

ИССЛЕДОВАНИЕ КОАКСИАЛЬНОГО МГД-ГЕНЕРАТОРА ВЗРЫВНОГО ТИПА

Ю. А. Буренин, Г. А. Швецов

На простой электротехнической модели численно анализируются энергетические характеристики МГД-генератора взрывного типа с самовозбуждением, компрессия потока в котором осуществляется либо при сжатии проводящей цилиндрической оболочки, либо при подрыве внутреннего проводника, выполняющего роль обратного провода компрессионной системы. Значения вычисленных энергий сравниваются со значениями энергий, полученных в [1] для «линейного» генератора ($dL_1/dx = \text{const}$, L_1 — индуктивность канала генератора, x^* — изменяющийся размер канала).

Генератор состоит из двух коаксиально расположенных трубчатых проводников, замкнутых с одного конца через индуктивно-омическую нагрузку ($R_2 = \text{const}$, $L_2 = \text{const}$), а с другого — присоединенных к источнику начальной энергии. Источник создает в цепи генератора ток I_0 , после чего закорачивается. Выделим три режима работы генератора:

а) внешний и внутренний проводники неподвижны и выполняют роль электродов, вдоль которых движется проводящий «поршень». «Поршнем» может быть ионизированный поток газа, генерированный в ударной трубе [2] или поток продуктов детонации [3, 4]. Генератор «линейный», и его работа рассмотрена в [1];

б) движущимся «поршнем» является наружный проводник;

в) движущийся «поршень» — внутренний проводник. Уравнения, описывающие работу генератора для случая б):

$$\begin{aligned} m \cdot d^2 r^* / dt^{*2} &= 1/2 \cdot \mu_0 H^2 2\pi r^* l, \\ d(LI) / dt^* &= -R_2 I, \\ dr^* / dt^* &= v^*, \\ H &= 1/2\pi \cdot I / r^*, \end{aligned} \tag{1}$$

где m , r^* , v^* — масса, радиус и скорость оболочки; H — магнитное поле в генераторе; $L = L_1 + L_2$. После введения безразмерных переменных и параметров уравнения (1) можно представить в виде

$$\begin{aligned} dr/dt &= v \cdot (\beta - 1), \\ dv/dt &= -i^2 p_3 (\beta - 1) / (r \ln \beta), \\ di/dt &= -i(\beta - 1) / \beta \ln \beta (p_1 + v \cdot \beta / r) / (p_2 - 1 + \ln r / \ln \beta) \end{aligned} \tag{2}$$

с начальными условиями

$$r(0) = \beta, \quad v(0) = -1, \quad i(0) = 1, \tag{3}$$

где $i = I/I_0$; $v = v^* / |v_0^*|$; $t = t^* \cdot |v_0^*| / (d_2 - d_1)$; $r = r^* / d_1$; d^2 , d_1 — радиусы внешнего и внутреннего проводников; $\beta = d_2 / d_1$; $p_1 = R_2 / L$; $(0) = \frac{R_2 \cdot d_2 \cdot \ln \beta}{L_1 \cdot |v_0^*|}$; $p_2 = \frac{(L_1 + L_2)}{L_1}$; $p_3 = -\frac{\omega_0}{2E_0} = -\frac{\mu_0 I_0^2 l \ln \beta}{4\pi m v_0^{*2}}$

(l — длина канала генератора, ω_0 , E_0 — начальная магнитная и кинетическая энергии). Уравнения, описывающие работу генератора в режиме в), могут быть получены аналогично. Для генераторов (б), (в) полагалось $\beta = 3$.

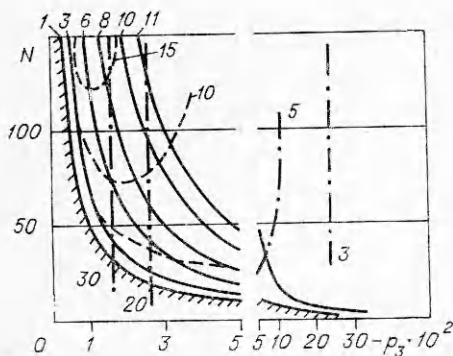


Рис. 1.

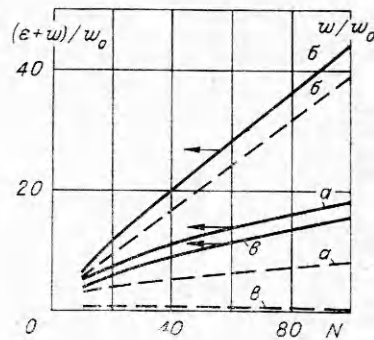


Рис. 2.

В результате численного решения задачи (2), (3) для момента полной перестройки индуктивности $L_1(t)=0$ были определены ϵ/ω_0 , w/ω_0 (ϵ — энергия, выделившаяся на активной составляющей нагрузки), а также в КПД преобразования кинетической энергии «поршня» в электромагнитную $\eta = \eta(p_1, p_2, p_3)$. Предполагалось, что потери потока обусловлены только рассеянием энергии на сопротивление нагрузки.

