

Автор выражает глубокую благодарность В. И. Яковлеву за постановку задачи и обсуждения, В. И. Хоничеву за обсуждения и Б. Г. Кузнецову за критические замечания.

Поступила 14 XI 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Rubinov S. I., Keller Joseph B. The transvers force on a spinning sphere moving in a viscous fluid.— J. Fluid Mech., 1961, vol. 11, pt 3.
2. Ranger K. B. Slow viscous flow past a rotating sphere.— Proc. of the Cambridge Phil. Soc. (math. and phys. sciences), 1971, vol. 69, pt 2.
3. Sastry V. U. K., Rama Rao K. V. Hydromagnetic Stokes flow past a rotating sphere.— J. Fluid Mech., 1978, vol. 88, pt 4.
4. Антимиров М. Я. Точное решение задачи о стационарном МГД-течении при медленном вращении шара.— МГ, 1979, № 1.
5. Яковлев В. И. Вихревые течения в несжимаемой проводящей жидкости, возникающие под действием переменного электромагнитного поля.— ПМТФ, 1976, № 5.
6. Хоничев В. И., Яковлев В. И. Движение шара в безграничной проводящей жидкости, вызванное переменным магнитным диполем, расположенным внутри шара.— ПМТФ, 1978, № 6.
7. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. Ч. 2. М.: Физматгиз, 1963.

УДК 621.37.373

### ВЫСОКОИНДУКТИВНЫЕ ВЗРЫВОМАГНИТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С БОЛЬШИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

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

Спиральные взрывомагнитные генераторы (ВМГ) являются источниками мощных импульсов электромагнитной энергии [1—3]. Одной из важнейших характеристик, определяющих практическую реализацию спиралей, является величина коэффициента усиления энергии ( $K_E$ ). От усилительных способностей ВМГ непосредственно зависят размеры источника первичной энергии. Поскольку удельная энергия, обеспечиваемая взрывными генераторами тока, примерно на три порядка выше удельной энергии конденсаторных устройств, применяемых обычно для запитки ВМГ, то объем источника начальной энергии приближается к объему ВМГ только в случае, если коэффициент усиления энергии генератора достигает величины  $\sim 10^3$ .

Существуют две возможности повышения  $K_E$  взрывомагнитных устройств. Одна из них заключается в создании каскадных систем, представляющих собой несколько ВМГ, соединенных с помощью узлов связи (воздушных трансформаторов) и работающих последовательно друг на друга [1, 4]. В этом случае коэффициент усиления энергии всей системы равен произведению  $K_E$  каждого ВМГ и может достигать сколько угодно больших значений. Однако каскадные генераторы являются сложными и дорогими устройствами. Кроме того, наличие узлов связи значительно увеличивает габариты и вес системы (например, размеры воздушного трансформатора сравнимы с размерами самого ВМГ). Другая возможность получения высоких значений  $K_E$  состоит в увеличении отношения  $\lambda = L_0/L_f$  (здесь  $L_0$  — начальная индуктивность ВМГ,  $L_f$  — индуктивность нагрузки) за счет повышения  $L_0$ . Конструкция генератора при этом практически не усложняется. Именно спиралам с большой начальной индуктивностью посвящена данная работа.

1. Электрические поля при работе высокоиндуктивных спиралей. Как известно, вследствие высокой скорости нарастания магнитного поля при быстром сжатии магнитного потока в объеме генераторов развиваются электрические поля, способные привести к возникновению пробоев и

снижению энергии в нагрузке. В предельном случае максимальное напряжение в спиральных генераторах стремится к величине  $LdI/dt \approx IdL/dt = -(\Phi/L)dL/dt$ , где  $L$  — индуктивность,  $I$  — ток,  $\Phi$  — магнитный поток. Особенно большие напряжения развиваются в высокоиндуктивных спиралах, так как они запитываются большим магнитным потоком (при заданном потоке в нагрузке величина начального потока  $\Phi_0$  должна быть тем выше, чем больше отношение  $L_0/L_f$ ). Напряжения в ВМГ в зависимости от начальной энергии, закона изменения индуктивности и размеров системы могут достигать десятков и даже сотен киловольт. Этим и объясняется тот факт, что высокоиндуктивные спирали с неизолированными витками работают крайне нестабильно (см., например, [2]).

