

УДК 621.314+621.33.4

К.В. Дубовенко, канд. техн. наук, Николаев. учебно-науч. ин-т Одес. нац. ун-та им. И.И. Мечникова

## РЕКУПЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ В КОНТУРЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА С ПЕРЕМЕННОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

*К.В. Дубовенко. Рекуперація енергії у контурі електричного розряду із змінною індуктивністю.* Методом чисельного моделювання у магнітогідродинамічному наближенні виконано аналіз характеристик електричного розряду в контурі імпульсного джерела енергії з накопичувачем енергії магнітного поля змінної індуктивності та нелінійним плазмовим навантаженням каналу розряду. Отримані характеристики свідчать про підвищення коефіцієнту корисної дії імпульсного джерела енергії та збільшення потужності розряду у плазмовому навантаженні, що згідно конструкції джерела кількісно пояснюється зменшенням значення постійної розряду та частковою рекуперацією у контур енергії, що була попередньо витрачена на комутацію струму у навантаження.

*K.V. Dubovenko. Energy Recuperation in the Electrical Discharge Circuit with Variable Inductance.* By applying the MHD-method of numerical simulation the analysis for electric discharge characteristics of a pulsed power source has been done. The source contains an inductive store with the inductance value that changes during discharge in non-linear plasma load. The characteristics obtained show increased efficiency of the pulsed power source operation and growth in the discharge power. According to the source design it is quantitatively explained by the decreasing value of the circuit time constant during the discharge in the plasma load as well as by partial recuperation of energy previously spent for switching current to the load.

Импульсные источники энергии с индуктивными накопителями энергии (ИНЭ) имеют преимущества по сравнению с источниками, содержащими емкостные накопители [1], что обусловлено гораздо более высокой плотностью запасаемой энергии в магнитном поле. Однако две основные причины, связанные с ограниченным КПД преобразования энергии, препятствуют широкому применению источников с индуктивными накопителями энергии в разрядно-импульсных технологиях, использующих электрические разряды в сплошных средах. Первая причина вызвана значительными потерями энергии в размыкающем коммутаторе разрядного контура при переключении тока из содержащей его ветви в ветвь с плазменной нагрузкой. Вторая причина обусловлена тем, что при переключении тока в ветвь с нагрузкой, представляющей собой канал разряда в сплошной среде, плазма канала нагревается, давление и удельная проводимость плазмы возрастают, канал расширяется в окружающем пространстве и его сопротивление  $R_H(t)$  быстро уменьшается. Соответственно возрастает постоянная времени  $\tau$  разряда индуктивности  $L$  ИНЭ на активное сопротивление плазмы  $\tau = L/R_H$  и уменьшается мощность разряда. При этом также снижается эффективность преобразования энергии, первоначально запасенной в индуктивном накопителе.

Таким образом, чтобы повысить эффективность преобразования энергии в контуре с ИНЭ, необходимо уменьшить постоянную времени разряда и снизить уровень потерь энергии на коммутацию при переключении тока в нагрузку.

Рассматривается численный анализ особенностей характеристик электрического разряда в нелинейной плазменной нагрузке генератора импульсных токов с рекуперацией энергии и изменением индуктивности ИНЭ в течение переходного процесса.

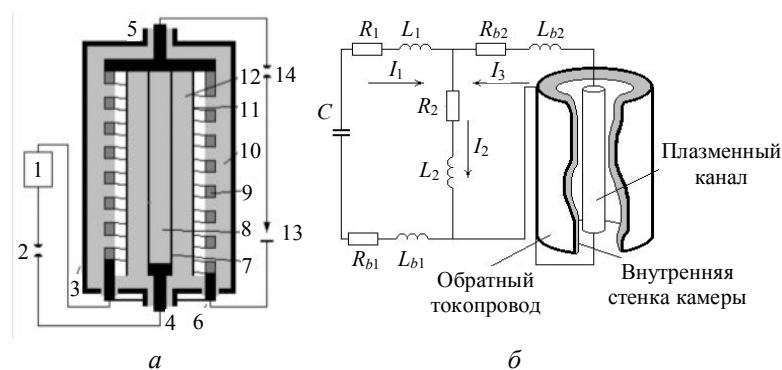


Рис. 1. Генератор импульсных токов с переменной индуктивностью индуктивного накопителя (а) и схема замещения его разрядного контура (б)

