

УДК 537.8

**Ю. В. Крушевский, к. т. н., доц.;**  
**Ю. И. Кравцов;**  
**В. В. Черныга, к. т. н., доц.**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ И НАПРАВЛЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТАРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В БЛИЖНЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЗОНАХ**

*В работе проведены теоретические исследования структуры поля элементарного электрического излучателя в ближней и промежуточной зонах. Построены диаграммы направленности этого вибратора по электрической составляющей поля на расстояниях 1,0 ... 35 см от него.*

***Ключевые слова:** элементарный излучатель, ближняя, промежуточная зоны, диаграмма направленности.*

### **Введение**

Массовое использование мобильных радиотелефонов (МРТ) является сегодня неопровержимым фактом. Этот вид коммуникаций предусматривает работу системы сотовой мобильной связи с использованием аппаратуры определенных стандартов. Самыми распространенными из них на сегодня являются стандарты GSM-900 и GSM-1800. МРТ этих стандартов работают в режиме передачи соответственно в частотных диапазонах 890...915 МГц и 1710...1785 МГц [3, 4].

Поскольку МРТ при его использовании находится возле головы (возле мозга) пользователя, имеет место влияние его излучения на здоровье человека. О вредности этого влияния можно судить, сравнив фактическую интенсивность облучения головы с санитарной нормой, принятой в Украине.

Другой актуальной на сегодня задачей является измерение интенсивности излучения МРТ с разработкой методов и средств измерения.

Фактическую же интенсивность излучения рассчитать или измерить не возможно, не исследовав поле излучателя в ближней и промежуточной зонах.

Интенсивность излучения характеризуется плотностью потока мощности, зависящая от мощности и частоты излучения МРТ, расстояния до точки наблюдения, структуры электромагнитного поля в этой точке и направленных свойств антенны радиотелефона. В современных МРТ используются дипольные, или спиральные антенны. Дипольная антенна представляет собой несимметричный четвертьволновой вибратор. Спиральная антенна – цилиндрической формы намотка провода, длина витка спирали которого является значительно меньше длины волны, что излучается. Такая антенна, как известно, характеризуется поперечным к оси спирали направлением излучения. Ее же диаграмма направленности будет такой же, как и вибратора.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Антенны МРТ можно считать короткими в масштабе излучаемых ими длин электромагнитных волн. Направленность коротких симметричных вибраторов длиной  $2l \leq 0,5\lambda$  практически совпадает с направленностью электрического вибратора Герца – физической модели элементарного электрического излучателя. Так, например, ширина диаграммы направленности симметричного полуволнового вибратора ( $2l = 0,5\lambda$ ) равняется  $80^\circ$ , а вибратора Герца –  $90^\circ$ , коэффициенты направленного действия равняются соответственно 1,64 и 1,50 [2, 3].

Известно, что симметричный электрический вибратор Герца излучает электромагнитное

поле, три составляющие которого в сферических координатах равняются [1]:

$$\dot{E}_{mr} = \frac{I_m l k^3}{2\pi \omega \varepsilon_a} \left[ \left( \frac{1}{kr} \right)^2 - j \left( \frac{1}{kr} \right)^3 \right] \cdot e^{-jkr} \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

$$\dot{E}_{m\theta} = \frac{I_m l k^3}{4\pi \omega \varepsilon_a} \left[ \frac{1}{kr} - j \left( \frac{1}{kr} \right)^2 - \left( \frac{1}{kr} \right)^3 \right] \cdot e^{-jkr} \cdot \sin \theta, \quad (2)$$

$$\dot{H}_{m\varphi} = j \frac{I_m l k^2}{4\pi} \left[ \frac{1}{kr} - j \left( \frac{1}{kr} \right)^2 \right] \cdot e^{-jkr} \cdot \sin \theta, \quad (3)$$

где,  $E_{mr}$ ,  $\dot{E}_{m\theta}$  и  $\dot{H}_{m\varphi}$  – комплексные амплитуды соответственно радиальной, меридиональной составляющих электрического поля и экваториальной составляющей магнитного поля;  $I_m$  – амплитуда гармонического тока, что протекает в вибраторе Герца;  $l$  – длина вибратора;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота электромагнитного поля;  $\varepsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, что окружает вибратор;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число (коэффициент фазы) электромагнитной волны;  $\theta$  – меридиональная угловая координата точки наблюдения поля вибратора;  $r$  – расстояние от вибратора до точки наблюдения;  $\lambda$  – длина волны поля вибратора.

