

---

## **СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

- ААР — адаптивная антенная решетка  
АР — антенная решетка  
АФУ — антенно-фидерное устройство  
ВЦА — волноводно-щелевая антенна  
ДН — диаграмма направленности  
ДОС — диаграммообразующая схема  
ЗА — зеркальные антенны  
КБВ — коэффициент бегущей волны  
КИП — коэффициент использования площади  
КНД — коэффициент направленного действия  
КПД — коэффициент полезного действия  
ЛПА — логарифмически периодическая антенна  
НСВ — несимметричный вибратор  
ПЭ — поляризационный эллипс  
ПХ — поляризационная характеристика  
РЛС — радиолокационная станция  
РПУ — радиоприемное устройство  
РСН — равносигнальное направление  
РТС — радиотехнические системы  
РЭС — радиоэлектронные средства  
СВ — симметричный вибратор  
СУЛ — схема управления лучом  
ФАР — фазированная антенная решетка  
ФВ — фазовращатель  
ЩА — щелевая антенна  
ЭМВ — электромагнитная волна  
ЭМП — электромагнитное поле  
ЭПР — эффективная площадь раскрыва антенны

---

## **ВВЕДЕНИЕ**

**О**сновными структурными составляющими средств радиосвязи, как правило, являются радиопередающее устройство, радиоприемное устройство и антенно-фидерный тракт.

Современные достижения в технике антенн основываются на последних разработках электроники, техники полупроводников, когерентной радиооптики, оптоэлектроники и т. д. Различные объекты — наземные стационарные и мобильные пункты управления, воздушные суда, средства обеспечения полетов авиации и другие имеют множество антенн различных диапазонов и назначений, и обеспечение их электромагнитной совместимости во многом зависит от характеристик и параметров антенн. В связи с этим специалист, обеспечивающий эксплуатацию техники связи, должен обладать знаниями основ теории антенн, а также их характеристик и параметров. Эти вопросы рассматриваются в настоящем учебном пособии.

Усвоение изложенных в пособии вопросов предполагает знание читателем общих разделов высшей математики, теории радиотехнических цепей и сигналов, электродинамики и распространения радиоволн в рамках существующих учебных программ.

## ГЛАВА 1

# РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН

## 1.1. НАЗНАЧЕНИЕ ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН И ИХ ФУНКЦИИ

**А**нтенна является неотъемлемой составной частью любого радиотехнического устройства, которое предназначено для передачи или приема информации с помощью радиоволн через окружающее пространство.

**Передающая антenna** предназначена для непосредственного излучения радиоволн. Она решает следующие задачи:

1) преобразование энергии токов высокой частоты в энергию излучаемых радиоволн. Одним из основных требований, предъявляемых к антеннам, является сохранение закона модуляции (отсутствие искажения передаваемой информации);

2) пространственное распределение энергии электромагнитного поля;

3) формирование определенной поляризационной структуры поля.

### Классификация антенн

1. *По функциональному назначению*: приемные, передающие, приемо-передающие.

2. *По конструкции и принципу действия*: линейные, апертурные, антенные решетки.

Антенны *линейного типа* характерны тем, что размеры поперечного сечения у них малы по сравнению с длиной волны. Обычно такие антенны выполняются из отрезка провода или нескольких проводов либо в виде стержня.

*Апертурные* антенны имеют раскрыв (апертуру), через который проходит поток излучаемой (принимаемой) энергии.

В свою очередь, линейные и апертурные антенны могут быть представлены как непрерывные системы, состоящие из элементарных излучателей: диполей (вибраторов) Герца, элементарных рамок или источников Гюйгенса.

*Антенная решетка* (AP) — это совокупность идентичных излучающих (приемных) элементов, расположенных в определенном порядке и питаемых от одного или нескольких когерентных источников.

3. *По поляризации*: антенны с линейной поляризацией, антенны с вращающейся поляризацией.

4. *По полосе пропускания*: узкополосные, широкополосные, широкодиапазонные.

5. *По диапазону радиоволн*: антенны диапазона ОВЧ (МВ), антенны диапазона УВЧ (ДМВ), антенны диапазона СВЧ (СМВ), антенны диапазона КВЧ (ММВ).

