

УДК 681.5:618.518

*Досліджено розподіл напруженості електромагнітного поля поблизу джерела випромінювання, який створює імпульсне поле над землею з різною вологістю*

*Ключові слова: напруженість поля, джерело, імпульсне поле*

*Исследовано распределение напряженности электромагнитного поля над земной поверхностью вблизи импульсного источника излучений при различной влажности почвы*

*Ключевые слова: напряженность поля, источник импульсных полей*

*Obtained electromagnetic field over earth surface for pulsed radiation*

*Key words: electromagnetic field, pulsed radiation*

# ОЦЕНКА ЭМО В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ, СОЗДАВАЕМАЯ ИМПУЛЬСНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПОМЕХ

**В. Д. Сахачкий**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой\*

**В. А. Гладуш\***

\*Кафедра радиоэлектроники и компьютерных систем Украинская инженерно-педагогическая академия ул. Университетская, 16, г. Харьков, Украина, 61003

## 1. Постановка задачи

В настоящее время в промышленных городах имеется тенденция к ухудшению электромагнитной обстановки (ЭМО). Это обусловлено прежде всего возрастанием промышленных радиопомех в окружающей среде. Увеличение функциональной сложности радиоэлектронных средств (РЭС), используемых в различных областях человеческой деятельности, повышение их быстродействия, широкое применение в них высокочувствительных элементов делают вопросы обеспечения помехозащищенности РЭС все более актуальными.

Для прогнозирования степени влияния сложившейся ЭМО на РЭС важное значение имеет оценка ЭМО. В настоящее время уровень мощности излучения или напряженности поля в окружающей среде достаточно подробно изучен для источников гармонических излучений [1,2,3]. На практике множество источников создает в окружающей среде импульсные поля. Условия их распространения в реальных условиях в полном объеме еще не изучены.

## 2. Цель работы

Целью работы является изучение влияния проводимости земной поверхности на напряженность поля в окружающей среде, создаваемую вблизи себя импульсным источником излучений.

## 3. Анализ литературы

Классическими работами по определению напряженности полей дальних зон излучений над земной поверхностью для гармонических источников являются работы Зоммерфельда А., Введенского Б.А. и других авторов. В то же время для практических целей важно знать картину распределения поля вблизи источников излучений. В работе [2] приведены обобщенные соотношения для составляющих квазистатического поля дипольных источников излучений, расположенных на плоской поверхности с заданной проводимостью. В работе [3] численно определены составляющие электромагнитного поля, созданного магнитными диполями, когда высоты приемной антенны ( $z$ ) и передающей антенны ( $h$ ) были больше нуля. Полученные результаты справедливы только при  $\rho \gg (z+h)$ , где  $\rho$  - расстояние между антеннами в горизонтальной плоскости. С целью получения более простых аналитических выражений в работе [4] разработана теория квазистатических полей дипольных антенн, расположенных на земной поверхности или над нею, которая базируется на методе эквивалентных зеркальных отражений. Использование данного метода при решении электродинамических задач распространения радиоволн на земной поверхностью обусловлено тем, что при строгом решении волновых уравнений появляются интегралы, которые не могут быть вычислены аналитически для области квазистатического поля, за исключением случая  $\rho \gg (z+h)$ . Показано, что на расстояниях много

больших и много меньших глубины скин- слоя полученные формулы сводятся к формулам, полученными строгими методами. При расстояниях соизмеримых с глубиной скин- слоя результаты расчета хорошо соответствуют результатам, полученным ранее с помощью интегральных уравнений.

Вопросы определения ЭМО для импульсных источников излучений в настоящее время находятся на стадии исследования. Здесь в достаточно полном объеме изучена ЭМО, создаваемая при ядерном взрыве и при разряде молнии [1].

