

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО РАЗМЫКАТЕЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В КОНТУРЕ С ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

*На основі чисельного моделювання у магнітогідродинамічному наближенні досліджено вплив параметрів електровзрывного фольгового розмикача (індуктивності комутатора, довжини та ширини фольги) на характеристики електричного розряду в контурі з індуктивно-ємнісним накопичувачем енергії та плазмовим навантаженням*

*На основе численного моделирования в магнитогидродинамическом приближении исследовано влияние параметров электровзрывного фольгового размыкателя (индуктивности коммутатора, длины и ширины фольги) на характеристики электрического разряда в контуре с индуктивно-емкостным накопителем энергии и плазменной нагрузкой*

### 1. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

С точки зрения передачи энергии от импульсного источника энергии нелинейной плазменной нагрузке один и тот же режим энерговода может быть эффективным для одного технологического процесса и в то же время не соответствовать другому. Поэтому для получения требуемых характеристик электрического разряда необходимо разрабатывать импульсные источники, основанные на различных электрофизических принципах, в том числе источники с накоплением энергии в магнитном поле индуктора, исследовать характеристики электрического разряда в их разрядных контурах, в частности, анализировать зависимости характеристик разряда от режима переключения тока размыкающим коммутатором. Влияние параметров электровзрывного размыкателя на характеристики электрического разряда в контуре с индуктивным накопителем энергии (ИНЭ) и индуктивной нагрузкой исследовались теоретически и экспериментально в [1-3], а в работах [4-6] численно изучались переходные процессы электрического разряда на нелинейную плазменную активно-индуктивную нагрузку.

В этом отношении не менее важной научно-технической задачей является изучение динамики электрического разряда комбинированного индуктивно-емкостного накопителя энергии (ИЕНЭ) на нелинейную плазменную нагрузку.

Согласно схеме замещения разрядного контура импульсного источника с ИЕНЭ (рис. 1) в результате коммутации цепи зарядки ИЕНЭ электровзрывным коммутатором к плазменной нагрузке оказываются одновременно подключенными как индуктивный, так и емкостный накопитель энергии (ЕНЭ). Характерно, что разряд двух накопителей характеризуется различными постоянными времени. Постоянная времени переходного процесса разряда ИЕНЭ характеризуется значением  $\tau_L = L_j/R_i(t)$ , где  $R_i(t)$  – сопротивление плазмы канала разряда. Скорость вывода энергии в нагрузку из ЕНЭ определяется постоянной разряда  $\tau_C = CR_i(t)$ . В начальные моменты ( $t = 0 \dots 10^{-6}$  с) после коммутации тока канал разряда имеет большое сопротивление ( $10^2 \dots 10^3$  Ом), его поперечное сечение мало (диаметр ионизированной области в момент пробоя межэлектродного промежутка соответствует диаметру стримера), а температура и удельная электропроводность плазмы далеки от максимальных значений, достигаемых в результате диссипации энергии в плазме. Этому случаю соответствует соотношение  $\tau_L \ll \tau_C$ .

В процессе ввода энергии в плазменный канал его сопротивление в результате быстрого расширения

токопроводящей области и ее нагрева уменьшается на 3...4 порядка. При этом соотношение постоянных времени разряда меняется на противоположное, так что  $\tau_L \gg \tau_C$ . Таким образом, переключение тока в нагрузку в разрядном контуре с ИЕНЭ происходит в две стадии. На первой (более быстрой) стадии превалирует ввод энергии в плазму из индуктивного накопителя энергии, а на второй – из емкостного.

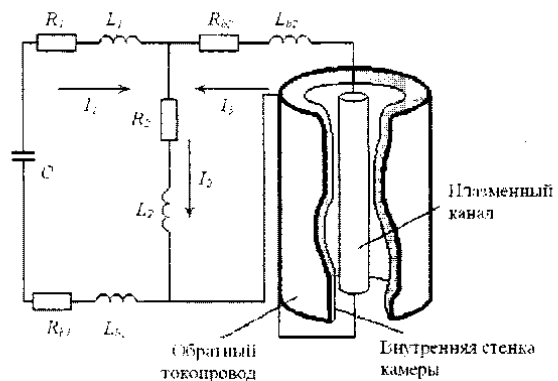


Рис. 1. Схема замещения разрядного контура с ИЕНЭ:  $C$  – емкость ЕНЭ;  $R_{b1}, L_{b1}$  – суммарные сопротивление и индуктивность разрядника, конденсаторной батареи и шин контура накачки ИЕНЭ;  $R_1, L_1$  и  $R_2, L_2$  – сопротивления и индуктивности ИЕНЭ и размыкателя соответственно;  $R_{b2}, L_{b2}$  – сопротивление и индуктивность шин и разрядника ветви нагрузки

Целью настоящей работы является исследование влияния параметров электровзрывного размыкателя в контуре с индуктивно-емкостным накопителем на характеристики мощного электрического разряда в газе (воздухе атмосферного давления).

Для достижения поставленной цели сформулированная в [4-6] математическая модель в приближении одномерной магнитной гидродинамики здесь применена для численного исследования электроразрядных процессов (рис. 2).

Поскольку математическая модель опубликована ранее, в настоящей работе для общности изложения материала представлены ее основные уравнения, способствующие анализу переходных процессов в разрядном контуре с ИЕНЭ (рис. 1).

