

Взрывные размыкатели тока

В. А. Демидов

Рассматриваются несколько основных экспериментально проверенных схем конструкций взрывных размыкателей тока. Приводятся результаты их исследований на плоских и цилиндрических моделях, а также результаты полномасштабных опытов с запиткой от спиральных и дисковых магнитокумулятивных генераторов.

Введение

Взрывные размыкатели тока (ВРТ) работают на принципе механического разрушения проводника (фольги) индуктивного накопителя энергии продуктами детонации (ПД) заряда взрывчатого вещества (ВВ). При разрушении проводника зарядом ВВ дальнейшее протекание тока связано с образованием электрической дуги. Электромагнитная энергия преобразуется в дуге в тепловую энергию. Охлаждение дуги продуктами детонации обуславливает прерывание тока и формирование импульса напряжения на ВРТ. Максимальное сопротивление ВРТ и скорость его нарастания определяются скоростью образования разрывов в разрушаемом проводнике и скоростью отвода тепловой энергии от разрядов в окружающую среду.

В работе [1] показано, что предельные коммутационные характеристики ВРТ определяются соотношением $EH < Pc$, где E , H – напряженности электрического и магнитного полей, P – давление среды, c – скорость звука в среде. Из этого соотношения следует, что эффективность взрывного размыкателя зависит как от характеристик ВВ, так и от свойств среды, в которой зажигается дуга, а также от организации механического разрушения проводника и охлаждения плазмы дуги.

К факторам, влияющим на формирование импульса тока в нагрузке, относятся проводимость $\sigma_{ПД}$ и электрическая прочность продуктов детонации ВВ. В [2] для ТЭНа, гексогена и октогена получены значения $\sigma_{ПД} = (1 - 7) \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Электрическая прочность ПД тротила, гексогена и их смесевых составов составляет 20–70 кВ/мм [3, 4].

Взрывные размыкатели тока с ребристой преградой

Разрушение фольги в ВРТ с ребристой преградой (РП) из диэлектрика происходит в результате разного ускорения под действием ударных волн (УВ) участков фольги, находящихся над пазами и ребрами преграды. Во ВНИИЭФ в первых опытах по обострению импульса тока спиральных магнитокумулятивных генераторов (МКГ) использовался размыкатель (рис. 1) с ребристой преградой и зарядом ВВ тороидальной формы [5]. Преграда была выполнена из ПММА с шириной пазов 1 мм, глубиной 4 мм и шириной выступов 1 мм. Заряд ВВ из ТГ 30/70 в виде усеченного тороида имел

наружный диаметр 100 мм, внутренний – 42 мм. Инициирование разрывного заряда ВВ осуществлялось по внутреннему кольцу ударной волной от заряда ВВ лайнера МКГ.

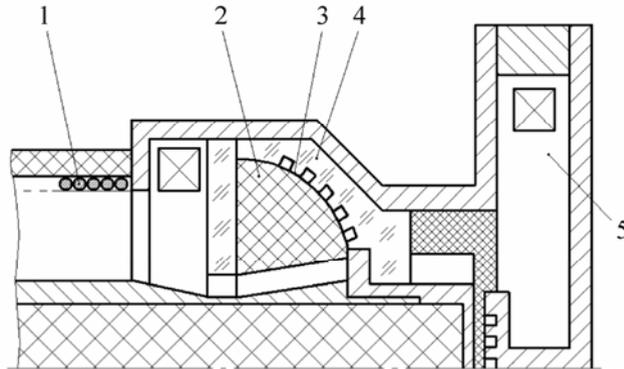


Рис. 1. ВРТ с тороидальным зарядом ВВ: 1 – спиральный МКГ, 2 – разрывной заряд, 3 – фольга, 4 – ребристая преграда, 5 – нагрузка

Эта конструкция ВРТ исследовалась при запитке от спиральных МКГ током до 3 МА. Нагрузка составляла 18 нГн, толщина алюминиевой фольги – 0,1–0,3 мм, ширина – 170 мм, длина – 38 мм.

На рис. 2 представлены зависимости максимального сопротивления ВРТ (R) и характерного времени нарастания тока τ (время нарастания тока – от 0,1 до 0,9 его максимального значения) в нагрузке от толщины фольги (δ_f). Видно, что с увеличением δ_f основные характеристики ВРТ заметно ухудшаются. При использовании медной фольгой толщиной 0,2 мм максимальное сопротивление размыкателя не превышало 5 МОм, $\tau \sim 3$ мкс. При возрастании разрываемого тока от 450 кА до 2,7 МА значения R и τ изменялись очень мало. Максимальное напряжение (~55 кВ) наблюдалось в опытах с фольгой толщиной 0,1 и 0,15 мм.

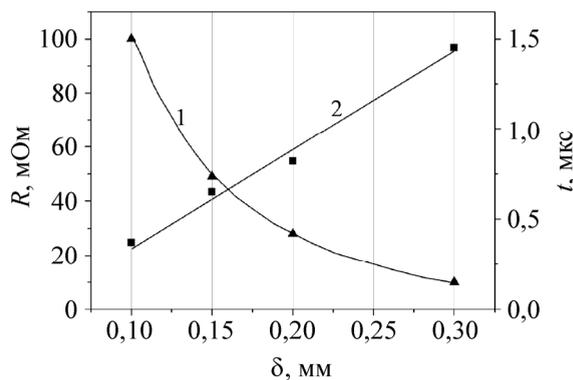


Рис. 2. Зависимости максимального сопротивления размыкателя (1) и характерного времени нарастания тока в нагрузке (2) от толщины фольги

Очевидно, что низкие выходные параметры ВРТ с алюминиевой фольгой толщиной 0,3 мм и медной фольгой толщиной 0,2 мм связаны с особенностями разрушения сравнительно тяжелой фольги на ребристой преграде, выполненной из ПММА. В любой момент времени после прихода

ударной волны от заряда ВВ на фольгу $U_{\text{п}} > U_{\text{р}}$, где $U_{\text{п}}$ и $U_{\text{р}}$ – скорость участков фольги над пазом и над ребром соответственно. Скорость движения фольги над пазом определяется материалом и толщиной фольги, а также типом и толщиной заряда ВВ. Результаты расчетов, выполненных по [6] для медной фольги толщиной 0,2 мм при толщине заряда ВВ (ТГ 50/50) 5–13 мм, показали, что $U_{\text{п}}$ достигает 3–4,5 мм/мкс за 0,7–1,5 мкс.