6. *По направленным свойствам*: ненаправленные, узконаправленные.

7. *По месту установки*: наземные (стационарные), бортовые (подвижные).

8. *По назначению радиотехнических устройств*: связные, навигационные, радиолокационные и т. д.

## **1.2. ПЕРЕДАЮЩАЯ АНТЕННА КАК НАГРУЗКА ДЛЯ ГЕНЕРАТОРА, ЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ**

Для оценки качества антенн и сравнения их между собой используют характеристики и параметры. Параметры антенн представляют собой определенные числовые величины, а характеристики дают некоторую функциональную зависимость.

Так как антенны обладают способностью преобразовывать энергию направляемых электромагнитных волн (ЭМВ) в энергию радиоволн (или наоборот), то существует ряд показателей, которые по своей сути для них являются *энергетическими параметрами*. К ним относятся: мощ-

нность излучения  $P_\Sigma$ , сопротивление излучения  $R_\Sigma$ , коэффициент полезного действия (КПД)  $\eta_A$ , входное сопротивление антенны  $\dot{Z}_A$ , действующая длина  $l_d$ , эффективная площадь раскрыта (ЭПР)  $A_{\text{эфф}}$ , коэффициент использования площади (КИП)  $q$ .

В режиме передачи (излучения) антenna является нагрузкой генератора токов высокой частоты. Как нагрузка, она характеризуется активной, реактивной и предельной мощностью, а также входным сопротивлением. Для получения наибольшей мощности излучения антenna должна быть согласована с линией передачи и внутренним сопротивлением генератора.

Эквивалентная схема передающей антенны представлена на рисунке 1.1.

**Входное сопротивление антенны** — это комплексная величина, равная отношению комплексных амплитуд (или действующих значений) напряжения и тока на входе антенны:

$$\dot{Z}_A = \frac{\dot{U}_{\text{Abx}}}{\dot{I}_{\text{Abx}}} = R_A + jX_A, \quad (1.1)$$

где  $R_A$  и  $X_A$  — активная и реактивная составляющие входного сопротивления соответственно.

Входное сопротивление антенны как параметр относится к антеннам только *линейного типа*, у которых комплексное напряжение и ток на входе антенны физически определены и могут быть непосредственно измерены. Для антенн *апертурного типа* понятие входного сопротивления неприемлемо, так как у них нет входных зажимов.

В общем случае входное сопротивление антенны зависит от частоты генератора сложным образом. Кроме того, на него оказывают влияние посторонние проводники и другие тела, расположенные вблизи антенны. Поэтому на практике входное сопротивление антенны определяют на заданных частотах с помощью измерительных приборов.

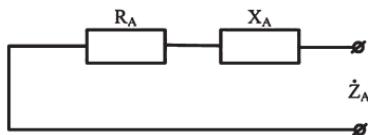


Рис. 1.1  
Эквивалентная схема передающей антенны

Подводимая к антенне мощность генератора расходуется на излучение, потери в антенне и окружающих ее телах и среде, а также на создание реактивных полей в ближней зоне, поэтому  $R_A$  характеризует мощность излучения антенны и мощность тепловых потерь в антенне и в окружающих ее телах и среде:

$$R_A = R_\Sigma + R_\Pi, \quad (1.2)$$

где  $R_\Sigma$  — сопротивление излучения;  $R_\Pi$  — сопротивление потерь.

**Сопротивление излучения** — это некоторое воображаемое активное сопротивление, на котором выделяется мощность, равная мощности излучения антенны:

$$P_\Sigma = \frac{I_A^2 \cdot R_\Sigma}{2}, \quad (1.3)$$

где  $I_A$  — амплитуда тока на входных зажимах антенны. Сопротивление излучения характеризует излучающие свойства передающей антенны. Величина  $X_A$  характеризует собой реактивную мощность в ближней зоне, которая не излучается.

Как сопротивление излучения, так и реактивное сопротивление антенны зависит от типа антенны, ее конструктивного исполнения, а также от длины волны. Сопротивление потерь зависит от проводящих свойств металла, из которого изготовлена антenna, качества изоляторов, а также от окружающих антенну тел и среды.