Уравнения математической модели, записанные в одномерном магнитогидродинамическом приближении в лагранжевых массовых координатах, имеют вид

$$i = \rho \frac{\partial(rH)}{\partial s}, \quad \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{H}{\rho r} \right) = \frac{\partial E}{\partial s}, \quad (1)$$

$$i = \sigma E, \quad f = \frac{\mu_0 i H}{\rho}, \quad q = \sigma E^2, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{\rho} \right) = \frac{\partial}{\partial s} (rv), \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -r \frac{\partial p}{\partial s} + f, \quad v = \frac{\partial r}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -p \frac{\partial (rv)}{\partial s} + q - \frac{\partial W}{\partial s} - Q_V, \quad W = -\chi \rho r \frac{\partial T}{\partial s}, \quad (4)$$

$$\chi_R = \frac{16}{3} \sigma_B T^3 l_R, \quad l_R = 6,8 \cdot 10^{-10} \left( \frac{T}{10^4} \right)^{1,33} (10^3 \rho)^{-7/4}, \quad (5)$$

$$p = p(\rho, T), \quad \varepsilon = \varepsilon(\rho, T), \quad \chi = \chi(\rho, T), \quad \sigma = \sigma(\rho, T), \quad (6)$$

$$R_2 = R_2(j_{2m}, Q_2, dQ_2/dt), \quad j_{2m} = I_{2m}/S_0, \quad (7)$$

$$Q_2 = \int I_2(t)^2 \cdot R_2 dt, \quad (8)$$

где  $r$  – пространственная координата;  $t$  – время;  $s$  – лагранжева массовая координата ( $ds = \rho r dr$ );  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\sigma$  – удельная электропроводность;  $f, q$  – плотность электромагнитной силы и мощность тепловых источников в пересчете на единицу массы;  $W$  – суммарный тепловой поток;  $Q_V$  – объемные потери энергии излучением;  $\chi$  – удельная теплопроводность, определяемая суммой удельной электронной  $\chi_{\text{э}}$ , молекулярной  $\chi_{\text{м}}$  и лучистой  $\chi_{\text{л}}$  теплопроводности;  $\sigma_B$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $l_R$  – средняя длина свободного пробега излучения по Росселанду;  $I_{2m}, j_{2m}$  – амплитудные значения тока и плотности тока в фольге электровзрывного коммутатора;  $S_0$  – начальная площадь поперечного сечения фольги;  $Q_2$  – энергия, выделившаяся в коммутаторе.

Электродинамические процессы в разрядной камере описываются уравнениями электромагнитного поля (1) – (2). Движение среды количественно характеризуется законами сохранения массы и количества движения (3). Закон сохранения энергии (4) представляет собой уравнение баланса энергии по видам: механической, электромагнитной, тепловой, излучения. В рассматриваемом случае высокой оптической плотности плазмы [7] необходим учет лучистой теплопроводности. В конце активной стадии разряда, когда плотность плазмы мала вследствие ее расширения она начинает излучать из всего объема. В этом случае необходим учет  $Q_V$  в (4). Зависимости (6), характеризуют термодинамические функции и коэффициенты переноса среды в межэлектродном промежутке [8].

Изменение сопротивления алюминиевой фольги электровзрывного коммутатора определяется соотношениями (7), полученными экспериментально для широкого диапазона значений диссипированной в нем энергии [1, 9].

Значение разрядного тока в (9) определяется совместным решением уравнений электромагнитного поля с уравнениями внешней электрической цепи [4, 10]. Для замкнутого контура любой схемы замещения в условиях цилиндрической симметрии разрядной камеры справедливо уравнение Максвелла в интегральной форме

$$\oint E_{\text{дм}} = -\frac{\mu_0 l}{2\pi} \frac{d}{dt} \left[ I_3(t) \ln \frac{r_{\Gamma}}{r_k(t)} \right], \quad (9)$$

где  $l$  – длина межэлектродного промежутка;  $I_3$  – ток плазменного канала;  $r_{\Gamma}$  – радиус камеры;  $r_k$  – радиус канала.

В расчетах задавались базовые параметры разрядного контура, соответствующие параметрам установки [2], со значениями емкости емкостного накопителя энергии  $15,3 \cdot 10^{-6}$  Ф, заряженного до начального напряжения  $8 \cdot 10^4$  В, суммарной индуктивности ЕНЭ и

разрядника в цепи накачки ИНЭ  $5 \cdot 10^{-8}$  Гн, индуктивности размыкателя  $1,3 \cdot 10^{-7}$  Гн, паразитной индуктивности ветви нагрузки  $9 \cdot 10^{-8}$  Гн, активных сопротивлений шин контура накачки ИНЭ и ветви нагрузки  $10^{-2}$  Ом и  $7 \cdot 10^{-3}$  Ом соответственно, длины канала разряда 0,2 м и радиуса обратного токопровода цилиндрической разрядной камеры 0,13 м (рис. 1). Заданное время бездугового разрыва цепи в моделируемой схеме ( $\sim 10^{-6}$  с) обеспечивалось размыкателем с длиной фольги 0,93 м, шириной 0,15 м, толщиной  $10^{-5}$  м. Индуктивность ИНЭ в контуре составляла  $1,5 \cdot 10^{-7}$  Гн.

## 2. ВЛИЯНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ РАЗМЫКАТЕЛЯ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КОНТУРЕ

Существенное влияние индуктивности коммутатора на передачу энергии из ИНЭ в индуктивную нагрузку обсуждалось при выполнении анализа результатов экспериментальных исследований, представленных в [1, 3]. Там же показано частичное поглощение начальной энергии самим размыкателем, что уменьшает КПД разряда.

В настоящей работе влияние индуктивности электровзрывного коммутатора на характеристики переходного процесса в цепи с нелинейной активно-индуктивной плазменной нагрузкой выполнены для базовых параметров схемы замещения. Индуктивность коммутатора варьировалась в диапазоне  $(1,3 \dots 4) \cdot 10^{-7}$  Гн.

Согласно результатам расчета при увеличении индуктивности коммутатора  $L_2$  в контуре с ИНЭ за счет роста суммарной индуктивности цепи зарядки ИНЭ снижаются амплитуда и скорость изменения тока зарядки  $I_1$ , возрастает время до начала электровзрывной коммутации и появления тока  $I_3$  в межэлектродном промежутке разрядной камеры (рис. 2,а).

При этом значении энергии, диссипированной в электровзрывном размыкателе в течение процесса коммутации, также увеличивается (табл. 1). Это обуславливает уменьшение максимального значения энергии, запасенной в ИНЭ к моменту окончания коммутации при увеличении индуктивности размыкателя.

