

В. М. АЛЕКСАНДРОВ, А. П. БАЙКОВ,  
В. А. ИВАНОВ, А. А. НЕСТЕРОВ  
(Новосибирск)

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В НЕЛИНЕЙНОМ RLC-ГЕНЕРАТОРЕ С ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКОЙ

Обычно наносекундные импульсы высокого напряжения получают с помощью генератора [1], схема которого представлена на рис. 1, а, где ЗУ — зарядное устройство;  $P_1$  — управляемый разрядник;  $C_0$  — зарядная емкость; Т — трансформатор;  $Z_H$  — сопротивление нагрузки; Л — накопительная линия. В этом генераторе трансформатор

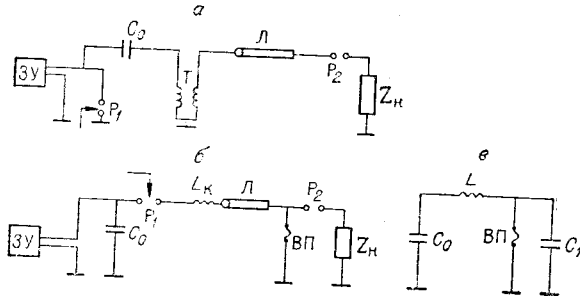


Рис. 1.

используется как источник высокого напряжения, заряжающий емкостный накопитель. Применением взрывающейся проволоки можно существенно упростить генератор, выполнив его по схеме рис. 1, б ( $L_k$  — катушка индуктивности; ВП — взрывающаяся проволочка). После срабатывания управляемого разрядника емкость  $C_0$  разряжается через индуктивность катушки  $L_k$ , линию Л и взрывающуюся проволочку ВП. Параметры последней необходимо выбрать таким образом, чтобы электрический взрыв происходил в момент первого максимума разрядного тока. В результате размыкания тока в контуре возникает импульс перепая

пряжения, заряжающий линию Л. Амплитуда импульса определяется величинами  $C_1$ ,  $L_k$ , параметрами линии Л, взрывающейся проволочки и может значительно превосходить величину зарядного напряжения  $U_0$ . Для исследования этой зависимости была принята простейшая эквивалентная схема кабельной линии — последовательное соединение индуктивности  $L_n = iL_n$  с емкостью  $C_n = iC_n$ , где  $L_n$ ,  $C_n$  — параметры линии на погонный метр. После выделения такой эквивалентной схемы линии схема всего устройства приводится к виду рис. 1, в, где  $L = L_k + L_n$ , а  $C_1 = C_n$ . Обозначим:  $i$  — общий ток;  $i_{в.п}$  — ток во взрывающейся проволочке;  $i_1$  — ток в емкости  $C_1$ . Нелинейная зависимость  $\frac{r_{в.п}(W_{в.п})}{r_{в.п}(0)}$  ( $W_{в.п}$  — поглощенная проводником энергия) была взята из эксперимента для медной проволочки и имеет вид рис. 2. Электрическая схема рис. 1, в описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$-U_0 + \frac{1}{C_0} \int_0^t i dt + Li' + r_{в.п}(W_{в.п}) i_{в.п} = 0; \quad i_{в.п} r_{в.п}(W_{в.п}) = \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1 dt; \quad i = i_{в.п} + i_1; \quad (1)$$

$$\frac{W'_{в.п}}{m} = r_{в.п}(W_{в.п}) i_{в.п}^2,$$

где  $m$  — масса взрывающегося проводника. Приводим (1) к более удобному для моделирования на аналоговой вычислительной машине (АВМ) виду:

$$Li'' + \frac{1}{C_0} i + \frac{1}{C_1} (i - i_{в.п}) = 0; \quad (i_{в.п} r_{в.п}(W_{в.п}))' - \frac{1}{C_1} (i - i_{в.п}) = 0; \quad (2)$$

$$\frac{W'_{в.п}}{m} = r_{в.п}(W_{в.п}) i_{в.п}^2.$$

Начальные условия и постоянные значения параметров следующие:

$$i(0) = i_{в.п.}(0) = W_{в.п.}(0) = 0; \quad i'(0) = \frac{U_0}{L}; \quad U_0 = 20 \text{ кВ};$$

$$C_1 = \{0; 2,6 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}; 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}; 2,6 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}\}.$$

