

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО КОНТУРА С ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

*У магнітогідродинамічному наближенні виконано чисельне моделювання характеристик потужного електричного розряду у повітрі в контурі з індуктивно-ємнісним накопичувачем енергії та електровибуховим фольговим розмикачем. Визначено вплив параметрів розрядного контуру (довжини плазмового каналу, напруги підімкнення плазмового навантаження в контур розряду, індуктивності індуктивного накопичувача) на характеристики розряду.*

*В магнітогідродинамічному приближении выполнено численное моделирование характеристик мощного электрического разряда в воздухе в контуре с индуктивно-емкостным накопителем энергии и электровзрывным фольговым размыкателем. Определено влияние параметров разрядного контура (длины плазменного канала, напряжения подключения плазменной нагрузки в контур разряда, индуктивности индуктивного накопителя) на характеристики разряда.*

### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работах [1, 2] показаны перспективы применения индуктивных накопителей энергии (ИНЭ) в энергоемких разрядно-импульсных системах со скоростью вывода первоначально запасенной энергии в плазменную нагрузку (канал электрического разряда в сплошной среде)  $10^{10} \dots 10^{12}$  Вт. Поскольку емкостный накопитель энергии (ЕНЭ), как и индуктивный, способен обеспечить быстрый вывод энергии в плазменный канал то, как показано в [1], в ряде случаев целесообразно совместное использование накопителей обоих типов (индуктивного и емкостного) в разрядно-импульсных системах. Емкостный накопитель в этом случае также выполняет функции первичного накопителя зарядки ИНЭ. Таким образом, в таких системах вывод энергии в нагрузку осуществляется комбинированным индуктивно-емкостным накопителем (ИЕНЭ). В работах [2, 3] представлена математическая модель расчета пространственно-временных процессов электрического разряда в сплошных средах в магнитогидродинамическом приближении. В ее основу положен численный метод решения задач магнитной гидродинамики, основанный на применении полностью консервативных разностных схем [4]. В [2, 3] также показана адекватность математической модели реальным процессам, происходящим в разрядных контурах разрядно-импульсных установок. Электроразрядные процессы в разрядном контуре с ИЕНЭ рассмотрены в [5]. Настоящая работа посвящена исследованию характеристик электрического разряда в контуре с ИЕНЭ, в частности, влиянию параметров разрядного контура – длины межэлектродного промежутка, определяющего длину канала разряда, напряжения пробоя коммутатора в ветви нагрузки, индуктивности индуктивного накопителя в составе ИЕНЭ на электроразрядные характеристики.

Цель настоящей работы – изучение влияния параметров контура с ИЕНЭ на характеристики канала, что необходимо для обоснованного и оптимального проектирования разрядно-импульсных установок. Схема замещения разрядного контура с индуктивно-емкостным накопителем энергии представлена на рис. 1. В разрядном контуре межэлектродный промежуток сформирован вдоль оси цилиндрической разрядной камеры. В нем инициируется канал разряда. На рис. 1 обозначено:  $C$  – емкость ЕНЭ;  $R_{b1}, L_{b1}$  – суммарные сопротивление и индуктивность разрядника, конден-

саторной 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. В такой цепи при обрыве тока  $I_2$  в контуре заряда ИЕНЭ электровзрывным фольговым размыкателем за счет импульса высокого напряжения осуществляется пробой разрядника в ветви нагрузки и ток из ИЕНЭ и конденсаторной батареи переключается в межэлектродный промежуток.

Поскольку математическая модель опубликована ранее [2, 3, 5], в настоящей работе для общности изложения материала представлены ее основные уравнения, способствующие анализу переходных процессов в разрядном контуре с ИЕНЭ (рис. 1).

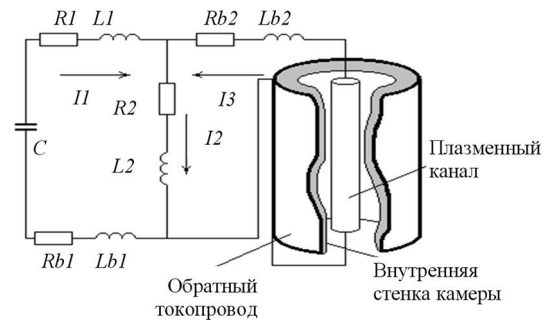


Рис. 1. Схема замещения разрядного контура с ИЕНЭ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

где  $r$  – пространственная координата;  $t$  – время;  $s$  – лагранжева массовая координата ( $ds = r dr$ );  $\mu_0$  – 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  $\chi_E$ , молекулярной  $\chi_M$  и лучистой  $\chi_R$  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 справедливо приближение лучистой теплопроводности [6]. 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 [7].