Таким образом, снижение магнитной энергии ИНЭ происходит за счет увеличения ее рассеивания в коммутаторе (табл. 1), что соответствует результатам экспериментальных исследований [2]. Следствием такого изменения является уменьшение значения энергии, выведенной из ИНЭ в межэлектродный промежуток на первой быстрой стадии разряда. Это уменьшение к концу первой микросекунды разряда несколько компенсируется возрастанием скорости вывода энергии из ЕНЭ за счет быстрого снижения сопротивления плазмы.

Таблица 1  
Выделившаяся или запасенная энергия ( $10^3$  Дж) в элементах разрядного контура в момент окончания электровзрывной коммутации в зависимости от индуктивности размыкателя

Элемент схемы замещения	Индуктивность размыкателя $L_2, 10^{-6}$ Гн		
	0,13	0,26	0,4
Емкость ЕНЭ	15,2	11,9	9,8
Индуктивность ИНЭ	3,1	2,5	2,2
Активное сопротивление размыкателя	24,8	28,5	31,2
Активное сопротивление канала разряда	3,6	4,2	3,9

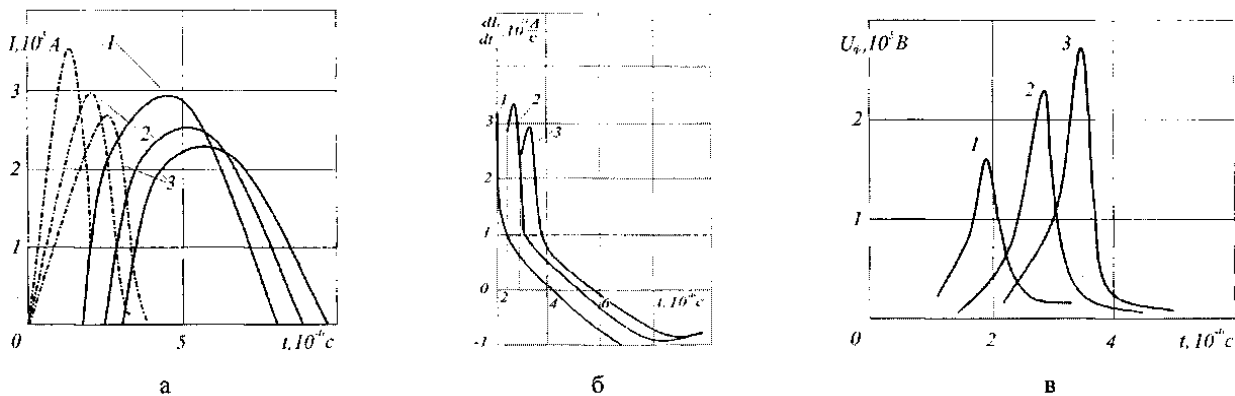


Рис. 2. Временные зависимости характеристик электрического разряда в контуре с комбинированным индуктивно-емкостным накопителем энергии для различных значений индуктивности размыкателя: а – токораспределение в ветвях контура: штрих-пунктирные линии – ток размыкателя,  $I_2$ ; сплошные линии – ток канала,  $I_3$ ; б – скорость изменения тока в канале разряда; в – напряжение на размыкателе. Кривые: 1 –  $L_2 = 1,3 \cdot 10^{-7}$  Гн; 2 –  $L_2 = 2,6 \cdot 10^{-7}$  Гн; 3 –  $L_2 = 4 \cdot 10^{-7}$  Гн

Поэтому амплитудное значение скорости переключения тока в канал разряда при увеличении индуктивности размыкателя не претерпевает существенных изменений (рис. 2,б). В результате при увеличении индуктивности размыкателя напряжение на нем возрастает (рис. 2,в, кривые 1-3), что может несколько осложнить бездуговое размыкание контура. Энергия, выделившаяся в канале разряда на стадии коммутации, определяется длительностью протекания тока. Малой индуктивности коммутатора  $L_2 = 1,3 \cdot 10^{-7}$  Гн соответствует короткая продолжительность быстрой стадии переключения (кривая 1 на рис. 2,б), в течение которой ток в разрядной камере  $I_3$  возрастает до значительной величины (сплошная кривая 1 на рис. 2,а). Для большой индуктивности коммутатора  $L_2 = 4 \cdot 10^{-7}$  Гн характерны более затяжной процесс электровзрывной коммутации (кривая 3 на рис. 2,б) и меньшее значение тока канала разряда  $I_3$  к моменту обрыва тока размыкателя  $I_2$  (сплошная кривая 3 на рис. 2,а). Характерно, что этими двумя параметрами определяется также и скорость переключения тока. Этим объясняется наличие экстремумов в зависимостях амплитуды производной тока  $dI_3/dt$  и энергии, выделившейся в канале, от индуктивности размыкателя, что следует из анализа рис. 2,б и табл. 1.

Характер изменения объемной мощности разряда в пересчете на единицу массы плазмы представлен на рис. 3. Аналогично амплитудным значениям  $I_3$  и  $q_m$  с ростом индуктивности коммутатора уменьшается максимальное значение тока разряда, плотность тока, а также напряженность магнитного поля  $H_m$  и электромагнитная сила  $f_m$ , действующая на единицу объема плазмы.

Уменьшение мощности разряда обуславливает спад амплитуды давления от  $3,3 \cdot 10^7$  Па при  $L_2 = 1,3 \cdot 10^{-7}$  Гн до  $2,3 \cdot 10^7$  Па при  $L_2 = 4 \cdot 10^{-7}$  Гн и температуры соответственно от  $3,0 \cdot 10^4$  К до  $2,5 \cdot 10^4$  К. При таком их изменении существенно уменьшается удельная электропроводность плазмы, скорость расширения и радиус канала (рис. 4). Причем, для зависимостей  $\sigma(t)$  характерно сглаживание пика при увеличении  $L_2$ . При пониженном уровне выведенной энергии из ИНЭ в межэлектродный промежуток ( $L_2 = 4 \cdot 10^{-7}$  Гн) пик удельной электропроводности не превышает значений  $\sigma(t)$  в начале послекоммутационной стадии. Это объясняется выравниванием со временем пространственного распределения по радиусу канала плотности тока  $i$ , температуры  $T$ , удельного объемного энерговыделения в пересчете на единицу массы плазмы  $q$  (рис. 4) и связано со снижением влияния скин-эффекта.

