

## ЭНЕРГЕТИКА ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ И ПРЕРЫВАТЕЛЕМ ТОКА

С.В. Логинов

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

E-mail: loginov@oit.hcei.tsc.ru

*Приводится электротехнический анализ схем включения прерывателя тока в контур с индуктивным накоплением энергии. Рассмотрены схемы включения прерывателя без нагрузки, с индуктивной и резистивной нагрузками. Выполнен анализ схем двухкаскадного обострения импульса и включения нагрузки до прерывателя. Для линейно нарастающего сопротивления прерывателя получены формулы расчета параметров импульса на нагрузке. Дается сравнение с результатами экспериментов.*

### Введение

В последние два десятилетия в импульсной энергетике интенсивно разрабатываются радиационные плазменные источники излучения тераваттной мощности с длительностью импульса  $\sim 10 \dots 100$  нс [1]. Для создания таких источников экспериментально проверяется технология формирования импульсов тока с помощью промежуточного индуктивного накопителя с микросекундным временем зарядки и размыкающего ключа для переключения энергии в излучающую нагрузку. Плотность энергии в индуктивном накопителе в десятки раз выше, чем в емкостном, поэтому его использование позволяет многократно снизить весогабаритные характеристики и стоимость установки. Однако применение таких накопителей возможно только с прерывателем тока, в частности плазменным, обеспечивающим сжатие импульса на нагрузке в десятки раз.

В настоящей работе дается электротехнический анализ схем включения прерывателя тока в контур с индуктивным накоплением энергии. Рассмотрены схемы включения прерывателя без нагрузки, с индуктивной и резистивной нагрузками. Приведен анализ схем двухкаскадного обострения импульса и включения нагрузки до прерывателя. Для линейно нарастающего сопротивления прерывателя получены формулы для расчета параметров импульса на нагрузке. Приближение линейного нарастания сопротивления в стадии быстрого обрыва тока оправданно как для плазменных прерывателей [2], так и для электровзрывных размыкателей [3].

### 1. Основные схемы включения прерывателей

Основные схемы включения прерывателя тока в контур с индуктивным накопителем показаны на рис. 1. В проводящем состоянии прерывателя индуктивность заряжается током  $I_0$  от первичного емкостного накопителя энергии. В момент размыкания на прерывателе возникает напряжение, величина которого зависит от параметров контура и скорости роста сопротивления прерывателя.

В схеме включения прерывателя без нагрузки (рис. 1, а) ток разряда определяется из уравнения

$$L_g \dot{I}_s + R_s I_s = 0,$$

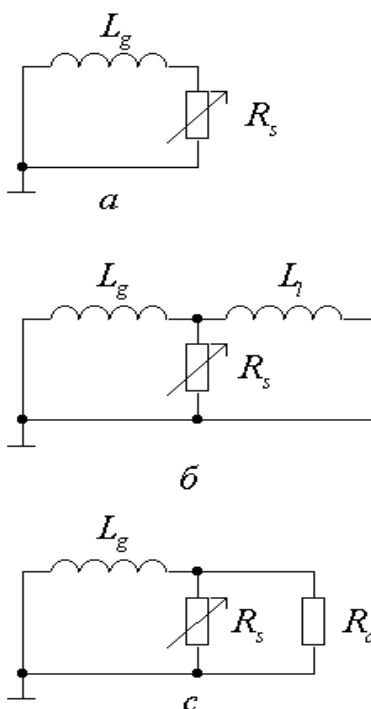


Рис. 1. Схемы включения прерывателя

решение которого имеет вид

$$I_s(t) = I_0 \exp\left(-\int_0^t \frac{R_s(t')}{L_g} dt'\right),$$

где  $I_0$  – ток в индуктивности в момент срабатывания прерывателя. В силу экспоненциального спада тока напряжение на прерывателе  $V_s(t) = I_s(t) R_s(t)$  достигает максимума при условии:

$$\dot{R}_s(t) = R_s^2(t) / L_g. \quad (1)$$

Для линейно нарастающего сопротивления  $R_s(t) = R_s t$  максимальное напряжение на прерывателе

$$V_m = I_0 \sqrt{\dot{R}_s L_g} / e, \quad (2)$$

где  $e$  – основание натуральных логарифмов, достигается в момент времени

$$t_m = \sqrt{L_g / \dot{R}_s}. \quad (3)$$

Поскольку максимальный ток в накопителе  $I_0 = U_0/\rho$ , где  $U_0$  – выходное напряжение первичного емкостного накопителя,  $\rho$  – волновое сопротивление контура зарядки, то из (2) следует, что применение прерывателя дает увеличение напряжения в  $K = (\dot{R}_s C/e)^{0.5}$  раз, где  $C$  – емкость в ударе первичного накопителя.

