

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.

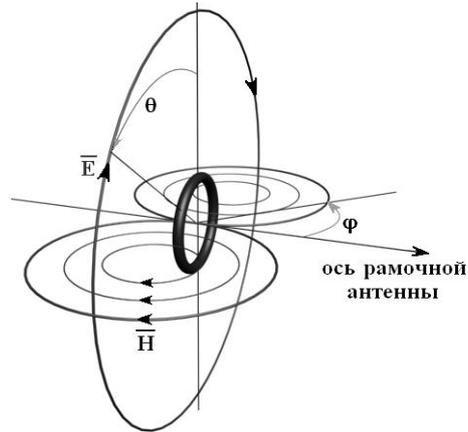


Рисунок 1 – Распределение электромагнитных полей при излучении МЭМИ рамочной антенной

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.

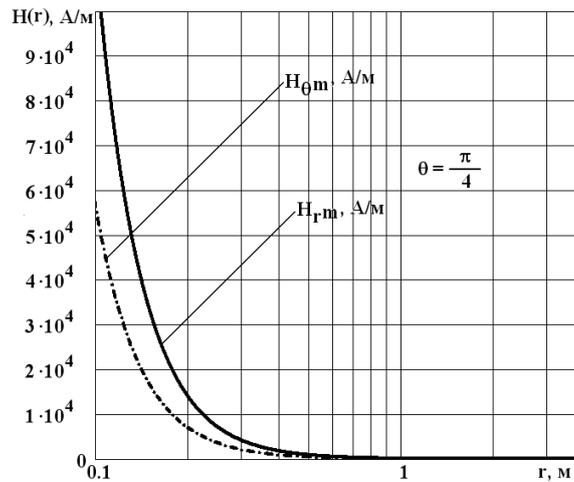


Рисунок 2 – Распределение амплитуд напряженностей магнитного поля в ближней зоне излучения последнего витка внешней спирали при  $\tau_{и} = 30 \cdot 10^{-6}$  с

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:

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

Аналізуючи систему виражень (8), необхідно помітити, що в дальній зоні випромінювання вибраної структури вектор напруженності магнітного поля має тільки одну складову  $\dot{H}_\theta$  (см. рисунок 1). Данна складова лежить в меридіональній площині (проходять через вісь рамочної антени). Вектор напруженності електричного поля буде мати також одну складову  $\dot{E}_\varphi$  (см. рисунок 1), лежачу в екваторіальній площині (перпендикулярну осі рамочної антени). В будь-якій точці дальньої зони електрична і магнітна компоненти МЭМИ будуть зсунуті відносно одна друга по фазі на  $180^\circ$ , що забезпечує напрямлення вектора Умова-Пойнтинга вздовж радіуса вектора, направлено від точки випромінювання до точки спостереження ( $r$ ). Амплітуди напруженностей електромагнітного поля зменшуються обернено пропорційно першій степені відстані від точки випромінювання. Таке порівняно повільне зменшення амплітуд поля в дальній зоні лежить в основі передачі енергії МЭМИ від місця подрыва комбінованого ВМГ до РЭС противника.

На рисунку 3 представлені залежності змін амплітудних значень  $\dot{H}_\theta$  і  $\dot{E}_\varphi$  від відстані до точки випромінювання МЭМИ.

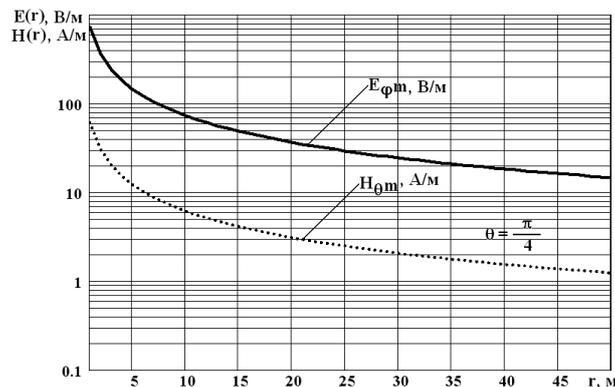


Рисунок 3 – Розподіл амплітуд напруженностей магнітного та електричного полів в дальній зоні випромінювання останнього витка зовнішньої спіралі при  $\tau_{и} = 30 \cdot 10^{-6}$  с

Аналізуючи дану графічну залежність, необхідно помітити, що, незважаючи на збільшення, порівняно з ближньою зоною, рівень полів (см. рисунок 2), їх величини всі рівно малі в порівнянні з критичними значеннями, викликаючими функціональне ураження чутливих елементів РЭС [3, 4].

Амплітуди полів в дальній зоні обернено пропорційні довжині хвилі (або тривалості  $\tau_{и}$  при імпульсному випромінюванні) і прямо пропорційні частоті коливань струму в випромінюючій системі.

На рисунку 4 представлені залежності змін амплітудних значень  $\dot{H}_\theta$  і  $\dot{E}_\varphi$  від відстані до точки випромінювання МЭМИ при тривалості імпульсу  $\tau_{и} = 30 \cdot 10^{-9}$ .

Таким чином, при випромінюванні комбінованим ВМГ з радіусом останнього витка 10 см. імпульсного МЭМИ наносекундної тривалості радіус зони ураження може збільшуватися до 87 метрів.

**Висновки.** Характеристики генерованого комбінованим вибухомагнітним генератором МЭМИ визначаються зоною випромінювання застосованої антенної системи. При використанні в якості випромінюючої антени останнього витка зовнішньої спіралі КВМГ в дальній зоні випромінювання можна очікувати високі рівні наведених електромагнітних полів, достаточних для функціонального ураження РЭС. При випромінюванні комбінованою структурою імпульсного МЭМИ наносекундної тривалості радіус зони ураження може збільшуватися до сотень метрів.

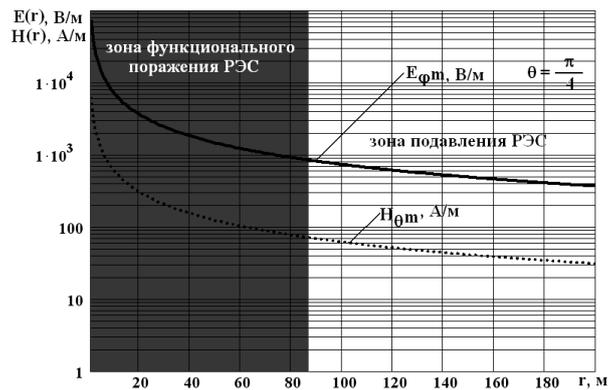


Рисунок 4 – Распределение амплитуд напряженностей магнитного и электрического полей в дальней зоне излучения последнего витка внешней спирали при  $\tau_{\text{и}} = 30 \cdot 10^{-9}$  с.

#### 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.