Генератор импульсных токов (рис. 1, а) содержит первичный накопитель энергии 1 (например, конденсаторную батарею), замыкающий коммутатор (разрядник) 2 в цепи накачки ИНЭ, корпус 3, электроды 4, 5 и токоввод 6 [2]. Электрически взрывающийся размыкающий коммутатор 7 в виде тонкой металлической фольги расположен на диэлектрическом основании 8 между электродами и контактирует с ними. Индуктивный накопитель 9 в форме соленоидальной обмотки расположен коаксиально коммутатору 7 в пазах диэлектрика 10. Замкнутый виток 11 имеет вид тонкостенного металлического цилиндра, разрезанного по образующей и свернутого внахлест. Между замкнутым витком 11 и индуктивным накопителем 9, а также витком 11 и размыкающим коммутатором 7 имеются зазоры, один из которых заполнен диэлектриком 12. Межэлектродный промежуток 13, в котором формируется канал разряда, расположен вдоль оси цилиндрической камеры высокого давления (рис. 1, б) и соединен параллельно с индуктивным накопителем через замыкающий коммутатор 14. После замыкания цепи разрядником 2 энергия аккумулируется в индуктивном накопителе 9 при протекании тока по контуру, образованному первичным источником 1, замыкающим коммутатором 2, электродом 4, размыкающим коммутатором 7, электродом 5, индуктивным накопителем 9 и коаксиальным вводом 6.

Быстрая диссипация энергии в размыкающем коммутаторе приводит к его электрическому взрыву [4]. Время до электрического взрыва и длительность прерывания тока определяются размерами цилиндрического проводника размыкателя и материалом, из которого он выполнен. Перенапряжение на проводнике в момент электрического взрыва приводит к пробое рабочего межэлектродного промежутка 13 и переключению тока в образовавшийся плазменный канал. Одновременно цилиндрическая ударная волна формируется вокруг продуктов взрыва фольги коммутатора и распространяется радиально по диэлектрику 12. При подходе ударной волны к замкнутому витку 11 последний начинает свое движение в зазоре, приближается к виткам ИНЭ, вытесняя магнитное поле из его внутреннего объема, и замыкает их через промежуток времени  $t = d/v_{cp}$  ( $d$  — толщина зазора,  $v_{cp}$  — средняя скорость расширения замкнутого витка). В результате ИНЭ из соленоида превращается в цилиндр и его индуктивность уменьшается [5], а энергия ИНЭ возрастает вследствие частичной рекуперации в контур механической энергии витка, совершающего при движении работу против действия пондеромоторных сил в магнитном поле. По сути, в данной конструкции реализуется принцип магнитной кумуляции энергии, на котором основана работа взрывомангнитных генераторов [6].

Сложность процессов в камере высокого давления затрудняет изучение важных для практики характеристик нелинейной плазменной нагрузки в условиях взаимодействия плазмы с магнитным полем и ударными волнами, отраженными от стенки разрядной камеры. Для количественного описания характеристик электрического разряда использовались методы численного анализа. С учетом схемы замещения (см. рисунок 1, б) переходной процесс в контуре описывается в приближении магнитной гидродинамики. В соответствии с ним основные уравнения замкнутой системы включают уравнения разрядного контура (1)...(4), электромагнитного поля

(5), (6), гидродинамики (7), энергии (8), теплового потока (9), термодинамических функций и коэффициентов переноса рабочей среды (10):

$$(L_1 + L_{b1})dI_1/dt + (R_1 + R_{b1})I_1 + \frac{d}{dt}(L_2I_2)/dt + R_2I_2 = U, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}(L_2I_2) + R_2I_2 + L_{b2}dI_3/dt + R_{b2}I_3 + \mathcal{E}_k(t) - \frac{\mu_0 l}{2\pi} \frac{d}{dt} \left[ I_3(t) \ln \left( \frac{r_w}{r_k(t)} \right) \right], \quad (2)$$

$$I_1 = I_2 - I_3; \quad \frac{dU}{dt} = -I_1/C, \quad (3)$$

$$R_1 = R_1(j_{1m}, Q, dQ/dt); \quad j_{1m} = I_{1m}/S_0; \quad Q = \int I_1(t)^2 R_1 dt, \quad (4)$$