Движение фольги над ребром определяется акустической «жесткостью» материала преграды $\tilde{R} = \rho c$, где ρ – плотность, c – скорость звука материала ребристой преграды (РП). На рис. 3 приведены расчетные зависимости $U_{\text{р}}(t)$, полученные в [7] для ПММА ($\tilde{R} \approx 3$) и стали ($\tilde{R} \approx 33$). Медная фольга имела толщину 0,2 мм, толщина заряда ВВ из ТГ 50/50 составляла 5 мм. Из рис. 3 видно, что скорость фольги над ребром из ПММА примерно в 2 раза выше, чем скорость над ребром из стали. Это означает, что длина разрываемого участка фольги и, следовательно, сопротивление размыкателя с РП из ПММА будет меньше, чем в случае использования для РП диэлектрического материала с ударно-волновыми свойствами стали.

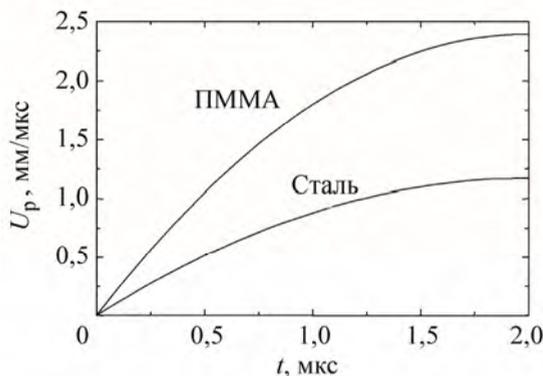


Рис. 3. Расчетные зависимости $U_{\text{р}}$ от времени для различных материалов

Для эффективного разрыва фольги высокое значение \tilde{R} является условием необходимым, но не достаточным [7]. Вследствие волны разгрузки в ребре возникает поперечное течение материала в сторону паза, которое при определенных условиях может препятствовать движению фольги внутри паза. Для снижения поперечного течения материал РП должен удовлетворять двум условиям: плотность материала должна быть максимальна, а скорость звука – минимальна. Для проверки влияния боковой разгрузки ребер преграды на разрушение фольги и размыкание электрической цепи были проведены эксперименты с плоскими РП, в которых применялись различные материалы. Использовалась медная фольга толщиной 0,2 мм, шириной 10 мм и длиной 80 мм. Заряд ВВ (ТЭН) толщиной 5 мм имел ширину 30 мм и длину 80 мм. Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний ВРТ с различными материалами ребристой преграды

Номер опыта	Материал РП	ρ , г/см ³	c , км/с	τ , мкс
1	ПММА	1,18	2,5	0,85
2	Керамика ЦТС-19	7,5	3	0,55
3	Корундовая керамика	3,7	7	2,5

Из испытанных в опытах материалов наилучшим является керамика ЦТС-19. Однако ее высокая стоимость и технические трудности изготовления преграды из этого материала ограничивают возможности использования ЦТС-19 в размыкателях тока. В связи с этим была экспериментально опробована комбинированная преграда [8, 9], изготовленная из двух доступных и высокотехнологичных материалов – стали и ПММА. Стальные полоски, расположенные на ребрах, позволяют снизить контактную скорость U_p и уменьшить боковую разгрузку ребер. В опыте с такой преградой при условиях, описанных выше, получено время коммутации $\tau = 0,6$ мкс.

С целью получения импульсов тока с характерным временем нарастания $\tau = 1$ мкс была исследована зависимость быстродействия размыкателя тока с комбинированной ребристой преградой от начальных условий. Эксперименты проводились на устройстве, состоящем из спирального МКГ и цилиндрического ВРТ с РП (рис. 4).

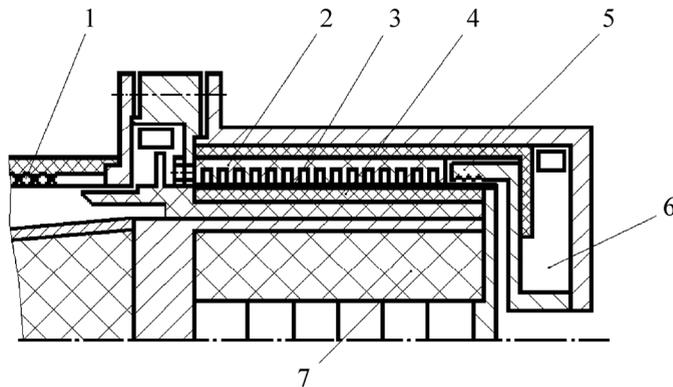


Рис. 4. Общий вид спирального МКГ с взрывным размыкателем тока: 1 – спиральный ВМГ, 2 – ребристая преграда, 3 – фольга, 4 – разрывной заряд ВВ, 5 – замыкающий ключ, 6 – нагрузка, 7 – заряд ВВ

В опытах использовались два типа МКГ – с внутренним диаметром спирали 100 и 200 мм. Первый тип позволяет получать в разрываемом контуре ток до ~ 7 МА, второй – до ~ 10 МА. Размыкатель содержит комбинированную (ПММА–сталь) преграду с внутренним диаметром 100 или 200 мм. Ширина паза 2,0 мм, ширина ребра 1,5 мм, высота ребра 5,5 мм (сечение стальных колец $1,5 \times 1,5$ мм²). В ВРТ диаметром 100 мм разрывной заряд имел толщину 5 мм, в ВРТ диаметром 200 мм – 10 мм. Инициирование разрывного заряда ВВ – осевое с разновременностью $\Delta t \leq 0,3$ мкс. В размыкателях использовали медную фольгу. Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний спиральных МКГ и ВРТ с ребристой преградой

№ опыта	D, мм	δ, мм	l, мм	L_k , нГн	I_k , МА	L_n , нГн	I_n , МА	U_p , кВ	τ , мкс	τ_R , мкс	p , ГВт/см ²
1	100	0,3	90	30	5,4	10	3,8	67	0,6	0,3	0,9
2	100	0,3	90	30	9,5	10	6,7	67	1,0	0,4	1,2
3	100	0,2	90	30	5,1	10	3,9	72	0,5	0,2	1,0
4	100	0,3	40	30	6,2	10	4,7	39	0,9	–	1,6
5	100	0,3	190	20	6,9	40	2,0	210	0,43	–	1,5

Окончание табл. 2

№ опыта	D , мм	δ , мм	l , мм	L_K , нГн	I_K , МА	L_H , нГн	I_H , МА	U_p , кВ	τ , мкс	τ_R , мкс	p , ГВт/см ²
6	200	0,3	200	30	9,2	10	7,0	110	0,6	0,3	0,5
7	100	0,3	300	20	5,6	17	3,4	190	0,3	0,12	0,7
8	200	0,3	400	50	9,3	21	6,6	340	0,48	0,15	0,7

Примечание: D – диаметр расположения фольги, δ – толщина фольги, l – длина фольги, L_K – индуктивность разрываемого контура, I_K – максимальный ток в разрываемом контуре, L_H – индуктивность нагрузки, I_H – максимальный ток в нагрузке, U_p – максимальное напряжение на размыкателе, τ – характерное время нарастания тока в нагрузке (от $0,1I_H$ до $0,9I_H$), τ_R – характерное (в «e» раз) время нарастания сопротивления размыкателя, p – плотность потока электромагнитной энергии через фольгу.