**Мощность излучения антенны** — это та часть мощности, подводимой к антенне от генератора, которая преобразуется антенной в радиоволны и достигает дальней зоны. Ее можно определить путем интегрирования плотности потока мощности этой антенны по замкнутой поверхности  $S$ , охватывающей некоторый объем пространства, окружающего антенну:

$$P_\Sigma = \oint_S \Pi dS, \quad (1.4)$$

где  $\Pi = \Pi(\theta, \phi)$  — плотность потока мощности (или модуль среднего значения вектора Умова — Пойнтинга).

Так как

$$\Pi(\theta, \varphi) = \Pi_{\max} \cdot F^2(\theta, \varphi); \quad \Pi_{\max} = E_{\max}^2 / 240\pi,$$

то

$$\Pi(\theta, \varphi) = \frac{E_{\max}^2 \cdot F^2(\theta, \varphi)}{240\pi}, \quad (1.5)$$

где  $F^2(\theta, \varphi)$  — диаграмма направленности (ДН) антенны по мощности.

В качестве простейшей поверхности интегрирования удобно выбрать сферу с радиусом  $r$  (рис. 1.2). Элемент площади  $dS$  на сферической поверхности (результат сечения поверхности сферы двумя меридиональными и двумя азимутальными плоскостями), как это видно из рисунка, равен

$$dS = r^2 \sin(\theta) \cdot d\varphi \cdot d\theta. \quad (1.6)$$

Подставляя в (1.4) выражения (1.5) и (1.6), можно получить

$$P_{\Sigma} = \frac{r^2 \cdot E_{\max}^2}{240\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} F^2(\theta, \varphi) \cdot \sin(\theta) \cdot d\varphi \cdot d\theta. \quad (1.7)$$

Таким образом, для определения мощности излучения необходимо знать нормированную ДН по мощности и напряженность поля в направлении максимального излучения при заданном расстоянии  $r$ . Мощность излучения антенны зависит от мощности генератора, условий согласования, а также от излучающей способности антенны. Эта способность зависит от типа антенны, особенностей конструктивного исполнения, размеров антенны по отношению к длине волны.

Антенна, как любой преобразователь энергии, характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД).

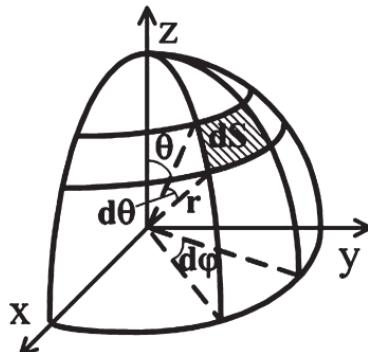


Рис. 1.2  
Поверхность интегрирования в сферической системе координат

**Коэффициент полезного действия** — это отношение мощности излучения ко всей активной мощности, получаемой антенной:

$$\eta_A = \frac{P_\Sigma}{P_A} = \frac{P_\Sigma}{P_\Sigma + P_\Pi} = \frac{R_\Sigma}{R_\Sigma + R_\Pi} < 1. \quad (1.8)$$

Отсюда следует, что для увеличения КПД антенны необходимо уменьшать сопротивление потерь и увеличивать сопротивление излучения антенны. КПД современных антенн различных диапазонов и типов весьма широк: от 25 до 95%.

**Действующая длина передающей антенны** — это коэффициент, имеющий размерность длины и связывающий между собой амплитуду напряженности поля в точке, находящейся в дальней зоне в направлении максимума излучения передающей антенны, с максимальным напряжением на зажимах антенны:

$$U_{A\max} = l_d \cdot E_{\max}. \quad (1.9)$$

Этот параметр относится *только к антеннам линейного типа* и характеризует их энергетическую эффективность по преобразованию энергии токов высокой частоты в линии передачи в энергию электромагнитного поля (ЭМП) излучаемой волны. Действующая длина передающей антенны зависит от ее геометрической длины и от закона распределения амплитуды и фазы тока вдоль антенны  $\dot{I}(z)$ :

$$l_d = \frac{1}{I_A} \cdot \int_{z=0}^l \dot{I}(z) \cdot dz. \quad (1.10)$$

*Из выражения (1.10) следует:*

- при равномерном и синфазном законе распределения тока по антенне ( $\dot{I}(z) = I_A = \text{const}$ ) действующая длина антенны совпадает с геометрической  $l_d = l$ ;
- чем более неравномерно и не синфазно распределение тока вдоль антенны, тем меньший процент от геометрической длины антенны составляет действующая длина. Поэтому в общем случае действующая длина лежит в пределах от нуля до геометрической длины:  $0 < l_d < l$ .

