ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$\overline{A}$ – векторный электродинамический потенциал
$\overline{A}_{эф}$ – эффективная площадь антенны, м^2
$\overline{B}$ – вектор магнитной индукции, Вб/м^2, Тл
$B_{\text{А}}$ – реактивная проводимость антенны, См
C – электрическая емкость, Ф
D – коэффициент направленного действия
$\overline{D}$ – вектор электрической индукции, Кл/м^2
$\overline{E}$ – вектор напряженности электрического поля, В/м
$\overline{F}$ – векторная функция
$F(\theta, \varphi)$ – нормированная характеристика направленности антенны
$G_{\text{А}}$ – активная проводимость антенны, См
$\overline{H}$ – вектор напряженности магнитного поля, А/м
I – электрический ток (амплитуда), А
$I_{\text{А}}$ – амплитуда тока в точках питания антенны, А
I_m – амплитуда тока в пучности, А
$I^{\text{М}}$ – магнитный ток, В
$\overline{J}$ – вектор поверхностной плотности электрического тока, А/м^2
L – индуктивность, Гн; длина антенны, м
$\overline{\Pi}$ – вектор Пойнтинга, Вт/м^2
$P_{\text{А}}$ – активная мощность, подводимая к антенне, Вт
P_{Σ} – мощность излучения, Вт
$P_{\text{к}}$ – комплексная мощность, В·А
Q – заряд, Кл; добротность цепи
R – электрическое сопротивление, Ом; радиус; коэффициент отражения
$R_{\text{А}}$ – активная составляющая входного сопротивления антенны, Ом
R_{Σ} – сопротивление излучения, Ом
$X_{\text{А}}$ – реактивная составляющая входного сопротивления антенны, Ом
S – площадь поверхности, м^2
T – период колебания, с
Λ – длина волны в линии, м
U – напряжение, В
$U_{\text{А}}$ – напряжение на входе антенны, В

V – объем, м^3
$\bar{Z}$ – вектор Герца
$Z_с$ – волновое (характеристическое) сопротивление среды, Ом
a – радиус провода; радиус круглого волновода;
размер широкой стенки волновода; размер антенны
b – размер узкой стенки волновода; размер антенны
c – скорость света (волны в вакууме)
d – расстояние между элементами; диаметр, ширина антенны
f – частота, Гц
$f(\theta,\varphi)$ – функция (характеристика) направленности антенны
h – высота подвеса антенны, м
$i=\sqrt{-1}$ – мнимая единица ($i^2 = -1$)
$k=\omega / c = 2\pi$ – волновое число в свободном пространстве
$k_Б$ – постоянная Больцмана
l – длина плеча антенны; длина отрезка линии, м
$l_д$ – действующая длина антенны, м
m – тип волны в линии
$m_э$ – коэффициент эллиптичности волны
n – коэффициент преломления; тип волны в линии
p – коэффициент отражения; поляризационный коэффициент;
тип волны в резонаторе
r – расстояние; радиальная координата
s – относительная координата
t – время
$\upsilon_ф$ – фазовая скорость, м/с
x, y, z – декартовы координаты
r, θ, φ – сферические координаты
α – коэффициент затухания, 1/м; угол
$\beta = 2\pi / \Lambda$ – коэффициент фазы, 1/м; угол
$\gamma = \lambda + i\beta$ – коэффициент распространения, 1/м
Δ – угол; отношение величины; глубина проникновения
δ – угол потерь
ε и μ – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды
ε' и μ' – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды

$\varepsilon_к$ и $\mu_к$ – комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости

σ – удельная проводимость среды, См/м

λ – длина волны, м

η – коэффициент полезного действия

ψ – угол сдвига фазы

ϕ – фаза

θ – меридиональный угол; угол возвышения

φ – азимутальный угол

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота, рад/с

ξ – коэффициент согласования; коэффициент замедления (укорочения) волны

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АФТ – антенно-фидерный тракт
ДН – диаграмма направленности
ДТР – дальнее тропосферное распространение
ЗС – земная станция
ИСЗ – искусственный спутник Земли
КНД – коэффициент направленного действия
КПД – коэффициент полезного действия
МПЛ – микрополосковая линия
МПЧ – максимально применимая частота
НПЧ – наименьшая применимая частота
ОРЧ – оптимальная рабочая частота
ПВ – поверхностная волна
ПРФ – поверхность равных фаз
РРЛ – радиорелейная линия
РС – ретранслятор связи
СВЧ – сверхвысокие частоты
ТРЛ – тропосферная радиолиния
ЭМВ – электромагнитная волна
ЭМД – элементарный магнитный диполь
ЭМП – электромагнитное поле
ЭЭВ – элементарный электрический вибратор
ЭЭД – элементарный электрический диполь