По условиям проведения опыты № 1 и № 2 отличались друг от друга только разрываемым током. Линейная плотность тока в фольге отличалась в $\sim 1,7$ раза ($i = 0,17$ и $0,3$ МА/см соответственно). Осциллограмма производной тока, полученная в опыте № 2, приведена на рис. 5. На рис. 6,а представлены $R(t)$ зависимости опытов, а на рис. 6,б – зависимости токов в МКГ, нагрузке и размыкателе в опыте № 2. Как и в [10], кривые $R(t)$ хорошо аппроксимируются экспоненциальной зависимостью $R(t) = R_0 \exp(t/\tau_R)$.

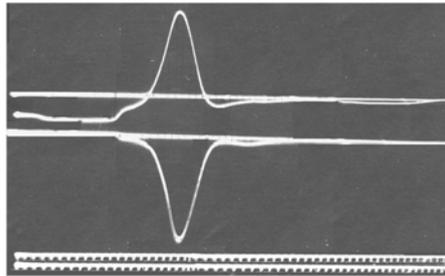


Рис. 5. Осциллограмма производной тока МКГ (верхний луч) и производной тока в нагрузке (нижний луч) в опыте № 2. Метки времени – через 0,2 мкс

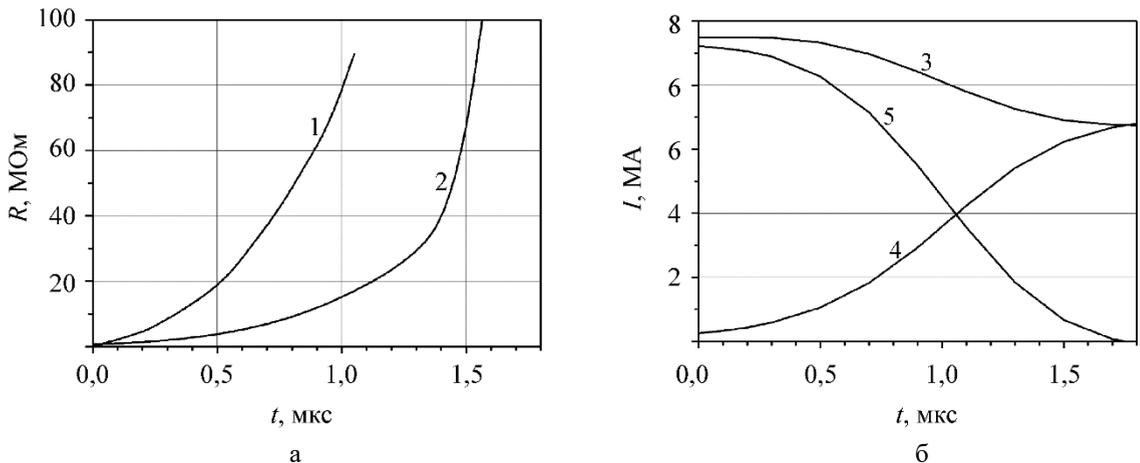


Рис. 6. Зависимости $R(t)$ в опыте № 1 (1) и № 2 (2) (а) и зависимости токов в МКГ (3), нагрузке (4) и размыкателе (5) в опыте № 2 (б)

Характерное время нарастания тока τ в опыте № 2 в $\sim 1,7$ раза больше, чем в опыте № 1. Таким образом, в диапазоне $i = 0,17 - 0,3$ МА/см τ пропорционально линейной плотности тока в фольге. В ранних экспериментах [11] с этим устройством при разрываемых токах $I_k = 3,5 - 5,5$ МА наблюдалась более слабая зависимость времени нарастания тока в нагрузке от $I_k (\tau \sim i^{0,25-0,5})$.

Применение более тонкой фольги (опыт № 3) приводит к некоторому снижению времени нарастания тока в нагрузке.

Опыты № 4 и № 5 проведены при повышенной плотности потока электромагнитной энергии $p = EH = I_R^2 R / (\pi D l)$, где E и H – напряженность электрического и магнитного полей в размыкателе; I_R и R – ток через размыкатель и его сопротивление. Именно параметр p определяет нагрев проводящего слоя среды в размыкателе и его сопротивление. Высоких значений p можно достичь несколькими способами: путем повышения разрываемого тока, сокращением длины фольги или увеличением индуктивности нагрузки. В опыте № 4 с укороченной до 40 мм фольгой и в опыте № 5 с повышенной до 40 нГн нагрузкой $p = 1,5$ и $1,6$ ГВт/см² соответственно. При этом резко изменились зависимости $R(t)$ размыкателей (рис. 7) по сравнению с предыдущими опытами. Сопротивление в этих опытах нарастает до некоторого максимума, а затем снижается. По-видимому, следует считать значение $p \sim 1,5$ ГВт/см² критическим для данного типа размыкателя.

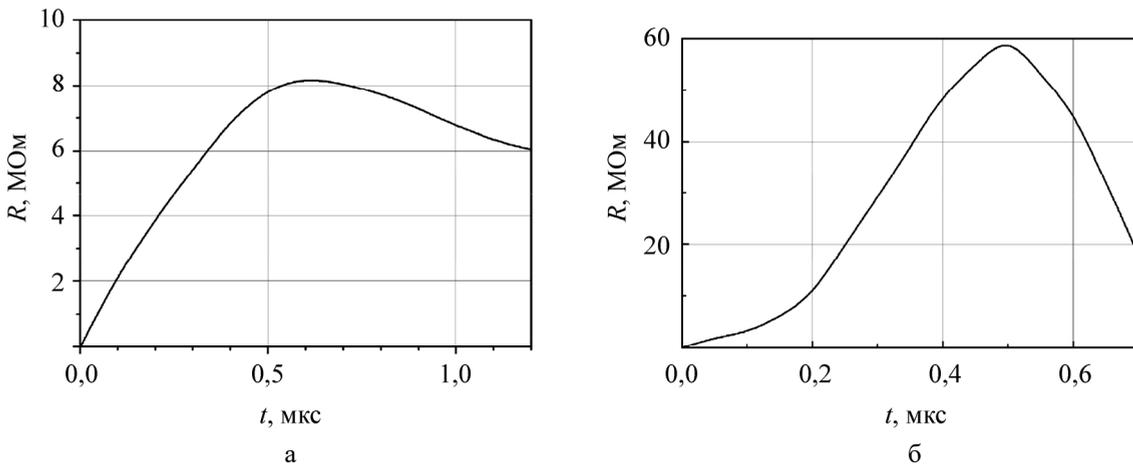


Рис. 7. Зависимости $R(t)$ в опытах № 4 (а) и № 5 (б)