**Физический смысл действующей длины передающей антенны.** Это такая геометрическая длина линейной антенны с равномерным и синфазным распределением тока вдоль нее, при котором эта антенна создает в точке, находящейся в дальней зоне по направлению максимума излучения, такую же напряженность поля, как и реальная антenna с неравномерным и несинфазным распределением тока по длине. В свою очередь, закон распределения тока вдоль передающей антенны зависит от типа антенны и ее конструктивного исполнения.

**Эффективная площадь раскрыва передающей антенны (ЭПР)** — это коэффициент, имеющий размерность площади, который связывает между собой плотность потока мощности, создаваемой передающей антенной в точке пространства, находящейся в дальней зоне в направлении максимума излучения, и активную мощность, подводимую к антенне от генератора:

$$P_{A\max} = A_{\text{эфф}} \cdot \Pi_{\max}. \quad (1.11)$$

Этот параметр относится только к антеннам апертурного типа и характеризует их энергетическую эффективность по преобразованию энергии токов высокой частоты в линии передачи в энергию излучаемой волны. Эффективная площадь передающей антенны зависит от ее геометрической площади и от закона распределения амплитуды и фазы поля по раскрыву антенны  $\dot{E}_S(x, y)$ :

$$A_{\text{эфф}} = \frac{\left| \int_s \dot{E}_S(x, y) dS \right|^2}{\int_s |\dot{E}_S(x, y)|^2 dS}. \quad (1.12)$$

*Из выражения (1.12) следует:*

- при равномерном и синфазном законе распределения поля в раскрыве апертурной антенны ( $\dot{E}_S(x, y) = E_0$ ) эффективная площадь раскрыва совпадает с его геометрической площадью;
- чем больше неравномерность и несинфазность в распределении поля по раскрыву, тем меньший процент

от геометрической площади раскрыва антенны составляет эффективная. Поэтому в общем случае эффективная площадь лежит в пределах от нуля до геометрической площади раскрыва:  $0 < A_{\text{эфф}} < S$ .

### **Физический смысл эффективной площади раскрыва передающей антенны.**

Это такая геометрическая площадь раскрыва апертурной антенны с равномерным и синфазным распределением поля в ее раскрыве, при котором эта антенна создает в точке, находящейся в дальней зоне по направлению максимума ДН, такую же плотность потока мощности, как и реальная антенна с неравномерным и несинфазным распределением поля в ее раскрыве. Величина, равная отношению ЭПР к геометрической площади раскрыва антенны, называется коэффициентом использования площади (КИП):

$$q = \frac{A_{\text{эфф}}}{S} \leq 1. \quad (1.13)$$

Этот коэффициент характеризует эффективность использования площади раскрыва апертурной антенны при излучении энергии электромагнитного поля и учитывает несинфазность и неравномерность возбуждения поверхности раскрыва.

## **1.3. ДИАПАЗОННЫЕ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН**

**Диапазоном рабочих частот** (полосой пропускания) антенны называется интервал частот от  $f_{\min}$  до  $f_{\max}$ , в пределах которого все параметры антенны не выходят из заданных пределов:

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min}. \quad (1.14)$$

Диапазон рабочих частот антенны чаще всего выражают в процентах к средней частоте диапазона:

$$\frac{\Delta f}{f_{\text{ср}}} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}} \cdot 2 \cdot 100\%. \quad (1.15)$$

Если  $\Delta f/f_{\text{cp}} < 10\%$ , то антенна — узкополосная.

Если  $10\% < \Delta f/f_{\text{cp}} < 100\%$ , то антенна — широкополосная.

Если  $\Delta f/f_{\text{cp}} > 100\%$ , то антенна — широкодиапазонная.

Диапазон рабочих частот широкодиапазонных антенн оценивают специальным параметром — коэффициентом перекрытия диапазона  $K_d = f_{\text{max}}/f_{\text{min}}$ .