Рассеиваемая в прерывателе мощность  $P_s(t) = R_s(t)I_s^2(t)$  достигает максимума при условии

$$\dot{R}_s(t) = 2R_s^2(t)/L_g. \quad (4)$$

Для линейно нарастающего сопротивления максимум мощности  $P_{\max} = (L_g \dot{R}_s/2e)^{0.5} I_0^2$  достигается в момент времени  $t_m = \sqrt{L_g/2\dot{R}_s}$ .

Для типичных значений плазменного прерывателя  $R_s \sim 0,1$  Ом/нс,  $L_g = 100...400$  нГн,  $I_0 \sim 1$  МА фронт нарастания напряжения  $t_m \sim 30...60$  нс, амплитуда напряжения  $V_m \sim 2...4$  МВ, максимальная мощность  $P_{\max} \sim 1,4...2,8$  ТВт.

В схеме включения накопителя на индуктивную нагрузку (рис. 1, б) токи в накопителе  $I$ , прерывателе  $I_s$  и нагрузке  $I_l$  определяются из системы уравнений

$$\begin{cases} I = I_s + I_l \\ L_l \dot{I}_l = R_s I_s \\ L_g \dot{I} + R_s I_s = 0 \end{cases}$$

с начальными условиями  $I(0) = I_s(0) = I_0$ ,  $I_l(0) = 0$ . Ее интегрирование дает ток в прерывателе

$$I_s(t) = I_0 \exp\left(-\int_0^t \frac{R_s(t')}{L_l} dt'\right)$$

и нагрузке

$$I_l(t) = I_0 \frac{L_g}{L_g + L_l} \left(1 - \exp\left(-\int_0^t \frac{R_s(t')}{L_l} dt'\right)\right),$$

где эквивалентная индуктивность  $L_l = \frac{L_g L_l}{L_g + L_l}$ .

Максимальное напряжение на прерывателе и время его достижения зависят в этом случае от величины  $L_l$ . Максимальная эффективность передачи энергии в нагрузку достигается при равенстве индуктивностей накопителя и нагрузки:  $I_g = I_l$ . При этом  $L_l = 0,5L_g$ , а  $t_m$  и  $V_m$  уменьшаются в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению со срабатыванием прерывателя без нагрузки. Максимум рассеиваемой в прерывателе мощности достигается в момент времени, определяемый из условия (4) с заменой  $L_g$  на  $L_l$ .

Рассеиваемая в нагрузке мощность

$$P_l(t) = \frac{L_g}{L_g + L_l} R_s(t) I_0^2 \times \exp\left(-\int_0^t \frac{R_s(t')}{L_l} dt'\right) \left(1 - \exp\left(-\int_0^t \frac{R_s(t')}{L_l} dt'\right)\right)$$

достигает максимума в момент времени  $t_m$ , определяемый из уравнения  $e^{-x} = \frac{1-2x}{1-4x}$ , где  $x = \frac{\dot{R}_s}{2L_l} t_m^2$ .

Решение уравнения дает  $x \approx 1,06$  и, следовательно,

$t_m \approx 1,46 \left(\frac{L_l}{\dot{R}_s}\right)^{0.5}$ . Максимум мощности импульса на нагрузке

$$P_{l\max} \approx 0,34 \frac{L_g}{L_g + L_l} \left(\frac{L_g L_l}{L_g + L_l}\right)^{0.5} \dot{R}_s^{0.5} I_0^2$$

достигает абсолютного максимума  $P_{l\max L_l} \approx 0,13(L_g \dot{R}_s)^{0.5} I_0^2$  при  $L_l = L_g/2$ . При равенстве индуктивностей мощность снижается до  $P_{l\max} \approx 0,12(L_g \dot{R}_s)^{0.5} I_0^2$ .

В таблице дано сравнение расчетных значений  $V_m$  и  $t_m$  с результатами экспериментов [4, 5]. Соответствие экспериментальных и расчетных значений напряжения на прерывателе в диапазоне от  $\sim 40$  кВ до  $\sim 3$  МВ свидетельствует о полном открытии прерывателей в этих экспериментах.

