

Авторы выражают благодарность А. П. Ершову за ценные обсуждения и А. И. Николину за помощь в проведении ряда экспериментов.

Поступила 28 VII 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зубков П. И., Лукьянчиков Л. А. Размыкание силовых цепей с помощью ВВ.— ФГВ, 1973, № 3.
2. Войтенко А. Е., Жеребченко В. И., Захаренко И. Д., Исаков В. П., Фалеев В. А. Размыкание электрического тока взрывом.— ФГВ, 1975, № 1.
3. Киселев Г. И., Лукьянчиков Л. А. Компенсационный способ измерения тока и напряжения.— «Приборы и техника эксперимента», 1974, № 4.
4. Залесский А. М. Электрическая дуга отключения. М., Госэнергоиздат, 1963.
5. Буткевич Г. В. Дуговые процессы при коммутации электрических систем. М., «Энергия», 1967.
6. Физика взрыва. М., «Наука», 1975.
7. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.
8. Lee T. H. Физика плазмы и размыкание электрических цепей.— «Труды Ин-та инженеров по электротехнике и радиоэлектронике», 1969, т. 57, № 3.

УДК 621.316.53.022 + 621.316.53.027.3

### КОММУТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВНЫХ РАЗМЫКАТЕЛЕЙ С БЫСТРЫМ РАЗРУШЕНИЕМ КОНТАКТНОГО ЭЛЕМЕНТА

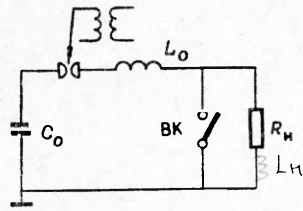
*Э. А. Азизов, Н. А. Ахмеров, К. И. Козорезов,  
В. В. Семченко  
(Москва)*

Расширение области применения индуктивных накопителей, в том числе для получения мощных электронных пучков и питания плазменно-динамических систем с энергией более 1 МДж связано с созданием ультранизкоомных ( $\sim 10^{-6}$  Ом) коммутаторов с мощностью  $10^{11}$ — $10^{12}$  Вт и фронтами переключения  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  с. Кажется, что такие коммутаторы можно создать, используя принцип быстрого разрушения контактного элемента взрывом заряда ВВ [1, 2]. Однако на этом пути возникает ряд проблем, которые могут быть решены только экспериментально:

1. Какой должна быть длина разрушаемой части контакта при заданном напряжении коммутации и как она зависит от тока и геометрии. Полученные до настоящего времени так называемые «холодные» (без размыкания тока) характеристики электрической прочности продуктов взрыва в области разрушения мало пригодны для выбора длины контактного элемента. Данные же о величине коммутационного напряжения при размыкании токов более 10 кА практически отсутствуют.

2. Каким может быть минимальное время переключения, определяемое процессами взаимодействия продуктов взрыва с дугой, возникающей в местах разрушения.

3. Связь соотношения масс заряда ВВ  $M_s$  и контактного узла  $m$   $\alpha = m/M_s$  с мощностью коммутации при заданной термостойкости



Фиг. 1

токоведущего элемента. Параметр  $\alpha$ , определяющий, с одной стороны, характер разрушения и скорость разлета осколков контактного элемента, а с другой — технологические качества конструкции, связан в конечном счете с абсолютными размерами расширяющейся области, в которой давление продуктов взрыва мало отличается от давления в детонационной волне. Если для обеспечения требуемой разрывной мощности величина  $\alpha$  окажется слишком большой, то целесообразность использования такой техники в лабораторных условиях становится спорной.

Существуют и другие проблемы, без решения которых трудно определить реальную возможность создания быстродействующих высоковольтных размыкателей.

