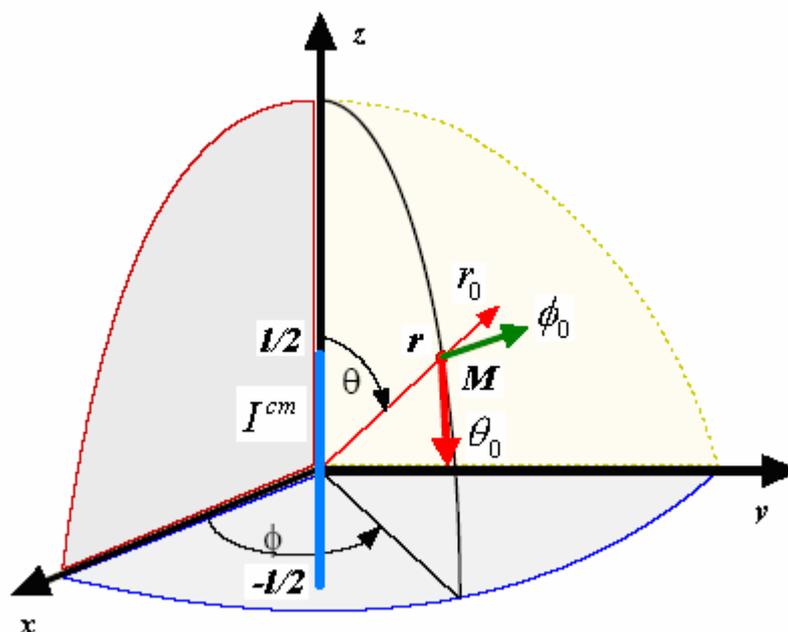


## 1.2.4. Ближние и дальние электромагнитные поля

Характер электромагнитного поля диполя в той или иной точке пространства существенно зависит от того, близко или далеко от него расположена рассматриваемая точка. В электродинамике и в теории антенн имеются соответствующие понятия – “ближнее” и “дальнее” поле. В основе этих оценок лежат соотношения между расстоянием от антенны до точки, в которой осуществляется прием сигнала. В курсах по ЭМС в университетах США и Европы тоже используются эти понятия применительно к расстояниям между источником и приемником помех.

Существуют разные способы оценки того, находится ли исследуемая точка пространства в ближнем или дальнем поле. В курсах по электродинамике поле, создаваемое источником, делят на две или иногда на три зоны. Связано такое деление с тем, что отдельные компоненты поля имеют различную зависимость от расстояния. Анализ поля излучения ЭЭИ обычно выполняют в сферической системе координат, в центр которой помещен излучатель (рис. Э26).

Электрический диполь длиной  $l$  с однородным током  $I^{cm}$  создает напряженности полей, проекции которых определяются соотношениями:



Элементарный электрический излучатель в сферической системе координат

$$\begin{aligned}
E_r &= \frac{kI^{cm}}{2\pi\omega\varepsilon\varepsilon_0 r^2} \left[ \frac{1}{kr} \sin(\omega t - kr) + \cos(\omega t - kr) \right] \cos\theta \\
E_\theta &= \frac{k^2 I^{cm}}{4\pi\omega\varepsilon\varepsilon_0 r} \left[ \frac{1}{kr} \cos(\omega t - kr) + \left( \frac{1}{k^2 r^2} - 1 \right) \sin(\omega t - kr) \right] \sin\theta \\
H_\alpha &= \frac{kI^{cm}}{4\pi r} \left[ \frac{1}{kr} \cos(\omega t - kr) - \sin(\omega t - kr) \right] \sin\theta
\end{aligned} \tag{Э-40}$$

а также  $E_\alpha = H_r = H_\theta = 0$ .

Из формул следует, что каждая компонента поля ( $E_r$ ,  $E_\theta$ , и  $H_\alpha$ ) имеет постоянную фазу на сферических поверхностях  $r = const$ , однако эти компоненты не синфазны, а их амплитуды зависят от угловой координаты  $\theta$ . Это неоднородная гармоническая сферическая волна, распространяющаяся в радиальном направлении и имеющая сложную пространственную структуру. Поле обладает осевой симметрией (отсутствует зависимость от азимутальной координаты  $\phi$ ), причем магнитные силовые линии – это концентрические окружности вокруг оси  $Z$ , а электрические силовые линии лежат в меридиональных областях (на рис. Э26 они отмечены красными стрелками).

Из приведенных соотношений для составляющих поля диполя следует, что отдельные компоненты поля имеют различную зависимость от расстояния  $r$ . Есть составляющие поля, обратно пропорциональные и первой, и второй, и третьей степени расстояния.

