления п.э.р. Вклад от напряжения на индуктивности  $L_2$  относительно



**Рис. 6.** Зависимости сопротивления п.э.р. от времени (а)–(в), полученные с помощью моделирования кривых тока соответственно 1–3 на рис. 3.



**Рис. 7.** Зависимости напряжения на п.э.р. от времени (а)–(в), соответствующие временному ходу сопротивления п.э.р. (а)–(в) рис. 6.

мал. Зависимость напряжения на размыкателе от времени дана на рис. 7. Оно достигает значений 60 кВ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные измерения показали, что скачок сопротивления п.э.р. описываемой конструкции достигает величины 3 Ом, обеспечивая пренапряжение на нагрузке до 60 кВ. Оптимальная задерж-

ка начала основного разряда относительно момента срабатывания плазменных пушек составляет 3.5 мкс, что соответствует кривой 2 на рис. 3 и соответственно перебросу тока в нагрузку (рис. 4б). При этом разрядный ток  $I_1$  еще не достигает максимального значения. Увеличение задержки срабатывания пушек свыше 3.5 мкс приводит к уменьшению величины переброшенного в нагрузку тока, что может быть связано с пробоем межэлектродного промежутка в п.э.р. возникающим перенапряжением. Возможным путем оптимизации конструкции может быть увеличение диаметра катодного электрода.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.
2. *Bluhm H.* Pulsed Power Systems, Principles and Applications. Berlin–Heidelberg–New York: Springer-Verlag, 2006.
3. *Анциферов П.С., Дорохин Л.А., Сидельников Ю.В.* // ПТЭ. 2011. № 2. С. 44.
4. *Antsiferov P.S., Dorokhin L.A.* // Phys. Plasmas. 2014. V. 21. P. 042119. <https://doi.org/10.1063/1.4873402>
5. *Antsiferov P.S., Dorokhin L.A., Koshelev K.N.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. P. 165601. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aab58eJ>
6. *Боброва Н.А., Буланов С.В., Разинкова Т.Л., Сасоров П.В.* // Физика плазмы. 1996. Т. 22. № 5. С. 387.
7. *Хаутиев Э.Ю., Анциферов П.С., Дорохин Л.А., Кошелев К.Н., Сидельников Ю.В.* // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 11. С. 110.