$$j_3 = \rho \frac{\partial(rH)}{\partial S}; \quad \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{H}{\rho} \right) = \frac{\partial E}{\partial S}, \quad (5)$$

$$j_3 = \sigma S; \quad f = \mu_0 j_3 H/\rho; \quad q = \sigma E^2/\rho, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{\rho} \right) = \frac{\partial}{\partial S}(rv); \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -r \frac{\partial p}{\partial S} + f_3; \quad \frac{\partial r}{\partial t} = v, \quad dS = \rho r dr, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -p \frac{\partial(rv)}{\partial S} + q - q_R - \frac{\partial W}{\partial S}; \quad (8)$$

$$W = -(\chi + \chi_R)\rho r \frac{\partial T}{\partial S}; \quad \chi_R = 16\sigma_B T^3/(3l_R), \quad (9)$$

$$p = p(\rho, T); \quad \varepsilon = \varepsilon(\rho, T); \quad \sigma = \sigma(\rho, T); \quad \chi = \chi(\rho, T), \quad (10)$$

где  $t, r, S$  — временная, пространственная и лагранжева координаты, соответственно;

$I_1, I_2, I_3$  — токи в ветвях контура;

$U, C$  — напряжение и емкость конденсатора;

$R_1, L_1$  — активное сопротивление и индуктивность электровзрывного коммутатора;

$R_2, L_2$  — активное сопротивление и индуктивность индуктивного накопителя;

$R_{b1}, L_{b1}$  — активное сопротивление и индуктивность элементов цепи накачки ИНЭ;

$j_{1m}, Q$  — амплитуда плотности тока и энергия, выделившаяся в размыкателе;

$E, H$  — напряженность электрического и магнитного поля, соответственно;

$\mu_0$  — магнитная постоянная;

$\rho, p, v, \varepsilon, \sigma$  — плотность, давление, скорость, внутренняя энергия и удельная электрическая проводимость рабочей среды, заполняющей разрядную камеру, соответственно;

$f_3, q_R$  — плотность электромагнитной силы и объемные потери энергии на излучение;

$q$  — удельная электрическая мощность;

$T, W$  — температура среды и тепловой поток, соответственно;

$\chi, \chi_R$  — электронная и лучистая теплопроводность, соответственно;

$\sigma_B, l_R$  — постоянная Стефана-Больцмана и росселандов пробег излучения, соответственно.

Зависимости сопротивления электрически взрывающегося проводника  $R_1$  от энергии  $Q$ , диссипированной в нем, скорости ввода и амплитуды плотности  $j_{1m}$  протекающего через него тока на основе интерполяции экспериментальных данных введены в модели в виде уравнений (4). Теплоперенос в диапазоне сплошного спектра излучения плазмы [7, 8] может быть определен с учетом лучистой теплопроводности. Граничные условия на оси плазменного канала  $r=0$  и на стенке цилиндрической камеры  $r=r_w$  заданы в следующем виде:

$$H(0, t) = 0; \quad v(0, t) = 0; \quad W(0, t) = 0; \quad (11)$$

$$H(r_w, t) = I_3(t)/(2\pi r_w); \quad v(r_w, t) = 0; \quad T(r_w, t) = T_0, \quad (12)$$

где  $T_0$  — начальное значение температуры рабочей среды, заполняющей объем камеры.

Решение системы уравнений получено конечно-разностным методом с использованием полностью консервативных разностных схем магнитной гидродинамики [7]. Проверка адекватности математической модели реальным процессам электрического разряда [8, 10] свидетельствует о достоверности получаемых результатов. Применение рассмотренного приближения к моделированию мощных разрядов в газах высокого давления также подтверждает совпадение расчетов с экспериментальными данными [8, 11].

Исследовались процессы электрического разряда для параметров установки, представленных в таблице.