В данной работе ставится задача нахождения оптимальных значений параметров  $L$ ,  $r_{в.п.}(0)$ ,  $m$ , при которых перенапряжение  $U_1 = r_{в.п.} i_{в.п.} = \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1 dt$  максимально, т. е. провести параметрическую оптимизацию критерия  $I = \max U_1$  для системы (2) по параметрам  $L$ ,  $r_{в.п.}(0)$ ,  $m$  для различных значений  $C_1$ ,  $U_0 \frac{r_{в.п.}^K}{r_{в.п.}^H}$  ( $r_{в.п.}^K$  — максимальное значение сопротивления;  $r_{в.п.}^H = r_{в.п.}^H(0)$  — начальное значение сопротивления).

Поставленная задача решалась на АВМ методом поиска экстремума вдоль гребня [2]. Суть этого метода заключается в следующем.

1. При фиксированных значениях оптимизируемых параметров  $L$ ,  $r_{в.п.}(0)$  находим  $\max U_1$  по параметру  $m$ .

2. Удерживая величину  $U_1$  по параметру  $m$  на экстремуме, находим  $\max U_1$  по параметру  $r_{в.п.}(0)$ .

3. Удерживая величину  $U_1$  на экстремуме по  $m$ ,  $r_{в.п.}(0)$ , находим  $\max U_1$  по параметру  $L$ .

4. В точке оптимума находится зависимость  $U_1$  от  $U_0$  и  $\frac{r_{в.п.}^K}{r_{в.п.}^H}$  для заданного значения емкости  $C_1$ .

Вся процедура повторяется для другого значения величины  $C_1$ .

Оптимизация параметров системы (2) была проведена для четырех значений емкости  $C_1$ .

На рис. 3 представлены кривые  $U_1$ ,  $L$ ,  $r_{в.п.}^H$ ,  $m$ ,  $W_{C_1}$  в зависимости от значений емкости  $C_1$ . Из рис. 3 следует, что:

1) максимум напряжения  $U_1 = 550$  кВ достигается при следующих значениях параметров:  $C_1 = 0$ ;  $L = 0,5 \cdot 10^{-7}$  Гн;  $r_{в.п.}(0) = 0,06$  Ом;  $m = 0,012$  г;

2) масса  $m$  имеет экстремум, а параметры  $L$ ,  $r_{в.п.}(0)$ ,  $U_1$ ,  $W_{C_1}$  ведут себя монотонно;

3) энергия  $W_{C_1}$  возрастает с увеличением емкости  $C_1$ . Поскольку максимум напряжения  $U_1$  соответствует нулевым значениям емкости  $C_1$  и запасенной энергии  $W_{C_1}$ , то практического интереса этот случай не представляет. Было принято дополнительное условие, согласно которому  $W_{C_1}$  должна быть не менее 10% от первоначальной энергии  $W_0 = \frac{C_0 U_0^2}{2}$ . Этому условию соответствует значение емкости  $C_1 = 2,6 \cdot 10^{-2}$  Ф. Оптимальное значение напряжения  $U_1$  при этом составляет 200 кВ.

Рассмотрено влияние перепада сопротивления  $\frac{r_{в.п.}^K}{r_{в.п.}^H}$  (рис. 4, а) на величину импульса перенапряжения  $U_1$  для случая 10% переброса энергии  $W_{C_1}$  в нагрузку. Опти-

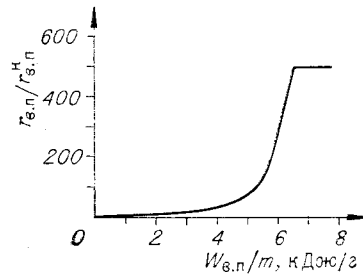


Рис. 2.

