

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ДВМГ МАЛОГО КЛАССА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПЛОЗИИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЙНЕРОВ

POSSIBILITIES OF APPLICATION OF SMALL CLASS DEMG TO STUDY IMPLOSION OF SOLID LINERS

*Е. И. Бочков, Б. Е. Гриневич, П. В. Дудай, Б. Т. Егорычев,
А. В. Ивановский, К. Н. Климушкин, А. И. Краев, В. Б. Куделькин,
В. И. Мамышев, Ю. И. Матцев, Е. В. Шаповалов*

*E. I. Bochkov, B. E. Grinevich, P. V. Duday, B. T. Egorychev, A. V. Ivanovsky, K. N. Klimushkin, A. I. Krayev,
V. B. Kudel'kin, V. I. Mamyshev, Yu. I. Mattsev, E. V. Shapovalov*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия
Russian Federal Nuclear Center – VNIIEF

Доклад посвящен исследованию возможностей достижения высоких скоростей при разгоне алюминиевого лайнера с помощью дискового взрывомагнитного генератора (ДВМГ) диаметром 250 мм. Рассмотрен ДВМГ с плоскими дисковыми элементами, снабженный фольговым размыкателем тока. Использован малоиндуктивный электро-взрывной размыкатель тока, состоящий из ряда полос медной фольги. Показаны преимущества применения малоиндуктивного размыкателя тока, как в плане получения высоких скоростей лайнера, так и технологические, упрощающие процесс сборки устройства.

The paper will explore the possibilities of achieving high velocities at acceleration of an aluminum liner with the use of a disk explosive magnetic generator (DEMG) 250 mm in diameter. The DEMG with flat disk elements and a foil current opening switch will be described. A low-inductive corrugated current opening switch consisting of a line of copper foil strips has been used. Both the advantages of application of the corrugated current opening switch for obtaining high liner velocities and the technological advantages simplifying the assembly process have been demonstrated.

Введение

Одним из направлений работы электрофизического отделения (ЭФО) ВНИИЭФ является создание одноразовых взрывомагнитных генераторов – ВМГ, работающих на принципе преобразования химической энергии взрывчатого вещества в энергию магнитного поля [1, 2].

Электрофизическое отделение достигло значительных успехов в разработке систем импульсной мощности для разгона лайнеров с использованием многоэлементного дискового взрывомагнитного генератора (ДВМГ) семейства «ПОТОК» диаметром 40 см с электровзрывным медным фольговым размыкателем тока (ФРТ).

Лайнерные эксперименты с таким устройством проводились при максимальных токах до 35 МА [3-5].

Однако все существующие системы импульсной мощности на основе ДВМГ обладают определенными недостатками:

- сложная технология изготовления;
- большая масса ВВ;
- высокая стоимость устройства.

В докладе рассмотрен источник тока на основе недорогого, но достаточно мощного ДВМГ с плоскими дисковыми модулями, снабженный малоиндуктивным электровзрывным фольговым размыкателем тока и предназначенный для исследования возможностей достижения высоких скоростей при разгоне алюминиевых лайнеров.

1. Определение выходных параметров ДВМГ малого класса на моделях

Рассмотрим дисковый ВМГ малого класса с наименьшим на данный момент количеством ВВ, а именно ДВМГ $\varnothing 250$ мм с плоскими дисковыми модулями [6,7].

В экспериментах по определению выходных параметров ДВМГ $\varnothing 250$ мм использовались источники тока на базе двух- и трех – модульных

генераторов [8]. Источник тока (см. рис. 1) состоит из спирального генератора Ø100 мм (1), узла отключения (2), 2-х модульного ДВМГ Ø250 мм (3) и нагрузки (4).

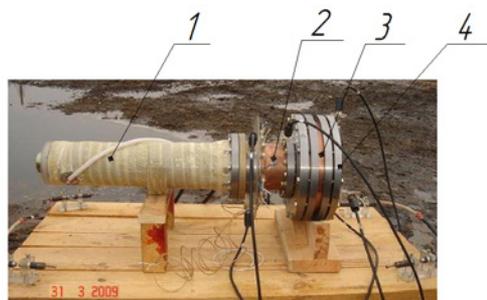


Рис. 1. Общий вид источника тока

Экспериментальные зависимости производной тока и тока ДВМГ, полученные в одном из экспериментов, приведены совместно с расчетными кривыми на рис. 2.