#### 4. Основное содержание работы

Рассмотрим источники импульсных излучений, моделью которых могут служить горизонтальный и вертикальный электрические диполи. Пусть источник излучений расположен над земной поверхностью на высоте  $h$ . Точка наблюдения в горизонтальной плоскости от излучателя находится на расстоянии  $\rho$  и на высоте  $z$ . Относительная диэлектрическая проницаемость земной поверхности  $\epsilon_r$  и ее проводимость  $\sigma$ . Будем считать, что источник излучения создает в свободном пространстве напряженность поля в виде разнополярных прямоугольных импульсов длительности  $\Delta T$ , с периодом следования  $T$  и амплитудой  $E$ . Для определения напряженности поля импульсного источника в заданной точке наблюдения, воспользуемся результатами работы [5]. Здесь методом эквивалентных зеркальных изображений получены аналитические выражения для напряженности электромагнитного поля, создаваемой вблизи дипольного источника гармонических излучений. В частности, компоненты напряженности электрического поля горизонтального электрического диполя имеют вид:

$$E_\rho \approx \frac{\cos \varphi}{4\pi i \omega \epsilon_0} \left\{ \frac{1}{R_0^3} \left( \frac{3\rho^2}{R_0^2} - 1 \right) - \frac{1}{R_1^3} \left( \frac{3\rho^2}{R_1^2} - 1 \right) + \frac{2\gamma_0^2}{\gamma_1^2 R_1^3} \left( \frac{3\rho^2}{R_1^2} \right) - \gamma_0^2 \left( \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_2} \right) \right\}, \quad (1)$$

$$E_\varphi \approx \frac{\sin \varphi}{4\pi i \omega \epsilon_0} \left\{ \frac{1}{R_0^3} - \frac{1}{R_1^3} + \frac{2\gamma_0^2}{\gamma_1^2 R_1^3} + \gamma_0^2 \left( \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_2} \right) \right\}, \quad (2)$$

$$E_z \approx \frac{\rho \cos \varphi}{4\pi i \omega \epsilon_0} \left\{ \frac{3(z-h)}{R_0^5} - \frac{3(z-h)}{R_1^5} + \frac{6\gamma_0^2(z+h)}{\gamma_1^2 R_1^5} - \frac{\gamma_0^2}{\rho^2} \left[ \frac{(z+h)}{R_1} - \frac{(d+z+h)}{R_2} \right] \right\}, \quad (3)$$

где  $\Pi$ - дипольный момент,  
 $\varphi$  - азимут точки наблюдения,

$$R_0 = \sqrt{\rho^2 + (z-h)^2}, \quad R_1 = \sqrt{\rho^2 + (z+h)^2}, \quad R_2 = \rho + (d+z+h)^2$$

- если расстояние до источника гораздо меньше длины волны в свободном пространстве и  $\frac{1}{R_2} \approx \frac{1}{R_1} - \frac{2}{\gamma_1^2 R_1^3} \left[ 1 + \gamma_1(z+h) - \frac{3(z+h)^2}{R_1^2} \right]$ , - если это расстояние гораздо больше глубины скин -слоя,

$$d = 2/\gamma_1, \quad \gamma_0 = i\omega(\mu_0 \epsilon_0)^{1/2}, \quad \sigma_0 = \sigma + i\omega \epsilon_0 \cdot \epsilon_r,$$

$\epsilon_0$  и  $\mu_0$  - соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемость свободного пространства.

Компоненты напряженности электрического поля для вертикального электрического диполя имеют вид:

$$E_z \approx \frac{1}{4\pi i \omega \epsilon_0} \left\{ \frac{1}{R_0^3} \left[ 1 - \frac{3(z-h)^2}{R_0^2} \right] + \frac{1}{R_1^3} \left[ 1 - \frac{3(z+h)^2}{R_1^2} \right] \right\}, \quad (4)$$

$$E_\rho \approx \frac{\rho}{4\pi i \omega \epsilon_0} \left\{ \frac{3(z-h)}{R_0^5} + \frac{3(z-h)}{R_1^5} - \frac{6\gamma_0^2(z+h)}{\gamma_1^2 R_1^5} - \frac{\gamma_0^2}{\rho^2} \left[ \frac{(d+z+h)}{R_2} - \frac{(z+h)}{R_1} \right] \right\}, \quad (5)$$

Тогда, с учетом приведенных выражений для составляющих, результирующую напряженность электрического поля можно определить по формуле

$$E_r = \sqrt{\frac{\rho^2}{z^2} + E_\rho^2 + E_\varphi^2} \quad (6)$$

для горизонтального электрического диполя и по формуле

$$E_B = \sqrt{E_z^2 + E_\rho^2} \quad (7)$$

для вертикального электрического диполя.

