

УДК 621.373.9

Д.Б. Кучер, Д.Л. Голубцов, В.Н. Мардерос, Т.В. Зонтова

Академия военно-морских сил имени П.С. Нахимова, Севастополь

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПИРАЛЬНЫХ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ В КОНСТРУКЦИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО ОБЪЕМА

Рассмотрены принципы конструктивного устройства спиральных взрывомагнитных генераторов. Проанализированы зависимости индуктивности спирали от геометрических размеров генератора.

**Ключевые слова:** спиральный взрывомагнитный генератор, индуктивность контура.

### Введение

**Постановка проблемы.** Современный уровень развития методов генерации мощных электромагнитных излучений (МЭМИ) определяет возможность разработок, создание и развертывание нового класса оружия направленной энергии – электромагнитного оружия (ЭМО). В настоящее время проводятся интенсивные исследования по созданию средств функционального поражения с использованием взрывных систем импульсной мощности, и множество научных экспериментов, демонстрирующих перспективность их применения в конструкциях излучающих систем электромагнитной энергии [1]. В этом отношении одним из наиболее перспективных систем ЭМО является спиральный взрывомагнитный генератор (ВМГ), принцип действия которого связан с изменением индуктивности соленоида при взрывном расширении замыкающего элемента (лайнера) [2, 3]. Автономная конструкция спиральных ВМГ позволяет применять их в различных излучающих системах, в том числе и в перспективных образцах электромагнитных боеприпасов [2]. Поэтому одной из главных задач практического применения таких типов генераторов является необходимость их компактного размещения в ограниченном объеме для доставки к цели.

**Анализ исследований и публикаций** Исследования, направленные на совершенствование методов генерации МЭМИ в конструкциях ограниченного объема, являются актуальной и важной проблемой в развитии перспективных образцов оружия направленной энергии на основе новых принципов взрывного преобразования энергии. Анализ существующих средств ЭМО свидетельствует о том, что использование ВМГ позволяет значительно миниатюризировать конструкции излучающих систем [2, 3].

Спиральные ВМГ являются уникальными источниками получения максимально возможной энергии, им нет альтернативы при проведении многих физических экспериментов [2, 3]. Оптимизация параметров спирального ВМГ позволяет получить максимальный коэффициент усиления энергии в индуктивной нагрузке при заданном времени работы [2 – 4].

Целью данной работы является проведение исследований, направленных на определение связи конструктивных размеров спирального ВМГ с уровнем МЭМИ в конструкциях ограниченного объема.

### Основная часть

Рассмотрим структуру спирального ВМГ (рис. 1).

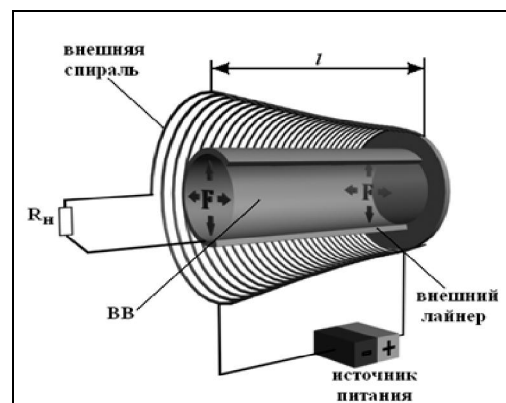


Рис. 1. Модель спирального ВМГ

Данная структура включает в себя источник питания, конический соленоид длиной  $l$  (внешнюю проводящую спираль) и металлический лайнер, заполненный взрывчатым веществом (ВВ). Внешняя спираль будет определять основной объем, занимаемый генератором в ограниченных размерах корпуса [2]. Следовательно, одной из задач является разработка профиля внешней спирали, лежащей в основе определения электрической прочности спирального ВМГ.

Наибольший коэффициент усиления ВМГ можно получить при максимально возможном количестве витков внешней спирали. Генераторы с возрастающим шагом витков обеспечивают значительно больший ток и более высокое усиление энергии, чем в ВМГ с постоянным шагом [2, 3]. Однако при увеличении количества витков на внешней спирали, при размещении в ограниченных размерах закрытой структуры, неизменно будет уменьшаться расстояние между ними и возникать опасность межвиткового пробоя. Поэтому для получения оптимальной структуры внешней спирали необходимо определе-

ние минимально возможных расстояний между витками, не приводящих к электрическому пробое.

Определение профиля (расстояния между витками) внешней спирали необходимо проводить, разделив всю ее длину  $l^*$  на отдельные секции, в которых изменение тока во времени будет незначительным [2]. Естественно, что расстояния между витками  $k$  на каждой секции внешней спирали будет разным (рис. 2).