Возможность масштабирования ВРТ при сохранении линейной плотности тока в фольге и параметров цепи коммутации следует из сравнения результатов опытов № 1 и № 6. В них размеры ВРТ (кроме размеров пазов и ребер РП и толщины фольги) отличались в два раза, токи в МКГ и нагрузке также отличались примерно в два раза, а временные характеристики импульса тока в нагрузке и зависимости $R(t)$ были одинаковы (рис. 8).

В табл. 2 под номерами 7 и 8 приведены результаты экспериментов, в которых показана возможность обострения импульсов тока спиральных МКГ до уровня 0,3–0,5 мкс. При этом длина фольги была увеличена примерно до 0,65–1 ее ширины.

Эффективная работа размыкателя со сравнительно толстой (до 0,3 мм) медной фольгой стала возможной благодаря применению комбинированной преграды с оптимальными размерами ребер и пазов. Сопротивление и скорость его роста достигают в экспериментах ~ 100 мОм и $\sim 7 \cdot 10^5$ Ом/с.

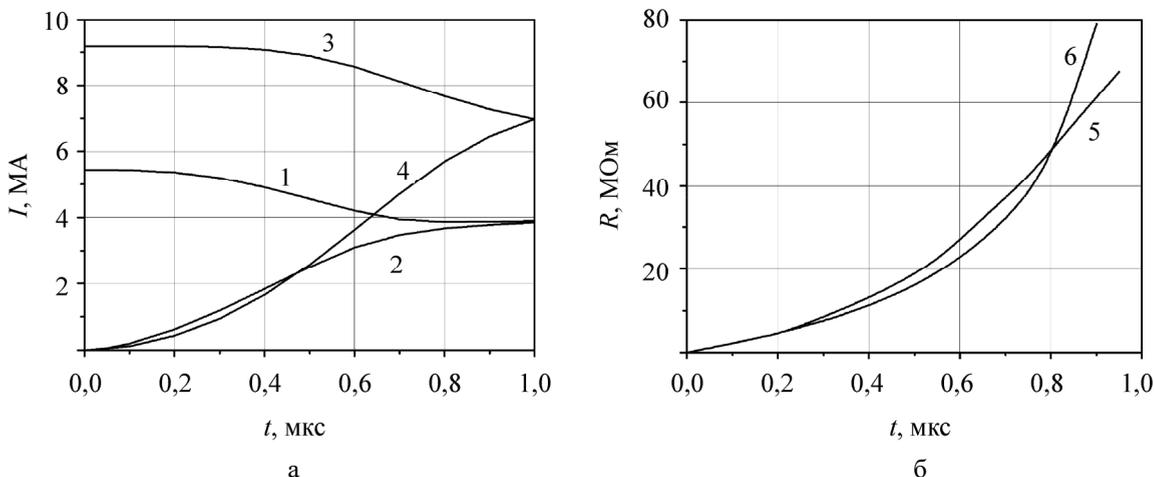


Рис. 8. Зависимости токов (а) и сопротивления размыкателей (б) от времени в опытах № 1 и № 6:
 1, 2, 5 – ток ВМГ, ток в нагрузке и сопротивление размыкателя в опыте № 1;
 3, 4, 6 – ток ВМГ, ток в нагрузке и сопротивление размыкателя в опыте № 6

С целью обострения импульсов тока дисковых магнитокумулятивных генераторов (ДМКГ) и запитки лайнерных нагрузок (z -пинчей) током более 10 МА во ВНИИЭФ были разработаны и испытаны два типа ВРТ: с расположением фольги на диаметре 290 мм (ВРТ290) и диаметре 560 мм (ВРТ560). Для формирования коротких импульсов тока путем разрыва контура ДМКГ ранее использовались электровзрывные размыкатели [12], но в опытах не удалось получить фронт импульса тока менее 1 мкс. Кроме того, электровзрывные размыкатели заметно снижают энергию ДМКГ из-за потерь магнитного потока при нагревании и испарении взрывающегося проводника.

На рис. 9 приведен эскиз ДМКГ с зарядами ВВ диаметром 240 мм (ДВМГ240) и ВРТ290. Размыкатель тока содержит комбинированную ребристую преграду с внутренним диаметром 290 мм и длиной 360 мм. В ВРТ применялась медная фольга толщиной 0,26 мм. Разрывной заряд на основе октогена имел толщину 8 мм. Система инициирования разрывного заряда – осевая.

При запитке от спирального МКГ током $I_0 \approx 4,7$ МА ДВМГ240-10 к началу разрыва фольги обеспечил в конечном контуре индуктивностью ~ 21 нГн ток 18,5 МА. ВРТ в нагрузке 16 нГн сформировал импульс тока 10 МА с $\tau = 0,55$ мкс. Напряжение в размыкателе составило 320 кВ. Сопротивление ВРТ нарастает до 30 МОм с характерным временем $\tau_R \approx 0,25$ мкс. Поглощенная в размыкателе энергия равна 1,9 МДж, плотность потока мощности – 1,2 ГВт/см². Максимальная электрическая мощность ВРТ составила 2 ТВт.

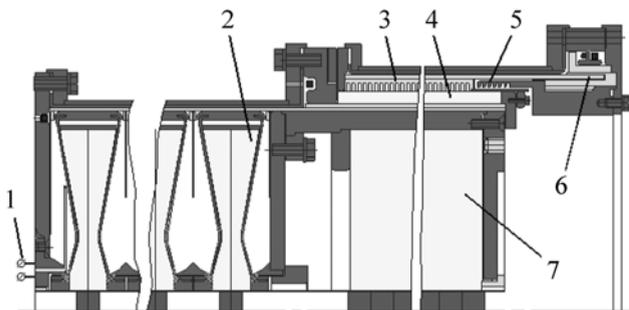


Рис. 9. ДВМГ240 с ВРТ290: 1 – электроды от спирального МКГ; 2 – десятиэлементный ДМКГ; 3 – РП; 4, 7 – заряды ВВ; 5 – замыкающий ключ; 6 – нагрузка

Размыкатель ВРТ560 испытывался с целью обострения тока пятиэлементного дискового генератора с зарядами ВВ диаметром 480 мм (ДВМГ480-5) [13]. В размыкателе используется комбинированная ребристая преграда с внутренним диаметром 560 мм, ширина пазов 3 мм, глубина – 7 мм, ширина ребер 1,5 мм. Ребра облицованы стальными кольцами сечением $1,5 \times 1,5 \text{ мм}^2$. Разрушаемый проводник – медная фольга толщиной 0,38 мм, шириной 1758 мм и длиной 700 мм. Толщина заряда ВВ 5,5 мм. Схема инициирования разрывного заряда отличается от приведенной на рис. 9: инициирование по внутренней поверхности разрывного заряда осуществляется ударной волной от радиально разлетающегося алюминиевого цилиндра, инициирование заряда ВВ в цилиндре – по оси.