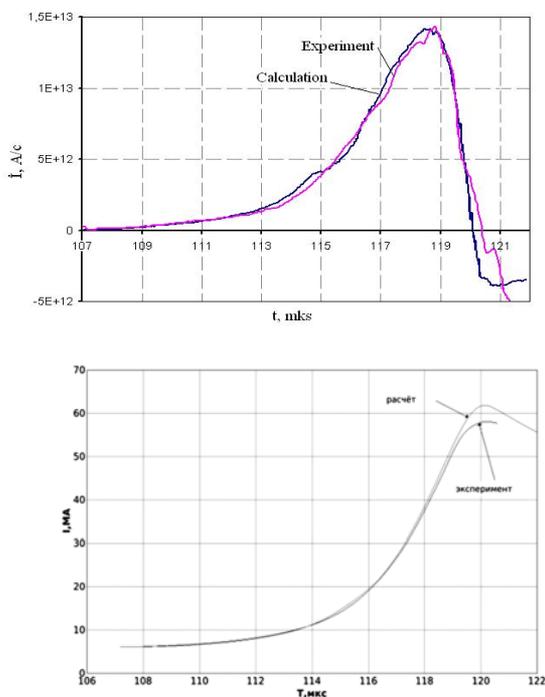


Рис. 2. Производная тока и ток двухмодульного дискового ВМГ

В эксперименте с двух модульным дисковым ВМГ Ø250 мм при начальном токе ~6,1 МА в нагрузке индуктивностью ~0,53 нГ получены следующие выходные характеристики:

- максимальный ток равен 58,5 МА;
- максимальная производная тока составила $1,4 \cdot 10^{13}$ А/с;

– коэффициент увеличения тока составил 9,5 раза;

– характерное время нарастания тока ~4 мкс.

Из рис. 2 видно, что расчетная зависимость производной тока от времени и аналогичная зависимость, полученная экспериментально, практически совпадают.

Для дополнительной проверки расчетов проведен опыт с тремя дисками и двумя медными вставками в полости сжатия потока (см. рис. 3). В нагрузке индуктивностью 1,7 нГн дисковый ВМГ сформировал импульс тока амплитудой 36,6 МА с максимальной скоростью нарастания $6,8 \cdot 10^{12}$ А/с и характерным временем $\tau_e \sim 4$ мкс при начальном токе 5,1 МА.

Также как и в предыдущих экспериментах, полученные данные хорошо согласуются с расчетом. Экспериментальная зависимость производной тока ДВМГ совместно с расчетной кривой приведены на рис. 4.



Рис. 3. Общий вид трехмодульного ДВМГ Ø 250 мм

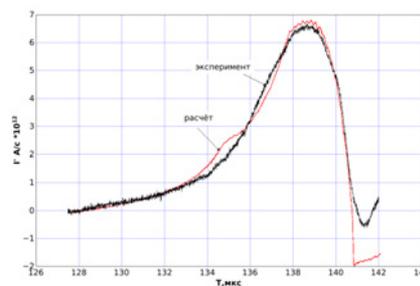


Рис. 4. Производная тока трехмодульного ДВМГ

Были проведены расчеты работы трехмодульного дискового ВМГ при начальном токе $I_0 = 6,5$ МА и индуктивности нагрузки – 1,2 нГн. Графики производной тока и тока генератора приведены на рис. 5.

Максимальный ток в расчете – 65,5 МА, максимальная скорость нарастания тока в нагрузке $1,4 \cdot 10^{13}$ А/с, максимальная магнитная энергия – 2,6 МДж, т.е. при массе ВВ в дисках – 2,7 кг величина произведенной магнитной энергии на 1 кг массы ВВ составит ~ 0,95 МДж/кг.