Очевидно, что при заданных параметрах спирального генератора рабочее напряжение в его объеме будет иметь минимальное значение в том случае, если в течение всего времени деформации величина  $LdI/dt$  остается постоянной. Это означает, что закон изменения индуктивности спирали должен выбираться с учетом потерь потока.

Ток  $I$ , протекающий в цепи ВМГ, определяется дифференциальным уравнением

$$d(IL)/dt + R_{\text{эфф}}I = 0,$$

где  $R_{\text{эфф}}$  — эффективное сопротивление, определяющее все потери в контуре. Решение этого уравнения относительно потока  $\Phi = IL$  имеет вид

$$\Phi(t) = \Phi_0 \exp\left(-\int_0^t \frac{R_{\text{эфф}}}{L} dt\right).$$

Отсюда коэффициент сохранения потока

$$\eta(t) = \exp\left(-\int_0^t \frac{R_{\text{эфф}}}{L} dt\right).$$

Из экспериментов следует, что в высокоиндуктивных спиралах, работающих без значительных потерь потока (без пробоев), отношение  $\alpha = R_{\text{эфф}}/L$  в течение всего времени вывода витков остается практически постоянным. Приняв  $\alpha = \text{const}$ , можно записать

$$(1.1) \quad I(t) = \Phi_0 e^{-\alpha t}/L(t).$$

Продифференцировав (1.1) по  $t$ , получим

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\Phi_0 e^{-\alpha t} \left[ \frac{dL}{dt} + \alpha L(t) \right]}{L^2(t)}.$$

Умножив это выражение на  $L$  и приняв  $LdI/dt \equiv \mathcal{E} = \text{const}$ , имеем

$$(1.2) \quad \frac{dL}{dt} + \left( \frac{\mathcal{E}}{\Phi_0} e^{\alpha t} + \alpha \right) L = 0.$$

Решение уравнения (1.2) имеет вид

$$(1.3) \quad L(t) = L_0 \exp [(\mathcal{E}/\Phi_0 \alpha)(1 - e^{\alpha t}) - \alpha t].$$

Выражение (1.3) является законом вывода индуктивности спирального генератора, в котором максимальное напряжение между конусом центральной трубы и витками спирали в течение всего времени работы постоянно.

2. Моделирование спиральных ВМГ. При исследовании и разработке взрывных генераторов тока вопросы моделирования занимают важное

Таблица 1

Номер секции	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Шаг витков, мм	1	1,12	1,25	1,5	1,75	2	2,5	3	3,5	4,5	6	8	11	16	24
Число заходов	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	4	6	8	12
Диаметр жилы провода, мм	0,62	0,72	0,95	1,05	1,25	1,5	0,95	1,05	1,25	1,05	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

место. Выяснение физических процессов, протекающих в генераторах, наиболее целесообразно проводить не на больших конструкциях, а на моделях, так как это резко сокращает время самого исследования и снижает материальные затраты.

Обозначим индуктивность, сопротивление и время работы модели и природы соответственно через  $L_1, R_1, t_1$  и  $L_2, R_2, t_2$ . Считаем, что все линейные размеры модели по сравнению с натурой уменьшены в  $n$  раз. Тогда для любого момента времени  $t_2 = nt_1$  выполняется равенство  $L_2 = nL_1$  и коэффициенты сохранения потока запишутся

$$\eta_1 = \exp\left(-\int_0^t \frac{R_1}{L_1} dt\right), \quad \eta_2 = \exp\left(-\int_0^{t_2} \frac{R_2}{L_2} dt\right).$$

Если в любой момент времени  $t_2 = nt_1$  выполняется равенство  $R_2 = R_1$ , то

$$\int_0^t \frac{R_1}{L_1} dt = \int_0^{nt_1} \frac{R_2}{nL_1} dt, \quad \eta_1 = \eta_2.$$

Однако подобное увеличение размеров генератора в  $n$  раз вызывает уменьшение эквивалентной частоты  $\omega = (2/I)dI/dt$  также в  $n$  раз, что приводит к увеличению глубины скин-слоя в  $\sqrt{n}$  раз и уменьшению активного сопротивления цепи в  $\sqrt{n}$  раз. Если причиной потерь потока в ВМГ является только конечная проводимость контура, то

$$(2.1) \quad R_2 = R_1/\sqrt{n}, \quad \eta_2 = \eta_1^{1/\sqrt{n}}.$$

Это соотношение хорошо выполняется для аксиально-симметричных систем. В спиральных ВМГ заметную роль могут играть геометрические