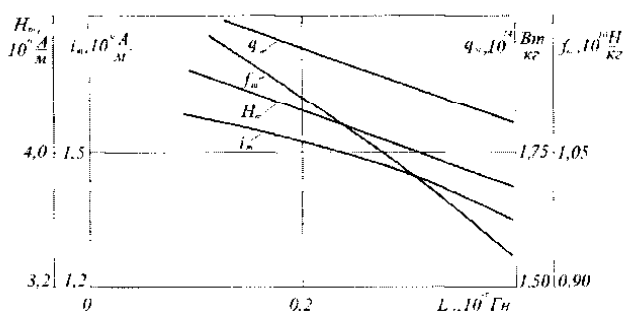


Рис. 3. Изменение максимальных значений электродинамических характеристик плазменного канала в зависимости от индуктивности размыкателя

Снижение суммарного значения энергии, остающейся в ИНЭ и конденсаторной батарее в момент окончания размыкания контура (табл. 1), при увеличении индуктивности размыкателя является следствием заметного уменьшения уровня ввода энергии в межэлектродный промежуток также и после коммутации цепи. Именно поэтому уменьшается скорость расширения канала (рис. 3), а электродинамические характеристики при увеличении значения  $L_2$  имеют ниспадающий характер (рис. 4).

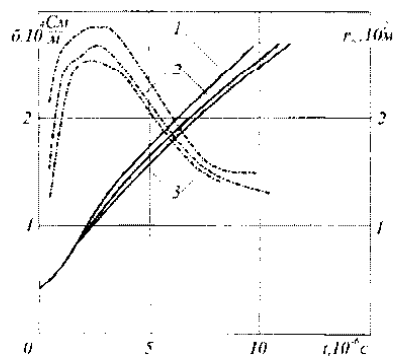


Рис. 4. Временные зависимости удельной электропроводности плазмы на оси канала разряда  $\sigma$  (штрих-пунктирные линии) и радиуса токопроводящего столба плазмы  $r_k$  (сплошные линии) для различных значений индуктивности размыкателя  $L_2$ .

Кривые: 1 –  $L_2 = 1,3 \cdot 10^{-7}$  Гн; 2 –  $L_2 = 2,6 \cdot 10^{-7}$  Гн; 3 –  $L_2 = 4 \cdot 10^{-7}$  Гн

Следует отметить, что рассмотренное здесь влияние значений индуктивности коммутатора на

характер токораспределения в контуре (рис. 2,а) и соответствующее влияние индуктивности ИНЭ на характер рассматриваемых переходных процессов, исследовавшееся в [4] сходны, но не тождественны. Существенное отличие заключается в том, что в случае увеличения индуктивности размыкателя энергии, запасенная в ИНЭ в момент начала размыкания, уменьшается, тогда как при соответствующем изменении индуктивности накопителя она растет. Этим обусловлено различное влияние этих параметров на переходные процессы электрического разряда.

### 3. ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ РАЗМЫКАТЕЛЯ НА ХАРАКТЕР ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Экспериментально установлено [1, 3], что от длины проводника (фольги) электровзрывного размыкателя зависят его коммутационные характеристики и, в частности, скорость обрыва тока. При небольших длинах в процессе отключения пик перенапряжения и напряженность электрического поля между его контактами оказываются настолько высокими, что развиваются в продуктах электрического взрыва фольги ионизационные явления прерывают процесс размыкания и приводят к резкому падению сопротивления электровзрывного коммутатора. С другой стороны, увеличение длины коммутатора ведет к росту доли энергии, рассеиваемой в нем в процессе отключения [1-3], и снижению КПД преобразования энергии в разрядном контуре. Поэтому с точки зрения обеспечения надежной коммутации и снижения потерь энергии на переключение тока длина электрически взрывающегося проводника коммутатора должна соответствовать такому минимально допустимому значению, при котором выполняется условие необратимого роста его сопротивления.

Исходя из этих соображений, в настоящей работе численные расчеты электровзрывной коммутации в разрядном контуре с ИЕНЭ и плазменной нагрузкой выполнены для различных значений длины электровзрывного коммутатора, изменяющейся в диапазоне от 0,5 м до 1,2 м. Остальные параметры схемы замещения (рис. 1) соответствовали указанным выше базовым значениям.

Результаты численного моделирования свидетельствуют о том, что в контуре с ИЕНЭ длина электровзрывного коммутатора слабо влияет на амплитуду протекающего через ИНЭ тока (рис. 5,а), но в значительной степени определяет скорость переключения тока в межэлектродный промежуток (рис. 5,б). С увеличением длины размыкателя  $d$  амплитуда тока канала уменьшается. Следует отметить, что при значении  $d = 0,55$  м пик коммутационного перенапряжения высок. Это может потребовать введения дополнительных мер для предотвращения развития ионизационных процессов в реальных условиях (повышения эффективности дугогашения [3], применения принципа ступенчатой коммутации [4, 11]).

Уменьшение амплитуды и скорости переключения тока в канал разряда объясняется уменьшением введенной в него энергии (табл. 2) за счет возрастания затрат на разрыв цепи зарядки ИНЭ при увеличении длины взрывающегося проводника.

Таким образом, в контуре с ИЕНЭ с увеличением длины размыкателя происходит следующее:

- а) снижаются значения амплитуд тока (рис. 5,а) и скорости его переключения в ветвь нагрузки (рис. 5,б);
- б) уменьшается максимальное значение напряжения на размыкателе (рис. 5,в);
- в) увеличиваются затраты энергии на размыкание контура (табл. 2);

г) уменьшается значение энергии, выделившейся в канале разряда.

д) уменьшается скорость расширения канала разряда и удельная электропроводность плазмы (рис. 6);

е) снижаются максимальные значения электродинамических характеристик разряда (рис. 7).

