

**СХЕМА РАСЧЕТА И ВКЛЮЧЕНИЕ НА НАГРУЗКУ ПЛОСКИХ
ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**

*Е. И. Биценков, А. Е. Войтенко, В. А. Лобанов,
Е. П. Маточкин*

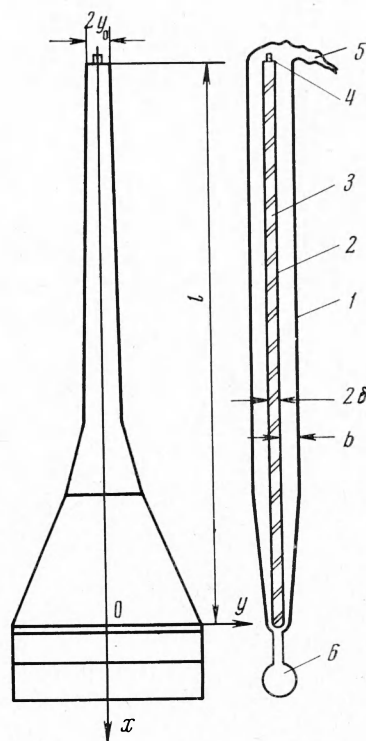
(Новосибирск)

Описана схема расчета плоских взрывомагнитных генераторов, рассчитаны аналитически и численно задачи включения генератора на постоянную омическую и индуктивную нагрузки, на нагрузку, сопротивление которой растет линейно с температурой, и на плазменную нагрузку с равновесным излучением. В последнем случае просчитан вариант включения нагрузки через согласующий трансформатор.

1. Использование энергии взрывчатых веществ (ВВ) для быстрого сжатия магнитного потока внутри проводящего контура [1] реализовано в ряде конструкций взрывомагнитных генераторов [1-7], которые являются наиболее мощными генераторами электрического тока. Взрывомагнитный генератор как источник тока имеет специфические электротехнические характеристики, которые необходимо учитывать при согласовании его с различными нагрузками.

В статье обсуждаются некоторые расчетные соотношения, полученные для плоского [4] взрывомагнитного генератора с нагрузкой индуктивного и активного характера. Близкая конструкция генератора разработана Герлахом и Кнопфелем [5]. Плоский генератор (фиг. 1) состоит из медных шин (1) переменной ширины, медной сварной кассеты (2), размещенной между шинами, и заряда ВВ (3), залитого во внутреннюю плоскость кассеты. Генератор подключается к конденсаторной батарее кабелями (5). В момент, когда разрядный ток достигает максимума, производится подрыв капсюля (4), и по заряду ВВ в кассете распространяется волна детонации. Под действием продуктов взрыва боковые стенки кассеты разлетаются в стороны, закорачивая шины генератора и постепенно вытесняя магнитный поток в нагрузку (6). Более подробно работа взрывомагнитных генераторов рассмотрена в книге Кнопфеля [8].

2. Взрывной генератор с электротехнической точки зрения представляет собой участок цепи с переменной индуктивностью $L(t)$. Предположим, что шины генератора параллельны друг другу, ширина их $2y$ медленно меняется по длине генератора x и расстояние между шинами $2b$ много



Фиг. 1

меньше ширины. Обозначив полную длину генератора через l и считая скорость замыкания пластин постоянной и равной скорости детонации D , можно записать зависимость индуктивности генератора от времени

$$L(t) = 4\pi b \int_{-l+Dt}^0 \frac{dx}{y(x)} \quad (2.1)$$

Начало координат расположено в месте подсоединения генератора к нагрузке, отсчет времени ведется от момента замыкания генератора взрывом.

Мощность, развиваемая таким генератором при изменении индуктивности, равна $2^{-1}c^{-2}I^2D (dL/dx)$. С другой стороны, она равна некоторой доле k мощности $4qy\delta D$, развиваемой при взрыве заряда ВВ. Таким образом, можно записать

$$\frac{\pi b}{2c^2} \frac{I^2}{y} = kqy\delta \quad (2.2)$$

Здесь I — ток в генераторе, q — энергия ВВ на единицу объема, 2δ — толщина слоя ВВ, c — электродинамическая постоянная.