Все задачи радиосвязи предусматривают, что точка наблюдения находится в дальней зоне, где  $kr \gg 1$ , и составляющей  $\dot{E}_{mr}$  в сравнении с  $\dot{E}_{m\theta}$  можно пренебречь, то есть в этой зоне учитываются только две ортогональные составные поля:

$$\dot{E}_{m\theta} = \frac{I_m l k}{4\pi \omega \varepsilon_a r} e^{-jkr} \cdot \sin \theta,$$

$$\dot{H}_{m\varphi} = j \frac{I_m l k}{4\pi r} e^{-jkr} \cdot \sin \theta.$$

Здесь среднее значение вектора плотности потока мощности имеет только одну радиальную составляющую [2,3]

$$\bar{\Pi}_{сер} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[ \dot{E}_{m\theta} \dot{H}_{m\varphi}^* \right],$$

которую можно определить по простой формуле [2]

$$\Pi_{сер} = \frac{P_{\Sigma}}{4\pi r^2}, \quad (4)$$

где  $P_{\Sigma}$  – мощность излучения вибратора Герца.

В случае исследования поля МРТ, который облучает голову пользователя, расстояние  $r$  является таким, что сильное неравенство  $kr \ll 1$  или  $kr \gg 1$  не выполняется. Так, например, при  $r \approx 5$  см – наименьшему расстоянию от излучателя к головному мозгу человека, на частоте 912,5 МГц (среднее значение частоты стандарта GSM-900) значения. Следовательно в выражениях (1)...(3) в квадратных скобках никаких упрощений сделать нельзя. На таких расстояниях находятся точки пространства, которые принадлежат к промежуточной зоне [2], где электромагнитное поле будет иметь более сложную структуру, поскольку будет определяться тремя составляющими, описанными выражениями (1)...(3). Таким образом, при расчете плотности потока мощности использование формулы (4) даст значительную погрешность.

По магнитной составляющей, как видно из выражения (3), диаграмма направленности излучателя полностью совпадает с известными результатами [1, 2] и для исследуемого случая представлена на рис. 1.

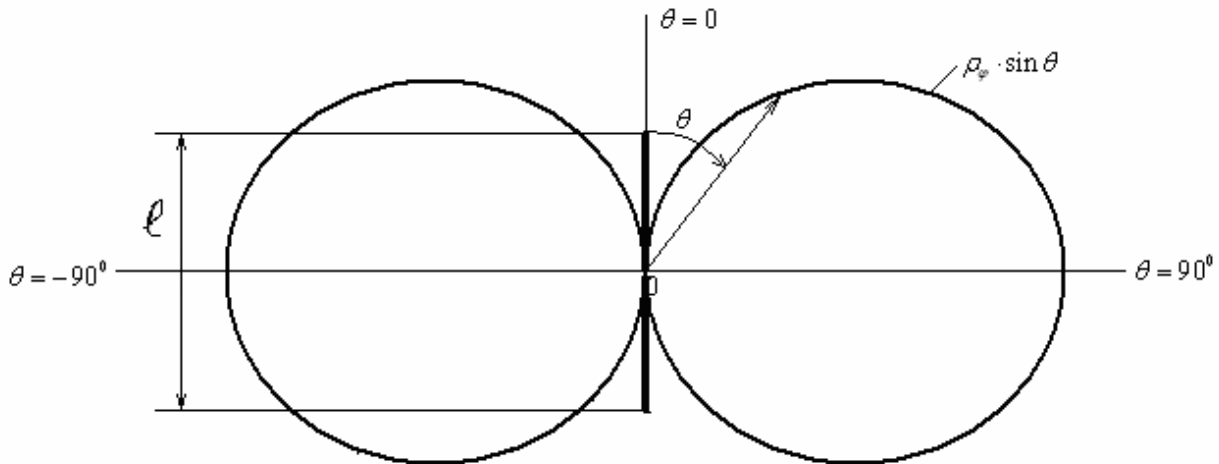


Рис. 1. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя по магнитной составляющей поля

### Постановка задания

Электромагнитное поле антенн базовых станций представляет интерес только в дальней зоне. Оно хорошо изучено и описано в технической литературе и учебниках.

Практический интерес представляет поле антенны мобильного радиотелефона в ближней и промежуточной ( $kr = 0,5 \dots 5$ ) зонах, описание которого в литературе отсутствует.

