

УДК 621.373.9

Д.Б. Кучер, Д.Л. Голубцов

Академія військово-морських сил ім. П.С. Нахімова, Севастополь

## ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В КОНСТРУКЦИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО ОБЪЕМА

Рассмотрены основные характеристики антенных систем и варианты их практического применения для излучения мощных электромагнитных помех в конструкциях ограниченного объема.

**Ключевые слова:** мощные электромагнитные излучения, рамочная антенна.

### Введение

**Постановка задачи.** Развитие средств ведения радиоэлектронной борьбы выводит на первый план задачу выбора антенной системы, имеющей ограниченные конструктивные размеры при ее размещении в специальных корпусах. Для создания мощных электромагнитных помех данные антенные системы подключаются к специализированным генераторам (взрывоманнитные генераторы (ВМГ), виркаторы и т.д.) и должны выдерживать высокие значения по токам и напряжениям [1].

#### Анализ исследований и публикаций.

В работах [2, 3] были представлены результаты исследований токов, наводимых ВМГ на нагрузку. При комбинировании работы таких устройств в качестве нагрузки должна выступать антенная система, способная выдерживать токи в десятки килоампер. Для излучения мощных электромагнитных помех наиболее рациональным является выбор рамочной антенны, способной излучать магнитную составляющую поля, проникающую вглубь объектов. Основными преимуществами магнитно-рамочных антенн являются также их предельная компактность в сочетании с высоким коэффициентом полезного действия, способность непрерывно перекрывать заданный интервал частот, их симметричность и т.д. [4].

**Целью данной работы** является моделирование основных параметров антенной системы при размещении ее в конструкциях ограниченного объема.

### Основная часть

Для решения задачи размещения излучающей системы в ограниченном объеме, рассмотрим следующий вариант конструкции (рис. 1), позволяющий задать параметры проектируемой антенны (табл. 1).

В качестве конструкции ограниченного объема рассмотрим цилиндр с диаметром  $D=100-130$  мм и высотой  $H=100\dots550$  мм (размеры рамочной антенны должны соответствовать заданным параметрам).

Рассмотрим основные характеристики антенной системы для мощных электромагнитных

помех. Одной из важнейших характеристик проектируемой антенны является полоса пропускания [5 – 8]. Выбранная антенна преобразует импульс напряжения  $V(t)$ , имеющий спектральную функцию  $U(\omega)$ , который поступает на ее вход по фидеру с волновым сопротивлением  $\rho_{\text{ф}}$ , в импульс электромагнитного поля  $E(r,t)$ , распространяющегося в виде свободной волны со спектральной функцией  $E(r,\omega)$  [5,6]. Она может быть характеризована пространственно-частотной характеристикой (векторной передаточной функцией)  $N_a(\omega,r)$ , которая представляет отношение комплексной амплитуды вектора напряженности излученного электромагнитного поля в точке пространства  $r$ , к комплексной амплитуде сигнала  $U(\omega)$  [5,6]. В дальней зоне напряженность электрического поля излучателя, занимающего объем  $V_a$ , определяется как [5]:

$$E(r, \omega) = -i \cdot (\omega/c) \cdot Z_0 I_0(\omega) \times \exp\left(-i\omega \frac{r}{c}\right) / (4\pi r) \cdot \int_{V_a} j(\omega, r') \exp(i\omega \frac{r'}{c} \cos \Theta) d^3 r', \quad (1)$$

Таблица 1

Параметры проектируемой антенны

$r$ , м	0,045	0,055	0,065	0,075	0,085	0,095	0,105
$d$ , м	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$
$P$ , м	0,283	0,346	0,408	0,471	0,534	0,597	0,66
$L$ , Гн	$9,32 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,44 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-7}$	$1,98 \times 10^{-7}$	$2,25 \times 10^{-7}$	$2,53 \times 10^{-7}$
$R_{\text{из}}$ , Ом	$1,2 \times 10^{-8}$	$2,81 \times 10^{-8}$	$5,4 \times 10^{-8}$	$9,7 \times 10^{-8}$	$1,6 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-7}$	$3,7 \times 10^{-7}$

Примечание:  $r$  – радиус кольца антенны, м;  $d$  – диаметр провода, м;  $P$  – периметр антенны, м;  $L$  – индуктивность, Гн;  $R_{\text{из}}$  – сопротивление излучения, Ом.

