

УДК 621.396.6

Кучер Д.Б., Харланов А.И., Медведь И.В., Тараненко С.В.

**МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ, НАВЕДЕННЫХ КОМБИНИРОВАННЫМИ ВЗРЫВОМАГНИТНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ**

**Введение.** В настоящее время всё более распространенным становится применение различных типов взрывомагнитных генераторов (ВМГ) в качестве самостоятельных источников мощных электромагнитных излучений (МЭМИ), которые можно использовать не только в радиотехнике, но и в биофизике, медицине и т. д.

Для определения механизма электромагнитного воздействия МЭМИ на современные радиоэлектронные системы (РЭС) необходимо знать параметры, влияющие на характер их распространения. С целью исследования свойств и характеристик электромагнитного поля МЭМИ в зависимости от зоны излучения в данной работе рассматривается модель распространения МЭМИ, генерируемых комбинированными ВМГ (КВМГ).

**Основной материал.** Для получения высоких энергетических уровней воздействия на РЭС комбинируют два взрывных генератора (импульсный и спиральный), построенных на различных физических принципах и работающих на одну нагрузку. При этом в качестве нагрузки должна выступать антенная система, способная выдерживать токи в десятки килоампер. В этом отношении наиболее приемлемым является выбор рамочной антенны, способной излучать магнитную составляющую поля, проникающую, в отличие от электрической, даже в глубь земной поверхности или бетонных сооружений [1, 2]. При размещении таких КВМГ в ограниченных по габаритным размерам корпусах в качестве рамочной антенны может выступать последний виток внешней спирали, на котором будет наводиться максимально возможный ток при выталкивании магнитного поля.

При этом необходимо учитывать, что такая рамочная антенна будет излучать сферические волны. Поэтому при решении задачи излучения МЭМИ воспользуемся теорией электромагнитного поля.

В результате процессов компрессии и выталкивания магнитного поля на последнем витке внешней спирали будет наводиться изменяющийся во времени ток, связать который с составляющими поля можно с помощью уравнений Максвелла, записанных в сферической системе координат [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{E}_r = 0; \\ \dot{E}_\varphi = -\frac{\dot{I}_m e^{-j\alpha r} l}{4\pi r^2} (1 + j\alpha r) \sin \theta; \\ \dot{E}_\theta = 0; \\ \dot{H}_r = j \frac{\dot{I}_m e^{-j\alpha r} l}{2\pi\omega\mu_a r^3} (1 + j\alpha r) \cos \theta; \\ \dot{H}_\varphi = 0; \\ \dot{H}_\theta = j \frac{\dot{I}_m e^{-j\alpha r} l}{4\pi\omega\mu_a r^3} (1 - \alpha^2 r^2 + j\alpha r) \sin \theta, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\dot{E}_r, \dot{E}_\varphi, \dot{E}_\theta$  и  $\dot{H}_r, \dot{H}_\varphi, \dot{H}_\theta$  – комплексные амплитуды векторов поля  $\vec{H}$  и  $\vec{E}$  в проекциях на координатные направления  $r, \varphi, \theta$  сферической системы координат соответственно (см. рисунок 1),  $l$  – эквивалентное расстояние между магнитными зарядами,  $\dot{I}_m$  – комплексный эквивалентный магнитный ток,  $\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}$  – коэффициент фазы,  $\lambda$  – длина волны (или ее эквивалент для импульсного сигнала), излучаемой с последнего витка внешней спирали.

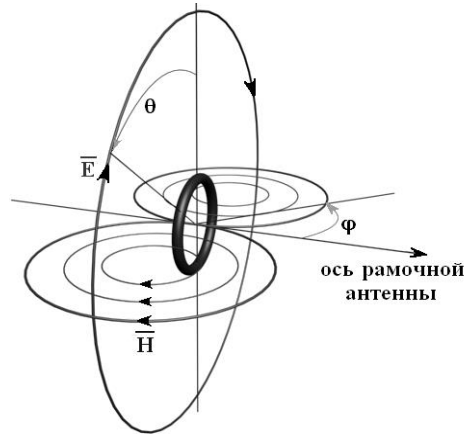


Рисунок 1 – Распределение электромагнитных полей при излучении МЭМИ рамочной антенной

