

мощностях до $2 \cdot 10^8$ Вт. При больших же мощностях ступенчатость проявляется очень сильно.

Обращает на себя внимание то, что независимо от длины разрушаемой части контактного узла коммутируемого тока и сопротивления нагрузки первая стадия коммутации протекает с одинаковой скоростью. Затем через одинаковый интервал времени во всех режимах эта скорость резко снижается до полного прерывания коммутации. Интервал прерывания коммутации и последующее развитие процесса уже зависят от геометрии ВК и коммутационных параметров. В настоящее время трудно определить конкретные физические причины наблюдаемого ступенчатого характера коммутации. Однако очевидно, что для получения высоких коммутационных мощностей необходим тщательный подбор механических характеристик и параметров цепи нагрузки.

Поступила 9 VI 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Koch W., Salge J. Über die Erzeugung von stopströmen mit Sprengtrennern ETZ-A, 1966, Bd 87, H19, S. 697—790.
2. Азизов Э. А., Ахмеров Н. А., Николаевский В. Г., Соколов Б. В., Финько С. В. О выводе энергии из индуктивного накопителя мощным коммутатором с шунтированием дуги.— В кн.: Тезисы докладов научной сессии отделения Научного Совета по проблемам электроэнергетики АН СССР. М., 1972.
3. Тарасенко Н. Н. Исследование движения стенки трубы под действием продуктов детонации внутреннего заряда ВВ.— ФГВ, 1974, т. 10, № 5, с. 737—741.

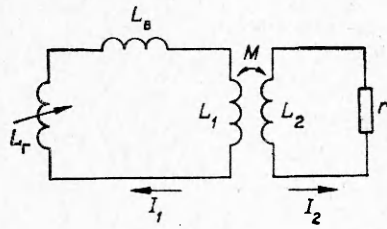
УДК 621.31

СОГЛАСОВАНИЕ ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА С АКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ С ПОМОЩЬЮ ТРАНСФОРМАТОРА

Л. С. Герасимов
(Новосибирск)

Перспективность использования взрывомагнитных генераторов (ВМГ) в современной технике и научных исследованиях в качестве импульсных генераторов электрической энергии большой мощности обсуждалась в работах [1—3]. Схема непосредственного включения взрывных генераторов на активную нагрузку является наиболее простой и удобной, но она имеет ограничения как по величине сопротивления нагрузки [4—6], так и по величине развиваемого напряжения [7]. В связи с этим в [3] в качестве обязательного элемента схемы взрывного электрического генератора называется размыкатель тока. Ниже показано, что применение импульсного согласующего трансформатора (СТ) позволяет в значительной мере ослабить указанные ограничения и добиться во многих случаях удовлетворительного согласования ВМГ с активной нагрузкой без размыкателя тока.

1. **Электрическая схема и уравнения устройства.** Приняв электротехническую модель ВМГ, что и в [1, 4, 5], схему устройства изобразим на фиг. 1. Здесь не приняты во внимание все паразитные активные сопротивления на первичной стороне трансформатора, паразитные индуктивности включены в индуктивность вывода L_B . На вторичной стороне не учтены



Фиг. 1

паразитные индуктивности, а паразитные сопротивления включены в сопротивление нагрузки r . Схема описывается уравнениями

$$(1.1) \quad (L_r I_1)' + (L_b + L_1) I_1' + M I_2' = 0;$$

$$(1.2) \quad L_2 I_2' + r I_2 + M I_1' = 0,$$

где $M = k\sqrt{L_1 L_2}$ — взаимная индуктивность обмоток СТ; k — коэффициент их связи; штрих означает дифференцирование по времени. Энергия, переданная в нагрузку за время работы генератора,

$$W_{н1} = r \int_0^T I_2^2(t) dt,$$

где $T = l_r/D$ — длительность цикла, l_r — длина генератора, D — скорость детонационной волны. Механическая работа продуктов взрыва против электромагнитных сил

$$(1.3) \quad W_{мех} = -\frac{1}{2} \int_0^T I_1^2(t) dL_r.$$

Энергия магнитного поля системы при $t = 0$ (в конце накачки)

$$(1.4) \quad W_{м1} = \frac{1}{2} (L_{r0} + L_b + L_1) I_{10}^2 + \frac{1}{2} L_2 I_{20}^2 + M I_{10} I_{20},$$

где $L_{r0} = L_r(0)$; $I_{10} = I_1(0)$; $I_{20} = I_2(0)$. Энергия магнитного поля при $t = T$

$$W_{м2} = \frac{1}{2} (L_b + L_1) I_{1m}^2 + \frac{1}{2} L_2 I_{2m}^2 + M I_{1m} I_{2m},$$