Поскольку основные параметры антенн МРТ являются практически одинаковыми с соответствующими параметрами элементарного электрического излучателя, проведем исследование структуры поля и диаграмм направленности последнего, а полученные результаты обобщим на антенны МРТ.

Такой подход к поставленному заданию позволит существенно уточнить распределение поля, облучающего пользователя мобильником.

### Основные материалы статьи

Если комплексные величины в квадратных скобках выражений (1)...(3) представить в

показательной форме и учесть, что  $\frac{k}{\omega \varepsilon_a} = \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}$ , то они переписутся таким образом:

$$\dot{E}_{mr} = 2E_0 \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6} \cdot e^{-j\left(kr + \arctg \frac{1}{kr}\right)} \cdot \cos \theta, \quad (5)$$

$$\dot{E}_{m\theta} = E_0 \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot e^{-j\left(kr - \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{kr}{k^2r^2 - 1}\right)} \cdot \sin \theta, \quad (6)$$

$$\dot{H}_{m\phi} = H_0 \sqrt{\left(\frac{1}{k}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot e^{-j\left(kr - \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{1}{kr}\right)} \cdot \sin \theta, \quad (7)$$

где  $E_0 = \frac{I_m l k^2}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}$ ,  $H_0 = \frac{I_m l k^2}{4\pi}$ .

Выражения (5)...(7) являются комплексными амплитудами составляющих

гармонического электромагнитного поля элементарного излучателя, которым отвечают мгновенные значения напряженностей в любой момент времени  $t$ :

$$E_r = 2E_0 \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6} \cdot \cos\left(\omega t - kr - \operatorname{arctg} \frac{1}{kr}\right) \cdot \cos \theta, \quad (8)$$

$$E_\theta = E_0 \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot \cos\left(\omega t - kr + \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{kr}{k^2 r^2 - 1}\right) \cdot \sin \theta, \quad (9)$$

$$H_\varphi = H_0 \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot \cos\left(\omega t - kr - \operatorname{arctg} \frac{1}{kr}\right) \cdot \sin \theta. \quad (10)$$

Выбрав  $t=0$ , выражения (8)...(10) перепишем так:

$$E_r = 2E_0 \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6} \cdot \cos\left(kr + \operatorname{arctg} \frac{1}{kr}\right) \cdot \cos \theta, \quad (11)$$

$$E_\theta = E_0 \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot \cos\left(kr + \operatorname{arctg} \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \theta, \quad (12)$$

$$H_\varphi = H_0 \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot \cos\left(kr + \operatorname{arctg} \frac{1}{kr} - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \theta. \quad (13)$$

или:

$$E_r = E_{mr} \cos \theta, \quad (14)$$

$$E_\theta = E_{m\theta} \sin \theta, \quad (15)$$

$$H_\varphi = H_{m\varphi} \sin \theta, \quad (16)$$

где

$$E_{mr} = 2E_0 \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6}$$

$$E_{m\theta} = E_0 \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4}$$

$$H_{m\varphi} = H_0 \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4}$$

являются амплитудными значениями соответствующих составляющих поля излучателя на расстоянии  $r$  от него.

Форма диаграммы направленности излучателя по составляющей  $H_\varphi$  остается одинаковой для любых расстояний  $r$  до точки наблюдения и представлена в меридиональной плоскости (рис.1).

Функция направленности излучателя по электрической составляющей  $E$ , являющаяся суммой ортогональных составляющих  $E_r$  и  $E_\theta$ , которая находится по формуле:

$$E = \sqrt{E_r^2 + E_\theta^2}, \quad (17)$$

будет зависеть от соотношения этих составляющих, которое, в свою очередь, будет зависеть от расстояния  $r$  до точки наблюдения. Соотношение между отмеченными составляющими будет изменяться, поскольку, во-первых, их амплитуды с ростом  $r$  будут уменьшаться с разной скоростью, и, во-вторых, между ними существует фазовый сдвиг  $\Delta\varphi = \left(\arctg \frac{1}{kr} - \arctg \frac{kr}{k^2r^2 - 1} + \frac{\pi}{2}\right)$ , который тоже зависит от  $r$ . Следовательно составляющая  $E$  может быть найдена как сумма мгновенных значений ортогональных составляющих этого поля из выражения (17) с учетом (12), (13):

$$E = E_0 \sqrt{4 \left[ \left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6 \right] \cdot \cos^2 \left( kr + \arctg \frac{1}{kr} \right) \cdot \cos^2 \theta + \left[ \frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3 \right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot \cos^2 \left( kr + \arctg \frac{kr}{k^2r^2 - 1} - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \sin^2 \theta} \quad (18)$$

Используя выражение (18), построим зависимость  $E(\theta)$  для разных расстояний  $r$ , считая элементарный электрический излучатель антенной мобильного телефона по стандарту GSM-900 ( $\lambda_{сеп} = 32,8$  см).