В зависимости от типа антенны, характеристики и параметры, наиболее критичные к изменению частоты, будут различными. Так, например, для линейных антенн это входное сопротивление, для антенных решеток — как входное сопротивление, так и направление максимума главного лепестка ДН.

Под **поляризацией ЭМВ** понимают ориентацию в пространстве вектора напряженности электрического поля относительно линии горизонта. При этом следует иметь в виду, что ЭМП в пространстве является разделенным, отсюда и термин — «поляризация». Так как магнитная составляющая поля всегда располагается в плоскости, перпендикулярной электрической, то о ней в дальнейшем можно и не говорить.

Плоскость, проходящую через вектор  $\vec{E}$ , и направление распространения волны (вектор  $\vec{\Pi}$ ), называют *плоскостью поляризации*, а плоскость, проходящую через векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , — *картинной плоскостью* (рис. 1.3).

Различают следующие виды поляризации:

- **линейная поляризация**, если плоскость поляризации не меняет своего положения в пространстве. Линейная поляризация может быть вертикальной, горизонтальной и наклонной;
- **вращающаяся поляризация**, если плоскость поляризации вращается вместе с вектором вокруг направления распространения с частотой колебаний ЭМП, т. е. делает один оборот за период колебаний.

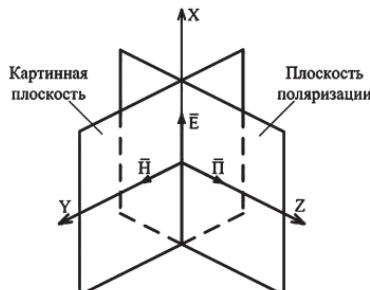


Рис. 1.3  
Составляющие ЭМП

При распространении ЭМВ с вращающейся поляризацией вектор  $\vec{E}$  вращается с угловой скоростью  $\omega = 2\pi f$ , совершая за один период высокочастотного колебания один оборот, и может изменять свою величину по гармоническому закону. При этом проекция конца вектора  $\vec{E}$  на картинную плоскость будет описывать в ней эллипс (рис. 1.4).

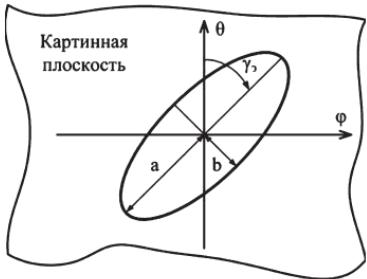


Рис. 1.4  
Эллипс поляризации

Поляризация поля, излучаемого антенной, соответствующая этому случаю, называется эллиптической.

Поляризационный эллипс характеризуется следующими параметрами:

- коэффициентом эллиптичности, равным отношению малой оси эллипса к большой,  $K_{\Theta} = b/a$ . В общем случае при эллиптической поляризации коэффициент эллиптичности зависит от угловых координат точки наблюдения, т. е.

$$K_{\Theta} = K_{\Theta}(\theta, \varphi); \quad (1.16)$$

- углом наклона поляризационного эллипса, т. е. углом между большой осью эллипса и вертикальной осью выбранной системы координат  $\gamma_{\Theta}$ ;
- направлением вращения вектора  $\vec{E}$ , которое определяется, глядя вслед уходящей волне. При этом под поляризацией правого вращения подразумевают вращение вектора  $\vec{E}$  по часовой стрелке, тогда коэффициент эллиптичности принимает положительные значения,  $0 < K_{\Theta} < 1$ . При поляризации левого вращения (вектор вращается против часовой стрелки) коэффициент эллиптичности отрицателен,  $-1 < K_{\Theta} < 0$ . При  $K_{\Theta} = 0$  эллипс вырождается в прямую линию и поле имеет линейную поляризацию.