Отдельно на примере «линейного генератора» рассматривалось влияние распределенного сопротивления электродов канала (R_1) при постоянном значении электропроводности. Для этого решалось уравнение

$$x'' = 2x \cdot (x - p_1) / (p_2 - x)$$

с начальными условиями $x(0)=0$, $x'(0)=1$, $x''(0)=p_3$. Параметр p_1 зависел от $x=x^*/l$ следующим образом:

$$p_1(x) = (R_2 + R_1(x)/L'(0)) / (R_2 + R_1(0)/L'(0)) [1 - R_1/(R_1 + R_2)x].$$

Работа данного генератора определяется тремя независимыми параметрами из четырех: p_1 , p_2 , p_3 , η . Если задавать желаемые значения η , то можно получить связь между p_1 , p_2 , p_3 , при которой осуществляется работа генератора. При $\eta=1$ для генератора в режиме б) такая связь показана на рис. 1: $N = (L_1 + L_2)/L_1 = p_2/(p_2 - 1)$ — коэффициент перестройки индуктивности; $p_1 = (n - 1)$; n — номер кривой. Штриховые и штрихпунктирные линии — постоянные значения $\epsilon/\omega_0 = \text{const}$,

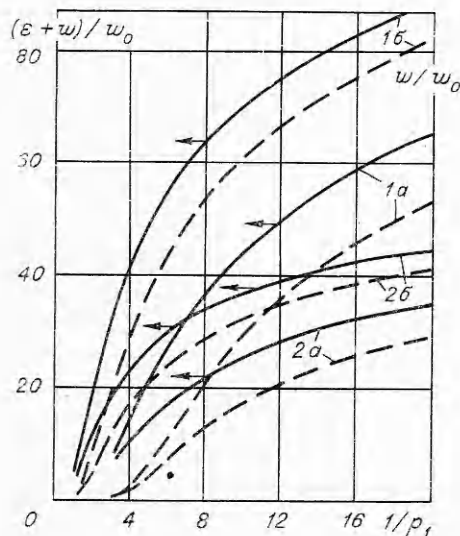


Рис. 3.

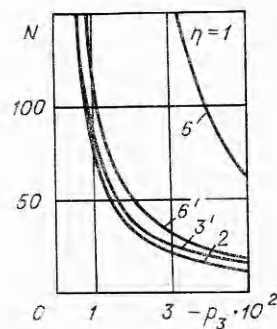


Рис. 4.

$(\varepsilon + \omega)/\omega_0 = \text{const}$ соответственно. Цифры у указанных кривых дают значения этих констант. При $p_1 \rightarrow 0$ кривые приближаются к предельной гиперболе, совпадающей с предельной гиперболой для «линейного» генератора: $N = \eta/(2 \cdot |p_3|)$. Особенности работы генератора, вытекающие из рис. 1, подробно обсуждались в [1] на примере «линейного» генератора.

Из закона сохранения энергии

$$(\varepsilon + \omega)/\omega_0 = 1 + (\eta/2 \cdot |p_3|) (1 - 1/N)$$

следует, что при одинаковых параметрах η , p_3 , N значения полной энергии (т. е. $(\varepsilon + \omega)/\omega_0$) будут одинаковыми для всех трех режимов работы генератора. При $N \geq 10$ и одинаковых значениях $\eta/|p_3|$ равенство полных энергий сохраняется независимо от значений p_1 и N .

Зависимости энергий при $p_1 = 0,25$; $p_3 = -0,01$ для трех режимов работы показаны на рис. 2. На рис. 3 для режимов а), б) приведены энергии при одинаковых N , η ($\eta = 1$; $N = 100$ для кривых 1, $N = 50$ для кривых 2).

Сравнение зависимости $p_3 = p_3(N)$, построенной при учете распределенного сопротивления электродов $R_1(t)$ «линейного» генератора с данными для случая $R_2 = \text{const} \gg R_1(t)$, приведено на рис. 4. Значения p_1 для кривых: 2 — $p_1 = 0,05$; 6 — $p_1 = 0,25$; 3' — $p_1(x=0) = 0,1$; $p_1(x=1) = 0,05$; 6' — $p_1(x=0) = 0,25$; $p_1(x=1) = 0,05$.

Кривые 3', 6' с одинаковым конечным значением $p_1 = (x=1) = 0,05$ близки к кривой 2, и величины энергий определяются в основном сопротивлением нагрузки.

Авторы признательны В. М. Титову за обсуждение результатов.

Институт гидродинамики СО АН СССР,
Новосибирск

Поступила в редакцию
16/VII 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Буренин, Г. А. Швецов. ФГВ, 1975, 11, 3.
2. В. А. Кириллин, В. А. Альтов и др. Докл. АН СССР, 1969, 185, 316.
3. М. Джонс, Ч. Мак-Киннон, В. Блэкмен.— В сб.: Прикладная магнитная гидродинамика, М., «Мир», 1965.
4. M. W. Burnham, S. J. Marshall. Proc. conference on megagauss magnetic field generation by explosives and related experiments. Frascati, Italy, 1965, Brussels, Eur. Atom, 1966, p. 367—386.

О СВЯЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАМЕНИ И СОСТАВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ БАЛЛИСТИЧНЫХ ПОРОХОВ

Е. Л. Давидчук, В. М. Мальцев, А. Д. Марголин,
Ю. М. Петров, О. Б. Рябиков

В настоящее время при расчете состава и температуры продуктов горения порохов на основе нитроглицерина и нитроклетчатки считают, что все реакции в пламенах порохов протекают с большой скоростью, а состав продуктов горения равновесный. Такие расчеты согласуются с экспериментальными результатами для горения порохов при высоких давлениях.