Случай 1, когда  $r = 1$  см ( $kr = 0.2$ ),  $E_{mr} = 2,04 E_m \theta$ .

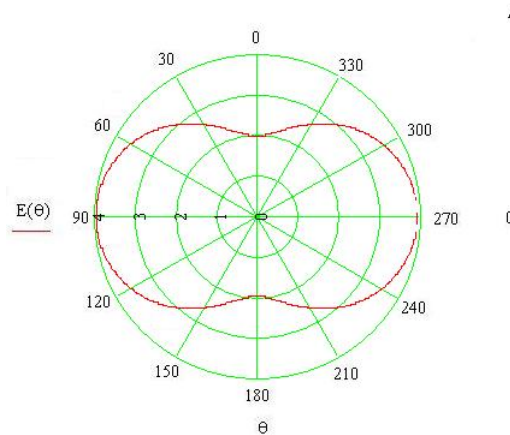


Рис. 2. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя по электрической составляющей поля при  $r = 1$  см

Случай 2, когда  $r = 5$  см ( $kr = 1$ ),  $E_{mr} = 2,82 E_m \theta$  ..

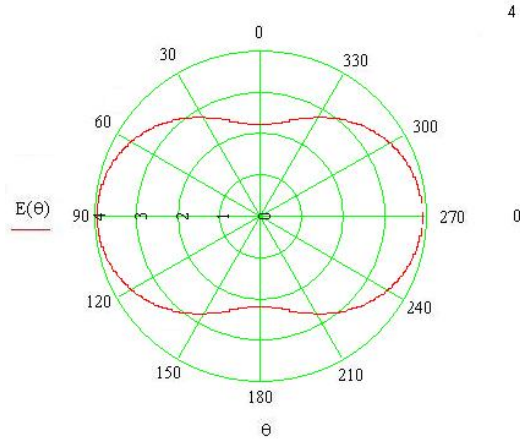


Рис. 3. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя по электрической составляющей при  $r = 5$  см.

Случай 3, когда  $r = 10$  см ( $kr = 2$ ),  $E_{mr} = 1,24 E_m \theta$  ..

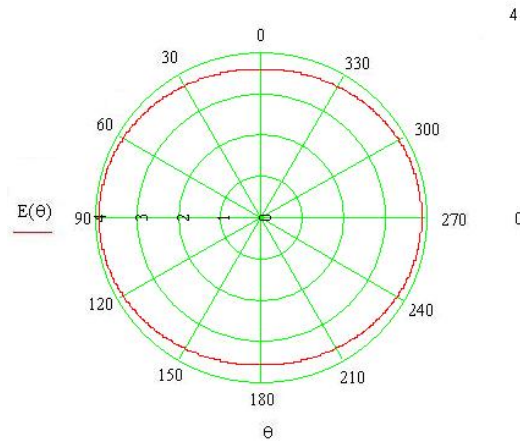


Рис. 4. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя по электрическому полю при  $r = 10$  см.

Случай 4, когда  $r = 12.5$  см ( $kr = 2.5$ ),  $E_{mr} = 0,93 E_m \theta$  ..

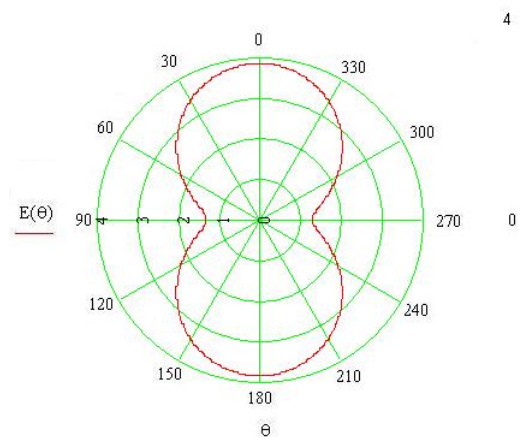
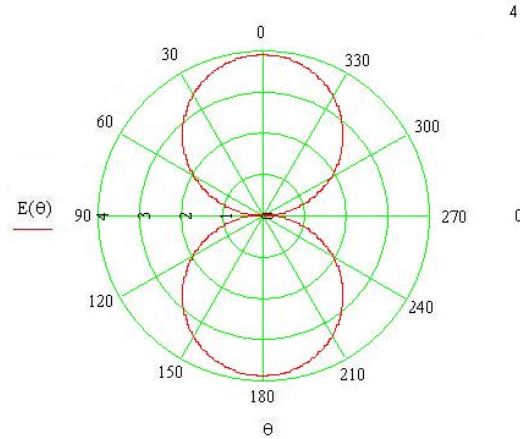


Рис. 5. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя по электрическому полю при  $r = 12$  см.