ГЛАВА 1. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

1.1. Расчет параметров гармонического электромагнитного поля

Все переменные электромагнитные процессы можно представить в виде суммы дискретных гармонических колебаний (для периодической функции) или непрерывного спектра гармонических колебаний (для непериодической функции). Поэтому в дальнейшем будем считать, что переменные электромагнитные поля (ЭМП) являются также гармоническими.

ЭМП называется гармоническим, если все скалярные величины, характеризующие поле, изменяются во времени по закону синуса или косинуса.

Вектор, проекции которого на координатные оси изменяются по гармоническому закону, называется гармоническим.

Например, в декартовых координатах вектор в общем случае имеет три составляющих при распространении электромагнитной волны (ЭМВ) вдоль оси z.

$$\begin{aligned}\overline{E}(t)_{|z=z_0} &= \overline{x}^0 E_{mx}\cos(\omega t+\Psi_x)+\overline{y}^0 E_{my}\cos(\omega t+\Psi_y)+\\ &+\overline{z}^0 E_{mz}\cos(\omega t+\Psi_z),\end{aligned} \tag{1.1.1}$$

где E_{mx}, E_{my}, E_{mz} – амплитуды проекций вектора на координатные оси с единичными ортами $\overline{x}^0, \overline{y}^0, \overline{z}^0$; $\omega = 2\pi/T$ – круговая частота; Ψ_x, Ψ_y, Ψ_z – начальные фазы проекций вектора при $z = 0$ и $t = 0$.

Аналогично можно записать гармонические векторы $\overline{H}$, $\overline{B}$ и $\overline{D}$ как в декартовых, так и в других системах координат.

На основании формулы Эйлера гармонический вектор линейных операторов определяется таким образом:

$$\overline{E}(z,t) = \mathrm{Re}\,\dot{\overline{E}}(z,t), \tag{1.1.2}$$

где $\dot{\overline{E}}(z,t)$ – комплексное представление вектора $\overline{E}$.

При этом комплексный вектор выражается как произведение функции координат и функции времени $\mathrm{e}^{i\omega t}$

$$\dot{\overline{E}}(z,t) = \dot{\overline{E}}_m(z)\mathrm{e}^{i\omega t}, \tag{1.1.3}$$

где $\dot{\overline{E}}_m(z)$ – комплексная амплитуда вектора, которая содержит сумму комплексных амплитуд проекций вектора, умноженных на соответствующие орты рассматриваемой системы координат.

$$\dot{\bar{E}}_m(z) = \bar{x}^0 \dot{E}_{mx} + \bar{y}^0 \dot{E}_{my} + \bar{z}^0 \dot{E}_{mz}. \quad (1.1.4)$$

Комплексный вектор в общем случае имеет шесть составляющих с реальной и мнимой частями, каждая из которых имеет по три составляющих на соответствующие координатные оси.

Таким образом, гармонический вектор является частным случаем комплексного вектора и определяется следующим образом:

$$\bar{E}(z,t) = \mathrm{Re}\left[\dot{\bar{E}}(z,t)\right] - \text{ для линейных операторов;}$$

$$\bar{E}(z,t) = \left[\frac{\dot{\bar{E}}(z,t) + \dot{\bar{E}}^*(z,t)}{2}\right] - \text{ для любых операторов,}$$

где $\dot{\bar{E}}^*(z,t) -$ комплексно-сопряженная функция.

Если гармонические функции вектора ЭМП удовлетворяют уравнениям Максвелла, то таким же уравнениям будут удовлетворять и комплексные функции. Однако определения комплексных функций во многих случаях проще по сравнению с гармоническими. Это объясняется тем, что дифференцирование комплексной функции по времени равносильно умножению ее на $i\omega$, а интегрирование по времени – делению на $i\omega$. При двукратном дифференцировании по времени $\partial^2 / \partial t^2$ равносильно умножению на $(i\omega)^2 = -\omega^2$.