**Таблица.** Сравнение экспериментальных данных с расчетом

| Источник информации | $L_g$ , мкГн | $L_l$ , мкГн | $I_s$ , кА | $\dot{R}_s$ , Ом/нс | $V_s$ , МВ | $V_m$ , МВ | $t_m$ , нс |
|---------------------|--------------|--------------|------------|---------------------|------------|------------|------------|
| [4]                 | 1,3          | 0,8          | 250        | 16/20               | 2,5        | 3,0        | 25         |
| [4]                 | 0,7          | 0,7          | 75         | 16/50               | 0,4...0,5  | 0,48       | 30         |
| [5]                 | 0,15         | 0,015        | 80         | 0,06                | 0,04       | 0,047      | 15         |

Примечание.  $L_g$  и  $L_l$  – индуктивности накопителя и нагрузки;  $I_s$ ,  $\dot{R}_s$  и  $V_s$  – экспериментальные значения тока в прерывателе, скорости роста сопротивления и напряжения на прерывателе

В схеме включения прерывателя на активную нагрузку (рис. 1, с) токи определяются из уравнений

$$\begin{cases} I = I_s + I_d \\ R_d I_d = R_s I_s \\ L_g \dot{I} + R_s I_s = 0 \end{cases}$$

с начальными условиями  $I(0) = I_s(0) = I_0$ ,  $I_d(0) = 0$ . Для нагрузки с постоянным сопротивлением  $R_d$  ток в прерывателе

$$I_s(t) = I_0 \exp\left(-\int_0^t \frac{L_g \dot{R}_s(t') + R_s(t') R_d}{L_g (R_s(t') + R_d)} dt'\right) = I_0 \frac{R_d}{R_s(t) + R_d} \exp\left(-\frac{R_d}{L_g} f(t)\right),$$

где  $f(t) = \int_0^t \frac{R_s(t')/R_d}{1 + R_s(t')/R_d} dt'$ . Для линейно нарастающего сопротивления прерывателя функция  $f(t) = t - \frac{1}{k} \ln(1 + kt)$ , где  $k = \dot{R}_s/R_d$ , а ток в прерывателе

$$I_s(t) = I_0 (1 + kt)^{\frac{1}{k\tau} - 1} \exp(-t/\tau),$$

где  $\tau = L_g/R_d$ .

Условие достижения максимального напряжения на прерывателе и соответственно напряжения, тока и мощности импульса в нагрузке совпадает с (1) и, следовательно, длительность фронта напряжения  $t_m$  не зависит от импеданса нагрузки. Зависимости амплитуды напряжения на прерывателе от сопротивления нагрузки и скорости роста сопротивления прерывателя показаны на рис. 2 и 3. Напряжение на прерывателе растет как при увеличении скорости роста сопротивления прерывателя (рис. 3), так и при увеличении сопротивления нагрузки пропорционально  $R_d^{0.4...0.5}$ , рис. 2. При бесконечно большом сопротивлении нагрузки напряжение на прерывателе стремится к  $V_m = I_0 \sqrt{\dot{R}_s L_g} / e$ .

Это естественный результат, совпадающий с формулой (2). Действительно, напряжение может быть записано в виде  $V_m = I_0 (\dot{R}_s L_g)^{0.5} (1+x)^{x^2-1} e^{-x}$ , где  $x = R_d / (\dot{R}_s L_g)^{0.5}$ . При неограниченном увеличении сопротивления нагрузки  $\lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^{x^2-1} e^{-x} = 1/\sqrt{e}$ .

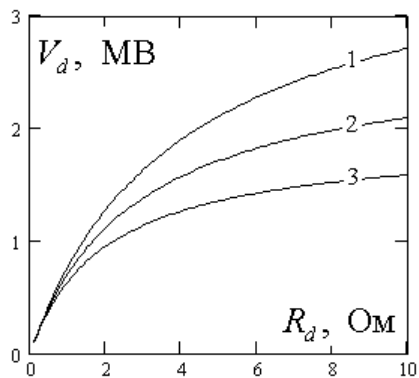


Рис. 2. Напряжение на прерывателе в зависимости от сопротивления нагрузки.  $\dot{R}_s=0,2$  (1),  $0,1$  (2) и  $0,05$  (3) Ом/нс.  $L_g=200$  нГн.  $I_0=1$  МА