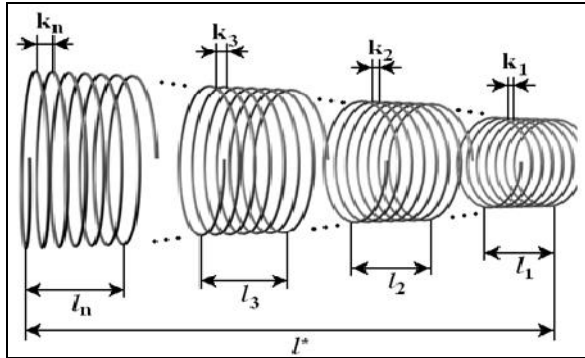


Рис. 2. Представление внешней спирали в виде отдельных секций с различными расстояниями между витками

Существующие методики построения профиля внешней спирали ориентированы либо на экспериментально полученные номограммы, либо на эмпирические зависимости, связывающие минимально допустимые расстояния между вводами или витками силовых трансформаторов с испытательным напряжением [2, 3].

Результаты исследований, проведенные в работах [2 – 4], позволяют выдать рекомендации по выбору шага намотки внешней спирали, начиная с источника питания для 10 секций:

$$\begin{aligned} k_1 &\geq 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}; & k_2 &\geq 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}; \\ k_3 &\geq 5,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}; & k_4 &\geq 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\ k_5 &\geq 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & k_6 &\geq 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\ k_7 &\geq 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & k_8 &\geq 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\ k_9 &\geq 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & k_{10} &\geq 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \end{aligned}$$

Конструктивные параметры внешней спирали будут связаны со значениями электрической и магнитной составляющих поля, генерируемого ВМГ. В качестве допущения, примем, что выбранную взрывомагнитную структуру необходимо разместить в цилиндрическом объеме (диаметром  $D = 100$  мм и высотой  $H = 300$  мм), табл. 1.

Индуктивность контура  $L$  (рис. 1) зависит от геометрической формы контура, его размеров и магнитной проницаемости той среды, в которой находится контур [3, 4]:

$$L_{\text{н\grave{a}i \bar{a}}} = \frac{\mu_0 N^2 \pi r_{\text{н\grave{o}}}^2}{l}, \tag{1}$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $N$  – количество витков соленоида,  $r_{\text{н\grave{o}}} = \sqrt{\frac{r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2}{3}}$  – средний радиус витка соленоида (рис. 3);  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы витков соленоида в начале и в конце спирали соответственно;  $l$  – длина соленоида.

На основании практических рекомендаций, полученных в работах [2, 3], разделим внешнюю спираль на 10 секций с учетом шага намотки в каждой секции.

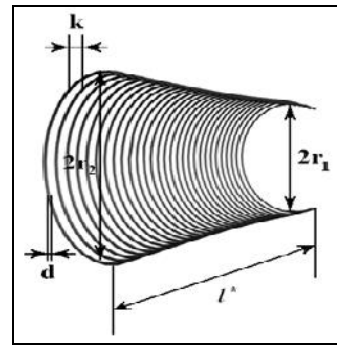


Рис. 3. Конструкционные размеры внешней спирали

В этом случае объем спирали можно определить следующим выражением:

$$V_{\text{н\grave{a}e}(t)} = \frac{1}{3} \pi l_{\text{н\grave{a}e}(t)} (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2), \tag{2}$$

где  $l_{\text{н\grave{a}e} = dN + kN$  – длина спирали (секции);  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы витков соленоида в начале и в конце спирали.

Значения геометрических параметров внешней спирали, полученные для цилиндрического объема с параметрами  $D=100$  мм и  $H=300$  мм, представлены в табл. 1. Во время работы ВМГ взрывное расширение лайнера будет приводить к уменьшению длины всех секций, вызывая изменение общей индуктивности спирали.

Закон изменения индуктивности в процессе расширения лайнера можно записать, учитывая результаты исследований, проведенные в работах [3 – 5], следующим образом:

$$L_{\text{н\grave{a}i \bar{a}}}(t) = \frac{\mu_0 N^2(t) \pi r_{\text{н\grave{o}}}^2}{l(t)} K(r_{\text{н\grave{o}}} / l^*), \tag{3}$$

где

$$l(t) = \frac{l^* - mD^2 t^2}{(2Mr_0 \sqrt{16 + \frac{2mD^2 t^2}{Mr_0^2}}) \cdot \left( \frac{mDt}{2Mr_0 \sqrt{16 + \frac{2mD^2 t^2}{Mr_0^2}}} - \frac{r_1 - r_2}{l^* - d} \right)}$$

$N(t) = \frac{l(t) - k}{d}$  – закон изменения количества витков соленоида;  $l(t)$  – закон изменения длины соленоида,  $l^* = d \cdot N^* + kN^*$  – первоначальная длина соленоида,  $d$  – диаметр проволоки;  $N^*$  – первоначальное количество витков соленоида;  $k$  – шаг намотки внешней спирали;  $K(r_{н0}/l^*)$  – поправочный множитель;  $m$  – масса ВВ;  $D$  – скорость детонации;  $r_0$  – начальный радиус заряда;  $M$  – масса оболочки.