Изменение сопротивления алюминиевой фольги электровзрывного коммутатора определяется соотношениями (7), полученными экспериментально для широкого диапазона значений диссипированной в нем энергии [8, 9].

Значение разрядного тока в (9) определяется совместным решением уравнений электромагнитного поля с уравнениями внешней электрической цепи [2, 4]. Для замкнутого контура любой схемы замещения в условиях цилиндрической симметрии разрядной камеры справедливо уравнение Максвелла в интегральной форме

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

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 малоиндуктивной установки [8] со значениями емкости ЕНЭ  $15,3 \cdot 10^{-6}$  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 0,13 м. 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.

## ЗАВИСИМОСТЬ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗРЯДНОМ КОНТУРЕ ОТ ДЛИНЫ КАНАЛА РАЗРЯДА

Исследование влияния длины межэлектродного промежутка на характеристики электрического разряда выполнялось с учетом нелинейности сопротивления и индуктивности канала на всей активной стадии переходного процесса, включающей и стадию переключения тока в канал. Длина межэлектродного промежутка варьировалась в диапазоне 0,01–0,8 м. Остальные параметры разрядного контура соответствовали базовым значениям.

До момента начала переключения тока в плазменную нагрузку процессы в разрядном контуре не зависят от ее параметров (рис. 2,а). Увеличение длины плазменного канала характеризуется:

- снижением амплитуды тока разряда и скорости переключения его в нагрузку (рис. 2,а);
- уменьшением начальной скорости переключения тока в канал (рис. 2,б);
- увеличением скачка напряжения на размыкателе (рис. 2,в);
- возрастанием энергии, расходуемой из индуктивного накопителя на размыкание цепи (табл. 1);
- независимым значением напряжения и энергии емкостного накопителя в момент окончания размыкания контура (табл. 1);
- снижением энергии, введенной в канал за время всей активной стадии разряда.

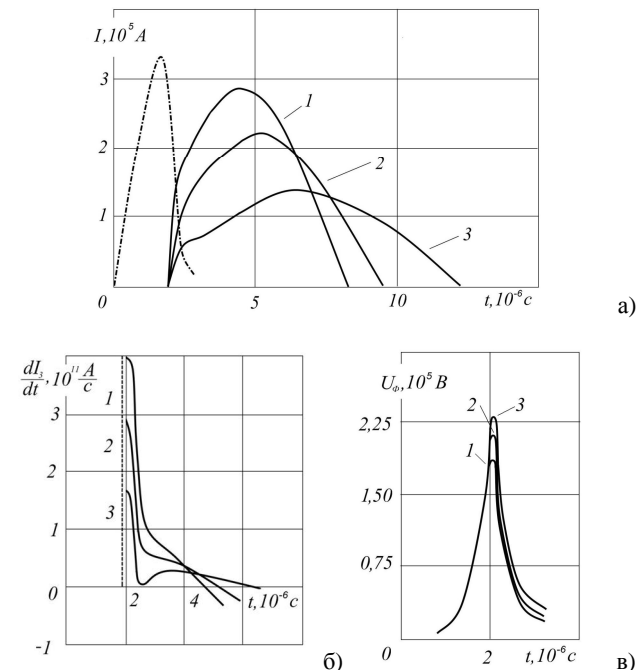


Рис. 2. Влияние длины канала на электрические характеристики разряда: а – токи в ветвях контура: ток размыкателя  $I_2$  (штрих-пунктир); ток канала  $I_3$  (сплошные линии); б – скорость изменения тока в межэлектродном промежутке; в – напряжение на коммутаторе (активная составляющая). Кривые: 1 –  $l = 0,2$  м; 2 –  $l = 0,4$  м; 3 –  $l = 0,8$  м

Таблица 1  
Выделившаяся или запасенная энергия ( $10^3$  Дж) в элементах контура в момент окончания процесса размыкания для различных значений длины канала разряда

Элемент схемы замещения	Длина канала (м)		
	0,2	0,4	0,8
Емкостный накопитель	15,2	15,2	15,2
Индуктивный накопитель	3,1	1,6	0,5
Активное сопротивление размыкателя	24,8	26,4	27,7
Активное сопротивление канала	3,6	3,3	3,0