Члены, пропорциональные  $\frac{1}{r^2}$ ,  $\frac{1}{r^3}$  доминируют при малых расстояниях между источником поля – диполем и точкой М, где считается напряженность поля. Но с ростом расстояния эти компоненты быстро спадают и остаются только слагаемые, пропорциональные  $\frac{1}{r}$ . Поэтому для облегчения исследования электромагнитного поля все пространство принято делить на две или три зоны или области.

Критерии, по которым делится пространство, бывают разными. Наиболее простым является деление пространства на две части исходя из условия, что в некоторой точке пространства совпадают значения составляющих, определяемых слагаемыми, пропорциональными первой и второй степени  $\frac{1}{r}$ , т.е. формула критерия равна:

$$\frac{1}{kr} = \frac{1}{k^2 r^2}$$

откуда следует, что

$$r = \frac{1}{k} = \frac{\lambda}{2\pi}.$$

Этим расстоянием от источника поля все пространство делится на две области. Этот критерий используется наиболее часто. Отметим, что при таком выборе границы областей ее положение будет изменяться в зависимости от частоты сигнала, излучаемого диполем или антенной.

Но имеются и иные критерии деления пространства на области или зоны. Основные из них приведены в таблице № 2. Границу зон определяют часто и исходя из изменений волнового импеданса. Этот критерий, во-первых, особенно важен при проектировании систем экранирования и защиты от ЭМИ, если параметры излучения источника и расстояние до него точно известны. И этот критерий важен также для проектировщиков антенных систем, когда необходимо знать, как спадает поле при удалении от антенны.

Границей областей при волновом критерии принято считать расстояние, на котором волновое сопротивление перестает меняться и становится постоянным и равным волновому сопротивлению вакуума  $Z_0 = 120\pi$  (377 Ом). Поскольку отношение импеданса экрана к импедансу падающей волны определяет эффективность системы экранирования, при ее проектировании знание сопротивления падающей волны очень важно.

Импеданс падающей волны определяется как отношение напряженности электрического поля, создаваемого излучателем в данной точке, к напряженности магнитного поля в той же точке. В этом случае критерий можно записать более точно, если все пространство поделить на три зоны с двумя границами. Тогда для ближней области граница дается примерным соотношением

$$r \leq 0.1 \frac{\lambda}{2\pi} \quad (\text{Э-41a})$$

Таблица № 2

Модель трех областей			Модель двух областей	
Доминирующая составляющая поля			Доминирующая составляющая поля	
$\frac{1}{r}$	$\frac{1}{r^2}$	$\frac{1}{r^3}$	$\frac{1}{r}$	$\frac{1}{r^2}, \frac{1}{r^3}$
Дальняя зона		Ближняя зона	Дальняя зона	Ближняя зона
Зона Фраунгофера	Переходная зона	Зона Френеля	Зона Фраунгофера	Зона Френеля
Дальняя область	Область индукционного поля	Область статического поля	Дальняя область	Реактивное поле
Дальнее радиационное поле	Ближнее радиационное поле	Реактивное поле	Радиационное поле	Область индукционного поля
Дальняя область	Переходная область	Область квазистационарного поля	Дальняя область	Область статического или квазистационарного

Для промежуточной (переходной) области соотношение для границы имеет вид

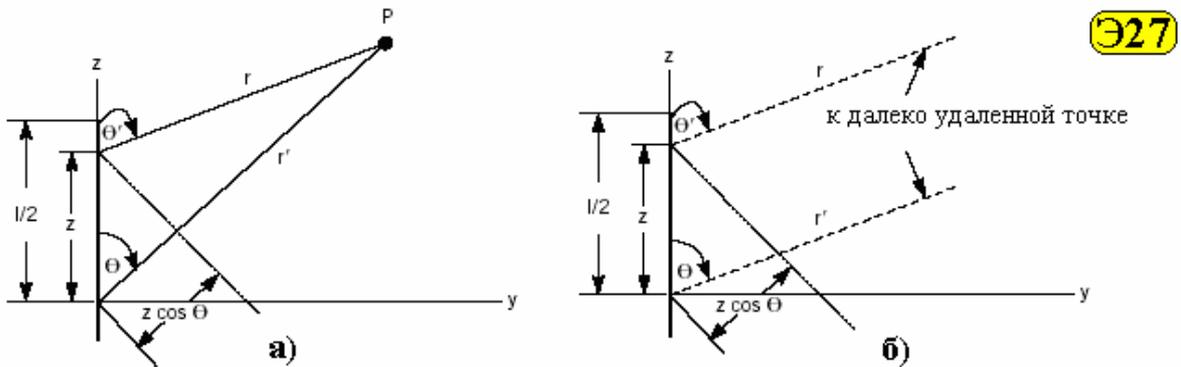
$$0.1\lambda/2\pi \leq r \leq 0.8\lambda/2\pi \quad (\text{Э-41б})$$

И для дальней области граница задается соотношением

$$r \geq 0.8\lambda/2\pi \quad (\text{Э-41в})$$

Таким образом, четкой границы, где можно было бы забить пограничный столб, эти соотношения не дают, но примерные значения оценить можно.