В опыте ток дискового генератора к началу разрыва фольги составлял 32,5 МА. ВРТ сформировал в нагрузке 17 нГн импульс тока 15 МА. Время нарастания тока $\tau = 0,8 \text{ мкс}$. Напряжение на размыкателе достигает 340 кВ, сопротивление 18 мОм ($\tau_R \approx 0,3 \text{ мкс}$). В ВРТ диссипирована энергия 5 МДж. Электрическая мощность размыкателя 3 ТВт. Временные зависимости напряжения ВРТ и тока в нагрузке приведены на рис. 10.

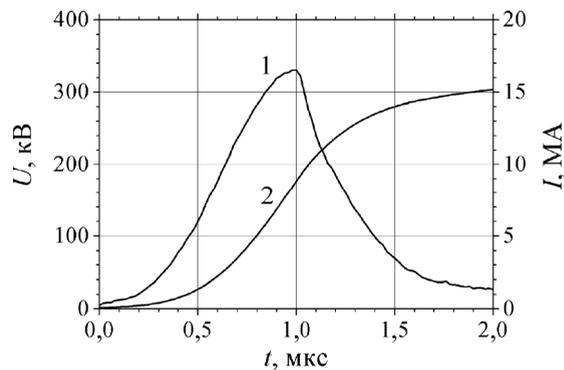


Рис. 10. Зависимости напряжения на размыкателе (1) и тока в нагрузке (2) от времени в опыте с ДВМГ480-5 и ВРТ560

Сильноточные взрывные размыкатели тока с ребристой преградой нашли развитие в Лос-Аламосской национальной лаборатории (ЛАНЛ, США). В 1980–1990-е годы в ЛАНЛ разрабатывалась (J. H. Goforth и др.) система «Процион» (Procyon), предназначенная для питания z-пинч нагрузок. Система включала спиральный МКГ типа Mark-IX [14], взрывной размыкатель тока [15], плазменно-поточный размыкатель [16] и z-пинч нагрузку. Ребристая преграда ВРТ из фторопласта имела внутренний диаметр $\sim 300 \text{ мм}$ и длину 760 мм; ширина паза 6,5 мм, глубина 13 мм, ширина выступа 1,5 мм. Разрушаемый проводник – алюминиевая фольга толщиной 0,8 мм. Система инициирования заряда ВВ расположена на оси устройства. Схема запитки ВРТ такова, что магнитное поле тока спирального генератора прижимает фольгу, в отличие от описанных выше конструкций, не к ребристой преграде, а к заряду ВВ.

В работе [17] приведены результаты двух опытов с полной системой «Процион» (без z-пинча). В первом опыте генератор Mark-IX выдал в разрываемый контур индуктивностью 72 нГн ток 18,3 МА (магнитная энергия $\sim 12 \text{ МДж}$). ВРТ, нагрузкой которого являлся плазменно-поточный размыкатель с начальной индуктивностью 25 нГн, сформировал импульс тока 13,6 МА с характерным временем нарастания $\tau \approx 2,6 \text{ мкс}$. Зависимости тока МКГ и тока в нагрузке от времени приведены на рис. 11. Максимальное напряжение на размыкателе составило 130 кВ.

В опыте № 2 при токе МКГ 20 МА (магнитная энергия 14,4 МДж) на выходе ВРТ (в передающей линии плазменно-поточного размыкателя) произошел электрический пробой.

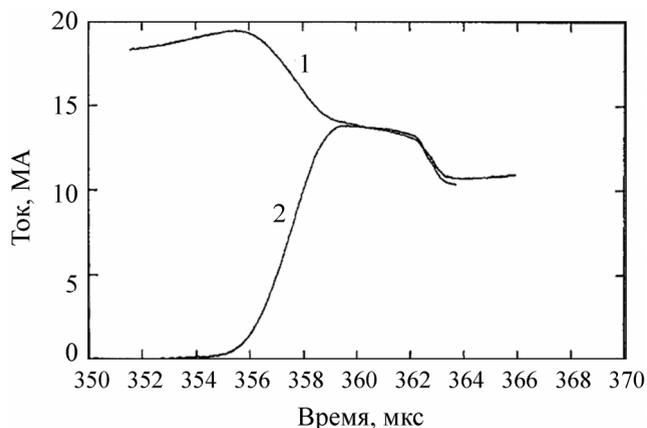


Рис. 11. Зависимости тока МКГ (1) и тока в нагрузке (2) от времени в первом опыте с генератором Mark-IX

В этих опытах линейная плотность тока в фольге достигала 0,2 МА/см, а сопротивление размыкателей в обоих опытах нарастало до ~80 МОм за ~4 мкс.

Взрывные размыкатели тока с диэлектрическими кумулятивными струями

В ВРТ этого типа используется эффект внедрения кумулятивных струй в разрушаемый проводник и струегаситель, выполненный в виде пластин или цилиндра из диэлектрика. Эскиз элемента размыкателя [18] представлен на рис. 12. При осевом подрыве заряда ВВ 4 кумулятивные выемки диэлектрического блока 3 схлопываются и токопровод 2 разрезается одновременно во многих сечениях по оси устройства кумулятивными струями 5, которые внедряются в диэлектрик 1 на глубину z .