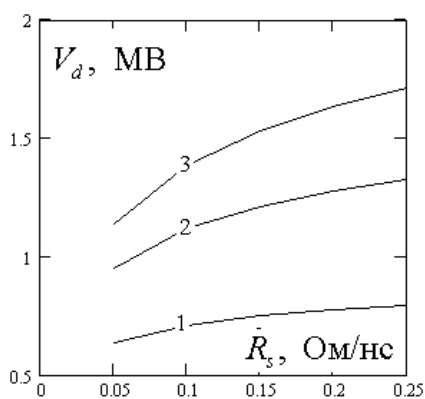


Рис. 3. Напряжение на прерывателе в зависимости от скорости роста сопротивления прерывателя.  $R_d=1$  (1),  $2$  (2) и  $3$  (3) Ом.  $L_g=200$  нГн.  $I_0=1$  МА

Максимум рассеиваемой в прерывателе мощности достигается в момент времени

$$t_{mP_s} = \frac{1}{4} \tau ((1 + 8/k\tau)^{0.5} - 1).$$

Максимальная мощность импульса в нагрузке

$$P_{dmax} = (kt_{mP_d})^2 (1 + kt_{mP_d})^{2-k\tau} \exp(-2t_{mP_d} / \tau) R_d I_0^2$$

получается при оптимальном сопротивлении нагрузки  $R_{dopt} \approx \alpha (\dot{R}_s L_g)^{0.5}$ . Величина  $\alpha = (k\tau)^{-0.5} \approx 0,616$  является решением уравнения  $4\alpha^2 \ln(1+1/\alpha) = 4\alpha - 1$ . При оптимальном сопротивлении амплитуда тока в нагрузке  $I_{dmax} \approx 0,48 I_0$ , максимум мощности импульса  $P_{dmaxR_d} \approx 0,14 (\dot{R}_s L_g)^{0.5} I_0^2$ . Максимум напряжения на прерывателе  $V_{dmax} \approx 0,48 R_{dopt} I_0 = 0,30 (\dot{R}_s L_g)^{0.5} I_0$  примерно вдвое меньше напряжения на прерывателе при срабатывании без нагрузки  $V_{smax} = (\dot{R}_s L_g / e)^{0.5} I_0$ . Длительность импульса напряжения на полувысоте равна  $\Delta t \approx 2,93 t_m$ . В этой формуле численный коэффициент равен разности корней уравнения

$$\left(\frac{a+1}{a+x}\right)^{a^2-1} e^{-a(1-x)} = 2x, \text{ где } x=t/t_m, a=1/kt_m.$$

Мощность и энергия импульса в нагрузке и прерывателе при других значениях сопротивления нагрузки показаны на рис. 4 и 5. Увеличение сопротивления нагрузки сопровождается ростом рассеиваемой в прерывателе мощности и спадом выделяемой в нагрузке энергии. Увеличение скорости роста сопротивления прерывателя приводит к росту мощности импульса и выделяемой энергии в нагрузке. Максимум мощности реализуется в нагрузке с большим сопротивлением в соответствии с зависимостью  $R_{dopt} \approx \alpha (\dot{R}_s L_g)^{0.5}$ , рис. 4.

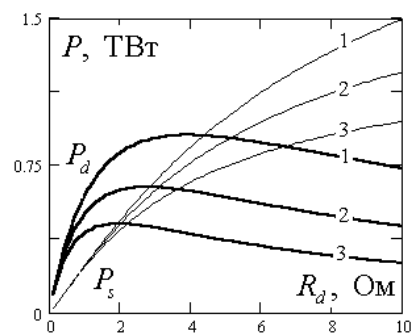


Рис. 4. Мощность в нагрузке и прерывателе в зависимости от сопротивления нагрузки.  $\dot{R}_s=0,2$  (1),  $0,1$  (2) и  $0,05$  (3) Ом/нс.  $L_g=200$  нГн.  $I_0=1$  МА

При оптимальном сопротивлении нагрузки коэффициент перенапряжения равен  $K = V_{dmax} / U_0 = 0,30 (\dot{R}_s C)^{0.5}$ . С использованием  $K$  оптимальное сопротивление нагрузки записывается в виде  $R_{dopt} = 2,07 K \rho$ . Мощность импульса на нагрузке равна

$$P_{dmax} = 0,93 K W_0 \omega_0, \quad (5)$$

где  $W_0 = CU_0^2/2$  – энергия в первичном накопителе,  $\rho = (L_g/C)^{0.5}$ ,  $\omega_0 = (L_g/C)^{-0.5}$ .