Таблица 2

Распределение энергии по элементам разрядного контура (кДж) в момент окончания электровзрывной коммутации для различных значений длины размыкателя

Наименование элемента схемы замещения	Длина электровзрывного размыкателя (м)		
	0,55	0,70	1,05
Емкость ИЕНЭ	16,5	15,8	14,7
Индуктивность ИНЭ	2,8	2,9	3,2
Активное сопротивление размыкателя	22,5	23,8	25,4
Активное сопротивление канала разряда	4,5	4,4	3,6

Анализ полученных результатов также позволяет заключить, что изменение скорости переключения тока в межэлектродный промежуток в зависимости от длины коммутатора определяет амплитуду давления и температуры в межэлектродном промежутке.

Соответственно изменению энергетических и электрических характеристик разряда уменьшаются максимальные значения давления и температуры на оси канала соответственно от  $5,2 \cdot 10^7$  Па и  $4,1 \cdot 10^4$  К при длине  $d = 0,55$  м до  $4 \cdot 10^7$  Па и  $3,9 \cdot 10^4$  К при  $d = 1,05$  м.

Значения максимальной температуры и удельной электропроводности плазмы канала коррелируют со значениями энергии, выделившейся в нем.

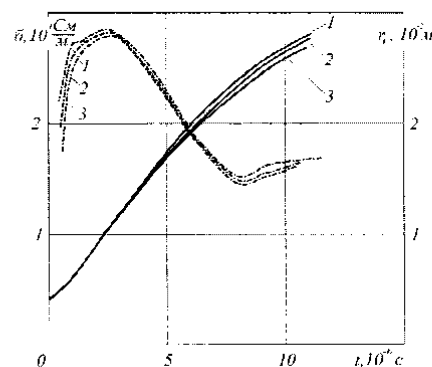


Рис. 6. Временные зависимости радиуса канала разряда  $r_k$  (сплошные линии) и удельной электропроводности плазмы на его оси  $\sigma$  (штрих-пунктирные линии) для различных значений длины размыкателя  $d$ .

Кривые: 1 –  $d = 0,55$  м; 2 –  $d = 0,7$  м; 3 –  $d = 1,05$  м

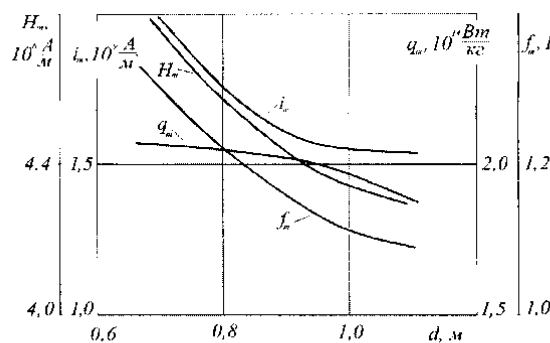


Рис. 7. Изменение максимальных значений электродинамических характеристик плазменного канала в зависимости от длины электровзрывного коммутатора

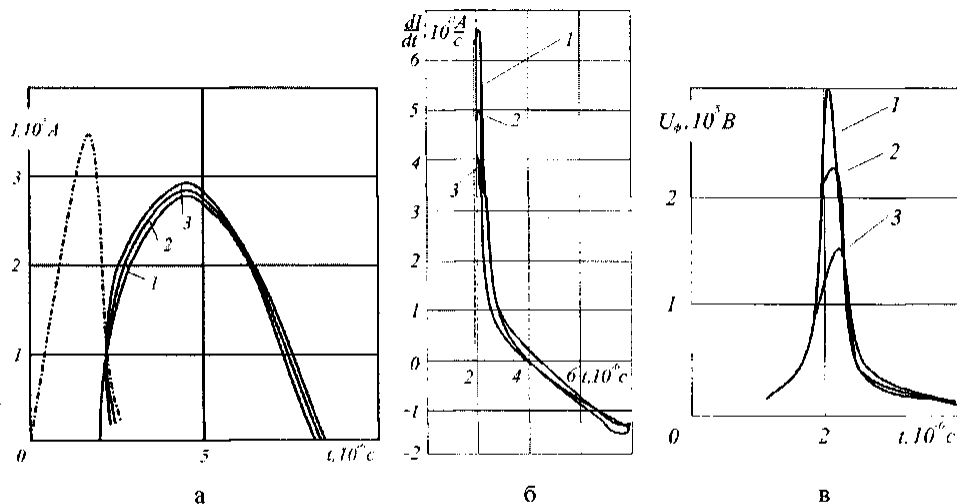


Рис. 5. Временные зависимости характеристик электрического разряда в контуре с комбинированным индуктивно-емкостным накопителем энергии для различных значений длины электровзрывного коммутатора: а – токораспределение в ветвях контура: штрих-пунктирные линии – ток размыкателя,  $I_2$ ; сплошные линии – ток канала,  $I_3$ ; б – скорость изменения тока в канале разряда; в – напряжение на размыкателе. Кривые: 1 –  $d = 0,55$  м; 2 –  $d = 0,7$  м; 3 –  $d = 1,05$  м

#### 4. ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЯДА ОТ ШИРИНЫ ФОЛЬГИ РАЗМЫКАТЕЛЯ

Необходимо отметить, что при изменении поперечного сечения взрывающегося проводника [3, 12] управление временем начала коммутации в контуре выполняется при практически неизменной начальной скорости увеличения тока в накопителе. Действительно, индуктивность  $L$  контура накачки ИНЭ с увеличением ширины фольги размыкателя изменяется незначительно. Тогда  $dI_2/dt = U_0/L$ . Кроме того, энергия коммутации оказывается почти линейно зависящей от площади сечения проводника. Поэтому в приводимых ниже результатах численных расчетов времени докоммутационной стадии разряда задавались изменением ширины фольги [12, 13].

Поведение представленных характеристик разряда качественно согласуется с результатами [12], полученными для случая разряда ИНЭ на индуктивность.

Следует иметь в виду, что уменьшение амплитуды напряжения на размыкателе в данном случае не означает облегчения его работы с точки зрения бездугового отключения цепи. Дело в том, что увеличение ширины проводника приводит, согласно [2], к некоторому снижению уровня напряжения развития ионизационных процессов вдоль поверхности продуктов электрического взрыва размыкателя.