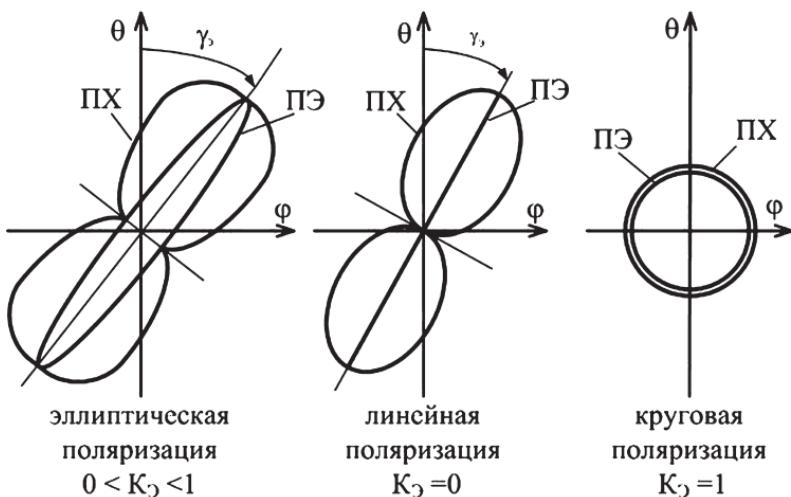


Рис. 1.5  
ПХ антенн для различных видов поляризации

**Поляризационная характеристика (ПХ)** — это зависимость ЭДС в приемной антенне с линейной поляризацией, принимающей ЭМВ рассматриваемой передающей антенны, от угла ее поворота в картинной плоскости. Таким образом, поляризационный эллипс вписан в ПХ. На рисунке 1.5 представлены поляризационные характеристики антенн для различных видов поляризации.

#### 1.4. ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ПЕРЕДАЮЩЕЙ АНТЕННЫ

На практике любой антenne присущее свойство концентрации энергии излучаемых ею ЭМВ в определенной области пространства (фокусирование энергии радиоволн). Для описания направленных свойств антенн используют специальные характеристики и параметры. К таким характеристикам относятся диаграммы направленности (ДН) передающей антенны по напряженности поля и плотности потока мощности, а к параметрам — ширина диаграммы направленности, уровень боковых лепестков ДН, коэффициент направленного действия (КНД) и коэффициент усиления (КУ).

Понятие о ДН передающей антенны вводится с целью выяснения проблемы о распределении в пространстве энергии, излучаемой антенной. При этом различают *ДН по напряженности поля* или *по мощности*. Но следует заметить, что они между собой жестко связаны.

*ДН по напряженности поля* — это зависимость амплитуды напряженности электромагнитного поля, излучаемого антенной, от угловых координат в пространстве при одинаковом расстоянии до нее. Причем выбор расстояния ограничен требованием нахождения измерителя в дальней зоне (зоне излучения) антенны:

$$r \gg \frac{(2L_A^2)}{\lambda}, \quad (1.17)$$

где  $L_A$  — наибольший габаритный размер антенны.

Ненормированная ДН обозначается следующим образом:

$$\begin{aligned} E &= E(\theta, \varphi) = F^E(\theta, \varphi); \\ H &= H(\theta, \varphi) = F^H(\theta, \varphi) \text{ при } r = \text{const}, \end{aligned} \quad (1.18)$$

где  $\theta$ ,  $\varphi$  и  $r$  — координаты точки наблюдения в сферической системе координат (рис. 1.2).

На практике при изучении ЭМП в дальней зоне антенны ограничиваются рассмотрением только ДН по электрической составляющей ЭМП —  $E(\theta, \varphi)$ , так как величины  $E$  и  $H$  связаны между собой волновым сопротивлением свободного пространства:  $W_0 = 377$  Ом,  $H = E/W_0$ .

*ДН по плотности мощности* — это зависимость плотности потока мощности ЭМП, излучаемого антенной, от угловых координат в пространстве.

Ненормированная ДН по мощности обозначается следующим образом:

$$\Pi = \Pi(\theta, \varphi) = F^2(\theta, \varphi) \text{ при } r = \text{const}. \quad (1.19)$$

*Плотность потока мощности* — это поток электромагнитной энергии в единицу времени (1 с) через площадку в 1 м. Ему соответствует физический смысл модуля вектора Умова — Пойнтинга:

$$\Pi = |\vec{P}| = \frac{1}{2} \cdot E \cdot H = \frac{1}{2} \cdot \frac{E^2}{W_0} = \frac{E^2}{240\pi}. \quad (1.20)$$

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)