При непосредственном включении нагрузки в разрядный контур с затуханием  $v = R/2\rho$  менее критического ток в нагрузке равен

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega L_g} \exp\left(-\frac{R}{2L_g} t\right) \sin \omega t,$$

где  $\omega = \omega_0(1-v^2)^{0,5}$  [6]. Максимум тока достигается в момент времени

$$t_m = \frac{1}{\omega_0(1-v^2)^{0,5}} \operatorname{arctg} \frac{(1-v^2)^{0,5}}{v}$$

и равен

$$I_m = I_0 \exp \left[ -\frac{v}{(1-v^2)^{0,5}} \operatorname{arctg} \frac{(1-v^2)^{0,5}}{v} \right].$$

Мощность в нагрузке максимальна при  $v_{opt} = 0,55$ , которое является решением уравнения

$$\frac{2v}{(1-v^2)^{0,5}} \operatorname{arctg} \frac{(1-v^2)^{0,5}}{v} = 1 + v^2.$$

В этом случае максимум мощности

$$P_m = 0,60W_0\omega_0 \quad (6)$$

реализуется при сопротивлении нагрузки  $R_{opt} \approx 1,1\rho$ . Из сопоставления (5) с (6) следует, что использование прерывателя, обеспечивающего десятикратное перенапряжение, дает рост мощности импульса в нагрузке в  $\sim 15$  раз.

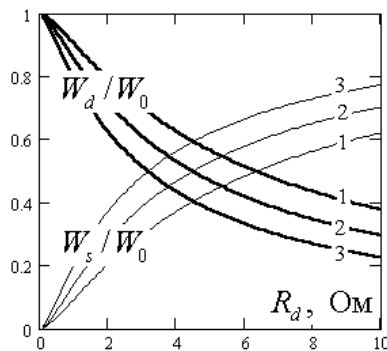


Рис. 5. Энергия в нагрузке и прерывателе в зависимости от сопротивления нагрузки.  $R_s = 0,2$  (1),  $0,1$  (2) и  $0,05$  (3) Ом/нс.  $L_g = 200$  нГн.  $I_0 = 1$  МА

В экспериментах с проволочными прерывателями при токе на нагрузке с сопротивлением  $R = 28\rho$  мощность импульса достигала  $P_m = 6,4W_0\omega_0$ , а коэффициент перенапряжения  $K = 12...14$  [7]. Для этих значений  $K$  расчетная величина оптимального сопротивления нагрузки  $R_{dopt} = (25...29)\rho$ . Максимальная мощность импульса на нагрузке в области указанных значений тока и коэффициента перенапряжения в соответствии с (5) равна  $P_{dmax} \approx 5W_0\omega_0$ . Близость расчетных и экспериментальных значений  $R_{dopt}$  и  $P_{dmax}$  свидетельствует об оправданности допущения линейного роста сопротивления в стадии его быстрого нарастания для расчета ожидаемых параметров импульса на нагрузке.

## 2. Двухкаскадная схема обострения импульса

Двухкаскадная схема обострения импульса, состоящая из двух последовательно соединенных контуров с индуктивным накопителем и прерывателем тока, показана на рис. 6. Она неоднократно проверялась в экспериментах [8–10]. В экспериментах [8] с двухкаскадной схемой при уровне тока  $\sim 100$  кА

длительность нарастания импульса тока сокращалась с 1,7 мкс до 100 нс после срабатывания первого прерывателя и до 40 нс в нагрузке после срабатывания второго. В экспериментах [9] при срабатывании первого прерывателя (время проводимости  $t_c \sim 1,2$  мкс, ток проводимости  $I_c \sim 1,7$  МА) напряжение достигало  $\sim 1$  МВ, второго ( $t_c \sim 120...140$  нс,  $I_c \sim 0,5...0,6$  МА) —  $\sim 4$  МВ. Сопротивление первого прерывателя за 50 нс нарастало до  $\sim 1...1,5$  Ом, второго — до  $\sim 10...15$  Ом за 10 нс.

При срабатывании прерывателя  $R_{s1}$  энергия из накопителя  $L_g$  переключается в промежуточный индуктивный накопитель  $L_{int}$ , во время зарядки которого прерыватель  $R_{s2}$  замкнут. При срабатывании прерывателя  $R_{s2}$  энергия из промежуточного накопителя переключается в нагрузку. Сокращение времени протекания тока в прерывателе  $R_{s2}$  дает увеличение скорости роста сопротивления и его максимального значения, а, следовательно, и выходного напряжения генератора и мощности импульса в нагрузке.