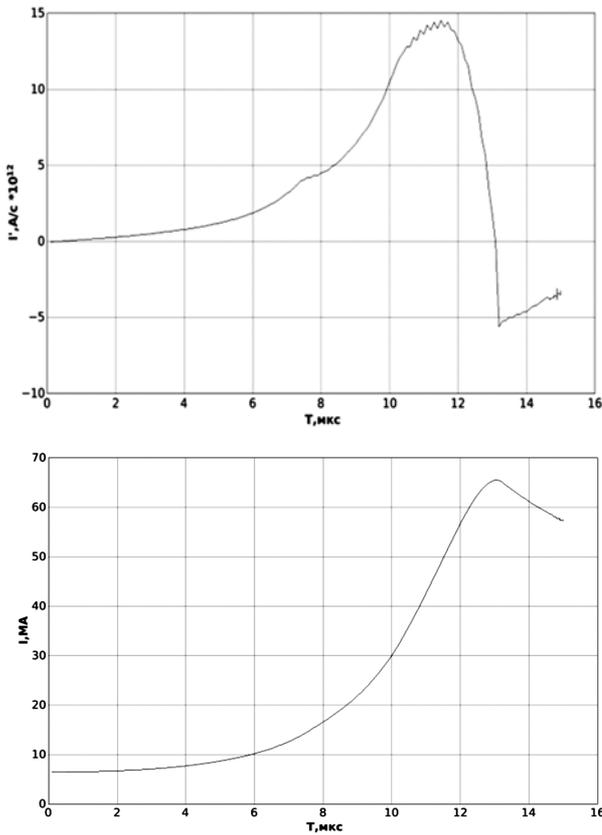


Рис. 5 Производная тока и ток дискового ВМГ

Максимальный ток в расчете – 65,5МА, максимальная скорость нарастания тока в нагрузке $1,4 \cdot 10^{13}$ А/с, максимальная магнитная энергия – 2,6 МДж, т.е. при массе ВВ в дисках – 2,7 кг величина произведенной магнитной энергии на 1 кг массы ВВ составит $\sim 0,95$ МДж/кг.

Таким образом, результаты проведенных опытов показали, что в ДВМГ с плоскими дисковыми модулями \varnothing 250 мм возможно усиление тока в ~ 10 раз – до значения, превышающего 60 МА.

Совпадение расчётных данных с результатами экспериментов на моделях позволило провести расчет источника тока на основе 30-модульного ДВМГ \varnothing 250 мм с малоиндуктивным электро-взрывным обострителем тока.

2. Расчеты источника тока

А. Модель вычислений

На рис. 6 показана схема источника тока для имплозии Z-пинча, а также приведена эквивалентная электрическая схема. Здесь L_g, R_g – индуктивность и сопротивление ДВМГ; L_s, L_n – индуктивность подводющих линий в цепи генератора и пинча; L_p – индуктивность лайнерного узла;

I_g, I_p – токи в цепи генератора и пинча; К – взрывной ключ; r_p, l_p – радиус и длина лайнера; δ_f, r_f – толщина и радиус фольги.

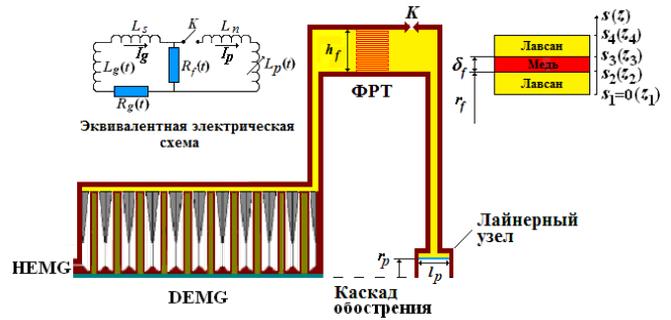


Рис. 6. Схема источника тока на основе ДВМГ для имплозии Z-пинча

Малоиндуктивный электровзрывной фольговый размыкатель тока (МЭВРТ) моделируется системой уравнения магнитной гидродинамики в рамках одномерного приближения. В лагранжевых координатах $(s(z) = \int_0^z \rho(z, t) \cdot dz)$ система имеет следующий вид (1):

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\rho} \right) = \frac{\partial u_z}{\partial s}, & \frac{\partial z}{\partial t} = u_z, \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial s} - j_y \frac{B_x}{\rho}, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{B_x}{\rho} \right) = \frac{\partial E'_y}{\partial s}, & E'_y = \frac{j_y}{\sigma}, & j_y = \frac{\rho}{\mu_0} \frac{\partial B_x}{\partial s}, \\ \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + p_T \frac{\partial u_z}{\partial s} = \frac{j_y E'_y}{\rho}, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ, u_z – плотность и массовая скорость; p – давление; ε_T, p_T – тепловые части удельной энергии и давления; B_x, E'_y – радиальный компонент магнитного и продольный компонент электрического поля в системе отсчёта, связанной с плазмой; j_y – плотность тока, σ – проводимость среды.