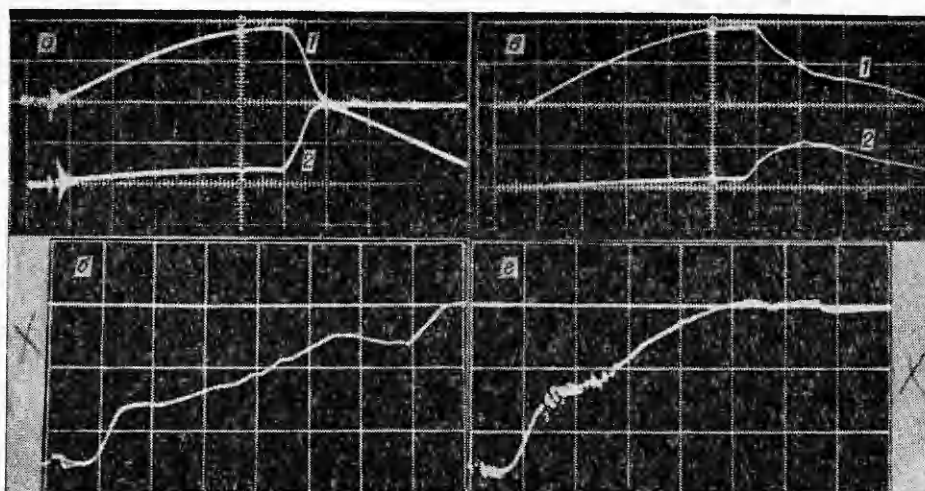
В данной работе представлены результаты изучения коммутационных характеристик некоторых вариантов взрывных коммутаторов (ВК) с быстрым разрушением контактного элемента.

Исследование характеристик ВК проводилось на установке, электрическая схема которой показана на фиг. 1. Источником энергии служила конденсаторная батарея, питающая индуктивный накопитель  $L_0$  через взрывной коммутатор. Параллельно ВК присоединялась нагрузка  $R_n$  с индуктивностью  $L_n$ . В момент достижения  $I_{\max}$  производился подрыв заряда ВВ в коммутаторе и ток переключался в цепь нагрузки. Токи в цепях измерялись поясами Роговского, а напряжение — малоиндуктивным делителем.

Изучались три варианта ВК (см. таблицу). В них контактный элемент изготовлялся из дюралюминия Д16Т. В качестве ВВ использовался пластифицированный гексоген с плотностью  $1,6 \text{ г/см}^3$  и скоростью детонации  $7,5 \cdot 10^5 \text{ см/с}$ .

В первом варианте ВК-1 контактный элемент изготовлялся из трубы  $\varnothing 40 \times 36 \text{ мм}$ . Заряд ВВ  $\varnothing 36 \text{ мм}$  и длиной  $14 \text{ мм}$  был закрыт с торцов пробками из различных материалов. Во втором варианте ВК-2 контактный элемент был выполнен из трубы  $\varnothing 66 \times 48 \text{ мм}$  с внутренним коническим

Тип	Индуктивность накопителя, мГ	Коммутируемый ток, кА	Параметры нагрузки, Ом; мкГ	Материал пробки	Номер осциллограммы
ВК-1	0,8	0,8	0,7; 0,17	Пенопласт Фторопласт Медь	
ВК-2	1,2	33	0,16; 3 0,32; 3	Медь	Фиг. 2, а
		53	0,32; 3 0,16; 3		Фиг. 2, б
ВК-3	0,1	18	0,1; 1	Фторопласт	Фиг. 2, а
			0,4; 1		Фиг. 2, в



Фиг. 2

подрезом шириной 14 мм и углом  $120^\circ$  при вершине. Заряд ВВ полностью заполнил объем подреза. Третий вариант — ВК-3 представлял собой отрезок трубы  $\varnothing 26 \times 24$  мм и длиной 25 мм с фторопластовым вкладышем с отверстием  $\varnothing 10$  мм, заполненным ВВ. Электродетонатор устанавливался с открытого торца. На внешней стороне вкладыша на расстоянии 15 мм друг от друга были сделаны кольцевые проточки полукруглого профиля с радиусом  $\rho = 2,5$  мм.

Скорость движения  $v_p$  разрушаемой части контактного элемента оценивалась по эмпирическим соотношениям [3]. Условия проведения эксперимента и номера соответствующих осциллограмм приведены в таблице, а сами осциллограммы на фиг. 2, а — г (а — 1 — ток через размыкатель, 2 — ток через нагрузку, 10 кА/см, 50 мкс/см; б — ток через размыкатель с момента начала коммутации, 10 кА/см, 25 мкс/см; в — 1 — ток через размыкатель, 2 — ток через нагрузку, 29 кА/см, 50 мкс/см; г — ток через размыкатель с момента начала коммутации, 11,5 кА/см, 25 мкс/см).