*Параметры генератора импульсных токов*

| Параметр                         | Обозначение, ед. измерения | Значение            |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------|
| <i>Конденсаторная батарея</i>    |                            |                     |
| Емкость                          | $C$ , мкФ                  | 30                  |
| Напряжение                       | $U_0$ , кВ                 | 50                  |
| <i>Индуктивный накопитель</i>    |                            |                     |
| Индуктивность                    | $L_2$ , мкГн               | 0,25                |
| Активное сопротивление           | $R_2$ , мОм                | 0,3                 |
| <i>Размыкающий коммутатор</i>    |                            |                     |
| Индуктивность                    | $L_1$ , мкГн               | 0,18                |
| Длина фольги                     | $d$ , м                    | 0,55                |
| Ширина фольги                    | $b$ , м                    | 0,12                |
| Толщина фольги                   | $h$ , м                    | $1,5 \cdot 10^{-5}$ |
| Материал                         | Алюминий                   |                     |
| <i>Нагрузка</i>                  |                            |                     |
| Длина межэлектродного промежутка | $l$ , м                    | 0,2                 |
| Среда                            | воздух                     |                     |
| Внутренний радиус камеры         | $r_w$ , м                  | 0,015...0,001       |

Рассматривались три характерных случая развития переходных процессов:

— в разрядном контуре с постоянной индуктивностью ИНЭ и разрядной камерой с большим внутренним радиусом  $r_w \approx 0,1$  м;

— в цепи с постоянной индуктивностью накопителя и малым внутренним радиусом разрядной камеры  $r_w = 0,015$  м;

— в контуре с переменной индуктивностью индуктивного накопителя и с внутренним радиусом разрядной камеры  $r_w = 0,015$  м.

На рис. 2 изображены временные зависимости тока и радиуса расширяющегося плазменного канала. Ток  $I_3$  появляется в плазменной нагрузке в момент  $t = 4$  мкс в результате прерывания тока  $I_1$  в электровзрывном коммутаторе.

Для всех трех режимов характеристики разряда совпадают до момента, пока ударная волна, отраженная от стенки камеры, при своем обратном движении не достигнет плазменного канала или индуктивность ИНЭ останется постоянной.

В случае, когда  $r_w = 0,015$  м и  $L_2 = \text{const}$  (рис. 2, в, кривая 2) ударная волна достигает стенки камеры в момент  $t = 8$  мкс и затем отражается. Максимальное значение давления у стенки сопоставимо с максимальным значением давления на оси канала (рис. 2, г). Движение отраженной ударной волны сквозь плазму к оси канала приводит к сжатию проводящего плазменного столба со средней скоростью около  $10^3$  м/с. В момент, когда ударная волна подходит к оси камеры, радиус плазменного канала (рис. 2, б, кривая 2) имеет значение почти в 1,5 раза меньше, чем при разряде в камере с большим радиусом  $r_w \approx 0,1$  м. Такое сжатие приводит к резкому уве-

личению давления (рис. 2, з, кривая 2) и температуры (рис. 2, д, кривая 2) плазмы. После “схлопывания” на оси канала ударная волна снова движется к стенке камеры, и процессы повторяются с некоторым затуханием.

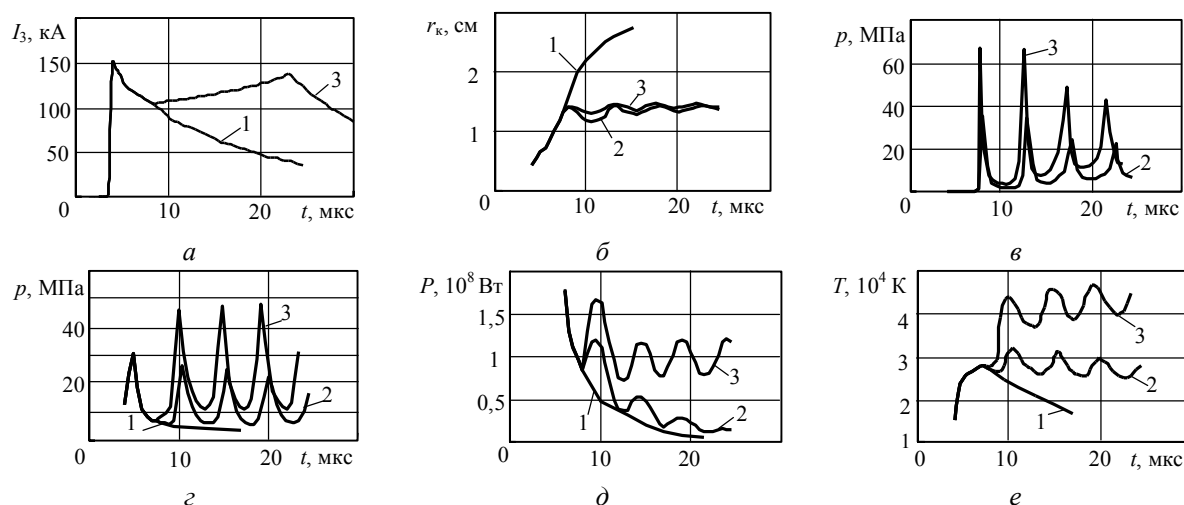


Рис. 2. Временные зависимости тока разряда (а), радиуса канала (б), давления на стенке камеры (в), на оси канала разряда (з), мощности разряда (д), температуры плазмы на оси канала (е):