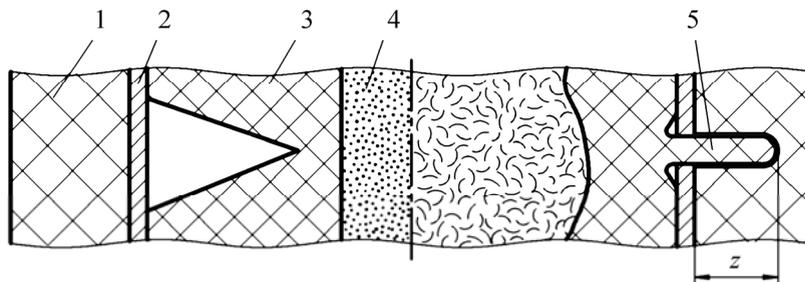


Рис. 12. Эскиз элемента размыкателя: слева от оси симметрии – до начала работы, справа – в процессе срабатывания; 1 – струегаситель, 2 – фольга, 3 – струеформирователь, 4 – заряд ВВ, 5 – кумулятивная диэлектрическая струя, z – длина струи

Исследования показали, что эффективная и надежная работа размыкателя достигается при изготовлении элементов 3 и 1 из полиэтилена, при этом угол кумулятивной выемки в струеформирователе 3 должен составлять 25–30° [19].

Рентгенографические исследования показали, что под действием диэлектрической струи в пластине из алюминия к началу протекания тока в нагрузке образуются разрывы шириной до 3,5 мм, а глубина проникновения струи в полиэтилен при этом достигает 5 мм [8, 19].

Проведены исследования влияния линейной плотности тока в фольге в диапазоне $i = 120\text{--}460$ кА/см на сопротивление ВРТ с кумулятивными струями [20]. Алюминиевый разрушаемый проводник толщиной 1 мм располагался на диаметре 200 мм, длина его равнялась 600 мм. На рис. 13 показана зависимость сопротивления ВРТ в моменты, соответствующие максимуму напряжения на размыкателе, от линейной плотности тока в фольге. Эта зависимость может быть примерно выражена как $R = 3,3 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}/i \text{ кА}\cdot\text{см}^{-1}$.

Во ВНИИЭФ на основе спиральных МКГ и ВРТ с кумулятивными струями созданы источники импульсной мощности, позволяющие формировать в нагрузках 30–40 нГн импульсы тока 10–15 МА с характерным временем нарастания 2,5–3,5 мкс [19, 21]. В этих устройствах используются МКГ диаметром 200 и 400 мм, обеспечивающие ток до ~28 МА в разрываемом контуре 50 нГн, и размыкатели диаметром 200 и 300 мм с фольгой длиной 600 и 800 мм соответственно.

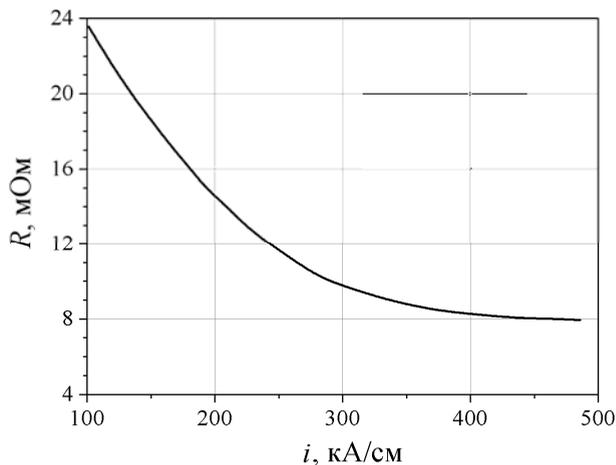


Рис. 13. Зависимость сопротивления ВРТ в моменты, соответствующие максимуму напряжения на размыкателе, от линейной плотности тока в фольге

Плазменные взрывные размыкатели тока

В плазменном взрывном размыкателе тока очень тонкая цилиндрическая металлическая оболочка превращается в плазменную уже в начале запитки МКГ. Располагается эта оболочка непосредственно на цилиндрической поверхности заряда ВВ. К концу работы МКГ ударная волна выходит на плазменную оболочку и сжимает ее, в результате чего наблюдается быстрый рост сопротивления размыкателя.

Принципиальная схема устройства с плазменным взрывным размыкателем приведена на рис. 14 [22, 23]. Цилиндрический плазменный канал зажигается между диэлектрической преградой 2 и поверхностью заряда ВВ 4; нагрузка 7 подсоединяется параллельно полученному каналу через разрядник-обостритель 6. Заряд ВВ размыкателя инициируется по оси. Исследования показали, что

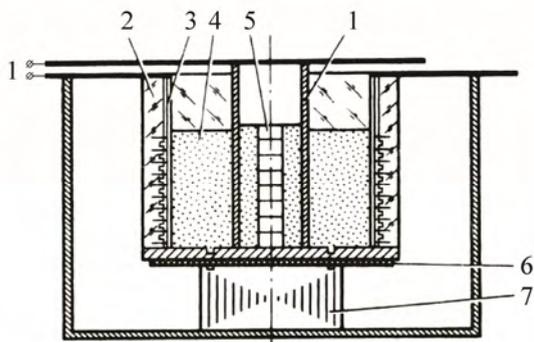


Рис. 14. Схема устройства, состоящего из двух витковых МКГ и плазменного взрывного размыкателя тока:
 1 – электроды от МКГ; 2 – диэлектрическая преграда; 3 – цилиндрический плазменный канал;
 4 – поверхность заряда ВВ; 5 – электродетонаторы; 6 – разрядник-обостритель; 7 – нагрузка

изменение сопротивления плазменного канала практически не зависит от значения тока в диапазоне до 10 МА. Эксперименты [23] с разрывом наружного проводника диаметром 200 мм и длиной 120 мм проводились с коаксиальным накопителем индуктивностью ~ 30 нГн при токах от 2 до 10 МА. При токе накопителя 9 МА в нагрузке 31 нГн получен ток с максимальным значением ~ 5 МА и временем нарастания от 0,1 до 0,8 максимального значения $\sim 0,45$ мкс, производная тока в нагрузке равна $\sim 1 \cdot 10^{13}$ А/с.

В ЛАНЛ исследовались такие размыкатели на плоских моделях с использованием конденсаторных батарей и МКГ [24–26]. В опытах при $i = 0,16$ МА/см сопротивление размыкателя нарастало примерно в 10 раз менее чем за 1 мкс. При увеличении i до 0,3 и 0,5 МА/см рост сопротивления резко снижался [24].

Большой недостаток таких размыкателей – высокое (несколько миллиом) сопротивление плазменного канала на стадии работы МКГ. Это приводит к большим потерям магнитного потока и снижению тока МКГ. Последние 20 лет плазменные взрывные размыкатели практически не исследовали и не применяли. Их использование возможно для обострения импульсов тока только очень быстроходных источников энергии.