В любом сечении генератора коэффициент k не может превышать некоторого максимального значения, определяемого зарядом ВВ, током и конструкцией генератора. Генератор будет работать в оптимальном режиме, если k всюду достигает этой величины, т. е. постоянно по длине генератора.

Записав совместно с условиями (2.1) и (2.2) уравнение энергии для электрической цепи и уравнения, определяющие сопротивление и другие электротехнические параметры, можно получить замкнутую систему уравнений, из которых определяется раскрой шин генератора $y(x)$, зависимости тока и энергии, выделившейся в нагрузке, от времени и другие характеристики генератора.

3. Для цепи с индуктивностью нагрузки L_1 , обладающей активным сопротивлением R , уравнение энергии при $k = \text{const}$ имеет вид

$$\frac{L(t) + L_1}{2c^2} I^2 + \int_0^t RI^2 dt = 4kq\delta \int_{-l}^{-l+Dt} y(x) dx + \frac{L_0 I_0^2}{2c^2} \quad (3.1)$$

Начальная индуктивность цепи $L_0 = L(0) + L_1$.

Задача о включении взрывного генератора на постоянное сопротивление $R = R_0$ решается аналитически. Раскрой шин соответствующего генератора

$$y(x) = y_0 \exp \left[\frac{c^2 R_0}{L_0 D} (l+x) \left(\frac{4\pi b D}{c^2 R_0 y_0} - 1 \right) \right] \quad (y_0 = y(-l)) \quad (3.2)$$

Здесь y_0 — ширина шин у начала генератора.

Иногда генератор работает только на индуктивную нагрузку. Соответствующий экспоненциальный раскрой шин получается при переходе в (3.2) к пределу $R_0 \rightarrow 0$. Этому случаю соответствует рассматриваемый в [4] генератор, в котором экспонента аппроксимирована прямыми отрезками.

Существует критическое значение сопротивления

$$R_* = 4\pi b D / c^2 y_0$$

при котором ширина шин и ток в генераторе постоянны. При $R_0 < R_*$ ширина шин и ток генератора увеличиваются, при $R_0 > R_*$ — убывают. Этот режим связан с сильной потерей магнитного потока и во многих отношениях неудовлетворителен.

Энергия E , выделившаяся в омической нагрузке за время работы генератора, отнесенная к начальной энергии магнитного поля в генераторе $E_0 = L_0 I_0^2 / 2 c^2$, равна

$$\frac{E}{E_0} = \frac{2c^2}{L_0 I_0^2} \int_0^t R_0 I^2 dt = \frac{\rho(n-1)[(n+1) + \rho(n-1)]}{[1 + \rho(n-1)]^2}$$

$$(\rho = R_0 / R_*, \quad n = L_0 / L_1)$$

Максимальное значение E / E_0 как функции ρ при заданном коэффициенте перестройки генератора n равно $(n+1)^2 / 4n$ и достигается при $\rho = (n+1) / (n-1)^2$. Ток при этом возрастает в $(n-1) / 2$ раз.

В случае $\rho = 1$ ток постоянен, и энергия в нагрузке $E = 2 E_0 (1 - 1/n)$ превышает начальный запас энергии в генераторе примерно вдвое.

Для наиболее интересного случая генераторов с $n \gg 1$

$$E = E_0 \rho (1 + \rho) n^2 / (1 + \rho n)^2 \quad (3.3)$$

и максимальная энергия достигается на нагрузке

$$R_0 = n^{-1} R_* \quad (3.4)$$

Энергия заряда ВВ при этом

$$Q_0 = 4q\delta \int_{-1}^0 y(x) dx =$$

$$= \frac{(n-1)^2}{2nk} E_0 \approx \frac{n}{2k} E_0$$

Отношение максимальной энергии в нагрузке (3.3) при условии (3.4) к полной энергии заряда ВВ равно

$$E / Q_0 = k / 2$$

Таким образом, при $n \gg 1$ половина энергии, выработанной генератором, переходит в тепло, а вторая половина остается в виде энергии магнитного поля, связанной с остаточной индуктивностью генератора.