где $I_{1m} = I_1(T)$ и $I_{2m} = I_2(T)$ — максимальные значения токов I_1 и I_2 . Уравнение баланса энергии для рабочей стадии

$$W_{м1} + W_{мех} = W_{м2} + W_{н1}.$$

Во время работы генератора часть энергии запасается в обмотках СТ в виде энергии магнитного поля. После окончания рабочего цикла начинается разряд трансформаторного накопителя энергии на нагрузку. Ток разряда найдем, подставив в (1.1), (1.2) $L_r = 0$:

$$I_2 = I_{2m} e^{-t/\tau_p},$$

где $\tau_p = \tau \left(1 - \frac{k^2}{1 + L_b/L_1} \right)$ — постоянная времени разряда, $\tau = L_2/r$. Из (1.1) находим

$$(L_b + L_1) I_1 + M I_2 = \text{const} = (L_b + L_1) I_{1m} + M I_{2m}.$$

Отсюда видно, что не вся электромагнитная энергия первичной цепи пере-

дается в нагрузку: при $t \rightarrow \infty$ $I_2 \rightarrow 0$, $I_1 \rightarrow I_{1\infty} = I_{1m} + M/(L_B + L_1) \times I_{2m}$. Энергия, переданная в нагрузку в стадии разряда,

$$W_{H2} = r \int_0^{\infty} I_2^2(t) dt = \frac{1}{2} r I_{2m}^2 \tau_p.$$

Полная энергия нагрузки $W_H = W_{H1} + W_{H2}$. Электрический КПД схемы $W_H/(W_{M1} + W_{Mex})$.

2. Оптимизация. Известно [5], что условием максимального КПД преобразования энергии взрыва в электромагнитную энергию является постоянство линейной плотности тока на линии контакта шин. Примем это условие. Тогда $j = I_1/y = j_0$, где $y(x)$ — ширина шины на расстоянии x от начала. Задача оптимизации сводится к отысканию $y(x)$ из уравнений (1.1), (1.2) с учетом условия $I_1/y = j_0$ и уравнения $L'_r = -a/y$, где $a = 2\mu_0\delta D$, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, δ — зазор между шиной и кассетой. Можно убедиться, что решение этой задачи есть

$$(2.1) \quad y = y_0 e^{t/\tau}, \quad L_r = \frac{a\tau}{y_0} (e^{-t/\tau} - e^{-T/\tau});$$

$$(2.2) \quad I_1 = I_{10} e^{t/\tau}, \quad I_2 = I_{20} e^{t/\tau};$$

$$(2.3) \quad 2 \left(1 + L_B/L_1 - \frac{a\tau}{L_1 y_0} e^{-T/\tau} \right) = k^2;$$

$$(2.4) \quad I_{20} = -\frac{k}{2} \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} I_{10}.$$

Равенство (2.3) непосредственно вытекает из уравнения баланса энергии для ВМГ с экспоненциальным профилем, а условие (2.4) необходимо обеспечить при накачке. Из (1.3), (1.4), (2.1), (2.2) и (2.4) находим

$$(2.5) \quad W_{Mex} = \frac{a\tau}{2y_0} (e^{T/\tau} - 1) I_{10}^2;$$

$$(2.6) \quad W_{M1} = \frac{1}{2} \left[L_{r0} + L_r + \left(1 - \frac{3}{4} k^2 \right) L_1 \right] I_{10}^2,$$

$$W_{Mex}/W_{M1} = e^{T/\tau} \left[1 + \frac{L_B}{L_{r0}} + \left(1 - \frac{3}{4} k^2 \right) \frac{L_1}{L_{r0}} \right]^{-1}.$$

Рациональный режим работы соответствует $W_{Mex}/W_{M1} \gg 1$, откуда следует $e^{T/\tau} \gg 1$, $L_B \leq L_{r0}$, $L_1 \leq L_{r0}$. Электрический КПД

$$(2.7) \quad \frac{W_H}{W_{M1} + W_{Mex}} = k^2 \frac{2 - \frac{k^2}{1 + L_B/L_1} - e^{-2T/\tau}}{4 \left(1 + \frac{L_B}{L_1} \right) - 2k^2 \left(1 + \frac{1}{2} e^{-2T/\tau} \right)} \cong \frac{k^2}{2(1 + L_B/L_1)}$$

в лучшем случае ($k = 1$, $L_B/L_1 \ll 1$) составляет 0,5, при $k = 0,9$, $L_B/L_1 \ll 1$ получим 0,4, а при $k = 1$, $L_B/L_1 = 1 - 0,25$. Таким образом, условие постоянства линейной плотности тока позволяет передать в нагрузку не более половины всей электромагнитной энергии устройства. Сформулируем теперь задачу оптимизации в следующей постановке. Будем считать заданными r , амплитуду импульса напряжения u_m , энергию импульса W_H , энергию батареи накачки W_{Σ} и параметры δ , L_B и k . Требуется найти L_1 , L_2 , y_0 , $T = l_r/D$. Удобнее сначала ввести в рассмотрение вместе W_H полную энергию системы $W_{\Pi} = W_{M1} + W_{Mex}$. Хотя точное значение W_{Π} до решения задачи оптимизации неизвестно, однако приближенно его можно найти из (2.7), положив $L_B/L_1 = 0$: $W_H/W_{\Pi} \cong k^2/2$. После пер-