С увеличением ширины фольги и длительности докоммутационной стадии разряда увеличивается амплитуда тока, протекающего через индуктивный накопитель и коммутатор (рис. 8,а). В соответствии с этим возрастает энергия, запасенная в ИНЭ, а энергия в ЕНЭ к моменту начала размыкания уменьшается. Согласно данным табл. 3 это обеспечивает увеличение энерговода в межэлектродный промежуток в течение коммутационного процесса от  $1,5 \cdot 10^3$  Дж до  $3,6 \cdot 10^3$  Дж при изменении ширины фольги от 0,05 м до 0,14 м.

Характер протекания тока и энергетические процессы в течение коммутационной стадии объясняют поведение электродинамических характеристик разряда в зависимости от площади поперечного сечения фольги размыкателя. Увеличение ширины фольги  $b$  от 0,05 м до 0,1 м обеспечивает значительное увеличение тока канала к моменту окончания стадии электровзрывной коммутации от  $9 \cdot 10^4$  А до  $2,2 \cdot 10^5$  А (рис. 8,а). Момент окончания коммутации удобно опреде-

лять по характерному излому кривой производной тока, например, ему соответствует значение  $t = 2,37 \cdot 10^{-6}$  с на кривой 3 рис. 8,б. Ввод энергии в плазму разряда за время коммутации при таком изменении значения  $b$  увеличивается от  $1,5 \cdot 10^3$  Дж до  $3,7 \cdot 10^3$  Дж (табл. 3). Дальнейшее увеличение ширины фольги от 0,1 м до 0,15 м приводит к некоторому снижению энерговода в плазму канала за счет существенного увеличения потерь энергии на активном сопротивлении размыкателя. Снижается при этом до  $1,9 \cdot 10^5$  А и значение тока канала к концу электровзрывной коммутации. Поэтому кривая зависимости максимальных по радиусу канала значений плотности тока достигает экстремума при значении  $b = 0,1$  м.

Таблица 3

Распределение энергии по элементам разрядного контура ( $10^3$  Дж) для различных значений ширины фольги размыкателя в момент окончания электровзрывной коммутации

Элемент схемы замещения	Ширина фольги электровзрывного размыкателя $b$ , м		
	0,05	0,10	0,14
Емкость ЕНЭ	39,0	25,4	15,2
Индуктивность ИНЭ	1,3	2,4	3,1
Активное сопротивление размыкателя	7,1	16,7	24,8
Активное сопротивление канала разряда	1,5	3,7	3,6

Особенностью рассматриваемого процесса является отсутствие максимума зависимости амплитуды давления в рассматриваемом диапазоне длин межэлектродного промежутка. Расчетным путем получено ее монотонное возрастание от  $2,3 \cdot 10^7$  Па до  $3,3 \cdot 10^7$  Па при увеличении  $b$  от 0,1 до 0,2 м. Этот результат является следствием того, что при возрастании времени до начала коммутации с ростом ширины фольги, несмотря на снижение амплитуды скорости переключения тока в канал, увеличивается начальное значение производной тока  $dI_3/dt$ . Это обеспечивает более высокие значения скорости энерговыделения в межэлектродном промежутке на начальной стадии переключения тока.

Следует отметить качественное согласие при-

водимых здесь зависимостей токов в ветвях контура и напряжения на размыкателе от сечения взрывающегося проводника с результатами расчетов [12] и эксперимента [13].

В рассматриваемом случае амплитуда импульсов тока в нагрузке уменьшается с увеличением сечения проводника. Возрастает только наибольшее значение тока первой стадии формирования импульса, которое определяется, как и в предыдущем случае, значением магнитной энергии, запасенной в индуктивном накопителе к начальному моменту размыкания. Дальнейшее увеличение тока объясняется подпиткой канала разряда

энергией, оставшейся в конденсаторной батарее. Причем, чем больше время до размыкания контура, тем больше затраты энергии на коммутацию цепи и значительнее доля энергии, запасенной в ИНЭ. Поэтому уровень энергии, оставшейся в емкости после размыкания, с ростом сечения коммутатора уменьшается (табл. 3).

Проверочная оценка соответствия результатов численных расчетов закону сохранения энергии в контуре, например, для ширины фольги  $b = 0,14$  м согласно выражению (1) дает значение энергии  $W_c = 15,2 \cdot 10^3$  Дж, оставшейся в емкостном накопителе на момент завершения коммутации.

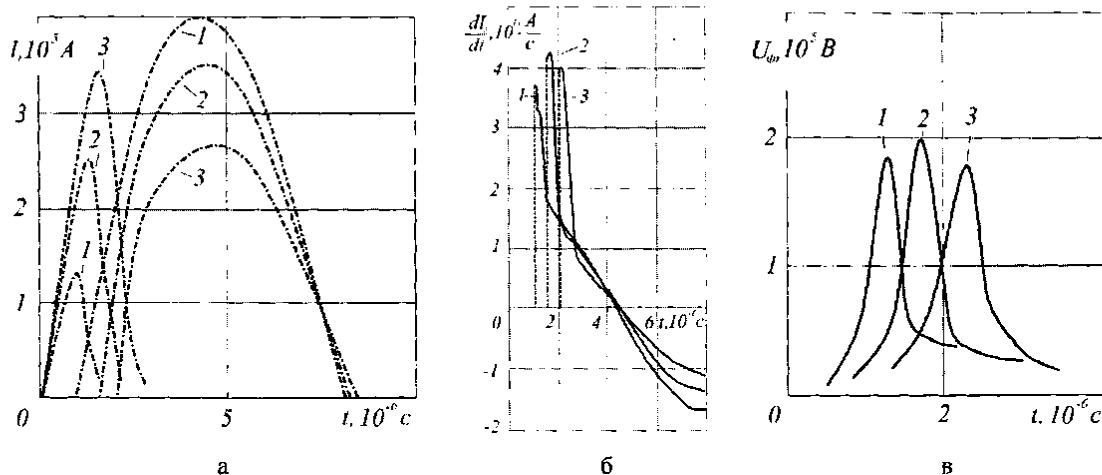


Рис. 8. Временные зависимости характеристик электрического разряда в контуре с индуктивно-емкостным накопителем энергии для различных значений ширины фольги электровзрывного коммутатора: а – токораспределение в ветвях контура: штрих-пунктирные линии – ток размыкателя,  $I_2$ ; сплошные линии – ток канала,  $I_3$ ; б – скорость изменения тока в канале разряда; в – напряжение на размыкателе. Кривые: 1 –  $b = 0,1$  м; 2 –  $b = 0,14$  м; 3 –  $b = 0,2$  м