Временные зависимости тока (рис. 2,а), радиуса канала и удельной электропроводности плазмы (рис. 3) для различных значений его длины  $l$  поясняют поведение остальных электродинамических характеристик канала (рис. 4). Слабое влияние длины канала на изменение радиуса плазменного столба в начальной стадии протекания через него тока, а также снижение амплитуды тока при увеличении длины межэлектродного промежутка приводят к ниспадающему характеру зависимостей  $i_m(l)$ ,  $q_m(l)$ ,  $H_m(l)$  и  $f_m(l)$ , изображенных на рис. 4.

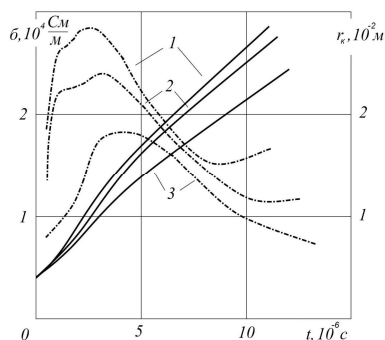


Рис. 3. Влияние длины на удельную электропроводность плазмы (штрих-пунктирные линии) и радиус токопроводящего столба (сплошные линии).

Кривые: 1 –  $l = 0,2$  м; 2 –  $l = 0,4$  м; 3 –  $l = 0,8$  м

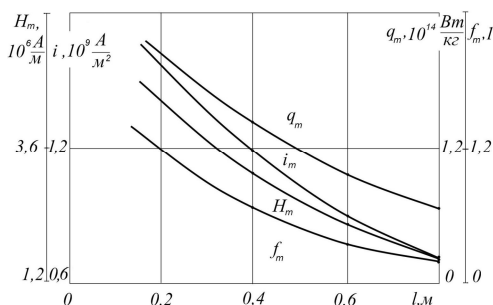


Рис. 4. Влияние межэлектродного расстояния на электродинамические характеристики канала разряда

Следует отметить, что при увеличении длины канала снижается уровень энергии, остающейся в индуктивном накопителе в момент окончания коммутации (табл. 1). Так, при длине  $l = 0,8$  м уже более 90 % запасенной в ИНЭ энергии расходуется к моменту окончания процесса размыкания ветви электровзрывным коммутатором.

Результаты выполненных расчетов свидетельствуют также о том, что значение энергии, введенной в канал на стадии переключения тока, имеет максимум при длине межэлектродного промежутка  $l = 0,1$  м.

Уровень энергии, вложенной в канал, плавно снижается в окрестности этого значения. Более крутой спад наблюдается только при  $l \leq 0,05$  м, когда индуктивность канала значительно меньше паразитной индуктивности ветви нагрузки и не влияет на увеличение амплитуды тока, а сопротивление канала становится сравнимым с сопротивлением шин цепи разряда. В противном случае, при длине канала разряда ( $l > 0,3$  м) его индуктивность и активное сопротивление ограничивают амплитуду тока. В пределе  $l = \infty$ ,  $R_n = \infty$ ,  $I_3 = 0$ ,  $W_n = 0$  (режим холостого хода). Этим объясняется уменьшение амплитудных значе-

ний температуры и давления плазмы при увеличении длины канала разряда.

Так, при заданных параметрах контура давление и температура канала оказываются сильно зависящими от длины межэлектродного промежутка. Изменение  $l$  от 0,2 м до 0,8 м приводит к уменьшению расчетных максимальных значений давления на оси цилиндрического плазменного канала от  $4,4 \cdot 10^7$  Па до  $1,7 \cdot 10^7$  Па, а температуры – от  $4,0 \cdot 10^4$  К до  $2,7 \cdot 10^4$  К.

Необходимо отметить, что из-за высокого сопротивления и собственной индуктивности канала его подпитка от ИНЭ оказывается малоэффективной при  $l = 0,8$  м. В этом режиме скорость переключения тока падает практически до нуля (кривая 3 на рис. 2,б) в конце процесса размыкания. И только лишь по мере увеличения удельной электропроводности плазмы за счет нагрева (медленный подъем кривой  $\sigma(t)$  при  $l = 0,8$  м иллюстрирует кривая 3 на рис. 3) и роста радиуса токопроводящей области скорость изменения тока на второй стадии переключения возрастает.

#### ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ВЕТВИ НАГРУЗКИ НА ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

При обрыве размыкателем тока  $I_2$  (рис. 1) на ИНЭ и на элементах ветви нагрузки, в том числе и на включенном в ней газовом разряднике, происходит скачкообразное увеличение напряжения. В связи с этим возникает задача исследования зависимости характеристик разряда от напряжения пробоя  $U_n$  разрядника в ветви нагрузки контура с ИЕНЭ. Для решения задачи в указанной постановке в численных расчетах напряжение срабатывания разрядника относительно начального напряжения  $U_0$  на конденсаторной батарее  $U'_p = U_n/U_0$  варьировалось в пределах  $1 \leq U'_p \leq 3,5$ . Нижний предел этого неравенства задан из условия обеспечения подключения ветви нагрузки в момент начала размыкания цепи зарядки ИНЭ. С другой стороны, в контуре с заданными параметрами при  $U'_p > 3,5$  напряжение пробоя превышает определенное экспериментально максимально достижимое значение (в режиме холостого хода без ветви нагрузки) перенапряжения на размыкателе и подключения межэлектродного промежутка в контур разряда не происходит [8].

В контуре электрического разряда с ИЕНЭ коммутация тока в нагрузку осуществляется в две стадии (рис. 5,а). Для первой (быстрой) стадии характерна высокая начальная скорость переключения тока в нагрузку. Влияние напряжения пробоя  $U'_p$  на процессы в течение этой стадии выражается в задержке коммутации тока в канал с ростом  $U'_p$ . Это объясняется возрастанием времени до срабатывания разрядника при увеличении напряжения его пробоя. При этом растет как значение энергии, выделенной в размыкателе, так и его сопротивление в момент начала коммутации тока в ветвь нагрузки (табл. 2). Увеличение расхода энергии на размыкание цепи происходит за счет дополнительного вывода магнитной энергии из ИНЭ. Поэтому большим значениям напряжения  $U'_p$  соответствуют меньшие значения тока первой стадии переключения.

Из этого следует, что в результате роста напряжения подключения межэлектродного промежутка в контур на быстрой стадии коммутации уменьшается максимальное значение тока, протекающего через канал, но увеличивается амплитуда скорости его изменения. Такое двоякое влияние напряжения  $U'_p$  на

электрические и энергетические характеристики разряда приводит к характерному изгибу кривых зависимостей амплитудных значений характеристик  $i_m(U'_p)$ ,  $q_m(U'_p)$ ,  $H_m(U'_p)$ , представленных на рис. 6. Действительно, ввиду того, что радиус канала не остается постоянным за время размыкания контура (рис. 7), максимальные значения этих характеристик определяются как значением тока, так и скоростью его переключения в канал. При высоких напряжениях пробоя ( $U'_p = 3$ ) значение тока в канале к моменту окончания коммутации невелико (рис. 5, а, кривая 3).

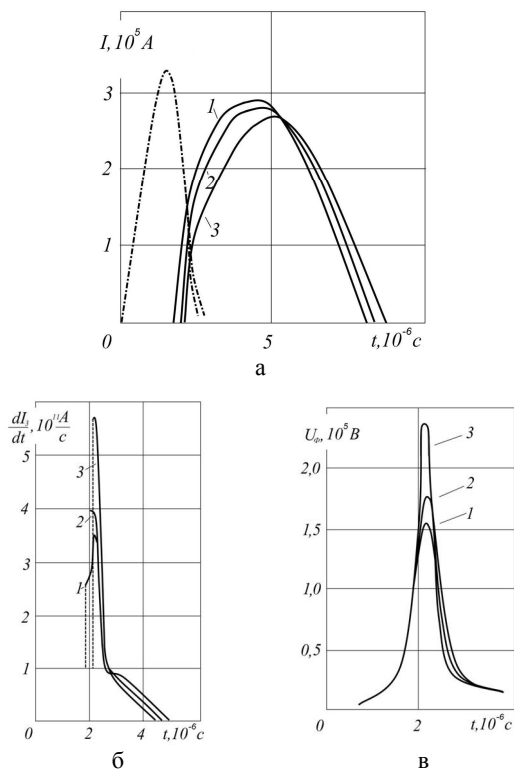


Рис. 5. Электрические характеристики разряда при различных значениях напряжения подключения ветви нагрузки: а – токи в ветвях контура: ток размыкателя,  $I_1$  (штрих-пунктир); ток канала,  $I_2$  (сплошные линии); б – скорость переключения тока в канал; в – напряжение на коммутаторе. Кривые: 1 –  $U'_p = 1$ ; 2 –  $U'_p = 1,5$ ; 3 –  $U'_p = 3$