Система уравнений (1) решается в области $0 < s < s_4$ ($z_4 = hf/n$ см. рис. 6, n – число зубьев). В силу симметрии поверхности $s = 0$ и $s = s_4$, считаются жёсткими стенками.

В области $s_1 \leq s \leq s_2$ уравнения дополняются УРС и проводимостью меди (2). В области диэлектрика ($0 \leq s < s_1$ и $s_2 < s \leq s_3$) проводимость равна нулю и используется УРС в форме Ми-Грюнайзена (3)

$$\begin{cases} p = p_X + p_T, & \varepsilon = \varepsilon_X + \varepsilon_T \\ p_X = \rho_0 \cdot c_0^2 \cdot (\rho^n / \rho_0^n - 1) / n, & p_T = \Gamma \cdot \rho \cdot \varepsilon_T. \end{cases} \quad (2)$$

В качестве диэлектрика используется лавсан: плотность $\rho_0 = 1,3 \text{ г/см}^3$, скорость звука $c_0 = 0,3 \text{ см/мкс}$, коэффициент Грюнайзена $\Gamma = 2$, параметр $n = 4$ (4).

Уравнение для магнитного поля решается в области $s_1 < s < s_2$. Граничные условия определяются через токи в цепи генератора I_g и нагрузки I_p (см. рис. 6).

$$B_x(s = s_1) = -\frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_g}{r_f}, \quad B_x(s = s_2) = -\frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_p}{r_f}. \quad (3)$$

Ток I_g определяется из уравнения для цепи генератора:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \left[L_g(t) + L_s + \frac{\mu_0 \cdot l_f}{2\pi} \cdot \frac{z(s_2) - z_2(t=0)}{r_f} \right] \cdot I_g \right\} + R_g(t) \cdot I_g + E'_y(s_2) \cdot l_f = 0, \quad (4)$$

$$I_g|_{t=0} = I_0$$

Ток I_p определяется из уравнения для цепи пинча:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \left[L_p(t) + L_n + \frac{\mu_0 \cdot l_f}{2\pi} \cdot \frac{z_3(t=0) - z_3(s_3)}{r_f} \right] \cdot I_p \right\} + R_s(t) \cdot I_p - E'_y(s_3) \cdot l_f = 0, \quad (5)$$

$$I_p|_{t=0} = 0$$

Здесь $R_s(t)$ – сопротивление взрывного ключа К,

$$L_p(t) = \frac{\mu_0 \cdot l_p}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{r_p(t=0)}{r_p(t)} \right), \quad l_f - \text{длина фольги.}$$

Система (1)–(5) замыкается уравнениями, описывающими движение лайнера:

$$\begin{cases} \frac{dr_p}{dt} = \mathfrak{V}_p, \\ \frac{d\mathfrak{V}_p}{dt} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I_p^2 \cdot l_p}{m_p \cdot r_p}, \end{cases} \quad (6)$$

$$r_p|_{t=0} = r_p^0, \quad \mathfrak{V}_p|_{t=0} = 0$$

Здесь \mathfrak{V}_p и m_p – скорость и масса лайнера.

В. Результаты расчетов

Проведены расчеты для 30-ти модульного ДВМГ $\varnothing 250 \text{ мм}$. Зависимости индуктивности и сопротивления генератора от времени представлены на рисунках 7, 8. Индуктивности подводных линий: $L_s = 6,45 \text{ нГн}$, $L_n = 3,03 \text{ нГн}$. Начальный ток запитки ДВМГ равен $I_0 = 6,5 \text{ МА}$, интеграл действия тока, текущего через МЭВРТ в начальный момент, составлял $6 \cdot 10^8 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$.

Параметры фольги: $\delta_f = 200 \text{ мкм}$,
 $l_f = 40 \text{ см}$; $r_f = w_f / 2\pi = 10,5 \text{ см}$, здесь $w_f = 66 \text{ см}$ – ширина фольги, $h_f = 6 \text{ см}$.