1 —  $r_w \approx 0,1$  м,  $L_2 = \text{const}$ ; 2 —  $r_w = 0,015$  м,  $L_2 = \text{const}$ ; 3 —  $r_w = 0,015$  м,  $L_2 \neq \text{const}$

Для заданных параметров контура уменьшение индуктивности накопителя начинается в момент  $t=8$  мкс. В течение следующих 16 мкс значение индуктивности линейно снижается от 0,25 до 0,1 мГн. Численный анализ показывает, что к моменту времени  $t=24$  мкс энергия, возвращенная в контур, достигает значения  $\Delta W=1$  кДж за счет преобразования кинетической энергии в электрическую при совершении работы короткозамкнутым витком, преодолевающим в процессе движения действие пондеромоторной силы, препятствующей уменьшению индуктивности накопителя. Это приводит к существенному дополнительному увеличению тока (рис. 2, а), мощности (рис. 2, д), давления (рис. 2, з) и температуры канала (рис. 2, е) для случая  $L_2 \neq \text{const}$  (кривые 3).

Таким образом, в генераторе рассмотренной конструкции за счет рекуперации энергии в контуре с ИНЭ переменной индуктивности возможно существенное повышение мощности разряда, КПД преобразования энергии и таких важных для практического использования в разрядно-импульсных технологиях характеристик разряда, как давление и температура плазмы.

## Литература

1. Ларионов Б.А. Проблемы накопления и преобразования электромагнитной энергии в импульсных системах питания с индуктивными накопителями / Ларионов Б.А., Спесова Ф.М., Столов А.М. и др. / Физика и техника мощ. импульс. систем / Под ред. Велихова Е.П. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — С. 66 — 104.
2. А.с. 1774473 СССР / Дубовенко К.В. Генератор импульсных токов // Б.И. — 1992.
3. Dubovenko K.V. Improvement of Power Conditioning for a Pulsed Plasma Source Applying the Storage Inductor with Variable Inductance // Abstracts of the 13<sup>th</sup> IEEE Intl. Pulsed Power Conf, Las Vegas, Nevada, USA. June 17 — 22, 2001 — P. 428.
4. Бурцев В.А. Электрический взрыв фольг и его применение в электрофизических установках / Бурцев В.А., Калинин Н.В. — М.: Энергоиздат, 1990. — 382 с.
5. Калантаров П.Л. Расчет индуктивностей / Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 488 с.

- 
6. Сахаров А.Д. Взрывомагнитные генераторы // Успехи физ. наук. — 1966. — Т. 88, № 4. — С. 725 — 734.
  7. Самарский А.А. Разностные методы решения задач газовой динамики / Самарский А.А., Попов Ю.П. — М.: Наука, 1980. — 352 с.
  8. Дубовенко К.В. Взаимодействие ударных волн с плазмой канала сильноточного разряда в камере высокого давления // Журн. техн. физики. — 1992. — Т. 62, № 6. — С. 83 — 92.
  9. Замышляев Б.В. Состав и термодинамические функции плазмы / Замышляев Б.В., Ступицкий Е.Л., Гузь Г.С. и др. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 144 с.
  10. Дубовенко К.В. Сильноточный разряд в цилиндрической камере при питании от контура с индуктивно-емкостным накопителем энергии // Электрон. обраб. материалов. — 1990. — № 2. — С. 62 — 65.
  11. Андреев Д.А. Сильноточный разряд типа Z-пинч в плотных средах / Андреев Д.А., Богомаз А.А., Рутберг Ф.Г. и др. // Журн. техн. физики. — 1992. — Т. 62, № 6. — С. 74 — 82.

Поступила в редакцию 16 апреля 2005 г.

---