Случай 5, когда  $r = 14,1$  см ( $kr = 2,75$ ),  $E_{mr} = 0,77 E_m \theta$ .



Рису. 6. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя по электрическому полю при  $r=14,1$  см.

Случай 6, когда  $r = 15$  см ( $kr = 3$ ),  $E_{mr} = 0,74 E_m \theta$ .

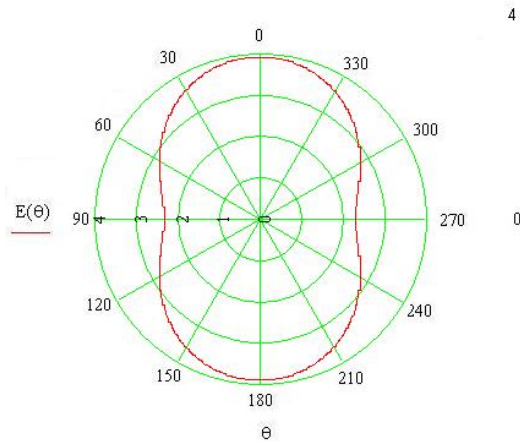


Рис. 7. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя по электрическому полю при  $r = 15$  см

Случай 7, когда  $r = 16$  см ( $kr = 3.2$ ),  $E_{mr} = 0,71 E_m \theta$ .

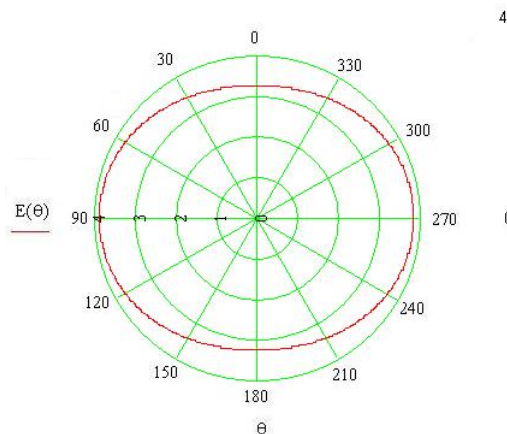


Рис. 8. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя по электрическому полю при  $r = 16$  см

Случай 8, когда  $r = 17$  см ( $kr = 3.4$ ),  $E_{mr} = 0,68 E_m \theta$ .

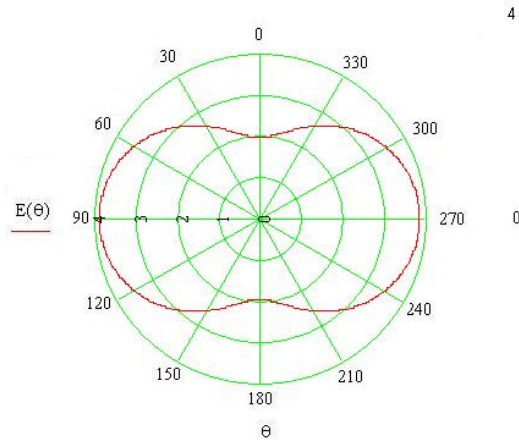


Рис. 9. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя по электрическому полю при  $r = 17$  см

Случай 9, когда  $r = 20$  см ( $kr = 4$ ),  $E_{\text{mr}} = 0,53 E_m \theta$ .

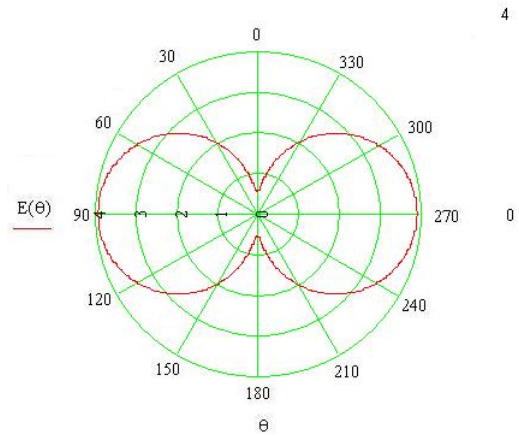


Рис. 10. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя по электрическому полю при  $r = 20$  см

Случай 10, когда  $r = 35$  см ( $kr = 7$ ),  $E_{\text{mr}} = 0,29 E_m \theta$ .