Вихревой размыкатель тока

В работах [27, 28] был предложен и исследован размыкатель, в котором алюминиевая или медная фольга разрушается за счет вихревого движения продуктов детонации ВВ, организованного вблизи проводника благодаря размещению между фольгой и зарядом ВВ элементов кругового сечения, выполненных из твердых материалов (рис. 15). Согласно [27] при нестационарном обтекании элементов 1 продуктами детонации заряда ВВ 3 по обе стороны от них возникает вихревое движение продуктов взрыва. Вихревое движение продуктов детонации около проводника 4 приводит к его растяжению, разрушению и перемешиванию продуктов взрыва с материалами проводника 4 и подложки 5, что влечет быстрый рост сопротивления размыкателя.

В опытах на плоских моделях со спиральными МКГ было показано, что вихревой ВРТ при линейной плотности тока до 0,2 МА/см обеспечивает нарастание тока в нагрузке с временем

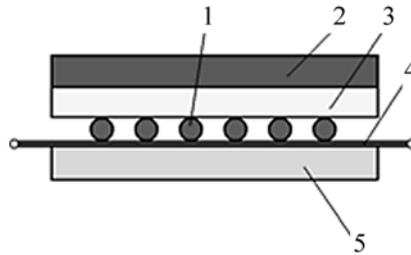


Рис. 15. Плоская модель размыкателя: 1 – элементы кругового сечения, 2 – система инициирования, 3 – заряд ВВ, 4 – фольга, 5 – подложка

$\tau < 1$ мкс. Из-за малой толщины подложки (3–4 мм) вихревой размыкатель отличается низкой паразитной индуктивностью, что дает возможность использовать его для размыкания низкоиндуктивных накопителей энергии – конечных контуров дисковых МКГ с токами в несколько десятков мегаампер.

В [29] приведены результаты первого эксперимента по обострению импульса тока дискового генератора с помощью вихревого ВРТ. Эскиз устройства представлен на рис. 16. В опытах использовался двухэлементный дисковый МКГ с зарядами ВВ диаметром 400 мм. Размыкатель располагался над дисковыми элементами. Разрушаемый проводник – медная фольга толщиной 0,2 мм, шириной 1250 мм и длиной 130 мм. Заряд ВВ размыкателя толщиной 3 мм инициировался ударными волнами, выходящими на внешнюю цилиндрическую поверхность от зарядов ВВ дискового МКГ. Соленоид, расположенный между зарядом ВВ и фольгой, выполнен с шагом витков 3,3 мм из медного провода диаметром 1,5 мм. Подложка толщиной 3 мм была выполнена из пенополистирола плотностью $0,15 \text{ г/см}^3$.

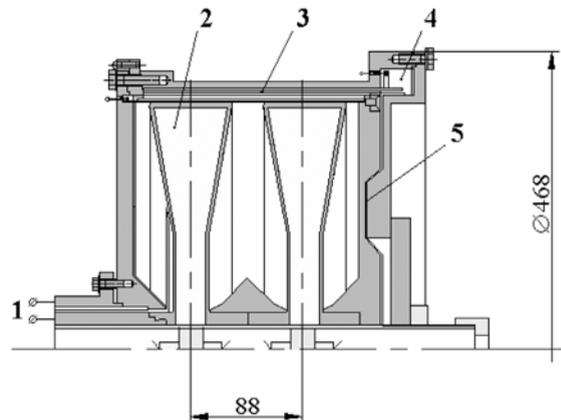


Рис. 16. Дисковый МКГ с низкоиндуктивным вихревым размыкателем тока:
1 – электроды от спирального МКГ, 2 – двухэлементный дисковый МКГ,
3 – вихревой ВРТ, 4 – нагрузка, 5 – замыкающий ключ

Дисковый генератор обеспечил к началу разрыва фольги ток 21 МА в контуре индуктивностью 5 нГн. К первой микросекунде от начала работы ВРТ в нагрузке 1,6 нГн был сформирован импульс тока ~20 МА с характерным временем нарастания ~0,5 мкс. Осциллограмма производной тока в нагрузке приведена на рис. 17. Максимальное напряжение в размыкателе составило 67 кВ, максимальное сопротивление 18 мОм.

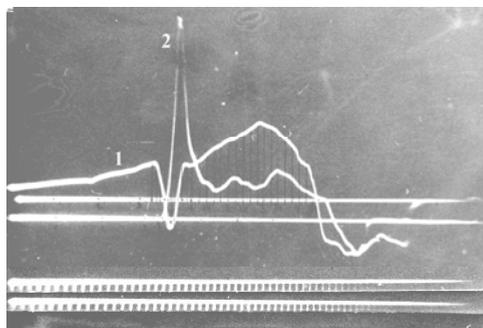


Рис. 17. Осциллограмма производной тока ДМКГ и тока в нагрузке в опыте с дисковым МКГ и низкоиндуктивным вихревым размыкателем тока: 1 – производная тока ДМКГ $(dI/dt)_{\max} = 1,0 \cdot 10^{13}$ А/с; 2 – производная тока в нагрузке $(dI/dt)_{\max} = 4,2 \cdot 10^{13}$ А/с; метки времени – через 0,2 мкс

Заклучение

Экспериментально показано, что ВРТ с ребристой преградой при запитке от спиральных МКГ могут формировать в нагрузке 20–40 нГн импульсы тока с характерным временем нарастания 0,3–0,5 мкс. Предельная плотность потока мощности $p = EN$ в ВРТ с ребристой преградой составляет $\sim 1,5$ ГВт/см².

Впервые взрывные размыкатели тока применены для обострения импульсов тока дисковых МКГ. ВРТ позволяют в реальных по индуктивности нагрузках (~ 20 нГн) получать токи до 15 МА с временем нарастания $\tau \leq 0,8$ мкс.

Список литературы

1. Yankovsky B. D. Pulse voltage generation by explosive opening switches // Megagauss field and pulsed power systems / Eds. V. M. Titov, G. A. Shvetsov. – N.Y.: Nova Science Publishers, 1990. P. 541–548.
2. Зубков П. И., Карташов А. М., Лукьянчиков Л. А. и др. Аномальное поведение электропроводности в детонационной волне в тротиле // Сб. докл. «VII Харитоновские тематические научные чтения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 58–61.
3. Зубков П. И., Лукьянчиков Л. А., Рябинин Ю. В. Электрическая прочность разлетающихся продуктов детонации // Приклад. механика и техн. физика. 1976. № 1. С. 134–138.
4. Ершов А. П., Зубков П. И., Ильянович Ю. Н. и др. Прерывание тока с шунтированием дуги проводящими продуктами детонации // Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение / Под ред. В. М. Титова, Г. А. Швецова. – М.: Наука. 1984. С. 397–401.
5. Chernyshev V. K. Superpower explosive magnetic energy sources (XXth century results. Tasks in the beginning of XXIst century) // Megagauss-10 / Ed. M. von Ortenberg. – Berlin, 2005. P. 17–28.