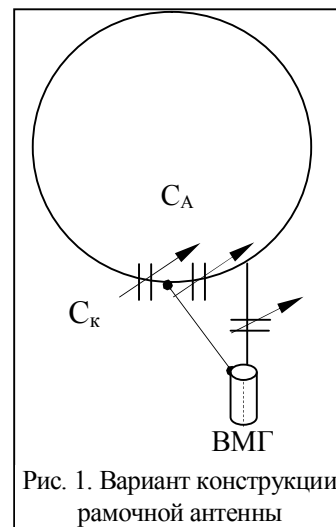


Рис. 1. Вариант конструкции рамочной антенны

где  $c$  – скорость света;  $Z_0$  – волновое сопротивление свободного пространства;  $I_0(\omega) = U(\omega) / [Z_a(j, \omega) + \rho_\Phi]$  – комплексная амплитуда тока на входе антенны;  $Z_a(j, \omega)$  – входной импеданс антенны;  $j(\omega, r')$  – функция распределения объемной плотности тока, нормированная к  $I_0(\omega)$ ;  $r$  – радиус-вектор точки наблюдения,  $r'$  – радиус-вектор точки источника;  $\theta$  – угол между  $r$  и  $r'$ .

$$\text{Тогда } \frac{E(r, \omega)}{U(\omega)} = R(\omega, r) H_a(\Theta, \omega).$$

Множитель  $R(\omega, r) = \frac{\exp\left(i\omega \frac{r}{c}\right)}{4\pi r}$  можно трактовать как передаточную функцию свободного пространства, которая не зависит от характеристик излучателя;  $H_a(\theta, \omega)$  имеет смысл пространственно-частотной векторной передаточной функции антенны [5]:

$$H_a(\Theta, \omega) = -i \frac{\omega}{c} \cdot \frac{Z_0}{[Z_a(j, \omega) + \rho_\Phi]} \times \int_{V_a} j(\omega, r') \exp\left(i\omega \frac{r'}{c} \cos \Theta\right) d^3 r'. \quad (2)$$

Если известна передаточная функция антенны  $H_a(\theta, \omega)$ , то форма излученного в направлении  $\theta$  электромагнитного импульса  $E(t)$  определяется как обратное преобразование Фурье от произведения  $H_a(\theta, \omega)$  на спектральную функцию возбуждающего импульса  $U(\omega)$ . В общем случае передаточная функция может быть выражена через параметры антенны:

$$H_a(\Theta, \omega) = -i \frac{\omega}{c} \cdot \frac{Z_0}{[Z_a(j, \omega) + \rho_\Phi]} \times |f(\Theta, \omega)| \cdot \exp[i\Phi(\Theta, \omega)] \cdot p(\Theta, \omega), \quad (3)$$

где  $|f(\Theta, \omega)| = \left| \int_{V_a} j(\omega, r') \exp\left(i\omega \frac{r'}{c} \cos \Theta\right) d^3 r' \right|$  – амплитудная диаграмма направленности (ДН);  $\Phi(\theta, \omega)$  – фазовая характеристика направленности;  $p(\theta, \omega)$  – поляризационная характеристика.

Для определения напряженности электрического и магнитного полей антенны определим величину  $Z_a(j, \omega)$ , которая будет определять полосу пропускания и значения напряженности электромагнитного поля. При этом под полосой пропускания будем понимать интервал частот, в котором  $H_a(\theta, \omega)$  остается постоянной или изменяется в допустимых пределах. Величина  $Z_a(j, \omega)$  будет иметь значение:

$$Z_a(j, \omega) = j\omega\mu_0 r^* \left[ \ln\left(\frac{8r^*}{d^*}\right) - 2 \right], \quad (4)$$

где  $r^*$  – радиус витка соленоида;  $d^*$  – диаметр провода обмотки.

С учетом выражения (4), запишем:

$$H_a(\Theta, \omega) = -i \frac{\omega}{c} \cdot \frac{Z_0}{\left[ j\omega\mu_0 r^* \left[ \ln\left(\frac{8r^*}{d^*}\right) - 2 \right] + \rho_\Phi \right]} \times \quad (5)$$

$$\times |f(\Theta, \omega)| \cdot \exp[i\Phi(\Theta, \omega)] \cdot p(\Theta, \omega).$$

Анализируя данную зависимость с учетом ограничений размеров антенны (табл. 1), при размещении ее в конструкциях ограниченного объема, можно сделать вывод, что полоса пропускания будет соответствовать значению  $\Delta f \approx 40$  МГц. С учетом выбранной конструкции антенны рассмотрим характеристики ее излучения. Для этого запишем выражение характеризующее связь магнитного и электрического поля в дальней зоне излучения [5, 6]:

$$\begin{cases} \dot{E}_\varphi = \frac{\dot{I} e^{-j\alpha r} \alpha S \omega \mu_a}{4\pi r} \sin \theta; \\ \dot{H}_\theta = -\frac{\dot{I} e^{-j\alpha r} \alpha^2 I S}{4\pi r} \sin \theta, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\dot{I}$  – эквивалентный ток в рамке;  $\alpha = 2\pi/\lambda$  – коэффициент фазы;  $S$  – площадь последнего витка внешней спирали.