При полном размыкании прерывателей амплитуда тока в промежуточном накопителе

$$I_{int} = \frac{L_g}{L_g + L_{int}} I_0,$$

в нагрузке

$$I_l = \frac{L_{int}}{L_{int} + L_l} \frac{L_g}{L_g + L_{int}} I_0.$$

Максимальный ток в нагрузке реализуется при  $L_{int} = (L_g L_l)^{0,5}$  и равен

$$I_{lmax} = \frac{1}{(1 + (L_l / L_g)^{0,5})^2} I_0.$$

Энергия в нагрузке

$$W_l = \frac{L_g L_{int}^2 L_l}{(L_g + L_{int})^2 (L_{int} + L_l)^2} W_0,$$

где  $W_0 = \frac{L_g I_0^2}{2}$ , максимальна при равенстве всех индуктивностей  $L_g = L_{int} = L_l$ . При этом  $W_l/W_0 = 1/16$ .

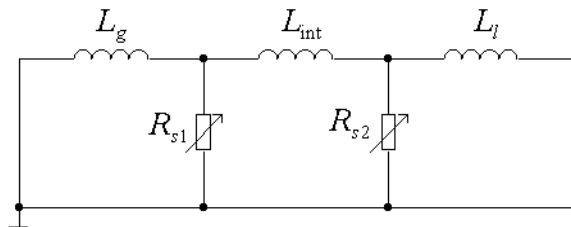


Рис. 6. Двухкаскадная схема обострения импульса

Отношение напряжений на прерывателях в случае линейного роста сопротивлений обоих прерывателей

$$(V_{s2} / V_{s1})_{max} = \frac{L_g}{L_g + L_{int}} \left( \frac{\dot{R}_{s2} L_l L_g + L_{int}}{\dot{R}_{s1} L_g L_{int} + L_l} \right)^{0,5}$$

при равенстве индуктивностей  $L_g=L_{int}=L_l$  сводится к  $(V_{s2}/V_{s1})_{max}=0,5(R_{s2}/R_{s1})^{0,5}$ . Отсюда следует, что для повышения напряжения на нагрузке скорость роста сопротивления во второй ступени обострения импульса должна быть вчетверо больше скорости роста сопротивления в первом прерывателе.

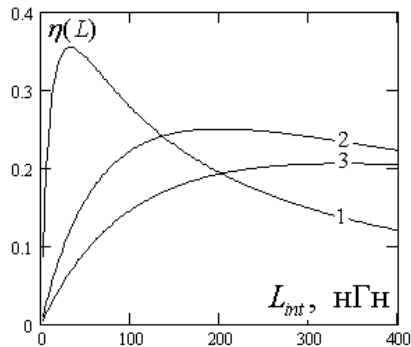


Рис. 7. Зависимость  $\eta(L_{int})$  для  $L_l=20$  (1), 200 (2) и 400 (3) нГн.  $L_g=200$  нГн

Выделяемая мощность в нагрузке

$$P_l(t) = \left( \frac{L_g}{L_g + L_{int}} \right)^2 \frac{L_{int}}{L_{int} + L_l} R_{s2}(t) I_0^2 \times \exp \left( - \int_0^t \frac{R_{s2}(t')}{L_l} dt' \right) \left( 1 - \exp \left( - \int_0^t \frac{R_{s2}(t')}{L_l} dt' \right) \right),$$

где  $L_i = L_{int}L_l / (L_{int} + L_l)$ , достигает максимума в момент времени  $t_m = 1,46 \left( \frac{L_l}{R_s} \right)^{0,5}$  и равна

$$P_{max} \approx 0,34 \frac{L_{int}}{L_{int} + L_l} \left( \frac{L_{int}L_l}{L_{int} + L_l} \right)^{0,5} \left( \frac{L_g}{L_g + L_{int}} \right)^2 \dot{R}_s^{0,5} I_0^2.$$

Абсолютного максимума  $P_{lmax(L_{int}, L_l)} = 0,043 (\dot{R}_s L_g)^{0,5} I_0^2$  мощность достигает при  $L_{int} = L_g/3$  и  $L_l = L_g/6$ . Однако эффективность передачи энергии в нагрузку снижается до 1/24. При равенстве индуктивностей  $L_g=L_{int}=L_l$  максимум мощности снижается в  $\sqrt{2}$  раз до значения  $P_{lmax} = 0,030 (\dot{R}_s L_g)^{0,5} I_0^2$ . Ее отношение к мощности импульса в однокаскадной схеме равно  $1/4 (\dot{R}_s / \dot{R}_{s1})^{0,5}$ . Следовательно, при максимально возможной эффективности передачи энергии в нагрузку добавление второго каскада оправдано, если только скорость роста сопротивления во втором прерывателе больше скорости роста сопротивления прерывателя в первом каскаде в 16 раз. При отличающихся индуктивностях отношение максимальных значений мощности импульса в двухкаскадной и однокаскадной схемах равно

$$\eta = (\dot{R}_{s2} / \dot{R}_{s1})^{0,5} \left( \frac{L_{int}}{L_{int} + L_l} \right) \left( \frac{L_g L_l}{(L_g + L_{int})(L_{int} + L_l)} \right)^{0,5} = (\dot{R}_{s2} / \dot{R}_{s1})^{0,5} \eta(L).$$