Например:

$$\frac{\partial}{\partial t}\bar{E} = i\omega\bar{E}, \text{ а } \int_t \bar{E}dt = \frac{1}{i\omega}\bar{E}. \quad (1.1.5)$$

Комплексные амплитуды также могут быть введены в линейные дифференциальные уравнения Максвелла. В уравнениях Максвелла с комплексными функциями временной множитель $\mathrm{e}^{i\omega t}$ может быть сокращен, поэтому такие уравнения чаще выражаются через комплексные амплитуды.

$$\mathrm{rot}\dot{\bar{H}}_m = i\omega\varepsilon\dot{\bar{E}}_m + \dot{\bar{J}}_m; \;\; \mathrm{rot}\dot{\bar{E}}_m = -i\omega\mu\dot{\bar{H}}_m. \quad (1.1.6)$$

Свойства окружающего пространства (среды распространения ЭМВ) характеризуются основными параметрами ε, μ, σ, которые чаще являются скалярными величинами. Эти электрические параметры в общем могут зависеть от координат пространства и времени.

Для свободного пространства:

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \approx 8{,}854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{Ф}}{\text{м}}\right]; \; \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \approx 1{,}257 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{Гн}}{\text{м}}\right]. \quad (1.1.7)$$

В реальных средах:
ε' – относительная диэлектрическая проницаемость; μ' – относительная магнитная проницаемость; σ – удельная проводимость; $\varepsilon = \varepsilon'\varepsilon_0$, $\mu = \mu'\mu_0$ – абсолютные проницаемости.

Величина $\varepsilon_к = \varepsilon - \frac{i\sigma}{\omega}$ и $\varepsilon'_к = \varepsilon'(1 - \frac{i\sigma}{\varepsilon\omega})$ характеризует электрические свойства среды и называется комплексной диэлектрической проницаемостью среды. Ее значение зависит от частоты.

Величина $\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$, численно равна отношению комплексных амплитуд токов проводимости и смещения и называется тангенсом угла потерь.

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} = \frac{60\lambda_0\sigma}{\varepsilon'}. \tag{1.1.8}$$

Данная величина является критерием деления сред на проводники и диэлектрики. Если $\mathrm{tg}\delta >> 1$, среду называют проводником, если $\mathrm{tg}\delta << 1$ – диэлектриком. Из соотношения для $\mathrm{tg}\delta$ следует, что диэлектрические свойства проявляются сильнее на более высоких частотах.

Так как металлы имеют очень высокую удельную проводимость, (например, медь $\sigma = 5{,}65 \cdot 10^7$ [См/м]), то $\mathrm{tg}\delta >> 1$ на всех частотах, используемых в радиотехнике. Однако существует ряд сред, занимающих промежуточное положение между проводниками и диэлектриками, например, вода, почва. Такие среды на одних частотах будут проводниками, а на других – диэлектриками. Этим, в частности, объясняется тот факт, что на низких частотах (больших длинах волн) земная поверхность становится проводящей и волны распространяются на большие расстояния.

Условие полупроводящей среды

$$0{,}1 \le \mathrm{tg}\delta \le 10. \tag{1.1.9}$$

Очевидно, что чем ниже частота волны, тем лучшими проводящими свойствами обладает среда и наоборот, при повышении частоты диэлектрические свойства среды улучшаются.

Важнейшим свойством переменного ЭМП является его способность распространяться в пространстве в форме ЭМВ.

Существование ЭМВ можно обнаружить по энергии, которую переносит ЭМП, превращая ее в энергию других видов: тепловую, механическую, химическую. Однако основное применение ЭМВ основано на способности переменного ЭМ поля переносить энергию в пространстве. Это явление используется для передачи информации в виде сигналов.

Впервые вопрос об энергии ЭМП практически сформулировал Максвелл, который показал, что полная энергия ЭМП складывается из энергии электрического и магнитного полей.