Это значение совпадает с результатом численного моделирования (табл. 3).

$$Q_c = Q_0 - Q_p - Q_l - Q_R - Q_K =$$

$$= (49 - 24,8 - 5,0 - 0,4 - 3,6) \cdot 10^3 \text{ Дж} = 15,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

где  $Q_0$  – значение энергии, накопленной в конденсаторной батарее перед началом переходного процесса;  $Q_p$ ,  $Q_l$ ,  $Q_R$ ,  $Q_K$  – соответственно энергия, диссипированная в размыкающем коммутаторе, запасенная в суммарной паразитной индуктивности контура разряда, активные потери в шинопроводе и канале к моменту окончания размыкания цепи зарядки ИНЭ.

Характер протекания тока и энергетические процессы в течение коммутационной стадии объясняют поведение электродинамических характеристик разряда в зависимости от площади поперечного сечения фольги размыкателя. Увеличение ширины фольги  $b$  от 0,05 м до 0,1 м обеспечивает значительное увеличение тока канала к моменту окончания стадии электровзрывной коммутации от  $9 \cdot 10^4$  А до  $2,2 \cdot 10^5$  А (рис. 8,а). Момент окончания коммутации удобно определять по характерному излому кривой производной тока, например, ему соответствует значение  $t = 2,37 \cdot 10^{-6}$  с на кривой 3 рис. 8,б. Ввод энергии в плазму разряда за время коммутации при таком изменении значения  $b$  увеличивается от  $1,5 \cdot 10^3$  Дж до  $3,7 \cdot 10^3$  Дж (табл. 3). Дальнейшее увеличение ширины фольги от 0,1 м до 0,15 м приводит к некоторому снижению энерговода в плазму канала за счет существенного увеличения потерь энергии на активном сопротивлении размыкателя. Снижается при этом до  $1,9 \cdot 10^5$  А и значение тока канала к концу электровзрывной коммутации. Поэтому кривая зависимости максимальных по радиусу канала значений плотности тока достигает экстремума при значении  $b = 0,1$  м.

Амплитудное значение плотности тока на оси

канала имеет максимум (рис. 9), обусловленный соответствующим изменением производной тока канала в зависимости от ширины фольги электровзрывного коммутатора (рис. 8,б).

Результаты расчета свидетельствуют о восходящем характере зависимости  $q_m(b)$ . Это объясняется увеличением мощности разряда на первой стадии переключения тока при увеличении сечения фольги размыкателя. Подтверждением служит рост удельной электропроводности плазмы на оси канала разряда за счет нагрева (рис. 10).

Следует также отметить, что уменьшение амплитудных значений напряженности магнитного поля и плотности электромагнитной силы в пересчете на единицу массы плазмы согласно рис. 9 связано со снижением амплитуды тока в межэлектродном промежутке при увеличении ширины фольги  $b$ .

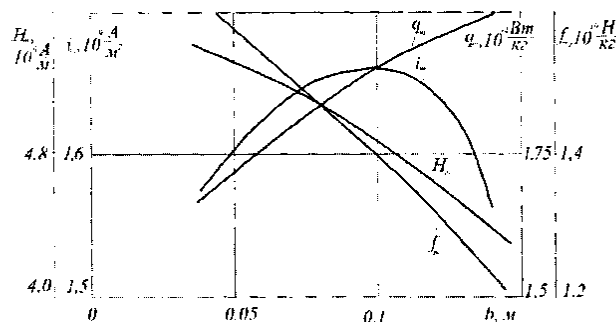


Рис. 9. Изменение максимальных значений электродинамических характеристик плазменного канала в зависимости от ширины фольги электровзрывного коммутатора

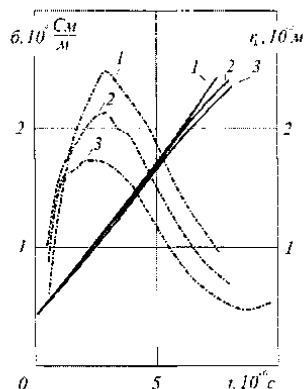


Рис. 10. Временные зависимости радиуса канала разряда  $r_x$  (сплошные линии) и удельной электропроводности плазмы  $\sigma$  на его оси (пунктирные линии) для различных значений ширины фольги размыкателя  $b$ .  
Кривые: 1 –  $b = 0,1$  м; 2 –  $b = 0,14$  м; 3 –  $b = 0,2$  м

### ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате исследования характеристик сильноточного электрического разряда в различных режимах отключения тока накачки индуктивного накопителя:

1. Получены характеристики электрического разряда в контуре с индуктивно-емкостным накопителем энергии в различных режимах электровзрывной коммутации.