Максимум  $\eta$  достигается при

$$L_{int} = \frac{L_g}{6} ((24L_l / L_g + 1)^{0,5} - 1), \text{ рис. 7.}$$

### 3. Включение нагрузки до прерывателя

Для устранения негативного влияния потоков плазмы из прерывателя на переключение энергии на нагрузку экспериментально неоднократно апробировалась схема включения нагрузки до прерывателя [11, 12]. В этой схеме (рис. 8) для устранения тока в нагрузке в стадии проводимости прерывателя устанавливается разделяющий разрядник Sw. Момент включения разрядника совпадает с моментом срабатывания прерывателя. В замкнутом состоянии сопротивление разрядника полагается нулевым. В начальный момент времени в индуктивности между нагрузкой и прерывателем  $L_s$  и индуктивности  $L_g$  протекает ток  $I_0$ . Токи в элементах схемы определяются из системы уравнений

$$\begin{cases} L_g \dot{I}_g + L_s (\dot{I}_g - \dot{I}_l) + R_s(t)(I_g - I_l) = 0 \\ L_g \dot{I}_g + L_l \dot{I}_l = 0 \end{cases}$$

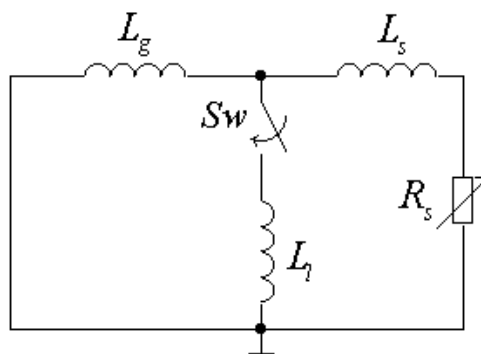


Рис. 8. Схема включения нагрузки до прерывателя

Ее интегрирование дает такие же временные зависимости тока в элементах схемы, как и в традиционной схеме включения нагрузки за прерывателем, но с

$$L_t = L_s + \frac{L_g L_l}{L_g + L_l}.$$

Наличие индуктивности между прерывателем и нагрузкой по сравнению с традиционной схемой приводит к увеличению  $t_m = (L_l / \dot{R}_s)^{0,5}$  и спаду амплитуды напряжения на нагрузке

$$V_{lmax} = I_0 \frac{L_g L_l}{L_g + L_l} \left( \frac{\dot{R}_s}{e L_l} \right)^{0,5}.$$

При равенстве индуктивностей  $L_g=L_l$  напряжение на нагрузке составляет  $(1+2L_s/L_g)^{-1}$  часть от напряжения на прерывателе. При  $L_g/L_s \sim 10$  спад напряжения на нагрузке  $\sim 20\%$ .

Максимум мощности на нагрузке

$$P_{max} = 0,34 \frac{L_g L_l}{(L_g + L_l)^{1,5} ((L_g + L_l)L_s + L_g L_l)^{0,5}} \dot{R}_s^{0,5} I_0^2 = \lambda \dot{R}_s^{0,5} I_0^2.$$

Зависимости  $\lambda$  от индуктивности нагрузки для разных индуктивностей между прерывателем и нагрузкой показаны на рис. 9. Влияние  $L_s$  на величину мощности существенно при индуктивности нагрузки менее 100 нГн. Максимум мощности достигается при индуктивности нагрузки

$$L_l = \frac{1}{4} \frac{L_g^2}{L_g + L_s} \left( 1 + \left( 1 + 16 \frac{L_s}{L_g} \left( 1 + \frac{L_s}{L_g} \right) \right)^{0.5} \right)$$

При  $L_s \ll L_g$  оптимальная индуктивность нагрузки  $L_l = L_g/2$  и  $P_{\max L} \approx 0,13(L_g R_s)^{0.5} I_0^2$ .