Выделившаяся или запасенная энергия ( $10^3$  Дж) в элементах контура в момент окончания электровзрывной коммутации для различных значений напряжения пробоя разрядника  $U'_p$

Элемент схемы замещения	Напряжение пробоя $U'_p$ (о.е)		
	1,0	1,5	3,0
Емкостный накопитель	13,6	15,2	3,0
Индуктивный накопитель	4,2	3,1	1,5
Активное сопротивление размыкателя	23,8	24,8	27,1
Активное сопротивление канала разряда	5,1	3,6	0,9

В соответствии с рис. 5 при повышении  $U'_p$  происходит:

- увеличение времени до начала коммутации тока в межэлектродный промежуток;
- снижение максимального значения тока первой стадии разряда;
- возрастание скорости переключения тока;
- уменьшение длительности первой стадии переключения тока от момента коммутации до момента излома на кривой тока;
- рост перенапряжения на размыкателе.

Однако в рассмотренном диапазоне изменения параметров контура с ИЕНЭ особенностью разряда является отсутствие экстремумов у зависимостей электродинамических характеристик от напряжения пробоя (рис. 6). Одновременно следует отметить, что в контуре с ИЕНЭ эти зависимости имеют более высокие значения, чем в случае разряда в контуре с ИНЭ [5]. Расчеты свидетельствуют о том, что указанные различия объясняются подпиткой межэлектродного промежутка от емкостного накопителя энергии. Как следует из рис. 7, на радиус токопроводящей области слабо влияет значение напряжения коммутации разрядника. Поэтому зависимость сопротивления канала от напряжения пробоя определяется влиянием  $U'_p$  на удельную электропроводность плазмы.

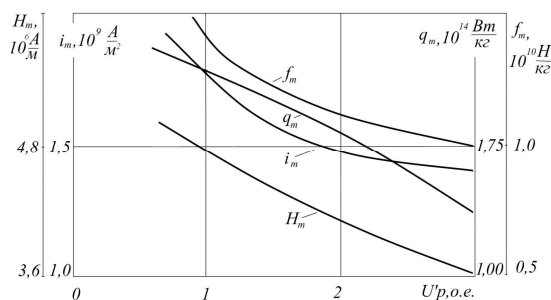


Рис. 6. Влияние напряжения подключения межэлектродного промежутка на максимальные значения электродинамических характеристик разряда в контуре с ИЕНЭ

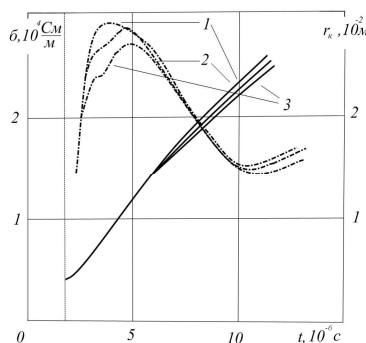


Рис. 7. Временные зависимости удельной электропроводности плазмы на оси канала (штрих-пунктир) и радиуса токопроводящего столба (сплошные линии) от напряжения подключения нагрузки. Кривые: 1 –  $U'_p = 1$ ; 2 –  $U'_p = 1,5$ ; 3 –  $U'_p = 3$

Таким образом, при увеличении напряжения пробоя разрядника в ветви нагрузки из-за возрастания потерь энергии в размыкателе энергосвод в канал на первой стадии переключения тока снижается (табл. 2). В результате уменьшается температура плазмы, ее удельная электропроводность (рис. 7) и увеличивается сопротивление канала. Это затрудняет ввод в него энергии из емкостного накопителя на второй, более медленной стадии электрического разряда и приводит к снижению максимальных значений электродинамических характеристик канала при увеличении  $U'_p$  (рис. 6).

Значения амплитуд давления и температуры на оси канала аналогично электродинамическим характеристикам уменьшаются соответственно с  $4,5 \cdot 10^7$  Па и  $4,1 \cdot 10^4$  К при  $U'_p = 1$  до  $3,2 \cdot 10^7$  Па и  $3,8 \cdot 10^4$  К, если  $U'_p = 3$ .