Параметры лайнера: $r_p^0 = 3 \text{ см}$, $m_p = 1 \text{ г}$,
 $l_p = 1 \text{ см}$.

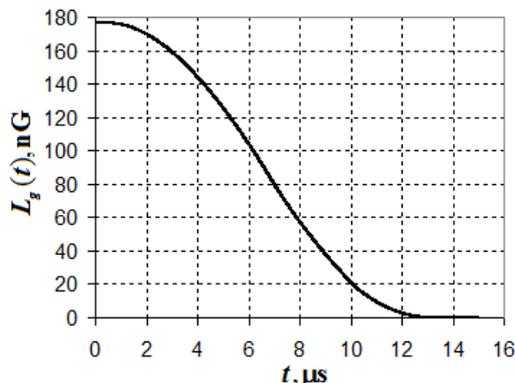


Рис. 7. Расчетная зависимость индуктивности 30-ти модульного ДВМГ

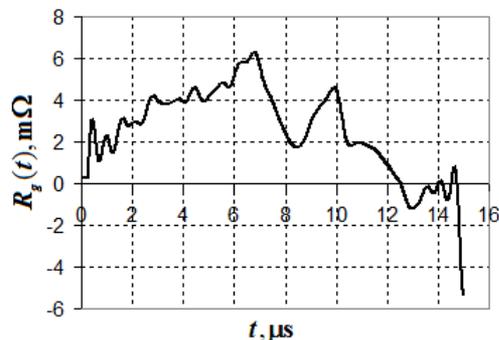


Рис. 8. Расчетная зависимость сопротивления 30-ти модульного ДВМГ

Взрывной ключ К замыкает цепь в момент времени $t_0 = 9,8 \text{ мкс}$, зависимость сопротивления ключа от времени после замыкания приведена в табл. 1, до момента замыкания полагалось, что $R_s = \infty$.

Таблица 1

Зависимость сопротивления взрывного ключа от времени

$t-t_0$, мкс	0	0,1696	0,188	0,214	0,241	0,259
	0,2946	0,3214	0,357	0,402	0,455	0,5
	0,5625	0,6339	0,714	0,804	0,893	0,973
	1,0714	1,1696	1,268	1,384	1,509	1,652
	1,8036	1,9464	2,17	2,357		
R_s , мОм	100	30	26,77	24	21,92	19,38
	16,85	15	13,38	11,54	9,46	8,08
	7,15	6,23	5,08	4,38	3,46	2,77
	2,31	2,08	1,62	1,38	1,38	1,62
	1,15	1,15	1,15	1,15		

На рис. 9 представлены временные зависимости токов в цепи генератора и пинча, напряжения на МЭВРТ – V_f , радиуса и скорости лайнера, полученные в результате численного моделирования. Расчеты велись до момента времени, когда $r_p = 1$ см.

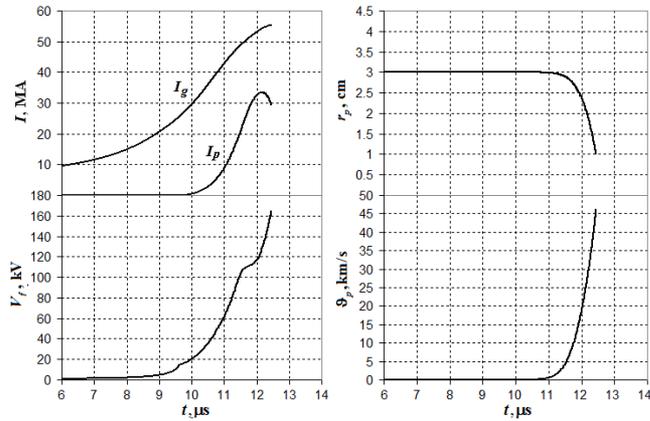


Рис. 9. Результаты расчета

Из результатов расчетов мы видим, что скорость, достигаемая лайнером, равна 46 км/с при максимальном токе через пинч 33 МА, при этом напряжение на МЭВРТ не превышает 165 кВ, время нарастания фронта – $\tau_{imp} = 2,65$ мкс.

С целью проверки устойчивости, полученных результатов, проведены две серии расчетов, в которых варьировался ток запитки ДВМГ и момент времени срабатывания взрывного ключа. Результаты приведены в табл. 2, 3.