И, наконец, еще один критерий деления пространства на области, определяемой работой антенн. Разработчики антенн в качестве критерия границы областей используют фазовый фронт волны, создаваемой излучателем или антенной.



**Источник и приемник расположены близко (а) и далеко (б) друг от друга**

На рис. Э27а показаны две линии, идущие от антенны в точку Р. Линия  $r$  идет в точку Р из точки  $z$ , а линия  $r'$  идет из средней точки антенны в точку Р. Где-то вдоль линии  $r'$  есть область ближнего поля, а по мере удаления от излучателя переходит в область дальнего поля. Очевидно, что в точку Р сигналы из двух разных точек придут в разное время, по пути  $r'$  сигнал будет идти дольше и возникнет фазовый сдвиг между двумя сигналами. Этот сдвиг в единицах длин волн можно легко оценить из рисунка по теореме косинусов. Тогда границу ближней и дальней областей можно определить из условия, что фазовый фронт волны из двух точек будет почти одинаковым, что дает

$$r = \frac{l^2}{\lambda},$$

где  $l$  - длина диполя.

Мы, в результате, будем придерживаться следующего деления волнового пространства на три зоны или области:

1. ближнюю, соответствующую расстояниям, для которых  $r \ll \lambda/2\pi$ ; (встречаются также названия – область статического поля, область реактивного поля, квазистационарная область);
2. промежуточную, где  $r \cong \lambda/2\pi$  (ближнее радиационное поле, индукционное поле, переходная зона или переходная область)
3. дальнюю зону (зона Фраунгофера, дальнее радиационное поле), где  $r \gg \lambda/2\pi$ .

Результаты теоретического анализа показывают, что если расстояние  $r$  от центра диполя до точки  $M$  мало по сравнению с длиной волны ( $r \ll \lambda$ ), то справедливы те же формулы, что и для постоянных электрического и магнитного полей. Поле обладает осевой симметрией (отсутствует зависимость от азимутальной координаты  $\phi$ ), причем магнитные силовые линии – концентрические окружности, а электрические – лежат в меридиональных плоскостях. В ближней зоне, когда  $r \ll \lambda$ , поле квазистационарно. Электрическое поле диполя в каждый момент времени имеет структуру поля электростатического диполя, а магнитное поле может быть найдено на основании закона Био-Саварра.

Пренебрегая малыми членами в формулах (Э-41), можно получить приближенные соотношения, характеризующие поле в ближней и дальней зонах. В ближней зоне поле описывается выражениями:

$$\begin{aligned}
 E_r &= \frac{U^{cm}}{2\pi\omega\epsilon\epsilon_0 r^3} \sin \omega t \cos \theta \\
 H_\phi &= \frac{U^{cm}}{4\pi r^2} \sin \theta \cos \omega t \\
 E_\theta &= \frac{U^{cm}}{4\pi\omega\epsilon\epsilon_0 r^3} \sin \omega t \sin \theta
 \end{aligned}
 \tag{Э-42}$$

$E_r$  и  $E_\theta$  это составляющая напряженности электрического поля на расстоянии  $r$  от диполя и составляющая, перпендикулярная к  $r$ ; а  $\theta$  - угол между направлением диполя и направлением радиус- вектора  $r$ , проведенного из диполя в рассматриваемую точку.

Из формул (Э-42) следует, что поле в ближней зоне не имеет волнового характера (под аргументом тригонометрической функции нет членов с  $kr$ , т.е. фазы напряженностей электрического и магнитного полей не зависят от пространственных координат). В ближней зоне напряженность электриче-

ского поля элементарного электрического диполя спадает по закону  $\frac{1}{r^3}$  и в первом приближении выражается формулами:

$$E_r = 2p \frac{\cos \vartheta}{r^3}, \quad E_\varphi = p \frac{\sin \vartheta}{r^3},$$

Магнитное же поле электрического диполя пропорционально  $\frac{\sin \vartheta}{r^2}$ , где угол  $\vartheta$  - это угол между направлением тока и радиус-вектором в точку, где ищется поле.

Векторы электрического  $\vec{E} = rE_r + \theta E_\theta$  (пропорционален  $\sin \omega t$ ) и магнитного  $\vec{H} = \alpha H_\alpha$  (пропорционален  $\cos \omega t$ ) полей сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ . Отсюда следует, что плотность потока энергии, пропорциональная произведению напряженностей, имеет реактивный характер, а средний поток энергии равен нулю, т.е. переноса энергии не происходит и излучение отсутствует. Это означает, что в ближней зоне поля, запасавшие энергию, преобладают над излучающими полями. Ближняя зона называется часто *областью реактивного ближнего поля*.