вого решения сможем уточнить W_{Π} и снова провести решение задачи. Итак, для четырех искомых величин можно получить четыре уравнения. Первым уравнением является (2.5), где $W_{\text{мех}} = W_{\Pi} - W_{\delta}$. Приравняем энергию батареи накачки W_{δ} к $W_{\text{м1}}$, тогда получим второе уравнение — (2.6), в котором $W_{\text{м1}} = W_{\delta}$. Третьим уравнением служит (2.3). Для $u_m = rI_{2m}$ с учетом (2.4) можно записать четвертое уравнение

$$(2.3) \quad \frac{u_m}{aj_0} = \frac{k}{2} \frac{y_0 r/a}{\sqrt{L_2/L_1}} e^{T/\tau}.$$

Решим систему уравнений (2.5), (2.6), (2.3) и (2.8) при $L^B = 0$. Опуская выкладки, запишем решение

$$(2.9) \quad e^{T/\tau} = \frac{1}{2} \frac{W_{\Gamma}}{W_{\delta}} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{k^2}{1 - k^2/2} \frac{W_{\Pi}/W_{\delta} - 1}{(W_{\Pi}/W_{\delta})^2}} \right];$$

$$(2.10) \quad L_1 = \frac{k^4/8}{(1 - k^2/2)^3} \frac{r^2 (W_{\Pi} - W_{\delta}) / (aj_0)^2}{(1 - e^{-T/\tau}) (u_m/aj_0)^4};$$

$$(2.11) \quad \sqrt{L_2/L_1} = \frac{1 - k^2/2}{k/2} \frac{u_m}{aj_0};$$

$$(2.12) \quad \frac{y_0 r}{a} = 4 \frac{1 - k^2/2}{k^2} \left(\frac{u_m}{aj_0} \right)^2 e^{-T/\tau}.$$

Учитывая выражения (2.11), (2.12), вычислим

$$\frac{L_{r0}}{L_1} = \left(1 - \frac{1}{2} k^2 \right) (e^{T/\tau} - 1).$$

3. Обсуждение результатов. Из (2.7) видно, что КПД падает вдвое при снижении k от 1 до 0,7 и при увеличении L_B/L_1 от нуля до 1. Коэффициент трансформации $n = w_2/w_1 = \sqrt{L_2/L_1}$ (w_1 и w_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток СТ) определяется напряжением и не зависит от энергии импульса (уравнение (2.11)). Равенства (2.9)—(2.12) обеспечивают заданные значения энергии W_{Π} и мощности u_m^2/r одновременно. Рассмотрим теперь вопрос о предельной мощности в следующей постановке. Будем считать фиксированными W_{Π} , W_{δ} , k и L_B . Тогда с ростом u_m L_1 будет падать, как u_m^{-4} , и в соответствии с (2.7) будет быстро падать W_{Π} . Отсюда видно, что если в нагрузку необходимо передать некоторую минимальную энергию $W_{\text{мин}}$, то предельная мощность, соответствующая этой энергии, определяется паразитной индуктивностью вывода L_B и коэффициентом связи k (уравнения (2.7), (2.10)). Зависимость L_B/L_1 от пиковой мощности $p_m = u_m^2/r$ удобно представить в виде

$$\frac{W_{\Pi}}{W_{\delta}} \frac{L_B}{L_1} = \frac{(1 - k^2/2)^3}{k^4/8} \frac{p_m^2}{(aj_0)^2 W_{\delta}/L_B}.$$

Пусть, например, $W_{\Pi}/W_{\delta} = 20$ и $k = 1$. Тогда при $p_m = aj_0 \sqrt{W_{\delta}/L_B}$ $L_B/L_1 = 0,05$, $W_{\Pi}/W_{\Pi} \cong 0,5$ и $W_{\Pi}/W_{\delta} = 10$. Если же $p_m = 10aj_0 \sqrt{W_{\delta}/L_B}$, то $L_B/L_1 = 5$, $W_{\Pi}/W_{\Pi} = 1/12$ и $W_{\Pi}/W_{\delta} = 1,67$. Наконец, при $p_m = aj_0 \sqrt{W_{\delta}/L_B}$ и $k = 0,7$ (вместо $k = 1$) получим $L_B/L_1 \cong 0,7$, $W_{\Pi}/W_{\Pi} \cong 0,15$ и $W_{\Pi}/W_{\delta} = 3$ (вместо 10). В заключение приведем пример расчета генератора и согласующего трансформатора для установки со следующими параметрами:

$r = 10$ Ом, $u_m = 10^6$ В, $W_{\Pi} = 10^6$ Дж, $W_{\delta} = 5 \cdot 10^4$ Дж, $L_B = 2 \cdot 10^{-9}$ Г, $k = 0,8$, $\delta = 4 \cdot 10^{-2}$ м, $j_0 = 4 \cdot 10^7$ А/м, $D = 0,75 \cdot 10^4$ м/с. Находим $a =$

$= 0,75 \cdot 10^{-3}$ Ом·м, $aj_0 = 3 \cdot 10^4$ В, $u_m/(aj_0) = 33,3$, $W_H/W_H \cong k^2/2 = 0,32$, $W_H \cong 3 \cdot 10^6$ Дж, $W_H/W_6 = 60$, $L_1 = 4,4 \cdot 10^{-8}$ Г, $L_H/L_1 \cong 0,05$, $T/\tau = \ln 60 = 4,1$, $\sqrt{L_2/L_1} = 56,6$, $L_2 = 1,41 \cdot 10^{-4}$ Г, $\tau = 1,41 \cdot 10^{-5}$ с, $T = 57,7 \cdot 10^{-6}$ с, $l_r = 0,43$ м, $y_0/a = 0,74$, $y_0 = 5,5 \cdot 10^{-3}$ м, $y_m = 0,33$ м.

Таким образом, взрывомагнитный генератор имеет экспоненциальный профиль с начальной ординатой $y_0 = 5,5 \cdot 10^{-3}$ м, конечной ординатой $y_m = 0,33$ м, длиной $l_r = 0,43$ м. Согласующий трансформатор имеет коэффициент трансформации $n \cong 57$, что соответствует $w_1 = 1$, $w_2 = 57$. Индуктивность первичной обмотки $L_1 = 4,4 \cdot 10^{-8}$ Г. Батарея накачки с энергией $5 \cdot 10^4$ Дж должна давать ток $I_{10} = 2,2 \cdot 10^5$ А.

Поступила 12 VIII 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов Л. С. Согласование взрывомагнитного генератора с индуктивной нагрузкой. — ЖТФ, 1974, т. 44, № 9.
2. Биченков Е. И. Усиление тока и увеличение энергии в плоских магнитно-кумулятивных генераторах с диффузией потока. — ПМТФ, 1976, № 4.
3. Азаркевич Е. И., Войтенко А. Е., Исаков В. П., Котов Ю. А. Взрывной электрический генератор. — ЖТФ, 1976, т. 46, № 9.
4. Conger R. L. Large electric power pulses by explosive magnetic-field compression. — «J. Appl. Phys.», 1967, vol. 38.
5. Биченков Е. И., Войтенко А. Е., Лобанов В. А., Маточкин Е. П. Схема расчета и включение на нагрузку плоских взрывомагнитных генераторов. — ПМТФ, 1973, № 2.
6. Войтенко А. Е., Маточкин Е. П., Яблочников Б. А. Использование взрывомагнитного генератора для питания газового разряда. — ПТЭ, 1973, № 3.
7. Герасимов Л. С., Икрянников В. И. Работа плоского взрывомагнитного генератора на активную нагрузку. — ЖТФ, 1977, т. 47, № 12.

УДК 538.4 : 621.31

ВЫВОД ЭНЕРГИИ ИЗ ИНДУКТИВНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ И ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В ИНДУКТИВНУЮ НАГРУЗКУ С ПОМОЩЬЮ РАЗРЫВА КОНТУРА

В. А. Демидов, Е. И. Жаринов, С. А. Казаков,
В. К. Чернышев

(Москва)

В последние годы вопросу получения мощных импульсов тока с помощью индуктивных накопителей энергии уделяется все большее внимание. Повышенный интерес к таким устройствам вызван тем обстоятельством, что плотность магнитной энергии в индуктивных накопителях значительно превышает плотность энергии емкостных источников. Наиболее наглядно эти преимущества проявляются в импульсных накопителях, защищаемых от взрывомагнитных генераторов (ВМГ), работающих на принципе быстрого сжатия магнитного потока [1—5]. Во взрывных системах накопитель имеет небольшую индуктивность, но токи в нем могут достигать десятков и даже сотен миллионов ампер.

Получение с помощью ВМГ рекордных величин токов и энергий открывает широкие перспективы использования импульсных накопителей во многих областях современной физики (изучение плазменного фокуса [6], получение больших магнитных давлений для изэнтропического сжатия веществ [7], ускорение заряженных частиц до высоких энергий и т. п.).