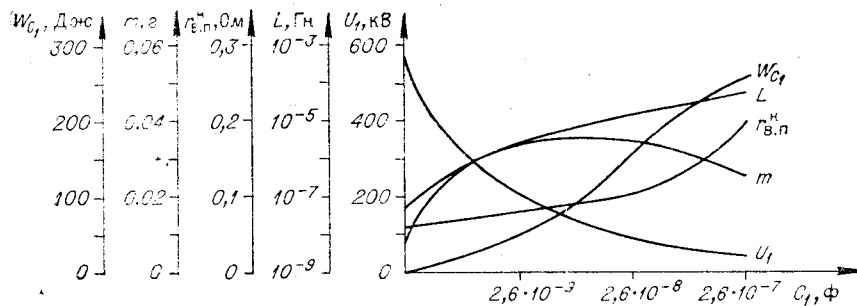


Рис. 3.

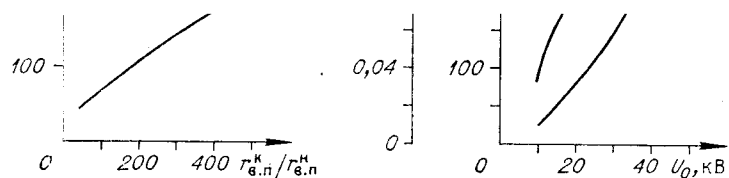


Рис. 4.

мальные значения параметров следующие:  $L=5$  мкГн;  $r_{в.п}^н=0,08$  Ом,  $m=0,035$  г. На рис. 4, б приведена зависимость величины импульса перенапряжения и оптимальной массы проволоки от величины зарядного напряжения.

С целью проверки принятого математического описания процессов и результатов по оптимизации, полученных на математической модели, был проведен ряд натуральных экспериментов. Эксперименты проводились при следующих численных значениях параметров контура:  $U_0=20$  кВ;  $L=5$  мкГн;  $m=0,03$  г;  $r_{в.п}^н=0,083$  Ом без коммутирующего разрядника  $P_2$  (схема рис. 1, б) и сопротивления нагрузки  $Z_{п}$ . Роль сопротивления

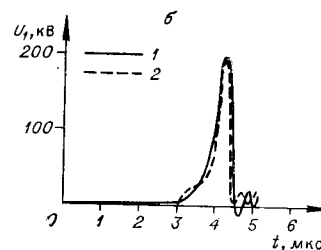
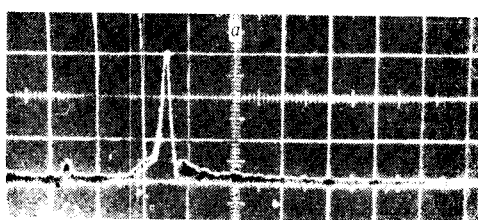


Рис. 5.

нагрузки выполнял канал разряда, возникавшего после электрического взрыва проволоки. На рис. 5, а приведена осциллограмма напряжения на взрывающемся проводнике. На рис. 5, б нанесена эта же кривая (2) и кривая переходного процесса напряжения

на взрывающейся проволоке, полученная при моделировании процесса на АВМ (1). Из рис. 5, б видно, что кривые достаточно близки. На рис. 6 приведены зависимости перенапряжения на конденсаторе  $C_1$  от величины индуктивности контура  $L$ . На рис. 6 видно, что расхождения между экспериментальной кривой (2) и расчетной (1) при моделировании незначительны.

Таким образом, принятая математическая модель с достаточной степенью точности описывает реальный процесс. Принятая методика оптимизации позволяет найти оптимальные значения параметров контура и предельные значения критерия качества  $I=\max U_1$ . Проведенные исследования позволили резко сократить объем экспериментальных работ при оптимизации  $RLC$ -контура генератора и более полно изучить влияние его параметров на амплитуду импульса перенапряжения, что позволяет рассчитывать конструкции высоковольтных генераторов с заданными характеристиками.

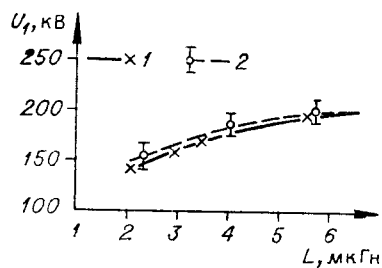


Рис. 6.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Фрюнгель. Импульсная техника. М., «Энергия», 1965.
2. Д. Дж. Уайлд. Методы поиска экстремума. М., «Наука», 1967.

Поступило в редакцию 13 сентября 1972 г.