В промежуточной области поле описывается полными формулами (Э-41). Эту область иногда называют областью излучаемого ближнего поля или зоной дифракции Френеля.

На *больших* расстояниях от диполя ( $r \gg \lambda$ ) закон изменения полей становится совсем другим. Эта так называемая *волновая* область или *дальняя* область. Поле в дальней области имеет вид

$$\begin{aligned} E_\theta &= \frac{k^2 I^{cm}}{4\pi\omega\epsilon\epsilon_0 r} \sin \theta \sin(\omega t - kr) \\ E_r &\approx 0 \\ H_\phi &= \frac{kI^{cm}}{4\pi r} \sin \theta \sin(\omega t - kr) \end{aligned} \quad (\text{Э-43})$$

Так как электромагнитное возмущение распространяется во все стороны от диполя с одинаковой скоростью  $c$  (при условии, что диполь находится в вакууме), то время прохождения волны до всех точек, удаленных от диполя на одно и то же расстояние  $r$ , одинаково. Поэтому во всех точках сферы, центр которой совпадает с диполем, фаза колебаний одинакова, т. е. возникает *сферический* волновой фронт, а следовательно, волна, излучаемая диполем, есть *сферическая* или *шаровая* волна.

Векторы  $\vec{E} = \theta E_\theta$  и  $\vec{H} = \alpha H_\phi$  взаимно перпендикулярны и ортогональны направлению распространения волны, так как волна распространяется в радиальном направлении. Векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  синфазны.

Отношение векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  зависит только от свойств среды и равно

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0}} = Z$$

В свободном пространстве имеем известный результат  $Z = Z_0 = 120\pi = 377 \text{ Ом}$

Итак, отметим следующее:

1. Условие  $\lambda/2\pi r = 1$  характеризует границу между дальней и ближней зонами.

2. При  $r \gg \lambda/2\pi$  (дальняя зона) волновое сопротивление  $Z_0 = E_\theta/H_\phi = 377 \text{ Ом}$ . Эта зона называется также зоной плоской волны.

3. При  $r \ll \lambda/2\pi$  (ближняя зона) волновое сопротивление  $Z = E_\theta/H_\phi = Z_0 \frac{\lambda}{2\pi r}$ . Этот случай соответствует электрическому полю или полю высокого волнового сопротивления (относительно сопротивления излучения).



Если вместо короткого проводника (вибратора) с высоким сопротивлением в качестве излучателя взять рамку с низким сопротивлением, тогда волновое сопротивление в ближней зоне будет равно  $Z = \frac{E_\theta}{H_\varphi} = Z_0 \frac{2\pi r}{\lambda}$ . Этот случай соответствует магнитному полю или полю низкого волнового сопротивления (относительно сопротивления излучения).

Картину рис. Э28 можно немного огрубить и ограничиться делением пространства на две зоны. Возвращаясь к рисунку силовых линии поля излучения электрического и магнитного излучателей отметим, что первый из них (рис. Э17а) соответствует прямому короткому проводнику (вибратору), в котором переменный высокочастотный ток мал (сопротивление источника велико). Волновое сопротивление вблизи такого излучателя велико, и в структуре поля преобладает электрическая составляющая, которая по мере удаления от излучателя уменьшается быстрее ( $1/r^3$ ), чем магнитная ( $1/r^2$ ), и, следовательно, уменьшается волновое сопротивление, асимптотически приближаясь к  $Z_0$  в дальней зоне (рис. Э29 желтый треугольник). Источнику с низким сопротивлением, преобладанию магнитной составляющей и росту сопротивления по мере удаления от источника с асимптотическим приближением к  $Z_0 = 377 \text{ Ом}$  в дальней зоне соответствует зеленый треугольник рис. Э29.



### Ближние и дальние поля

Итак, вдали от источника изменяющегося во времени ЭМ поля, отношение амплитуд электрических и магнитных полей равно 377 Ом. Вблизи от источника полей это отношение может быть совершенно другим, и будет зависеть от характера источника. Область, где отношение E/H (волновое сопротивление) примерно 377 Ом, называется дальней областью, а область, где отношение значительно отличается от 377 Ом, называется ближней областью..

Ближняя область составляет приблизительно одну шестую часть длины волны источника. При 1 МГц это - приблизительно 45,7 м, и при 10 МГц - приблизительно 4,57 м. Это означает что, если источник ЭМП находится в пределах этих расстояний, то мы имеем дело с ближним полем. Знать это необходимо потому, что высокочастотные помехи могут определяться либо полностью электрическим полем, либо полностью магнитным полем. От характера основного поля помехи зависит выбор системы экранирования и защиты.