На второй стадии переключения тока, когда сопротивление канала из-за его расширения и увеличе-

ния электропроводности уже относительно мало, энергетический переход из ЕНЭ с увеличением напряжения пробоя возрастает. При больших  $U_p$  за счет этого несколько компенсируется недостаток энергии, введенной в межэлектродный промежуток при больших  $U_p$  на первой стадии переключения. В результате крутизна функции  $i_{3m}(U_p)$  уменьшается (рис. 6). Однако время достижения тока амплитудного значения возрастает.

Таким образом, в контуре с ИЕНЭ зависимости электродинамических характеристик от напряжения пробоя  $U_p$  не имеют экстремумов. Это объясняется неодинаковым уровнем подпитки межэлектродного промежутка конденсаторной батареей. Кроме того, характеристики имеют крутой спад в области малых значений  $U_p$  (рис. 6). Следствием этого является значительная чувствительность амплитуды давления плазмы канала к напряжению пробоя.

### ВЛИЯНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ ИНЭ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Теоретический и практический интерес представляет также выяснение влияния индуктивности накопителя на характеристики электрического разряда в межэлектродных промежутках разрядных контуров с ИЕНЭ. В настоящей работе при проведении численных расчетов значение индуктивности ИНЭ изменялось в пределах  $5 \cdot 10^{-8} \dots 10^{-6}$  Гн. Остальные параметры схемы замещения соответствовали базовым.

Анализ результатов численного моделирования свидетельствует о существовании такого диапазона изменения значений индуктивности, в котором возможно эффективное управление характеристиками канала разряда, а также давлением и температурой плазмы в нем.

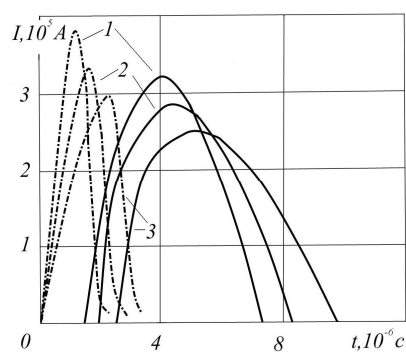
Процессы начальной стадии переключения тока в нагрузку при увеличении индуктивности ИНЭ характеризуются:

- а) увеличением времени от начала разряда в контуре до момента возникновения тока в межэлектродном промежутке (рис. 8,а);
- б) снижением амплитуды тока ИНЭ в докоммутационной стадии разряда;
- в) ростом максимального значения тока канала на первой стадии переключения;
- г) уменьшением скачка напряжения на размыкателе (рис. 8,б);
- д) увеличением энергии, запасенной в ИНЭ в момент начала переключения тока (табл. 3).

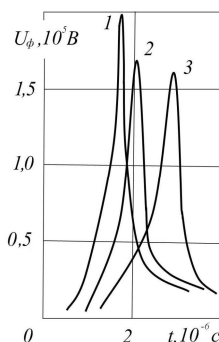
При этом максимальное значение скорости переключения тока изменяется незначительно (рис. 8,в).

Рост индуктивности ИНЭ приводит к уменьшению амплитуды тока канала. При этом возрастает как время до наступления максимума тока, так и до перехода тока через ноль.

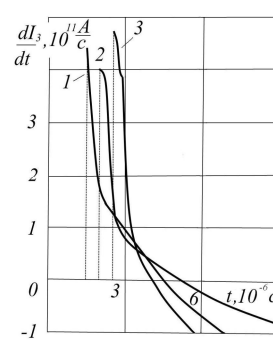
Уменьшение амплитуды тока разряда при увеличении индуктивности ИНЭ объясняется снижением запаса энергии в конденсаторной батарее к моменту окончания первой стадии переключения тока. О динамике процессов, сопровождающих энергетический переход в межэлектродный промежуток, можно судить по совмещенным во времени зависимостям удельной электропроводности плазмы, радиуса токопроводящего столба (рис. 9), а также других важных характеристик разряда.