Таблица 2

Диаметр спирали, см	Номер опыта	$L_0$ , мкГ	$E_0$ , кДж	$L_f$ , мкГ	$I_f$ , кА	$E_f$ , кДж	$\eta$	$K_E$
4	1	340	0,014	0,14	160	1,8	0,22	130
	2	340	0,025	0,14	210	3,0	0,21	120
	3	340	0,015	0,14	150	1,6	0,21	110
	4	340	0,014	0,14	150	1,6	0,22	120
8	5	650	0,035	0,27	260	9,0	0,33	260
	6	650	0,17	0,27	550	41	0,32	240
	7	650	0,21	0,27	620	52	0,32	250
16	8	1300	0,25	0,55	660	120	0,46	490
	9	1300	1,2	0,55	1450	570	0,46	480
	10	1300	1,8	0,55	1800	900	0,47	500

Таблица 3

Номер секции	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Длина секции, мм	120	60	60	120	60	60	120	120	120	120	120	120
Шаг витков, мм	6	7	8	10	12	14	18	24	32	48	72	96
Число заходов	1	1	1	2	2	2	3	4	6	8	12	16
Диаметр жилы провода, мм	4,5	5	5	3,3	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5

отсекания потока. Ввиду сложности расчетов количественная зависимость сопротивления, обусловленного отсеканиями от размеров спирали, неизвестна и может быть получена из экспериментов.

Моделирование спиральных ВМГ исследовалось на генераторах с внутренним диаметром спирали 4; 8 и 16 см. Линейные размеры этих ВМГ строго подобны. Спираль диаметром 8 см выбрана за основу, а две другие модели конструировались путем уменьшения или увеличения всех размеров в 2 раза. ВМГ диаметром 8 см состоит из 15 секций длиной по 4 см. Распределение индуктивности  $L(t)$  удовлетворяет соотношению (1.3). Витки намотаны медным круглым проводом с высокой электрической прочностью. Снаружи они залиты эпоксидным компаундом. Параметры спирали приведены в табл. 1. Центральная алюминиевая труба имеет наружный диаметр 4 см, внутренний — 3 см, масса взрывчатого вещества в трубе 0,7 кг.

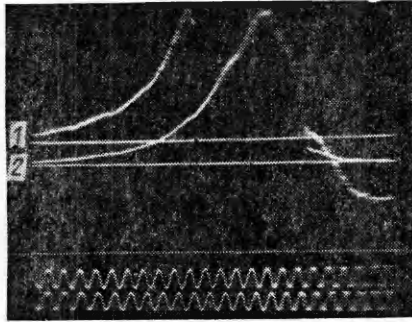
С каждой моделью проведено по 3—4 опыта. Запитка спиралей начальной энергией проводилась от конденсаторных источников. Результаты опытов сведены в табл. 2, где  $E_0$ ,  $E_f$  — начальная и конечная энергия ВМГ,  $I_f$  — ток в нагрузке.

Типичная осциллограмма производной тока, зарегистрированная в опыте 10, приведена на фиг. 1 (метки времени через 4 мкс, луч 1 : 1 см по вертикали —  $1,7 \cdot 10^{10}$  А/с, луч 2 : 1 см —  $3,5 \cdot 10^{10}$  А/с), а на фиг. 2 представлена зависимость тока от времени для опыта 10.