4. Более сложен случай изменяющегося при нагреве сопротивления $R(t)$. Считая изменение сопротивления пропорциональным изменению температуры, получаем

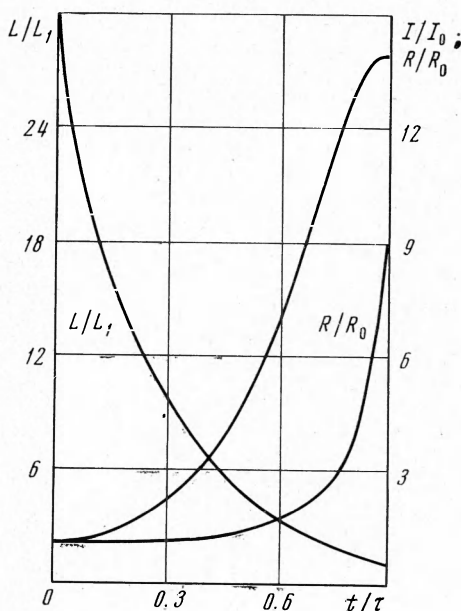
$$\frac{dR}{dt} = \frac{\alpha R_0}{\lambda} R I^2 \quad (4.1)$$

где α — температурный коэффициент сопротивления, λ — полная теплоемкость резистора, R_0 — начальное значение сопротивления.

Система уравнений (2.1), (2.2), (3.1), (4.1) решалась численно на ЭВМ по программе Рунге — Кутты с автоматическим выбором шага. В безразмерном виде решение зависит от параметров

$$A_1 = \frac{4 \sqrt{\pi} D}{c R_0 I_0} \sqrt{kbq\delta}, \quad A_2 = \frac{L_0 I_0^2 \alpha}{c^2 n \lambda}$$

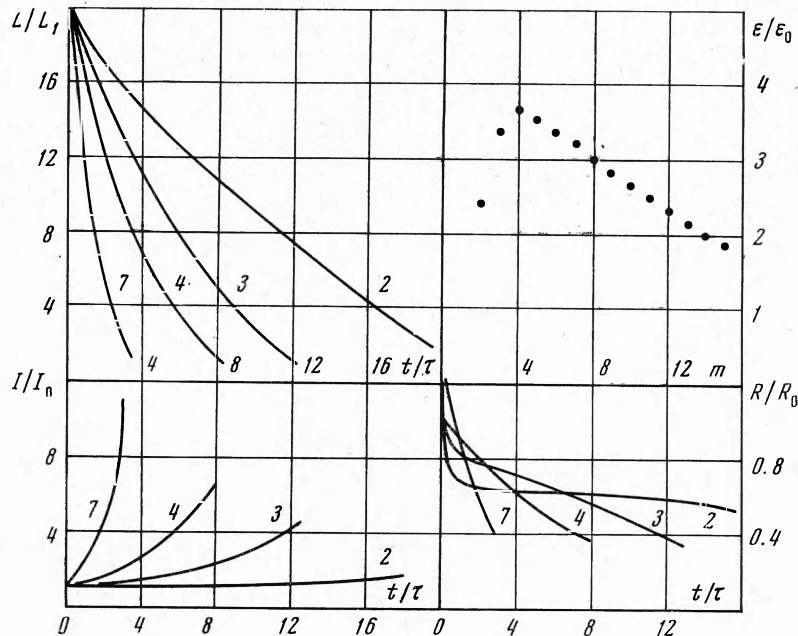
Результаты расчета зависимостей L / L_1 , I / I_0 , R / R_0 от безразмерного времени $\tau = c^2 R_0 L_1^{-1} t$ при $A_1 = 10^2$, $A_2 = 5 \cdot 10^{-2}$ приведены на фиг. 2.



Фиг. 2

По вычисленному току из условия (2.2) можно определить ширину шин и спроектировать оптимальный для данного случая генератор.

При фиксированном n в нагрузке, сопротивление которой растет со временем, можно выделить энергию большую, чем в случае постоянного сопротивления. Переменная ширина шин повышает к. п. д. использования энергии взрыва по сравнению с генератором постоянной ширины, рассмотренным в [9].