Как можно видеть из этих данных, результаты расчетов устойчивы при вариации I_0 в пределах 5–7 МА и при изменении t_0 в диапазоне ± 1 мкс.

Проведенные расчеты позволили спроектировать источник тока на основе малогабаритного 30-ти модульного ДВМГ $\varnothing 250$ мм.

Таблица 2

Устойчивость результата к вариациям тока запитки

I_0 , МА	5,0	5,5	6,0	6,5	7
I_p^{\max} , МА	29,7	31,2	32,5	33,4	34,0
τ_{imp} , мкс	3,4	3,11	2,87	2,65	2,44
V_f^{\max} , кВ	137	150	159	165	168
v_p^{\max} , км/с	40,6	42,3	44,5	46,2	46,3

Устойчивость результата к вариациям времени срабатывания ключа

t_0 , мкс	8,8	9,3	9,8	10,3	10,8
I_p^{\max} , МА	32,1	32,7	33,4	33,3	31,0
τ_{imp} , мкс	3,43	2,93	2,65	2,20	1,9
V_f^{\max} , кВ	171	169	165	156	161
v_p^{\max} , км/с	44,0	44,7	46,2	45,3	42,1

3. Описание источника тока

Ключевым устройством источника является сильноточный генератор тока, малогабаритный дисковый взрывомагнитный генератор (ДВМГ) диаметром 250 мм с плоскими дисковыми элементами, разработанный в ЭФО [7,8].

Основные элементы источника показаны на рис. 10 и включают в себя конденсаторную батарею (на рис. не показана), спиральный взрывомагнитный генератор (СВМГ), взрывной узел отключения (УО), 30-модульный дисковый взрывомагнитный генератор $\varnothing 250$ мм (ДВМГ), малоиндуктивный электровзрывной фольговый размыкатель тока (МЭВРТ), взрывной ключ (ВЗТ) – замыкатель тока для подключения первоначально изолированной от МЭВРТ нагрузки (ВЗТ), электрически взрывающийся алюминиевый лайнер, сжимаемый к оси током, формируемым МЭВРТ.

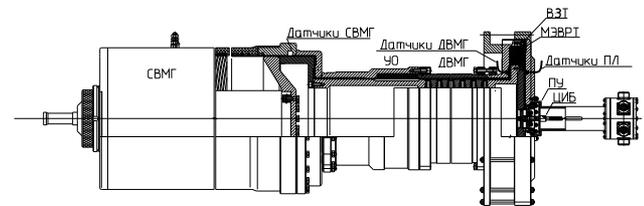


Рис. 10. Взрывомагнитный источник на основе 30-модульного ДВМГ $\varnothing 250$ мм

Данный эксперимент был разработан, чтобы расширить показ системы, с включением работы динамической нагрузки.

Начальный поток вводится в спиральный преусилитель при разряде конденсаторной батареи. Выход спирального преусилителя, обеспечивающий ток около 6,5 МА, соединен с ДВМГ.

Между спиральным предусилителем и дисковым ВМГ установлен взрывной узел отключения (УО), предназначенный для захвата магнитного потока в контуре дискового генератора после завершения работы предусилителя.

Генерируемый ДВМГ импульс тока амплитудой около 60 МА протекает через малоиндуктивный электровзрывной размыкатель тока, расположенный сразу за дисковым ВМГ. Лайнерный пондеромоторный узел (ЛПУ) подсоединяется параллельно размыкателю тока с помощью радиальной передающей линии с твердотельным изолятором (см. рис. 11).

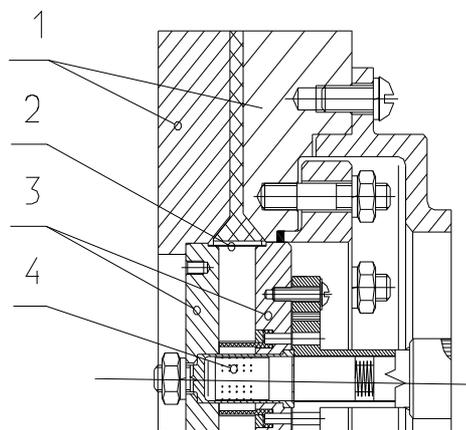


Рис. 11. Схема радиальной передающей линии (ПЛ) с лайнерным пондеромоторным узлом (ЛПУ)

ЛПУ представляет собой участок радиальной линии с медными токопроводами (1), переходящими в коаксиал - алюминиевый лайнер(2).