а



б



в

Рис. 8. Временные зависимости характеристик электрического разряда в контуре с комбинированным индуктивно-емкостным накопителем при различных значениях индуктивности ИНЭ: а – токораспределение в ветвях контура: штрих-пунктирные линии – ток размыкателя,  $I_2$ ; сплошные линии – ток канала,  $I_3$ ; б – напряжение на размыкателе; в – скорость изменения тока в канале. Кривые: 1 –  $L_1 = 5 \cdot 10^{-8}$  Гн; 2 –  $L_1 = 1,5 \cdot 10^{-7}$  Гн; 3 –  $L_1 = 3 \cdot 10^{-7}$  Гн

Таблица 3

Выделившаяся или запасенная энергия ( $10^3$  Дж) в элементах контура в момент начала коммутации для различных значений индуктивности ИНЭ

Элемент схемы замещения	Индуктивность ИНЭ (Гн)		
	$5 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$
Емкость конденсаторной батареи	23,3	20,3	17,2
Индуктивность ИНЭ	2,6	6,8	10,3
Активное сопротивление размыкателя	13,9	14,0	14,7
Активное сопротивление канала разряда	0	0	0

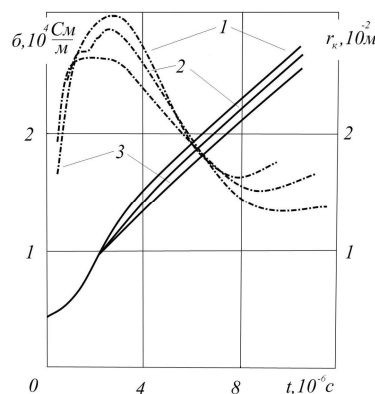


Рис. 9. Временные зависимости радиуса канала разряда (сплошные линии) и удельной электропроводности плазмы на его оси (штрих-пунктирные линии) для различных значений индуктивности ИНЭ. Кривые: 1 –  $L_1 = 5 \cdot 10^{-8}$  Гн; 2 –  $L_1 = 1,5 \cdot 10^{-7}$  Гн; 3 –  $L_1 = 3 \cdot 10^{-7}$  Гн

Удельная электропроводность плазмы достигает своего амплитудного значения на второй стадии переключения тока, когда температура плазмы близка к максимальной. Причем, чем больше индуктивность накопителя, тем ниже амплитуда зависимостей  $\sigma(t)$ ,  $T(t)$  на оси канала. Однако скорость увеличения удельной электропроводности максимальна на первой стадии переключения тока и тем выше, чем значительнее объемная мощность, обеспечиваемая запасом магнитной энергии, то есть, чем выше индуктивность ИНЭ.

Анализ электродинамических характеристик (рис. 10) показывает, что поведение зависимостей максимальных значений плотности тока и удельной объемной мощности от индуктивности накопителя определяется скоростью ввода магнитной энергии ИНЭ в межэлектродный промежуток.

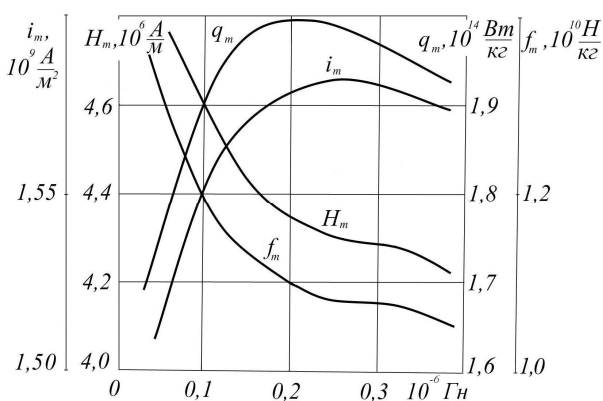


Рис. 10. Влияние индуктивности ИНЭ на электродинамические характеристики разряда

В рассматриваемом случае питания канала от индуктивно-емкостного накопителя увеличение индуктивности ИНЭ  $L_1$  приводит к снижению амплитуды тока, что определяет уменьшение значений зависимости напряженности магнитного поля от индуктивности накопителя. Характер кривой электромагнитной силы определяется поведением функций  $i_m(L_1)$ ,  $H_m(L_1)$  (рис. 10).

Характерно, что амплитуда давления канала определяется значением удельной электромагнитной мощности. Именно поэтому кривая давления достигает максимума на уровне  $4,4 \cdot 10^7$  Па при  $L_1 = 1,5 \cdot 10^{-7}$  Гн. В то же время максимальная температура на оси канала коррелирует с амплитудой тока, составляя  $4,3 \cdot 10^4$  К и  $3,7 \cdot 10^4$  К при изменении  $L_1$  от  $5 \cdot 10^{-8}$  Гн до  $3 \cdot 10^{-7}$  Гн соответственно.