Первоначальная индуктивность выбранной структуры определяется следующим выражением:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} = \mu_0 \frac{N^2}{l^2} V; \quad (4)$$

где  $S = \pi r^2$  – площадь каждого витка;  $V = Sl$  – объем соленоида;  $N$  – число витков;  $l$  – длина спирали (секции).

На основании полученных данных, можно сделать выводы о зависимости индуктивности от геометрических параметров спирали, таких как длина, объем и количество витков спирали (рис. 4, 5).

Первоначальная индуктивность выбранной структуры будет определять минимальные значения тока при работе генератора до момента подрыва ВВ.

Для эффективного поражающего воздействия необходимо на выходе генератора получить величины тока не менее  $10^5$  А, что возможно при определенных первоначальных размерах спирали [2, 3].

Таблица 1

Геометрические параметры внешней спирали

	№ секции внешней спирали									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$r_{1,м}$	0,030	0,037	0,044	0,051	0,058	0,065	0,072	0,079	0,086	0,093
$r_{2,м}$	0,037	0,044	0,051	0,058	0,065	0,072	0,079	0,086	0,093	0,1
$l,м$	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
$d,м$	$0,1 \times 10^{-3}$	$0,1 \times 10^{-3}$	$0,1 \times 10^{-3}$	$0,1 \times 10^{-3}$	$0,1 \times 10^{-3}$	$0,1 \times 10^{-3}$	$0,1 \times 10^{-3}$	$0,1 \times 10^{-3}$	$0,1 \times 10^{-3}$	$0,1 \times 10^{-3}$
$k,м$	$1,7 \times 10^{-4}$	$3,9 \times 10^{-4}$	$5,9 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-3}$	$3,9 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-3}$
$S,м^2$	0,013	0,018	0,023	0,029	0,035	0,042	0,05	0,058	0,067	0,084
$V,м^3$	$1,06 \times 10^{-4}$	$1,54 \times 10^{-4}$	$2,12 \times 10^{-4}$	$2,79 \times 10^{-4}$	$3,56 \times 10^{-4}$	$4,42 \times 10^{-4}$	$5,36 \times 10^{-4}$	$6,41 \times 10^{-4}$	$7,54 \times 10^{-4}$	$8,77 \times 10^{-4}$
$N$	1111	612	434	230	167	130	97	75	59	49
$L,Гн$	0,183	0,081	0,056	0,021	0,014	0,01	$7,06 \times 10^{-3}$	$5,04 \times 10^{-3}$	$3,7 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-3}$
$V_{\Sigma}, м^3$	4,361 $\times 10^{-3}$									

где  $r_1, r_2$  – радиусы внутренней и внешней спирали (секции);  $l$  – длина секции, м;  $d$  – диаметр проволоки, м;  $k$  – шаг намотки внешней спирали;  $S$  – площадь спирали, м<sup>2</sup>;  $V$  – объем внешней спирали, м<sup>3</sup>;  $N$  – количество витков;  $L$  – индуктивность, Гн;  $V_{\Sigma}$  – суммарный объем внешней спирали, м<sup>3</sup>.

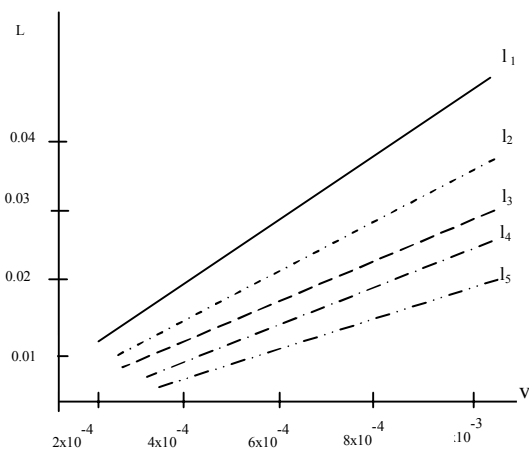


Рис. 4. Зависимость индуктивности спирального ВМГ от геометрических размеров спирали до подрыва ВВ