Энергетические соотношения ЭМП в некотором объеме V формулируются на основе закона сохранения энергии. Движение энергии из этого объема характеризуется вектором Пойнтинга. Вектор Пойнтинга является вектором плотности потока энергии. Мгновенное значение вектора Пойнтинга определяется векторным произведением

$$\bar{\Pi}(t) = \left[\bar{E}(t), \bar{H}(t)\right], \text{ Вт/м}^2. \tag{1.1.10}$$

Вектор Пойнтинга характеризует величину и направление потока мощности ЭМП. Численно (модуль) вектора Пойнтинга равен количеству энергии, переносимой ЭМП за единицу времени (1 с) через единичную площадку (1 м^2), перпендикулярную направлению движения энергии.

В средах с потерями $(\sigma \neq 0)$ вводится, так называемый, комплексный вектор Пойнтинга, комплексная амплитуда которого равна

$$\bar{\Pi}_m = \frac{1}{2}\left[\dot{\bar{E}}_m, \dot{\bar{H}}_m^*\right] = \frac{1}{2}\left[\dot{\bar{E}}_m^*, \dot{\bar{H}}_m\right]. \tag{1.1.11}$$

Вещественная часть комплексного вектора Пойнтинга равна среднему за период значению вектора Пойнтинга

$$\bar{\Pi}_{\text{ср}} = \operatorname{Re}\dot{\bar{\Pi}}_m, \tag{1.1.12}$$

где $\bar{\Pi}_m$ – комплексная амплитуда или просто комплексный вектор.

Среднее значение вектора $\bar{\Pi}(t) = [\bar{E}, \bar{H}]$ определяется на основании соотношения для нелинейных операторов:

$$\bar{\Pi}_{\text{ср}} = \frac{1}{2}\operatorname{Re}\left[\dot{\bar{E}}_m, \dot{\bar{H}}_m^*\right] = \frac{1}{2}\operatorname{Re}\left[\dot{\bar{E}}_m^*, \dot{\bar{H}}_m\right]. \tag{1.1.13}$$

Для периодической функции в средах с потерями $(\sigma \neq 0)$ вводится так называемый комплексный вектор Пойнтинга, комплексная амплитуда которого равна

$$\bar{\Pi}_m = \frac{1}{2}\left[\dot{\bar{E}}_m, \dot{\bar{H}}_m^*\right] = \frac{1}{2}\left[\dot{\bar{E}}_m^*, \dot{\bar{H}}_m\right]. \tag{1.1.14}$$

Вещественная часть комплексного вектора Пойнтинга равна среднему за период значению вектора Пойнтинга

$$\bar{\Pi}_{\text{ср}} = \operatorname{Re}\dot{\bar{\Pi}}_m, \tag{1.1.15}$$

где $\bar{\Pi}_m$ – комплексная амплитуда или просто комплексный вектор.

Среднее значение вектора Пойнтинга можно рассматривать как среднюю за период плотность потока энергии. Поэтому средний поток мощности через замкнутую поверхность S, ограничивающую рассматриваемый объем V, определяется выражением

$$P_{S_{\text{ср}}} = \mathrm{Re}\oint_S \dot{\bar{\Pi}}_m d\bar{S}. \qquad (1.1.16)$$

Задачи

Задача 1.1.1. Определить диапазон длин волн, в пределах которого среду с параметрами $\varepsilon' = 4, \sigma = 10^{-2}$ См/м можно считать полупроводящей.

Методика решения задачи

Определим граничные значения $\mathrm{tg}\delta$ в случае полупроводящей среды. Так как $\mathrm{tg}\delta = 60\lambda_0\sigma/\varepsilon'$, то при $\mathrm{tg}\delta = 0{,}1$ длина волны $\lambda_0 = 0{,}1\varepsilon'/(60\sigma) = 0{,}7$ м. Принимаем другое значение $\mathrm{tg}\delta = 10$, получаем $\lambda_0 = 10\varepsilon'/(60\sigma) = 70$ м (рис. 1.1.1).