Из полученных данных следует:

1. При токах до 1 кА время переключения  $\tau_k$  ВК-1 находится в пределах от 5 до  $8 \cdot 10^{-6}$  с. Максимальная скорость  $v_p$  оболочки в средней части составляет  $2,2 \cdot 10^5$  см/с. Величина  $\tau_k$  зависит от количества продуктов взрыва, продуваемых через разрушаемый участок. Это количество регулировалось массой пробок. В случае медных пробок величина  $\tau_k$  минимальна.

Увеличение импеданса нагрузки  $Z_n$  одновременно с ростом коммутационного напряжения  $U_n$  до 10 кВ приводит к повышению  $\tau_k$  до 10 мкс. Установлено также, что процесс переключения меняется при введении воздушного слоя толщиной 10 мм между зарядом ВВ и стенкой трубы. В этом случае вместе с уменьшением  $v_p$  до  $1,4 \cdot 10^5$  см/с наблюдается ступенчатое переключение со значительным ростом  $\tau_k$  и слабой воспроизводимостью. Кроме того, снижение параметра  $\alpha$  в коммутаторе ВК-2 за счет увеличения диаметра и толщины трубы приводит к уменьшению  $v_p$  до  $1,8 \cdot 10^5$  см/с и увеличению  $\tau_k$  до 9 мкс при  $U_k = 2,5$  кВ и до 25 мкс при  $U_k = 10$  кВ.

2. Переход к экспериментам с ВК-2 при токах несколько десятков кА существенно увеличил  $\tau_k$ , изменив характер процесса коммутации.

При  $I=33$  кА и  $U_k=5,5$  кВ наблюдалось две стадии переключения: первая с  $dI/dt \approx 10^9$  А/с длительностью  $\sim 15$  мкс до момента, когда  $U_n \approx 3,0$  кВ, вторая с  $(dI/dt)_{\max} = 4 \cdot 10^8$  А/с. Полное время переключения достигло 50 мкс. Увеличение  $U_n$  до 11 кВ практически не повлияло на первую стадию ( $dI/dt \approx 10^9$  А/с,  $5 \cdot 10$  мкс). За этой стадией в течение  $5 \cdot 10$  мкс спад тока прекращался, а затем ток переключался очень медленно ( $dI/dt < 3 \cdot 10^8$  А/с). В ряде случаев наблюдалось временное переключение части тока в цепь ВК-2.

Однако во всех экспериментах коммутация тока из цепи ВК-2 в цепь нагрузки происходила, хотя и со значительным разбросом  $\tau_k$ . При  $I = 53$  кА и  $U_k = 9$  кВ характеристики первой стадии не претерпели изменений, но стадия прерывания процесса переключения при  $U_n = 3$  кВ резко возросла до 30—40 мкс. Последующая медленная коммутация тока в нагрузку сменялась таким же медленным обратным переключением основной части тока в цепь ВК-2.

3. Коммутация тока  $I = 18$  кА при помощи ВК-3, имеющего диэлектрическую прослойку из фторопласта, происходила с  $dI/dt = 6 \cdot 10^8$  А/с в течение 30 мкс. Повышение  $R_n$  до 0,4 Ом привело к тому, что после переключения около половины тока в нагрузку за время  $\sim 60$  мкс коммутация практически прекращалась. На скоростной фотосъемке процесса в первом режиме видно сначала интенсивное свечение в области проточек. Затем у проточек появляется дуга, горящая на границе продуктов взрыва примерно в течение 60 мкс. Во втором режиме появляется несколько дуг, соединяющихся в один канал.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать следующие заключения. Наиболее быстрая коммутация происходит в начальной стадии разрушения, когда дуга отключения горит на границе быстро расширяющихся продуктов взрыва с давлением  $\sim 10^5$  атм. В этом интервале времени с высокой скоростью растут длина и поверхность дугового разряда, горящего на внешней границе разлетающихся газов. Однако вследствие резкого падения давления ( $p \sim r^{-8}$ ) при сферическом разлете проявляется возможность распространения волны ионизации и тока внутрь областей, занимаемых продуктами взрыва. Поэтому скорость удлинения дуги должна уменьшиться и соответственно снизиться скорость коммутации. При высоких коммутационных напряжениях на этой стадии вероятно термическая неустойчивость, вызывающая разбросы и затягивание процесса коммутации.