Лайнер крепится между двумя массивными медными дисками(3).

Соосно с лайнером размещен центральный измерительный блок (4).

Первоначально нагрузка изолирована от контура ДВМГ с помощью размещенного на внешнем токопроводе взрывного ключа – замыкателя тока (ВЗТ) с твердотельной электрической изоляцией.

Регистрация токов в системе производится с помощью индукционных датчиков. Средства диагностики явлений в лайнерной нагрузке включают в себя датчики методики измерения скорости PDV.

4. Малоиндуктивный электровзрывной размыкатель тока (МЭВРТ) и его конструктивные параметры

Для быстрой передачи энергии из ДВМГ в нагрузку обычно используют классическую схему

электровзрывного фольгового размыкателя тока (ФРТ) показанную на рис. 12 [9,10].

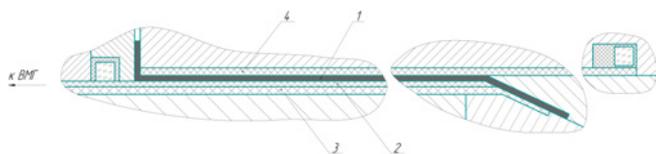


Рис. 12. Эскиз фольгового размыкателя тока в ПЛ ДВМГ

ФРТ представляет собой тонкостенный медный цилиндр 1, установленный между изоляторами 2, 3, 4 и переходящий со стороны места подключения ДВМГ к передающей линии (ПЛ) в радиальную щель, перпендикулярную оси цилиндра, а со стороны нагрузки – в сферическую поверхность.

ФРТ набирается из полос медной фольги, закрепляемых поверх изоляторов 2, 3, установленных на внутреннем токопроводе ПЛ. Поверх слоя медных полос устанавливается изолятор 4.

В экспериментах с устройством, выполненным по этой схеме, были получены рекордные результаты по импульсной мощности для взрывомагнитных систем.

Однако данная схема ФРТ сложна в изготовлении и требует выполнения последовательного монтажа экспериментального устройства, исключая возможность предварительного изготовления фольгового размыкателя.

В [11] рассмотрен малоиндуктивный электровзрывной размыкатель тока (МЭВРТ) в виде «змейки» (см. рис. 13). В дальнейшем этот размыкатель предполагается использовать совместно с 30-ти модульным ДВМГ для формирования микросекундных импульсов тока [12].

Конструктивная схема и фотография МЭВРТ в процессе монтажа приведены на рис. 13.

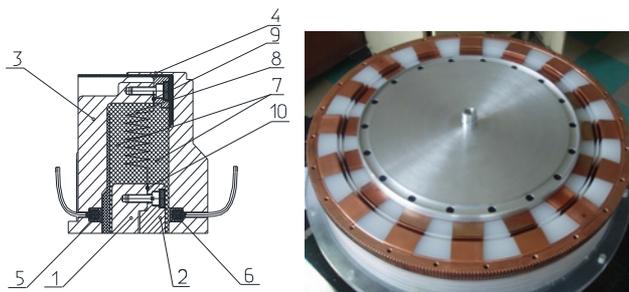


Рис. 13. Конструктивная схема и фотография МЭВРТ

МЭВРТ включает в себя два стальных переходника (1, 2), два медных фланца (3, 4), измери-

тельные датчики (5, 6), изоляторы (7) и содержит гофрированную фольгу (8), кольца (9, 10) для крепления фольги.

Фольга изготавливается из медных полосок толщиной 0,20 мм и длиной ~400 мм. Суммарная ширина фольги ~660 мм.

Такое построение размыкателя тока позволяет уменьшить длину устройства, выполнение фольги с большим количеством поворотов позволяет увеличить электрическую прочность после взрыва фольги вдоль ее длины, а выполнение фольги с гофрами треугольной формы (по сравнению, например, с гофрами прямоугольной формы) позволяет уменьшить индуктивность МЭВРТ. Запас электрической прочности по изоляции между концами возрастает почти в 2–3 раза, что способствует увеличению мощности размыкателя.

Кроме перечисленного выше, данная конструкция размыкателя высокотехнологична, т.к. позволяет производить сборку в лабораторных условиях, обеспечивая высокое качество и сокращая время на проведение экспериментов.