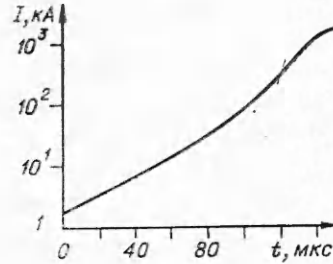
Из табл. 2 следует, что коэффициенты, характеризующие эффективность срабатывания спиралей ( $\eta$ ,  $K_E$ ), в сильной степени зависят от размеров системы: чем больше габариты генератора, тем эффективнее он работает. Особенно наглядно это видно из представленных на фиг. 3 кривых  $\eta(t)$ , которые получены путем усреднения в каждый момент времени значений  $\eta$  по всем опытам для данной модели (кривые 1—3 — диаметр спирали 4; 8 и 16 см соответственно). Сравнение значений  $\eta_1$  и  $\eta_2$  для двух любых моделей в момент времени  $t_2 = nt_1$  показывает, что они достаточно хорошо удовлетворяют соотношению (2.1). Этот факт означает: либо в спиральных потерях на отсеканиях пренебрежительно малы по сравнению с омическими, либо сопротивление, обусловленное ими, при увеличении всех линейных размеров системы в  $n$  раз уменьшается в  $\sim \sqrt{n}$  раз. Из соотношения (2.1) и выражения  $K_E = \lambda \eta^2$  можно найти  $K_{2E} = K_{1E}^1 \sqrt{n} \lambda^{1-1/\sqrt{n}}$ . Эта закономерность изменения коэффициента усиления энергии спиралей при вариации их размеров хорошо подтверждается экспериментами.

Таблица 4

Номер опыта	$L_0$ , мкГ	$E_0$ , кДж	$L_f$ , мкГ	$R_f \cdot 10^{-4}$ , Ом	$I_f$ , МА	$E_M$ , МДж	$E_T$ , МДж	$E_f$ , МДж	$K_E$
1	305	14	0,34	10	4,1	2,9	0,2	3,1	220
2	305	16	0,34	3,2—24	4,5	3,4	0,6	4,0	250
3	305	24	0,34	3,0—10	5,4	4,9	0,5	5,4	225
4	285	28	0,34	3,2—26	4,8	3,9	0,7	4,6	165
5	285	16	0,34	10—19	3,7	2,3	0,4	2,7	170



Ф и г. 1

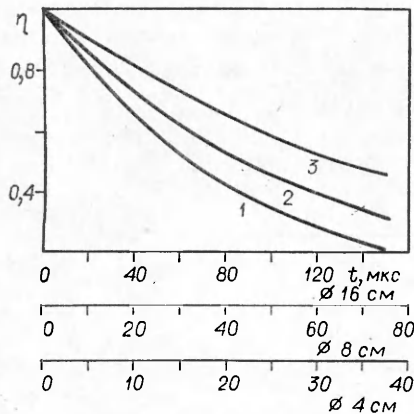


Ф и г. 2

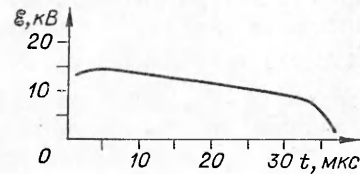
На фиг. 4—6 для опытов 2,7 и 10 приведены графики  $\mathcal{E}(t)$ . Опыты проведены при одинаковых начальных условиях — значения  $E_0$  для спиралей отличаются друг от друга примерно в  $n^3$  раз. При выводе витков первых секций значения  $\mathcal{E}$  для спиралей диаметрами 4; 8 и 16 см относятся как 1 : 2 : 4, но в дальнейшем эти соотношения нарушаются. Для ВМГ диаметром 8 см  $\mathcal{E}$  в течение почти всего времени работы остается постоянной (спад  $\mathcal{E}$  на последних двух секциях связан с выходом вершины конуса трубы из объема спирали), что свидетельствует о хорошем совпадении реальной кривой  $L(t)$  с расчетной. Для спиралей диаметрами 4 и 16 см зависимость  $\mathcal{E}(t) \neq \text{const}$ , поэтому эти генераторы, созданные путем изменения линейных размеров ВМГ диаметром 8 см в 2 раза, не являются оптимальными с точки зрения снижения рабочих напряжений. Для этих спиралей необходимо провести расчет  $L(t)$  с учетом выражения (2.1). Так, если в опыте 10 значение  $\mathcal{E}$  достигает 80 кВ, то в случае оптимального распределения  $L(t)$   $\mathcal{E}$  не будет превышать 70 кВ, т. е. при тех же начальных условиях рабочее напряжение будет снижено на  $\sim 15\%$ .

**3. Испытание генератора диаметром 24 см.** Конструктивные параметры спиральной катушки диаметром 24 см приведены в табл. 3.