Если дипольный источник создает импульсное излучение, то его напряженность поля в точке наблюдения будет описываться уравнением [6,7]

$$E_{(t)} = \sum_{k=1}^{\infty} \left[ A_{(k)} \sqrt{2} \Pi_{(k)} \sin(2\pi k t / T) \right], \quad (8)$$

где  $A_{(k)} = 4\sqrt{2} \frac{E}{T} \frac{\sin\left(\frac{\pi k \Delta T}{T}\right)}{\pi k \frac{\Delta T}{T}} \sin\left(\frac{\pi k}{2}\right)$ ,  $\Pi_{(k)}$  - коэффициент передачи на  $k$ -й гармонике.

Для горизонтального и вертикального диполей он соответственно имеет вид  $\Pi_{Г(к)} = E_{Г(к)} / E_{ГД(к)}$  и  $\Pi_{В(к)} = E_{В(к)} / E_{ВД(к)}$ , где  $E_{Г(к)}$  и  $E_{В(к)}$  определяются по формулам (6) и (7), а  $E_{ГД(к)}$  и  $E_{ВД(к)}$  - известные выражения для напряженности электрического поля горизонтального и вертикального диполей в свободном пространстве [8]. При этом необходимо учесть, что частота излучения  $k$  - й гармоники  $\omega = \omega_{(к)} = 2\pi k / T$ .

Так как чувствительные к воздействию радиопомех РЭС могут располагаться на различных этажах зданий, то представляет интерес определить картину распределения напряженности поля импульсного источника по высоте  $z$  при фиксированных расстояниях  $\rho$  до источника помех. Приведенные ниже результаты расчета соответствовали расстояниям 50м, 75м, 100м и 150м для сухой ( $\epsilon_r = 7$ ,  $\sigma = 10^{-3}$  См/м), влажной ( $\epsilon_r = 15$ ,  $\sigma = 1,2 \cdot 10^{-2}$  См/м) и мокрой ( $\epsilon_r = 30$ ,  $\sigma = 3 \cdot 10^{-2}$  См/м) земли. Источник излучения имел дипольный момент  $\Pi = 1A^*m$ .

На рис. 1-3 показано распределение по высоте относительной амплитуды напряженности поля импульсного излучения горизонтального диполя. Относительная амплитуда определялась как отношение амплитуды поля в точке приема ЕПР к амплитуде поля источника излучения ЕДЖ для сухой (с.з), влажной (в.з), и мокрой (м.з) земли. Азимут точки наблюдения  $\varphi = \pi / 2$ . Частота следования импульсов равна 1 МГц, длительность импульсов  $\Delta T = 0,25T$ , и амплитуда  $E=1В/м$ .

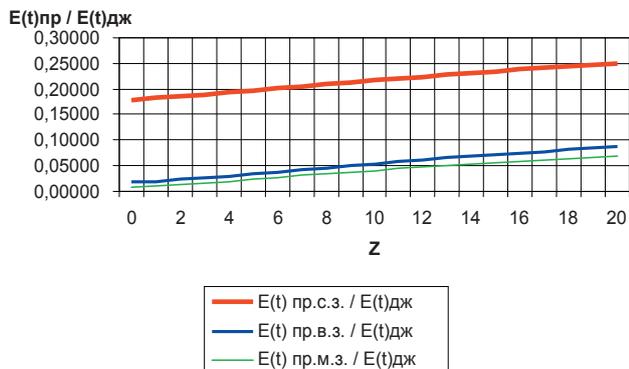


Рис. 1. Напряженность поля горизонтального диполя на различных высотах точки приема при  $\rho = 50м$