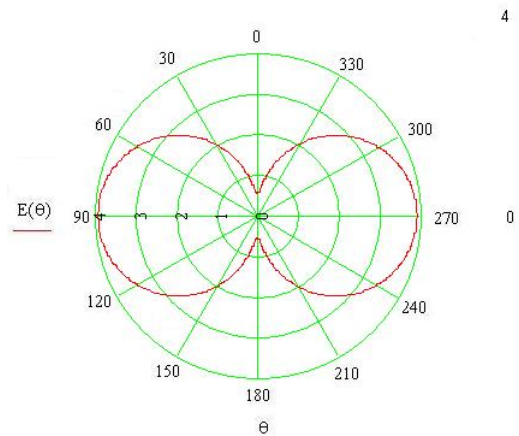


Рис. 11. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя по электрическому полю при  $r = 35$  см



### Анализ полученных результатов

На малых расстояниях, когда  $kr \leq 5$ , амплитуды составляющих электрического поля  $E_{m2}$  и  $E_{m\theta}$  являются величинами одного порядка и на результат векторного сложения будет иметь большое влияние фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$ . Так, в границах  $0 \leq kr \leq 5$   $\Delta\varphi(r)$  измениться от  $\pi$  до почти  $\pi/2$ , а  $\cos\Delta\varphi$  – от 0 до 1. Из-за этого диаграммы направленности излучателя по электрическому полю изменяются от горизонтальной “восьмерки” (рис.2) до вертикальной (рис.6) и снова до горизонтальной (рис.10).

На расстоянии приблизительно 12,33см ( $kr \approx 2,36$ ) амплитуды составляющих электрического поля станут равными. Дальше амплитуда радиальной составляющей  $E_{mr}$ , уменьшаясь быстрее амплитуды меридиальной составляющей  $E_{m\theta}$ , на расстоянии  $r = 100$  см ( $kr = 19,57$ )  $E_{mr} = 0,1E_{m\theta}$ . Фазовый сдвиг на расстояниях  $r \geq 25$ см становится постоянным, равным  $\pi/2$  и практически перестает влиять на форму диаграммы направленности.

Следовательно, на расстояниях  $r > 100$ см ( $r \geq 3\lambda$ ) радиальной составляющей в сравнении с меридиальной можно ( $E_{mr} < 0,1E_{m\theta}$ ) пренебречь и считать диаграмму направленности излучателя окончательно сформированной.

### Выводы

1. Форма диаграммы направленности элементарного электрического излучателя по электрической составляющей его поля в ближней и промежуточной зонах существенно зависит от расстояния до точки наблюдения, обусловленной зависимостью от этого расстояния не только отношения амплитуд радиальной и меридиональной составляющих поля, но и, главным образом, сдвига фаз между ними.

2. На границе между ближней и промежуточной зонами ( $0,5 \leq kr \leq 5$ ) амплитуда составляющих электрического поля являются величинами одного порядка и поэтому основное влияние на форму диаграммы направленности будет иметь фазовый сдвиг между этими составляющими.

3. На расстояниях, когда  $kr \geq 5$ , фазовый сдвиг между составляющими электрического поля становится практически независимым от расстояния  $r$  и равняется постоянной величине  $\pi/2$ . Из-за этого форма диаграммы направленности становится зависимой только от соотношения амплитуд составляющих электрического поля и приобретает окончательный вид на расстоянии не меньших  $3\lambda$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. – Г.: Связь, 1971 – 481 с.
2. Кочержевский Г.Н. Антенно-фиденные устройства. – Г.: Связь, 1972 – 471 с.
3. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. – Г.: Трениздат, 2005 – 178 с.
4. Ратынский М.В. Основы сотовой связи. – М.: Радио и связь, 1998 – 316 с.

**Крушевский Юрий Владимирович** – доцент кафедры радиотехники;

**Кравцов Юрий Иванович** – старший преподаватель кафедры проектирование компьютерной и телекоммуникационной аппаратуры;

**Черныга Вячеслав Васильевич** – доцент кафедры радиотехники.

Винницкий национальный технический университет.