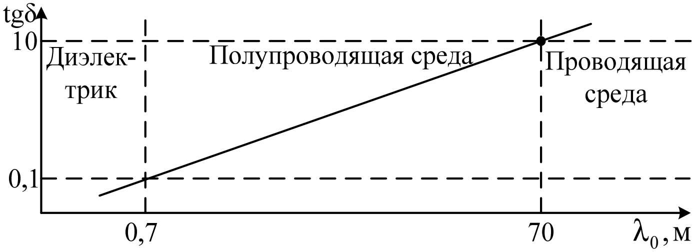

Рис. 1.1.1. График зависимости тангенсом угла потерь от длины волны

Таким образом, в диапазоне волн 0,7–70 м данная среда является полупроводящей.

Задача 1.1.2. Получить выражение для $\mathrm{tg}\delta = \dfrac{\sigma}{\omega\varepsilon} = \dfrac{60\lambda_0\sigma}{\varepsilon'}$ через длину волны λ_0.

Методика решения задачи

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon'\varepsilon_0}, \qquad (1.1.17)$$

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{\sigma\cdot 36\pi}{2\pi\cdot f\cdot\varepsilon'\cdot 10^{-9}} = \frac{\sigma\cdot 6\cdot\lambda_0}{10^8\cdot\varepsilon'\cdot 10^{-9}} = \frac{60\lambda_0\sigma}{\varepsilon'}, \qquad (1.1.18)$$

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{60\lambda_0\sigma}{\varepsilon'}, \text{ так как } \lambda \approx \frac{3\cdot 10^8}{f}. \quad \lambda_{\text{м}} = \frac{300}{f_{\text{МГц}}}. \tag{1.1.19}$$

Поэтому $\mathrm{tg}\delta$ определяют, используя параметры среды и длину волны.

Задача 1.1.3. Записать комплексный вектор, комплексную амплитуду и гармонический вектор (мгновенное значение вектора) $\bar{E}$, если его амплитуда $E_{my} = 5$ мкВ/м, а начальная фаза $\Psi_y = 30°$. Здесь $\dot{\bar{E}}(t) = \dot{\bar{E}}_m \mathrm{e}^{i\omega t}$, $\dot{\bar{E}}_m = \dot{\bar{E}}_m \mathrm{e}^{i\omega}$.

$$\bar{E}(t) = \mathrm{Re}\left[\dot{\bar{E}}(t)\right]. \tag{1.1.20}$$

Методика решения задачи

Комплексная амплитуда вектора равна

$$\dot{\bar{E}}_m(y) = \bar{y}^0\, 5\mathrm{e}^{i30°} \text{ мкВ/м.}$$

Комплексный вектор равен

$$\dot{\bar{E}}(y,t) = \bar{y}^0\, 5\mathrm{e}^{i30°}\ \mathrm{e}^{i\omega t}.$$

Мгновенное значение гармонического вектора

$$\bar{E}(y,t) = \bar{y}^0\, 5\cos(\omega t + 30°).$$

Гармонический вектор имеет одну составляющую ***y*** и зависит от ***t.***

Задача 1.1.4. Определить средние значения вектора Пойнтинга $(\bar{\Pi}_{\text{ср}})$, если комплексные амплитуды $\dot{\bar{E}}_m$ и $\dot{\bar{H}}_m$ заданы только одними проекциями, например x и y

$$\dot{\bar{E}}_m = \bar{x}^0 E_{mx}\mathrm{e}^{i\Psi x}, \quad \dot{\bar{H}}_m = \bar{y}^0 H_{my}\mathrm{e}^{i\Psi y}. \tag{1.1.21}$$

Методика решения задачи

Среднее значение вектора $\bar{\Pi}_{\text{ср}}$ определяется по формуле

$$\bar{\Pi}_{\text{ср}} = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\dot{\bar{E}}_m, \dot{\bar{H}}_m^*\right] = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left[\dot{\bar{E}}_m^*, \dot{\bar{H}}_m\right]. \tag{1.1.22}$$

Поэтому предварительно необходимо определить комплексно-сопряженное значение векторной функции, например

$$\dot{\bar{H}}_m^* = \bar{y}^0 H_{my}\mathrm{e}^{-i\Psi y}. \tag{1.1.23}$$

В дальнейшем определяется векторное произведение

$$\left[\dot{\bar{E}}_m, \dot{\bar{H}}_m^*\right] = \bar{z}^0 E_{mx} H_{my} \mathrm{e}^{i(\Psi_x - \Psi_y)}. \qquad (1.1.24)$$

Среднее значение гармонического вектора $\bar{\Pi}(t)$ равно

$$\bar{\Pi}_{\text{ср}} = \bar{z}^0 \frac{1}{2} E_{mx} H_{my} \cos\Psi, \qquad (1.1.25)$$

где $\Psi = \Psi_x - \Psi_y$ – начальная фаза $\bar{\Pi}(t)$ при $t = 0$.