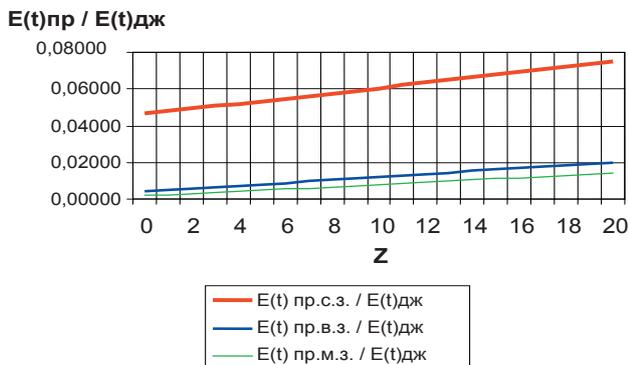


Рис. 2. Напряженность поля горизонтального диполя на различных высотах точки приема при  $\rho = 100м$

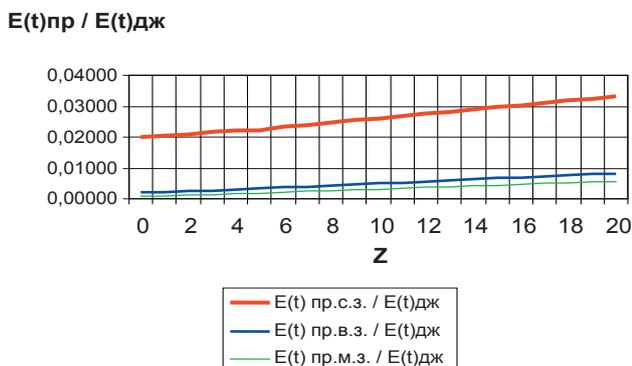


Рис. 3. Напряженность поля горизонтального диполя на различных высотах точки приема при  $\rho = 150м$

Из рисунков видно, что для горизонтального электрического диполя амплитуда импульсной помехи растет с увеличением высоты точки приема. Влажная почва за счет поглощения излучения уменьшает амплитуду помехи.

Распределение по высоте напряженности поля вертикального диполя показано на рис. 4-7. Расчеты проведены для той же частоты следования и параметров импульса.

**E(t)пр / E(t)дж**

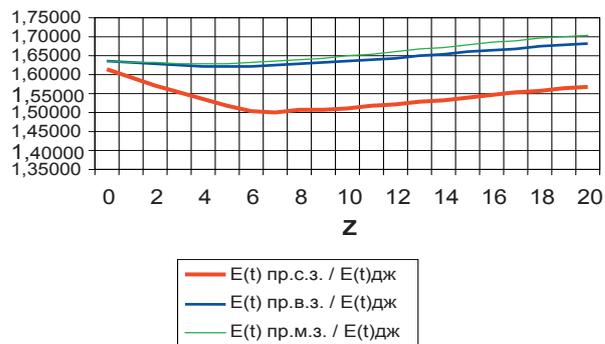


Рис. 4. Напряженность поля вертикального диполя на различных высотах точки приема при  $\rho = 50м$

**E(t)пр / E(t)дж**

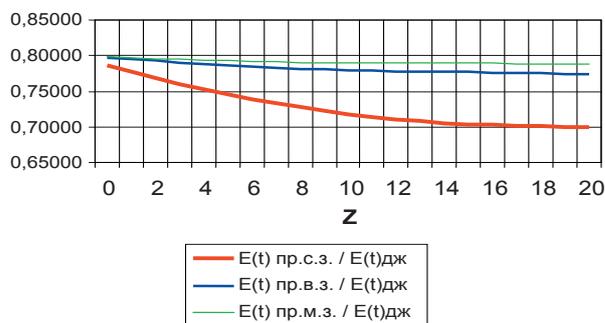


Рис. 5. Напряженность поля вертикального диполя на различных высотах точки приема при  $\rho = 75м$