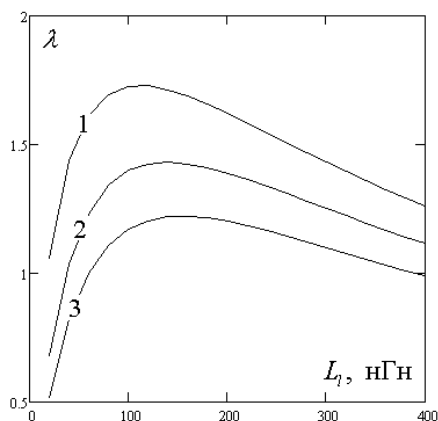


Рис. 9. Зависимости  $\lambda$  от индуктивности нагрузки.  $L_s=10$  (1), 50 (2) и 100 (3) нГн.  $L_g=200$  нГн

Энергия в нагрузке

$$W_l = \frac{L_g^2 L_l}{(L_g + L_l)^2 (L_g + L_s)} W_0$$

где  $W_0 = \frac{(L_g + L_s) I_0^2}{2}$  — энергия, запасенная в накопителе к моменту срабатывания прерывателя. Отношение  $W_l$  к энергии в нагрузке в традиционной схеме равно  $k = \frac{1}{1 + L_s / L_g}$ . При  $L_g / L_s \sim 10$  в схе-

ме включения нагрузки до прерывателя уменьшение выделяемой в нагрузке энергии не превышает 10 % по сравнению с традиционной.

### Заключение

В результате выполненного электротехнического анализа включения прерывателя в контур с индуктивным накоплением энергии получены аналитические формулы для определения параметров импульса на нагрузке. Полученные формулы полезны при анализе результатов экспериментов, а также для расчета ожидаемых параметров импульса при проектировании генераторов с индуктивным накоплением энергии и прерывателем тока. Параметры импульса на нагрузке зависят от скорости роста сопротивления прерывателя, которая в рамках электротехнического анализа не может быть определена. Для ее определения требуется рассмотрение физических процессов, обуславливающих прерывание тока в реальном прерывателе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ware K.D., Filios P.G., Gullickson R.L. et al. Inductive energy technology for pulsed intense X-ray sources // IEEE Trans. on Plasma Sci. — 1997. — V. 25. — № 2. — P. 160–168.
2. Ким А.А., Ковальчук Б.М., Логинов С.В. и др. Увеличение мощности линейного трансформатора посредством последовательного включения плазменных прерывателей тока // Известия вузов. Физика. — 1999. — Т. 42. — № 12. — С. 9–14.
3. Бурцев В.А. Коммутация тока при электрическом взрыве фольг // В кн.: Физика и техника мощных импульсных систем / Под ред. Е.П. Велихова. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — С. 211–224.
4. Mesyats G.A., Bugaev S.P., Kim A.A. et al. Microsecond plasma opening switches // IEEE Trans. on Plasma Sci. — 1987. — V. 15. — № 6. — P. 649–653.
5. Hinshelwood D.D., Boller J.R., Comisso R.J. et al. Long conduction time plasma erosion opening switch experiment // Appl. Phys. Lett. — 1986. — V. 49. — № 24. — P. 1635–1637.
6. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. — М.: Мир, 1972. — 392 с.
7. Котов Ю.А., Лучинский А.В. Усиление мощности емкостного накопителя энергии прерывателем тока на электрически взрываемых проволочках // В кн.: Физика и техника мощных импульсных систем / Под ред. Е.П. Велихова. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — С. 189–211.
8. Долгачев Г.И., Голованов Ю.П., Гусяков С.Е. и др. Обострение фронта тока индуктивного накопителя двухкаскадным плазменным прерывателем тока // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. — 1987. — № 4. — С. 30–31.
9. Kovalchuk B.M., Mesyats G.A. Superpower pulsed systems with plasma opening switches // Proc. of VIII Intern. Conf. on High Power Particle Beams. — Novosibirsk, 1990. — P. 92–103.
10. Kokshenev V.A., Fursov F.I., Kurmaev N.E. A two-stage scheme of the current pulse sharpening on the GIT-12 generator with the use of the plasma opening switches // Proc. of XIV Symp. on High Current Electronics. — Tomsk, 2006. — P. 328–331.
11. Kovalchuk B.M., Kim A.A., Loginov S.V. et al. Experiments on GIT-4 with the load upstream from the POS // Proc. of XII Intern. Pulsed Power Conf. — Monterey, 1999. — P. 1191–1194.
12. Kokshenev V.A., Fursov F.I., Kurmaev N.E. Investigation of the POS characteristics in several schemes delivering MA current pulses to low impedance loads on GIT-12 // Proc. of XIII Symp. on High Current Electronics. — Tomsk, 2004. — P. 170–173.

Поступила 02.04.2008 г.