### ВЫВОДЫ

1. Определен количественный характер изменения значений электродинамических характеристик разряда, а также давления и температуры плазмы в зависимости от длины канала, напряжения включения плазменной нагрузки в разрядный контур, индуктивности ветви нагрузки.

2. Выполненный анализ свидетельствует о том, что изменение параметров разрядного контура позволяет в широких пределах изменять режимы выделения энергии в плазменной нагрузке и влиять на характеристики электрического разряда, что важно для разработки разрядно-импульсного оборудования.

### 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. Щерба А.А., Дубовенко К.В. Высоковольтные электро-разрядные компактные системы. К.: Наукова думка, 2008. – 270 с.
3. Дубовенко К.В. Взаимодействие ударных волн в плазме канала сильнооточного разряда в камере высокого давления // Журн. техн. физики, 1992. – Т. 62, № 6. – С. 83-93.
4. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные методы решения задач газовой динамики. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
5. 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.
6. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных газодинамических явлений. – М.: Наука, 1966. – 686 с.
7. Замышляев Б.В., Ступицкий Е.Л., Гузь А.Г. Состав и термодинамические функции плазмы. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 144 с.
8. Бурцев В.А., Литунский В.Н., Прокопенко В.Ф. Исследование электрического взрыва фольг // Журн. техн. физики. – 1977. – №8. – С. 1642-1652.
9. Бурцев В.А., Калинин Н.В. Индуктивно-емкостные накопители энергии и их коммутация с помощью электрического взрыва фольг // Вопр. атомной науки и техн. – М., 1983. – Вып. 2: Термоядерный синтез. – С. 27-46.

**Bibliography (transliterated):** 1. Burcev V.A., Kalinin N.V., Luchinskij A.V. `Elektricheskiy vzryv provodnikov i ego primeneniye v `elektrofizicheskikh ustanovkakh. - M.: `Energoatomizdat, 1990. - 432 s. 2. Scherba A.A., Dubovenko K.V. `Vysokovol'tnyye `elektrozryadnye kompaktnyye sistemy. K.: Naukova dumka, 2008. - 270 s. 3. Dubovenko K.V. `Vzaimodejstvie udarnykh voln v plazme kanala sil'notochnogo razryada v kamere vysokogo davleniya // Zhurn. tehn. fiziki, 1992. - T. 62, № 6. - S. 83-93. 4. Samarskiy A.A., Popov Yu.P. `Raznostnyye metody resheniya zadach gazovoy dinamiki. - M.: Nauka, 1980. - 352 s. 5. Dubovenko K.V. `Vliyanie parametrov `elektrovzryvnogo razmykatelya na karakteristiki `elektricheskogo razryada v konture s induktivnym nakopitelem `energii // Vestnik NTU "HPI". - 2009. - № 41. - S. 54-61. 6. Zel'dovich Ya.B., Rajzer Yu.P. `Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gazodinamicheskikh yavlenij. - M.: Nauka, 1966. - 686 s. 7. Zamyshlyayev B.V., Stupickij E.L., Guz' A.G. `Sostav i termodinamicheskie funktsii plazmy. - M.: `Energoatomizdat, 1984. - 144 s. 8. Burcev V.A., Litunovskij V.N., Prokopenko V.F. `Issledovanie `elektricheskogo vzryva fol'g // Zhurn. tehn. fiziki. - 1977. - №8. - S. 1642-1652. 9. Burcev V.A., Kalinin N.V. `Induktivno-ekmostnyye nakopiteli `energii i ih kommutatsiya s pomosh'yu `elektricheskogo vzryva fol'g // Voпр. atomnoj nauki i tehn. - M., 1983. - Vyp. 2: Termoyadernyj sintez. - S. 27-46.

Поступила 30.01.2012

Дубовенко Константин Викторович, д.т.н.  
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 parameters of an electrical discharge circuit with an inductive-capacitive energy store on spark discharge characteristics.

Numerical simulation of high power air spark discharge characteristics in a circuit with an inductive-capacitive energy store and a foil blasting release has been carried out with a magnetohydrodynamic approach application. Influence of the discharge circuit parameters (the plasma channel length, voltage of the plasma load connection to the discharge circuit, inductor store inductance) on the spark characteristics has been determined.

Key words – electrical discharge, circuit parameters, inductive-capacitive energy store.