5. Заключение

Представлены результаты взрывных экспериментов с моделями дисковых ВМГ малого класса. Показана возможность усиления тока дисковым ВМГ в 10 раз – до значения, превышающего 60 МА.

Описана конструкция источника импульсной мощности на базе 30-ти модульного ДВМГ Ø250 мм для исследования эффективности высокоскоростной имплозии цилиндрических лайнеров.

Показана возможность реализации скорости лайнера 46км/с при максимальном токе через пинч 33МА с временем нарастания 2,65 мкс. При этом напряжение на МЭВРТ не превышает 165 кВ.

Список литературы

1. Чернышев В. К., Протасов М. С., Шевцов В. А. Первые дисковые взрывоманнитные генераторы // Труды Третьей Международной конференции по генерации мегагаусных магнитных полей и родственными экспериментам. г. Новосибирск. СССР. 1984. с. 23–25

2. Chernyshev V. K., Protasov M. S., Shevtsov V. A., Petrukhin A. A., Yakubov V. B., et al. "Explosive magnetic generators of «Potok» family"

// Eighth IEEE Intern. Pulsed Power Conference. San-Diego. USA. 1991. p. 419–433.

3. Chernyshev V. K., Buyko A. M., Petrukhin A. A., et al. Investigation of Electrically Exploded Large Area Foil for Current Switching. // Megagauss Field and Pulsed Power Systems. Nova Science Publishers. New York. 1990. P. 465–470.

4. Buyko A. M., Vasyukov V. A., Gorbachev Y. N., et al. Results of the joint VNIIEF/LANL experiment ALT-2 modeling the "ATLAS" facility parameters by means of disk EMG // Megagauss-9. Sarov. Russia. 2004. p. 752–756.

5. Buyko A. M., Gorbachev Y. N., Zmushko V. V. et al. Explosive magnetic device with a three-layered liner for radiographic of dynamic strength of materials // Megagauss X. Berlin. Germany. 2005. p. 375–379.

6. Chernyshev V. K. and Vakhrushev V. V. Disk EMG for fusion target compression study on models // Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications. New York. USA. 1994. p.p. 547–549.

7. Chernyshev V. K., Vakhrushev V. V., Kudelkin V. B., Shpagin V. I. Small class (250mm) disk EMG testing result // 13th IEEE Int. Pulsed Power Conf. and 28th IEEE Int. Conf. Plasma Science. Las Vegas. Nevada. USA. 2001. p.p. 971–973

8. Aryutkin M. Y., Dryamov M. A., Egorchev B. T., Grinevich B. E., et al. Experimental determination of limiting capabilities of small-class DEMG // Megagauss XIII Proceedings of Thirteenth International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Suzhou. China. 2010. p.p. 306–312

9. Петрухин А. А., Голубев В. В., Данов В. М., Мамышев В. И., Павловский Е. С., Прокопов В. А., Протасов М. С., Чернышев В. К., Шевцов В. А., Якубов В. Б. Результаты экспериментов по передаче энергии мегаджоулевого диапазона из взрывоманнитного генератора с помощью фольгового размыкателя тока // Труды Третьей Международной конференции по генерации мегагаусных магнитных полей и родственными экспериментам. г. Новосибирск. СССР. 1984. с. 384–387

10. Chernyshev V. K., Buyko A. M., Petrukhin A. A., et al. Investigation of Electrically Exploded Large Area Foil for Current Switching. // Megagauss Field and Pulsed Power Systems. Nova Science Publishers. New York. 1990. P. 465–470.

11. Chernyshev V. K., Kucherov A. I., Mezhevov A. I., Vakhrushev V. V. Electroexplosive Foil 500 kV Current Opening Switch Characteristics Research // 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Baltimore, Maryland, USA, 1997, P. 1208–1212.

12. Гриневич Б. Е., Ивановский А. В., Чернышев В. К., Вахрушев В. В., Куделькин В. Б., Краев А. И., Шпагин В. И. «Источник импульсной мощности со скоростью нарастания тока до 10^{14} А/с для разгона легких лайнеров до высоких скоростей на базе дискового ВМГ второго поколе-

ния» // Международная конференция «VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии». г. Саров, Россия. 2006. С. 563–566