Кроме длительности электромагнитного импульса, на величины напряженностей излучаемых полей влияет сопротивление излучения выбранной комбинированной системы. Данное сопротивление учитывает активную мощность, излучаемую комбинированной системой в окружающее пространство.

Для определения сопротивления излучения перепишем систему (6) для амплитудных значений электрического и магнитного полей, учитывая, что  $e^{-j\alpha r} \approx 1$ ,  $\alpha = 2\pi \frac{1}{\lambda}$  и волновое сопротивление сре-

$$\text{ды } Z_B = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} = 120\pi:$$

$$\begin{cases} E_{\varphi m} = \frac{I_{\max} S \omega \mu_a}{2\lambda r} \sin \theta; \\ H_{\theta m} = \frac{I_{\max} \omega \mu_a S}{2\lambda r} \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} \sin \theta, \end{cases} \quad (7)$$

где  $I_{\max}$  – максимальное значение электрического тока, наводимого при взрыве ВМГ на последнем витке внешней спирали.

В графическом виде на рис. 2 представлены зависимости значений напряженности магнитного поля от тока ВМГ с учетом заданных параметров антенны (табл. 1).

Из анализа полученных зависимостей, представленных на рис. 2, можно сделать вывод, что при величинах тока  $i \approx 1 \times 10^3 - 1 \times 10^4$  А, напряженность магнитного поля в точке излучения антенной системой диаметром  $D \approx 0.09$  м будет лежать в пределах  $H \approx 4 \times 10^4 - 3 \times 10^5$  А/м.ф.

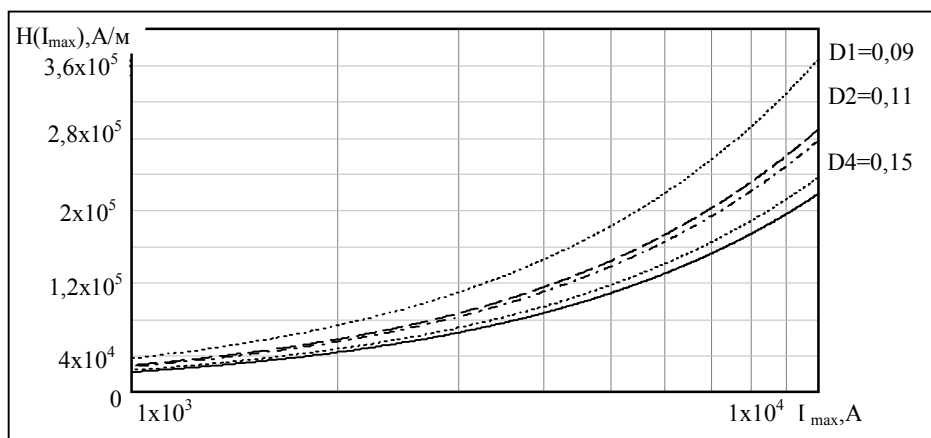


Рис. 2. Зависимость напряженности электромагнитного поля от тока ВМГ при различных радиусах рамки

Выбирая в качестве источника тока для антенны спиральный взрывомагнитный генератор [3] можно получить распределение амплитуд напряженности магнитного поля в дальней зоне из выражения (6).

В графическом виде на рис. 3 представлена зависимость изменения амплитудных значений  $H_{\theta}$  от расстояния до точки излучения. Амплитуды полей в

дальней зоне обратно пропорциональны длине волны (или длительности  $\tau_{и}$  при импульсном излучении) и прямо пропорциональны частоте колебаний тока в излучающей системе. При использовании в качестве генератора спирального ВМГ с диаметром витка 0,09 м амплитуда напряженности (рис. 3) магнитного поля для дальности до 200 м будет иметь значения  $H > 0,18$  А/м.