Более сложная картина наблюдается, когда между зарядом ВВ и утолщенной оболочкой имеется воздушный слой. В этом случае разрушение производится не давлением детонационной волны, а давлением сжатого и нагретого многократным прохождением ударной волны воздушного слоя, который одновременно сжимается расширяющимися продуктами взрыва. В результате оболочка разрушается при давлениях, меньших давления детонационной волны, и поэтому скорость разлета осколков и скорость коммутации снижаются. Отмечаемая нестабильность коммутации, по-видимому, связана с тем, что в начальной стадии разлета дуга горит в сильно нагретом воздушном слое, расширяющемся вначале несферично, так как  $\Delta r \ll r$ . Это влияет на равномерность азимутального распределения тока и соответственно на коммутационный процесс.

Большое влияние на скорость коммутации оказывает величина  $\alpha$ , так как она определяет скорость разлета осколков и расширения продуктов взрыва на начальной стадии. Это особенно четко проявляется в экспериментах с ВК-2, где значение  $\alpha$  изменено более чем вдвое. Особенностью коммутации токов в десятки килоампер является то, что коммутация носит ступенчатый характер. Он слабо выражен при коммутационных

мощностях до  $2 \cdot 10^8$  Вт. При больших же мощностях ступенчатость проявляется очень сильно.

Обращает на себя внимание то, что независимо от длины разрушаемой части контактного узла коммутируемого тока и сопротивления нагрузки первая стадия коммутации протекает с одинаковой скоростью. Затем через одинаковый интервал времени во всех режимах эта скорость резко снижается до полного прерывания коммутации. Интервал прерывания коммутации и последующее развитие процесса уже зависят от геометрии ВК и коммутационных параметров. В настоящее время трудно определить конкретные физические причины наблюдаемого ступенчатого характера коммутации. Однако очевидно, что для получения высоких коммутационных мощностей необходим тщательный подбор механических характеристик и параметров цепи нагрузки.

Поступила 9 VI 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Koch W., Salge J. Über die Erzeugung von stopströmen mit Sprengtrennern ETZ-A, 1966, Bd 87, H19, S. 697—790.
2. Азизов Э. А., Ахмеров Н. А., Николаевский В. Г., Соколов Б. В., Финько С. В. О выводе энергии из индуктивного накопителя мощным коммутатором с шунтированием дуги.— В кн.: Тезисы докладов научной сессии отделения Научного Совета по проблемам электроэнергетики АН СССР. М., 1972.
3. Тарасенко Н. Н. Исследование движения стенки трубы под действием продуктов детонации внутреннего заряда ВВ.— ФГВ, 1974, т. 10, № 5, с. 737—741.

УДК 621.31

### СОГЛАСОВАНИЕ ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА С АКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ С ПОМОЩЬЮ ТРАНСФОРМАТОРА

*Л. С. Герасимов*  
(Новосибирск)

Перспективность использования взрывомагнитных генераторов (ВМГ) в современной технике и научных исследованиях в качестве импульсных генераторов электрической энергии большой мощности обсуждалась в работах [1—3]. Схема непосредственного включения взрывных генераторов на активную нагрузку является наиболее простой и удобной, но она имеет ограничения как по величине сопротивления нагрузки [4—6], так и по величине развиваемого напряжения [7]. В связи с этим в [3] в качестве обязательного элемента схемы взрывного электрического генератора называется размыкатель тока. Ниже показано, что применение импульсного согласующего трансформатора (СТ) позволяет в значительной мере ослабить указанные ограничения и добиться во многих случаях удовлетворительного согласования ВМГ с активной нагрузкой без размыкателя тока.

1. **Электрическая схема и уравнения устройства.** Приняв электротехническую модель ВМГ, что и в [1, 4, 5], схему устройства изобразим на фиг. 1. Здесь не приняты во внимание все паразитные активные сопротивления на первичной стороне трансформатора, паразитные индуктивности включены в индуктивность вывода  $L_B$ . На вторичной стороне не учтены