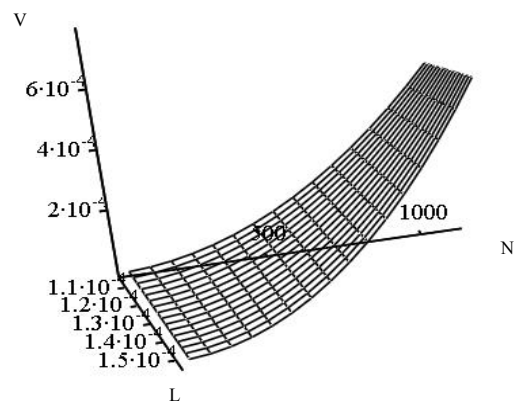


Рис. 5. Зависимость индуктивности спирального ВМГ от геометрических размеров спирали до подрыва ВВ

Рассмотренные примеры моделирования геометрических параметров излучающей системы (в т.ч. и конструкции внешней спирали взрывомагнитного генератора) и соответствующие расчеты по оценке различных вариантов конструктивного исполнения ВМГ позволяют сделать вывод о зависимости уровня усиления тока от геометрических параметров внешней спирали.

### Выводы

Анализируя результаты, представленные в табл. 1, на рис. 4, 5, можно заметить следующее. Полученные результаты исследований подтверждают возможность конструктивных решений по размещению и применению автономных излучающих систем в ограниченном объеме, в том числе и спирального взрывомагнитного генератора в цилиндре с параметрами:

$$D = 100 \text{ мм и } H = 300 \text{ мм.}$$

При правильном подборе параметров спирального ВМГ можно достигнуть эффективного усиления энергии в индуктивной нагрузке и соотношение индуктивностей спирали и объема будет соответствовать требуемым значениям.

При этом должны быть выполнены следующие условия:

– электрическая прочность внешней спирали взрывомагнитного генератора должна обеспечиваться соответствующим выбором изоляционных конструкций и допустимых расстояний между витками;

– определение профиля (расстояния между витками, не приводящего к пробою) внешней спирали необходимо проводить, разделив всю ее длину на отдельные секции, в которых изменение тока во времени будет незначительным.

Исследования, направленные на совершенствование методов генерации мощных электромагнитных импульсов в конструкциях ограниченного

объема, являются актуальной и важной проблемой в развитии перспективных образцов оружия направленной энергии на основе новых принципов взрывного преобразования энергии.

Полученные результаты исследований определяют зависимость МЭМИ от конструктивных размеров спирали взрывомагнитного генератора и позволяют выдать рекомендации по рациональному использованию ограниченного объема в конструкциях излучающих систем вместе с увеличением коэффициента усиления всей структуры.

### Список литературы

1. Кравченко В.И. Электромагнитное оружие / В.И. Кравченко. – Х.: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – 185 с.
2. Прищепенко А.Б. Взрывы и волны. Взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона / А.Б. Прищепенко. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 208 с.
3. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / под ред. В.Е. Фортова. – М.: Наука, 2002. – 399 с.
4. Высокоиндуктивные взрывомагнитные генераторы с большим коэффициентом усиления энергии / В.А. Демидов, Е.И. Жариков, А.С. Казаков, В.И. Чернышев // ПМТФ, № 6, 1981. – С. 106-111.
5. Биченков Е.Н. Усиление тока и увеличение энергии в плоских магнитокумулятивных генераторах с диффузией потока Е.Н. Биченков // ПМТФ. – 1976. – № 6. – С. 121-126.

Поступила в редколлегию 19.05.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СПІРАЛЬНИХ ВИБУХОМАГНІТНИХ СИСТЕМ У КОНСТРУКЦІЯХ ОБМЕЖЕНОГО ОБ'ЄМУ

Д.Б. Кучер, Д.Л. Голубцов, В.М. Мардерос, Т.В. Зонтова

*В статті розглянуті принципи конструктивного пристрою спіральних вибухомагнітних генераторів. Проаналізовані залежності індуктивності спіралі від геометричних розмірів генератору.*

**Ключові слова:** спіральний вибухомагнітний генератор, індуктивність контуру.

### FEATURES OF APPLICATION OF SPIRAL EXPLOSIVE MAGNETIC SYSTEMS IN THE LIMITED VOLUME DESIGNS

D.B. Kuher, D.L. Golubtsov, V.M. Marderos, T.V. Zontova

*Principles of the constructive device of the spiral explosive-magnetic generators have been considered in the article. Spiral inductance dependences on generators geometric sizes have been analyzed in this work.*

**Keywords:** spiral blastmagnetic generator, inductance of contour.