Анализируя выражения (1), необходимо заметить, что для составляющих электрического и магнитного полей входят отдельные слагаемые  $\alpha r$  и  $\alpha^2 r^2$  пропорциональные единице. Так как  $\alpha r = 2\pi \frac{r}{\lambda}$ , для очень малых по сравнению с длиной волны расстояний ( $r \ll \lambda$ ) от точки излучения можно сделать следующие допущения

$$\alpha r \ll 1; \alpha^2 r^2 \ll 1; e^{-j\alpha r} \approx 1. \quad (2)$$

Тогда выражение (1) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{E}_\varphi = -\frac{\dot{I}_m l}{4\pi r^2} \sin \theta; \\ \dot{H}_r = j \frac{\dot{I}_m l}{2\pi \omega \mu_a r^3} \cos \theta; \\ \dot{H}_\theta = j \frac{\dot{I}_m l}{4\pi \omega \mu_a r^3} \sin \theta; \\ \dot{E}_r = \dot{E}_\theta = \dot{H}_\varphi = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Эквивалентный магнитный ток и электрический ток, наводимый в рамке, связаны следующим соотношением:

$$\dot{I}_m = j\omega \frac{\mu_a S}{l} \dot{I}, \quad (4)$$

где  $S$  – площадь последнего витка внешней спирали.

Тогда выражение (3) можно переписать, учитывая (4), следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{E}_\varphi = -\frac{j\omega \mu_a S \dot{I}}{4\pi r^2} \sin \theta; \\ \dot{H}_r = -\frac{S \dot{I}}{2\pi r^3} \cos \theta; \\ \dot{H}_\theta = -\frac{S \dot{I}}{4\pi r^3} \sin \theta. \end{cases} \quad (5)$$

Принятие допущений  $r \ll \lambda$ ,  $\alpha r \ll 1$ ,  $\alpha^2 r^2 \ll 1$  и  $e^{-j\alpha r} \approx 1$  равносильно пренебрежению запаздыванием электромагнитных процессов. При этом электромагнитные поля вокруг данной рамочной антенны будут в основном определяться током, наводимым на последнем витке внешней спирали при срабатывании ВМГ. Вектор электрического поля данной излучающей структуры имеет только одну составляющую  $\dot{E}_\varphi$  и лежит в плоскости, перпендикулярной оси рамочной антенны (см. рисунок 1). Вектор магнитного поля имеет две составляющие  $\dot{H}_r$  и  $\dot{H}_\theta$ , не зависящие от длительности и длины волны МЭМИ. Результирующий вектор будет лежать в плоскостях, проходящих через ось вибратора. Следовательно, векторы электрического и магнитного полей данной излучающей структуры в любой точке ближней зоны будут взаимно перпендикулярны. Амплитуды электрического и магнитного полей в ближней зоне будут убывать пропорционально квадрату и кубу расстояния (см. рисунок 2), поэтому размеры ближней зоны в данном случае будут очень малы, несмотря на достаточно высокие значения напряженностей непосредственно в точке излучения.

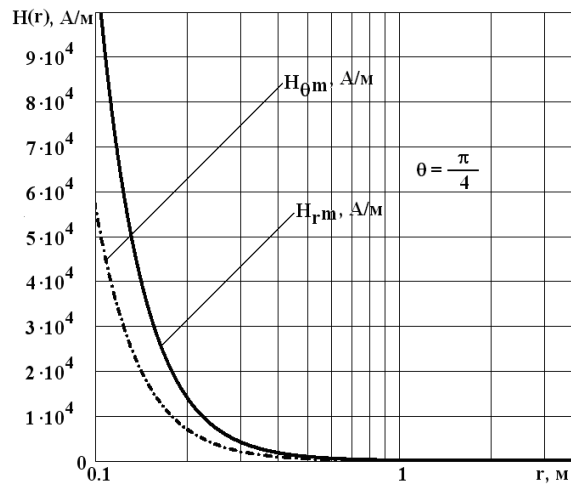


Рисунок 2 – Распределение амплитуд напряженностей магнитного поля в ближней зоне излучения последнего витка внешней спирали при  $\tau_{и} = 30 \cdot 10^{-6}$  с

Таким образом, в ближней зоне будет проявляться только незначительное излучение выбранной комбинированной системы и размеры зоны функционального поражения РЭС не будут превышать несколько десятков сантиметров.