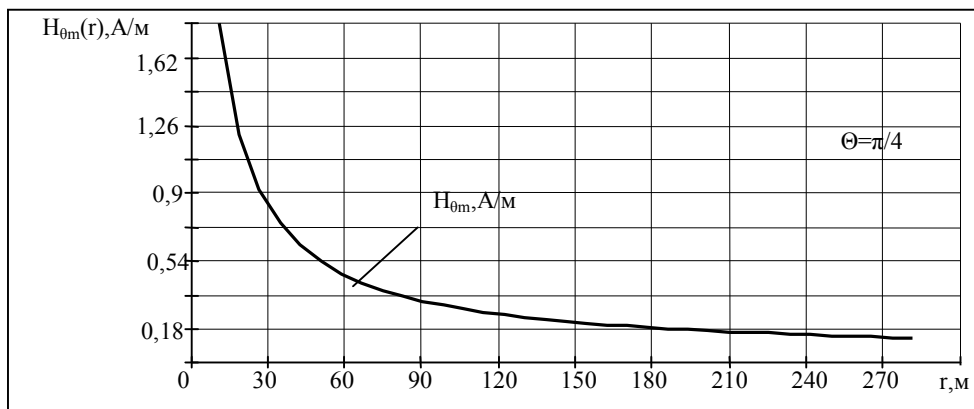


Рис. 3. Распределение амплитуд напряженностей магнитного поля в дальней зоне излучения рамочной антенны

## Выводы

В результате проведенных исследований получены основные характеристики антенной системы предназначенной для излучения мощных электромагнитных помех при ее размещении в конструкциях ограниченного объема.

Антенна с выбранными параметрами будет иметь ограниченную полосу пропускания

$$\Delta f \approx 40 \text{ МГц.}$$

Несмотря на то, что энергия выделяемая в пространство будет составлять 10-15% от подаваемой с генератора, выбранная антенная система позволяет сконцентрировать на дальности до 200 метров значения напряженности магнитного поля 0,18 – 1,7 А/м, что приведет к выводу из строя чувствительных элементов радиоэлектронной аппаратуры в дальней зоне излучения.

## Список литературы

1. Прищепенко А.Б. Взрывы и волны. Взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона / А.Б. Прищепенко. – М.: БИНОМ.
2. Особенности применения спиральных взрывомагнитных генераторов в конструкциях ограниченного объема / Д.Б. Кучер, Д.Л. Голубцов, В.Н. Мардерос, Т.В. Зонтова // 36. наук. пр. ХУПС. – Х.: ХУПС, 2011. – Вып. 3(28). – С. 27-32.
3. Особенности генерирования мощных электромагнитных помех спиральным взрывомагнитным генератором / Д.Б. Кучер, С.В. Тараненко, А.И. Харланов, Ю.М. Бусяк // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2009. – Вып. 4(78). – С. 86-90.
4. Ротхаммель К. Антенны / К. Ротхаммель. – Изд. 11-е, доп. Алоиз Кршике, 2008, в 2-х томах. – 828 с.
5. Андреев Ю.А. Малогабаритные сверхширокополосные антенны для излучения мощных электромагнитных импульсов / Ю.А. Андреев, Ю.И. Буянов, В.И. Кошелев // Журнал радиоэлектроники. – Институт сильноточной электроники СО РАН. – 2006. – Вып. №2. – С. 12-28.

6. Марков Г.Т. Антенны / Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.

Фано. – М.: Сов. Радио, 1965. – 72 с.

7. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пос. для вузов / Васильев Д.В, Витоль М.Р., Горшенков Ю.Н. и др. / под ред. К.А. Самойло. – М.: Радио и связь, 1982. – 528 с.

Поступила в редколлегию 20.10.2011

8. Фано Р. Теоретические ограничения полосы согласования произвольных импедансов: пер. с англ. / Р.

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

### **ОСОБЛИВОСТІ РОЗТАШУВАННЯ АНТЕННОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕШКОД У КОНСТРУКЦІЯХ ОБМЕЖЕНОГО ОБ'ЄМУ**

Д.Б. Кучер, Д.Л. Голубцов

В статті розглянуті основні характеристики антенних систем та варіанти їх практичного застосування для випромінювань потужних електромагнітних перешкод в конструкціях обмеженого об'єму.

**Ключові слова:** потужні електромагнітні випромінювання, рамкова антена.

### **SPECIAL CONDITIONS OF PLACEMENT OF SPIRAL SYSTEMS FOR POWERFUL MAGNETIC INTERFERENCE RADIATION IN THE LIMITED SIZE CONSTRUCTIONS**

D.B. Kuher, D.L. Golubtsov

Principle characteristics of spiral systems and variants of their application for powerful magnetic interference radiation in the limited size constructions have been revealed in the article.

**Keywords:** powerful electromagnetic radiations, loop-aerial.