6. Иванов А. Г., Карпенко Г. Я. О разгоне тонких пластин продуктами взрыва при различных способах инициирования ВВ // Физика горения и взрыва. 1980. № 2. С. 84–89.
7. Власов Ю. В., Демидов В. А., Скоков В. И. Модель взрывного размыкателя тока с ребристой преградой // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применение / Под ред. В. К. Чернышева, В. Д. Селемира, Л. Н. Пляшкевича. – Саров: ВНИИЭФ, 1997. С. 372–378.
8. Chernyshev V. K., Andreevskikh L. A., Volkov G. I. et al. Mechanical conductor disruption character in explosive current commutator // Megagauss fields and pulsed power systems / Eds. V. M. Titov, G. A. Shvetsov. – N.Y.: Nova Science Publishers, 1990. P. 533–536.
9. Пат. РФ 2399111 МПК H01H 39/00. Взрывной формирователь импульса тока / А. С. Борискин, Ю. В. Власов, В. А. Демидов, С. А. Казаков, Е. В. Шаповалов // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 25.
10. Tucker T. I., Turman B. N. Modeling and scaling experiments of explosive driven pulse power systems // 3rd IEEE Int. pulsed power conference / Eds. T. H. Martin, A. H. Guenther. – Albuquerque, N.M., 1981. P. 334–336.
11. Chernyshev V. K., Demidov V. A., Veselov V. N. et al. Investigation of the speed response dependence of the explosive current opening switch on initial conditions // Megagauss fields and pulsed power systems / Eds. V. M. Titov, G. A. Shvetsov. – N.Y.: Nova Science Publishers, 1990. P. 527–531.
12. Chernyshev V. K., Buyko A. M., Kostyukov V. N. et al. Investigation of electrically exploded large area foil for current switching // Ibid. P. 465–470.
13. Selemir V. D., Demidov V. A., Boriskin A. S. et al. Disk magnetocumulative generator of 480 mm diameter for explosive EMIR facility // IEEE Transactions on Plasma Sci. 2010. Vol. 38, N 8. P. 1762–1767.
14. Fowler C. M., Caird R. S. The Mark IX generator // 7th IEEE Int. pulsed power conference / Eds. B. H. Bernstein, J. P. Shannon. – Monterey, California, 1989. P. 475–478.
15. Goforth J. H., Marsh S. P. Explosively formed fuse opening switches for use in flux-compression generator circuits // Megagauss fields and pulsed power systems / Eds. V. M. Titov, G. A. Shvetsov. – N.Y.: Nova Science Publishers, 1990. P. 515–526.
16. Baker W. L., Beason J. D., Degnan J. H. et al. Plasma flow switch driven implosions // Ibid. P. 615–622.
17. Goforth J. H., Oona H, Brownell J. H. et al. Procyon Experiments Utilizing Explosively-Formed Fuss Opening Switches // 8th IEEE Int. pulsed power conference / Eds. R. White, K. Prestwich. – San Diego, California, 1991. P. 273–276.
18. Котов Ю. А., Цыпленков А.П. Исследование взрывного размыкателя с кумулятивными диэлектрическими струями // Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение / Под ред. В. М. Титова, Г. А. Швецова. – М.: Наука, 1984. С. 402–405.
19. Волков Г. И., Дудай П. В., Иванов В. А. Основные типы взрывных размыкателей тока и их коммутационные характеристики // Megagauss-12 / Под ред. Г. А. Швецова. – Новосибирск, 2011. С. 408–419.

20. Chernyshev V. K., Volkov G. I., Ivanov V. A. et al. Experimental investigation of explosive opening switch operation // *Megagauss magnetic field generation and pulsed power applications* / Eds. M. Cowan, R. B. Spielman. – N.Y.: Nova Science Publishers, 1994. P. 731–738.

21. Чернышев В. К., Авдошин В. В., Волков Г. И. и др. Спиральные взрывомагнитные источники с запасаемой энергией 0,5–25 МДж для исследования работы газового пондеромоторного узла с МГД-соплом и динамики разгона твердотельного лайнера // *Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применение* / Под ред. В. К. Чернышева, В. Д. Селемира, Л. Н. Пляшкевича. – Саров: ВНИИЭФ, 1997. С. 279–281.

22. Павловский А. И., Васюков В. А., Руссков А. С. Формирование быстро нарастающих мегаамперных импульсов тока от магнитокумулятивных генераторов // *Письма в ЖТФ*. 1977. Т. 3, № 16. С. 789–792.

23. Павловский А. И., Васюков В. А., Попков Н. Ф. и др. Исследование накопления и коммутации высоких плотностей энергии // *Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение* / Под ред. В. М. Титова, Г. А. Швецова. – М.: Наука, 1984. С. 410–415.

24. Goforth J. H., Caird R. S., Benjamin R. F. et al. Fast explosive-driven opening switches carrying high linear current densities // *Там же*. С. 388–394.

25. Goforth J. H., Greene A. E. Results from plasma compression opening switch experiments // *Megagauss technology and pulsed power applications* / Eds. C. M. Fowler, R. S. Caird, D. J. Erickson. N.Y. – L.: Plenum Press, 1987. P. 513–520.

26. Goforth J. H., Caird R. S. Experimental investigation of explosive-driven plasma compression opening switches // *4th IEEE Int. pulsed power conference* / Eds. T. H. Martin, M. F. Rose. – Albuquerque, N.M., 1983. P. 786–789.

27. А. с. № 1598750 МКИ H01 H39/00. Взрывной размыкатель электрической цепи / Ю. В. Власов, В. А. Демидов, Е. Е. Мешков, В. А. Шевцов // *Изобретения. Полезные модели*. 1999. № 23. С. 332.

28. Vlasov Yu. V., Demidov V. A., Egorova T. A. et al. Investigation of a vortex current opening switch having streamlined components between a conductor and an explosive charge // *Megagauss-11* / Eds. I. Smith, B. Novac. – London, 2007. P. 192–194.

29. Demidov V. A., Demin A. N., Kazakov S. A. et al. Disk explosive magnetic generator with low risetime in the load // *Proc. of the 12th Int. conf. on High Power Particle Beams* / Eds. M. Markovits, J. Shiloh. – Haifa, Israel. 1998. P. 588–590.

Explosive Opening Switches

V. A. Demidov

Some basic experimentally checked schemes of the explosive opening switch constructions are described in the paper. The investigation results on the flat and cylindrical models and also full-scale experiments with powering from helical and disc magneto-cumulative generetors are provided.