Для дальней зоны излучения выбранной комбинированной структуры выполняется условие  $r \gg \lambda$ . В этом случае можно сделать следующие допущения:

$$\alpha r \gg 1; \alpha^2 r^2 \gg \alpha r; \frac{1}{r^2} \rightarrow 0 \text{ и } \frac{1}{r^3} \rightarrow 0. \quad (6)$$

Тогда выражение (3) для дальней зоны излучения можно переписать, учитывая (6), следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{E}_\varphi = -j \frac{\dot{I}_m e^{-j\alpha r} \alpha}{4\pi r} \sin \theta; \\ \dot{H}_\theta = j \frac{\dot{I}_m e^{-j\alpha r} \alpha^2}{4\pi \omega \mu_a r} \sin \theta; \\ \dot{E}_r = \dot{E}_\theta = \dot{H}_\varphi = \dot{H}_r = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Система (7), учитывая выражение (4), характеризующее связь магнитного и электрического тока, будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{E}_\varphi = \frac{\dot{I}e^{-j\alpha r} \alpha S \omega \mu_a}{4\pi r} \sin \theta; \\ \dot{H}_\theta = -\frac{\dot{I}e^{-j\alpha r} \alpha^2 IS}{4\pi r} \sin \theta. \end{cases} \quad (8)$$

Анализуя систему выражений (8), необходимо заметить, что в дальней зоне излучения выбранной структуры вектор напряженности магнитного поля имеет только одну составляющую  $\dot{H}_\theta$  (см. рисунок 1). Данная составляющая лежит в меридиональной плоскости (проходящей через ось рамочной антенны). Вектор напряженности электрического поля будет иметь также одну составляющую  $\dot{E}_\varphi$  (см. рисунок 1), лежащую в экваториальной плоскости (перпендикулярную оси рамочной антенны). В любой точке дальней зоны электрическая и магнитная компоненты МЭМИ будут сдвинуты относительно друг друга по фазе на  $180^\circ$ , что обеспечивает направление вектора Умова-Пойнтинга вдоль радиуса вектора, направленного от точки излучения до точки наблюдения ( $r$ ). Амплитуды напряженностей электромагнитного поля убывают обратно пропорционально первой степени расстояния от точки излучения. Такое сравнительно медленное убывание амплитуд поля в дальней зоне лежит в основе передачи энергии МЭМИ от места подрыва комбинированного ВМГ до РЭС противника.

На рисунке 3 представлены зависимости изменения амплитудных значений  $\dot{H}_\theta$  и  $\dot{E}_\varphi$  от расстояния до точки излучения МЭМИ.

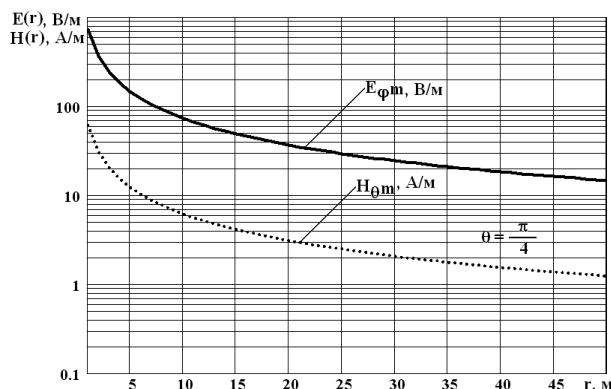


Рисунок 3 – Распределение амплитуд напряженностей магнитного и электрического полей в дальней зоне излучения последнего витка внешней спирали при  $\tau_{и} = 30 \cdot 10^{-6}$  с

Анализируя данную графическую зависимость, необходимо заметить, что, несмотря на увеличение, по сравнению с ближней зоной, уровней полей (см. рисунок 2), их величины все равно малы в сравнении с критическими значениями, вызывающими функциональное поражение чувствительных элементов РЭС [3, 4].