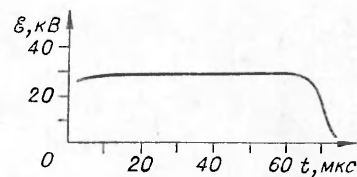
Секции намотаны круглым медным проводом. Распределение  $L(t)$  рассчитывалось по формуле (1.3). В генераторе использовались медные центральные трубы с наружным диаметром 110 мм и толщиной стенки 10 мм, а также алюминиевые трубы с наружным диаметром 130 мм и толщиной стенки 20 мм. Масса взрывчатого вещества в ВМГ 13 кг. Нагрузка генератора во всех опытах имела постоянную индуктивность 0,34 мкГ,



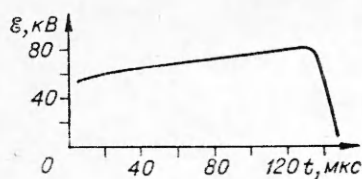
Ф и г. 3



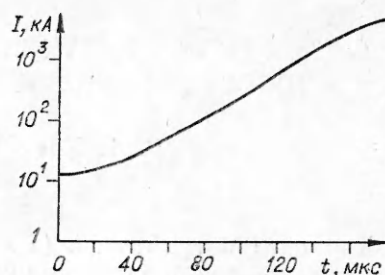
Ф и г. 4



Ф и г. 5



Ф и г. 6



Ф и г. 7

начальное сопротивление варьировалось от  $3 \cdot 10^{-4}$  до  $10^{-3}$  Ом, а в процессе нарастания тока возрастало до  $(1-2,6) \cdot 10^{-3}$  Ом.

Результаты испытаний генераторов при различных начальных условиях приведены в табл. 4, где  $R_f$  — сопротивление нагрузки;  $E_m = I^2 L_f / 2$  — магнитная энергия в нагрузке;  $E_T = \int_0^t I^2(t) R_f(t) dt$  — тепловая энергия в нагрузке;  $E_f = E_m + E_T$ ;  $K_E = E_f / E_0$ .

Из табл. 4 видно, что спираль диаметром 24 см может обеспечивать конечную энергию до  $\sim 5,5$  МДж, имея при этом стабильную величину коэффициента усиления энергии (220).

На фиг. 7 приведена зависимость  $I(t)$  для опыта 3. Максимальное напряжение на входе нагрузки в этом опыте 45 кВ, напряжение в контуре спирали достигает 60 кВ. Из результатов опытов следует также, что уменьшение проводимости центральной трубы приводит к некоторому снижению  $K_E$  генератора.

4. Спиральный ВМГ с  $K_E \sim 10^3$ . Проведена серия из 5 опытов с ВМГ диаметром 8 см и длиной спирали 72 см. Спиральная катушка с начальной индуктивностью 490 мкГ имеет шаг первых витков 1,25 мм, конечных — 48 мм. При запитке начальной энергией 100—130 Дж в нагрузке индуктивностью 0,03 мкГ генератор стабильно обеспечивал ток 2,8—3,2 МА. Коэффициент усиления энергии в опытах составил 1000—1300.

Как показали эксперименты, высокоиндуктивные спиральные ВМГ при оптимальном распределении витков вдоль оси и изолированном контуре могут усиливать начальную энергию в 1000 и более раз. Величина удельной энергии (отношение конечной энергии в нагрузке к начальному объему ВМГ) равна 30—60 Дж/см<sup>3</sup>, а коэффициент преобразования энергии взрывчатого вещества в энергию нагрузки составляет 4—8%. Магнитное поле под витками спиралей достигает величины 1 Мэ.

Учитывая сказанное, а также простоту и дешевизну конструкции, можно заключить, что высокоиндуктивные спиральные генераторы являются удобными и надежными источниками импульсов электромагнитной энергии.

Поступила 10 X 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
2. Shearer J. W. et al. Explosive-driven magnetic field compression generators — J. Appl. Phys., 1968, vol. 39, p. 2102.
3. Crawford J. C., Damerow R. A. Explosively driven high-energy generators.— J. Appl. Phys., 1968, vol. 39, p. 5224.
4. Cummings D. B. Cascading explosive generators with autotransformer coupling.— J. Appl. Phys., 1969, vol. 40, p. 4145.