Фиг. 3

Для эффективного нагрева нагрузки с большим сопротивлением необходимо включить между генератором и нагрузкой согласующий трансформатор. Оптимальный коэффициент трансформации по току

$$m = I / I_1 \quad (4.2)$$

подлежит определению.

В качестве примера рассмотрена плазменная нагрузка, сопротивление которой убывает с ростом температуры

$$R = R_0 (T_0 / T)^{3/2} \quad (4.3)$$

Для плотной плазмы, излучающей как черное тело, баланс энергии в нагрузке имеет вид

$$\lambda (T - T_0) + \int_0^t \sigma T^4 S dt = \frac{1}{m^2} \int_0^t R I^2 dt \quad (4.4)$$

где λ — полная теплоемкость плазмы, S — излучающая поверхность, σ — постоянная Стефана — Больцмана. Задачу определяют безразмерные параметры

$$B_1 = \frac{4\pi b D}{c^2 y_0 R_0} m^2, \quad B_2 = \frac{35 T_0^3 S L_1}{2 \lambda c^2 R_0} m^2, \quad B_3 = \frac{3 E_0}{\lambda T_0 n}, \quad \tau = \frac{c^2 R_0}{L_1 m^2} t$$

Результаты численного решения системы (2.1), (2.2), (3.1), (4.2) — (4.4) для $B_1 = 0.3 m^2$, $B_2 = 0.5 m^2$, $B_3 = 8.5$, $n = 20$ и $m = 2, 3, 4, 7$ приведены на фиг. 3. Точками показан энергетический выход для разных трансформаторов.

При больших коэффициентах трансформации ток в нагрузке мал, плазма сильно охлаждается излучением и вначале ее сопротивление растет. В этом случае ВВ дает заметный энергетический вклад лишь при достаточно большой мощности, т. е. при быстрой работе генератора. Так как потери энергии плотной плазмы сильно зависят от температуры ($\sim T^4$), то в рассматриваемом случае сопротивление плазмы меняется мало: в 2—2.5 раза. Наибольшая энергия в нагрузке выделяется при согласовании ее с генератором через определенный трансформатор. При возрастании m уменьшается ток в нагрузке, а вместе с ним и мощность нагрева. При малом m растет эффективное сопротивление нагрузки в первичной цепи, что ведет к быстрой релаксации магнитного потока. В рассмотренном случае оптимальное $m = 4$.

Поступила 25 X 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Сахаров А. Д. Взрывомагнитные генераторы. Усп. физ. н., 1966, т. 88, вып. 4.
2. Сахаров А. Д., Людаев Р. З., Смирнов Е. Н., Плющев Ю. И., Павловский А. И., Чернышев В. К., Феоктистова Е. А., Жаринов Е. И., Зысин А. Ю. Магнитная кумуляция. Докл. АН СССР, 1965, т. 165, № 1.
3. Биченков Е. И. Взрывные генераторы. Докл. АН СССР, 1967, т. 174, № 4.
4. Биченков Е. И., Войтенко А. Е., Демчук А. Ф., Дерибас А. А., Куликов Б. И., Нестирихин Ю. Е., Соболев О. П. Эксперименты со взрывно-магнитным генератором в лабораторных условиях. Докл. АН СССР, 1968, т. 183, № 6.
5. Herlach F., Knoepfel H. Megagauss fields generated in explosive-driven flux compression devices. Rev. Scient. Instr., 1965, vol. 36, No. 8.
6. Herlach F., Knoepfel H. Explosive techniques for applications in experimental physics. Rapporto Lab. Gas Ionizzati 65/17, 1965.
7. Knoepfel H., Kroegler H., Luppi R., Montfort J. E. van. The generation and switching of magnetic energies in megajoule range by explosive systems. Lab Gas Ionizzati, Euratom CNEN Frascati, 1968.
8. Knoepfel Heinz. Pulsed high magnetic fields. Amsterdam—London, North-Holland Publ. Com., 1970. (Рус. перев. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М., «Мир», 1972.)
9. Conger R. L. Large electric power pulsed by explosive magnetic-field compression. J. Appl. Phys., 1967, vol. 38, No. 5.