2. Математическая модель и результаты численного анализа могут быть использованы в практике проектирования технологических разрядно-импульсных установок с индуктивно-емкостными накопителями энергии для генерации мощных электрических разрядов в сплошных средах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 432 с.
2. Бурцев В.А., Литуновский В.Н., Прокопенко В.Ф. Исследование электрического взрыва фольг // Журн. техн. физики. – 1977. – 47, № 8. – С. 1642-1652.
3. Бурцев В.А., Калинин Н.В. Индуктивно-емкостные накопители энергии и их коммутация с помощью электрического взрыва фольг // Вопр. атомной науки и техн. Вып. 2: Термоядерный синтез. – М., 1983. – С. 27-46.
4. Шерба А.А., Дубовенко К.В. Высоковольтные электро-разрядные компактные системы. К.: Наукова думка, 2008. – 270 с.
5. Дубовенко К.В. Взаимодействие ударных волн в плазме канала сильноточного разряда в камере высокого давления // Журн. техн. физики, 1992. – Т. 62. – № 6. – С. 83-93.
6. Дубовенко К.В. Влияние параметров электровзрывного размыкателя на характеристики электрического разряда в контуре с индуктивным накопителем энергии // Вестник НТУ "ХПИ". – 2009. – № 41. – С. 54-61.
7. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных газодинамических явлений. – М.: Наука, 1966. – 686 с.
8. Замышляев Б.В., Ступицкий Е.Л., Гузь А.Г. Состав и термодинамические функции плазмы. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 144 с.
9. Андресен А.Б., Бурцев В.А., Воловцов В.М., Дроздов А.А. Исследование коммутационных свойств электрически взрывающихся фольг в дугогасящих средах // Журн. техн. физики. – 1980. – Т. 50. – № 11. – С. 2283-2294.

10. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные методы решения задач газовой динамики. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
11. Проблемы накопления и преобразования электромагнитной энергии в импульсных системах питания с индуктивными накопителями / Б.А. Ларионов, Ф.М. Спевакова, А.М. Столов, Э.А. Азизов. В кн.: Физика и техника мощных импульсных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 66-104.
12. Бурцев В.А., Калинин Н.В. Численное исследование передачи энергии из индуктивно-емкостного накопителя в индуктивную нагрузку при помощи электровзрывных размыкателей тока. – Л.: 1981. – 44 с. – (Препринт/ НИИЭФА: К-0490).
13. Тагути Юуити, Сакураи Макого, Уэно Исао. Импульсный источник с индуктивным накопителем и размыкателем на основе взрывающегося проводника // Дэнки гаккай ромбунси. Trans. Inst. Elec. Eng. Jap. – 1985. – В 105. – Р. 925-932.

**Bibliography (transliterated):** 1. Burcev V.A., Kalinin N.V., Luchinskij A.V. 'Elektricheskij vzryv provodnikov i ego primeneniye v 'elektrofizicheskikh ustanovkakh. - M.: 'Energoatomizdat, 1990. - 432 s. 2. Burcev V.A., Litunovskij V.N., Prokopenko V.F. Issledovanie 'elektricheskogo vzryva fol'g // Zhurn. tehn. fiziki. - 1977. - 47, № 8. - С. 1642-1652. 3. Burcev V.A., Kalinin N.V. Induktivno-emkostnyye napokiteli 'energii i ih kommutaciya s pomosh'yu 'elektricheskogo vzryva fol'g // Voпр. atomnoj nauki i tehn. Vyp. 2: Termoyadernyj sintez. - M., 1983. - S. 27-46. 4. Scherba A.A., Dubovenko K.V. Vysokovol'tnyye 'elektro-razryadnye kompaktnyye sistemy. K.: Naukova dumka, 2008. - 270 s. 5. Dubovenko K.V. Vzaimodejstviye udarnykh voln v plazme kanala sil'notochnogo razryada v kamere vysokogo davleniya // Zhurn. tehn. fiziki, 1992. - T. 62. - № 6. - S. 83-93. 6. Dubovenko K.V. Vliyaniye parametrov 'elektrovzryvnogo razmykatel'ya na harakteristiki 'elektricheskogo razryada v konture s induktivnym napokitelem 'energii // Vestnik NTU "HPI". - 2009. - № 41. - S. 54-61. 7. Zel'dovich Ya.B., Rajzer Yu.P. Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gazodinamicheskikh yavlenij. - M.: Nauka, 1966. - 686 s. 8. Zamyshlyayev B.V., Stupickij E.L., Guz' A.G. Sostav i termodinamicheskie funkcii plazmy. - M.: 'Energoatomizdat, 1984. - 144 s. 9. Andezen A.B., Burcev V.A., Vodovozov V.M., Drozdov A.A. Issledovanie kommutatsionnykh svoystv 'elektricheskikh vzryvaemykh fol'g v dugogasyaschih sredah // Zhurn. tehn. fiziki. - 1980. - T. 50. - № 11. - S. 2283-2294. 10. Samarskij A.A., Popov Yu.P. Raznostnye metody resheniya zadach gazovoj dinamiki. - M.: Nauka, 1980. - 352 s. 11. Problemy nakopleniya i preobrazovaniya 'elektromagnitnoj 'energii v impul'snykh sistemah pitaniya s induktivnymi napokiteleyami / B.A. Larionov, F.M. Spevakova, A.M. Stolon, 'E.A. Azizov. V kn.: Fizika i tehnika moschnykh impul'snykh sistem. - M.: 'Energoatomizdat, 1986. - S. 66-104. 12. Burcev V.A., Kalinin N.V. Chislennoe issledovanie peredachi 'energii iz induktivno-emkostnogo napokitel'ya v induktivnyyu nagruzku pri pomoshchi 'elektrovzryvnykh razmykatelej toka. - L.: 1981. - 44 s. - (Preprint/ НИИЭФА: К-0490). 13. Taguti Yuuiti, Sakurai Makoto, U'eno Isao. Impul'snyj istochnik s induktivnym napokitelem i razmykatelem na osnove vzryvayushchegosya provodnika // D'enki gakkaj rombunsi. Trans. Inst. Elec. Eng. Jap. - 1985. - V 105. - P. 925-932.

Поступила 05.02.2012

Дубовенко Константин Викторович, д.т.н., доц.  
Николаевский государственный аграрный университет  
кафедра электротехнологий и электроснабжения  
54010, Николаев, ул. Парижской Коммуны, 9  
тел.: (0512) 341082, e-mail: dubovenko2010@gmail.com

Dubovenko K.V.

**Influence of electroblasting breaker parameters on electric spark discharge characteristics in a circuit with an inductive-capacitive energy store.**

Influence of electroblasting breaker parameters (switch inductance, foil length and width) on electric spark discharge characteristics in a circuit with an inductive-capacitive energy store and plasma load is studied by means of numerical simulation in magnetohydrodynamical approximation.

**Key words** – spark discharge, inductive-capacitive energy store, commutation modes.