**E(t)пр / E(t)дж**

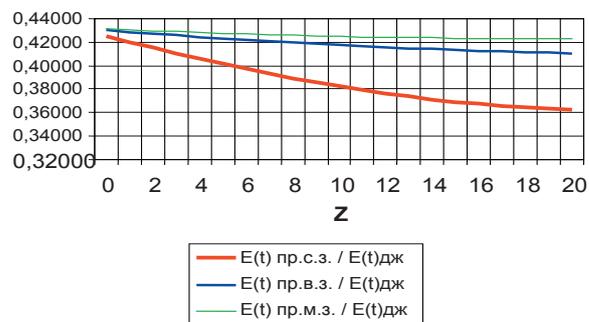


Рис. 6. Напряженность поля вертикального диполя на различных высотах точки приема при  $\rho = 100м$

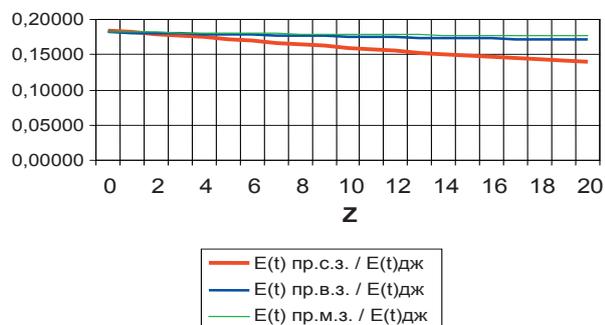
$$E(t)_{пр} / E(t)_{дж}$$


Рис. 7. Напряженность поля вертикального диполя на различных высотах точки приема при  $\rho = 150\text{ м}$

Из рисунков видно, что на больших расстояниях напряженность поля уменьшается с ростом высоты точки наблюдения, что можно объяснить видом диаграммы направленности диполя. При этом влажная земля за счет отражения от поверхности увеличивает напряженность поля в окружающей среде. При малых расстояниях (рис. 4) имеются высоты, на которых напряженность поля может достигать минимальных значений.

Следует отметить, что во всех случаях наличие проводящей поверхности земли приводит к искажению формы импульса. Импульс по мере увеличения расстояния до точки наблюдения начинает сглаживаться и расширяться. Полученные результаты имеют аналогичный характер и для других частот следования импульсов.

## 5. Выводы

Анализ полученных результатов показал, что для источников помех, которые можно представить в виде вертикального электрического диполя, чем больше влажность земли, тем выше напряженность поля в любой точке пространства на различных расстояниях от

источника помех. При расстояниях от излучателя 50 м и меньше на высотах 4 м - 8 м наблюдается минимальный уровень напряженности поля. Для источников помех, соответствующих горизонтальному диполю, напряженность поля минимальна на малых высотах и возрастает с увеличением высоты точки приема. Следовательно, чувствительные к воздействию радиопомех РЭС при непредвиденном источнике помех целесообразно располагать на средних этажах зданий.

## Литература

1. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи.- М.: Радио и связь, 1987.- 256с.
2. Bannister P. R. The quasi-static fields of dipole antennas at the earth's surface // Radio SciL, .- 1966.- vol. 1.- p.p. 1321-1330.
3. Bannister P. R. Quasi-static fields of dipole antennas located above the earth's surface // Radio Sci.- 1967.- vol. 2.- p.p. 1093-1103.
4. Bannister P. R. The image theory quasi-static fields of antennas above the earth's surface // NUSC Rep. .- 1969.- Dec. 29.- p.p.1061.
5. Bannister P. R. // Pros. IEEE.- 1979- № 67(7).- p.p. 1001-1008.
6. Хармут Х.Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и связи.- М.: Радио и связь, 1985.- 376с.
7. Шулманис А.А. Отражение радиоимпульсов от случайного неоднородного плазменного слоя // Труды Рижского политехнического института. Радиоэлектроника и связь. Исследование устройств, преобразующих электрические сигналы .- 1983.- С.82-84.
8. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн.- М.: Наука, 1973.- 607с.