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.

На рисунке 4 представлены зависимости изменения амплитудных значений  $\dot{H}_\theta$  и  $\dot{E}_\varphi$  от расстояния до точки излучения МЭМИ при длительности импульса  $\tau_{и} = 30 \cdot 10^{-9}$ .

Таким образом, при излучении комбинированным ВМГ с радиусом последнего витка 10 см. импульсного МЭМИ наносекундной длительности радиус зоны поражения может увеличиваться до 87 метров.

**Выводы.** Характеристики генерируемого комбинированным взрывомагнитным генератором МЭМИ определяются зоной излучения применяемой антенной системы. При использовании в качестве излучающей антенны последнего витка внешней спирали КВМГ в дальней зоне излучения можно ожидать высокие уровни наведенных электромагнитных полей, достаточных для функционального поражения РЭС. При излучении комбинированной структурой импульсного МЭМИ наносекундной длительности радиус зоны поражения может увеличиваться до сотен метров.

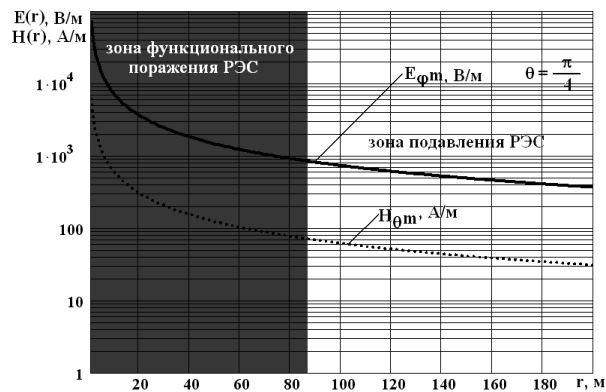


Рисунок 4 – Распределение амплитуд напряженностей магнитного и электрического полей в дальней зоне излучения последнего витка внешней спирали при  $\tau_{\text{и}} = 30 \cdot 10^{-9}$  с.

#### Литература

1. Столярчук А.В. Принципы создания комплексированного ВМГ / А.В. Столярчук, В.И. Чумаков // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития : 2-й Международный радиоэлектронный форум : сб. науч. трудов. – Харьков.: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2005. – Т. 6. – С. 92–95.
2. Ермаков Г.В. Особенности блокирования радиолиний управления взрывными устройствами с магнитными антеннами / Г.В. Ермаков, И.И. Зима // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития : 3-й Международный радиоэлектронный форум : сб. науч. трудов. – Х.: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2008. – С. 186–188.
3. Кравченко В.И. Электромагнитное оружие / В.И. Кравченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 185 с.
4. Особенности воздействия мощных электромагнитных излучений на радиоэлектронные средства УКВ диапазона / Д.Б. Кучер, С.В. Тараненко, В.П. Макогон [та ін.] // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х. : ХУПС ім. Івана Кожедуба, 2008. – Вип. 3(18) . – С. 44–47.

УДК 621.396.6

Кучер Д.Б., Харланов О.І., Медведь І.В., Тараненко С.В.

#### МОДЕЛЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ, НАВЕДЕНИХ КОМБІНОВАНИМИ ВИБУХОМАГНІТНИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

У роботі розглянуто модель розповсюдження потужних електромагнітних випромінювань, наведених комбінованими вибухомагнітними генераторами, при використанні в якості випромінюючої системи останнього витка зовнішньої спирали.

Kucher D.B., Harlanov A.I., Medved I.V., Taranenko S.V.

#### MODEL OF CIRCULATION OF POWERFUL ELECTROMAGNETIC RADIATIONS, GENERATED BY THE EXPLOSIVE MAGNETIC GENERATORS

In work the model of circulation of powerful electromagnetic radiations, generated by the explosive magnetic generators, at the use as a radiative system of the last coil of external spiral, is examined.