Таким образом, три вектора $\bar{\Pi}$, $\bar{E}$ и $\bar{H}$ взаимно перпендикулярны.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.1.5. Записать уравнения Максвелла для комплексных амплитуд и комплексно-сопряженных амплитуд.

Задача 1.1.6. Определить диапазон длин волн, в пределах которого среду с параметрами $\varepsilon' = 20, \sigma = 10^{-1}$ См/м можно считать проводящей.

Задача 1.1.7. Доказать, что гармонический вектор $\bar{E}(t)$ может быть выражен через комплексный и комплексно-сопряженный вектор. Комплексный вектор имеет одну составляющую x.

$$\dot{\bar{E}}(t)_{|z=z_0} = \bar{x}^0 E_{mx} \mathrm{e}^{i(\omega t + \Psi_x)}. \qquad (1.1.26)$$

1.2. Расчет параметров плоских волн в различных средах

В однородных изотропных средах ЭМВ распространяются как сферические на расстоянии r от точечного излучателя, расположенного в точке A. Любая из поверхности сферы S, например, в точке B имеет зависимость

$$E(r,t) = E_m(t_0) \frac{\mathrm{e}^{-ikr}}{r}, \qquad (1.2.1)$$

где $E_m(t_0)$ – функция амплитуды составляющей вектора $\bar{E}$ в точке A.

На относительно больших расстояниях от излучателя $(r >> \lambda)$ фронт сферической волны, при малых размерах поверхности S, является локально плоским (рис. 1.2.1). В этих пределах волну считают плоской. Плоская волна является простейшим типом ЭМВ, которая широко используется для объяснения различных законов распространения радиоволн.

Волна называется плоской и однородной, если гармонические векторы поля зависят только от одной координаты, например z.

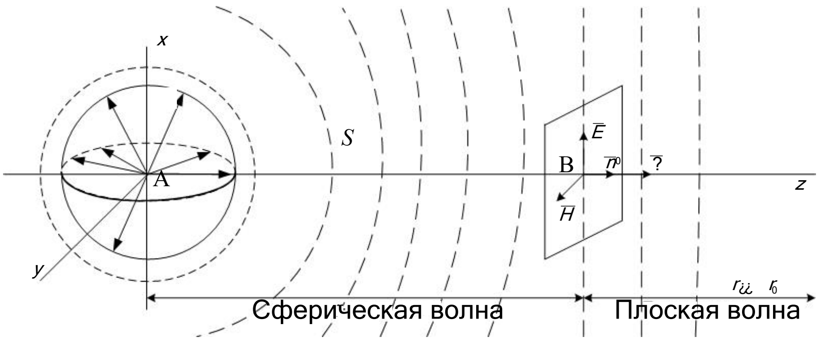

Рис. 1.2.1. Трансформация сферической волны в плоскую

В плоской волне ПРФ является бесчисленное множество параллельных плоскостей, которые перпендикулярные оси *oz*. В средах без потерь ($\sigma = 0$) амплитуда векторов $\bar{E}$ и $\bar{H}$ плоской волны не зависит от расстояния *z*, а фазовый множитель зависит только от координаты *z* как e^{-ikz}. В плоской волне векторы $\bar{E}$ и $\bar{H}$ взаимно перпендикулярны и перпендикулярны направлению распространению, т. е. вектору $\bar{П}$. Такие волны называются поперечно-электромагнитными или *TEM* (*Transverse Electro Magnetic*) или просто волна типа *T*.

В непоглощающих средах $\sigma = 0$, а $\varepsilon_к = \varepsilon$, $\mu_к = \mu \approx \mu_0$, волновым числом, или коэффициентом фазы, равно

$$k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu} . \quad (1.2.2)$$

Длина волны λ определяется как расстояние между двумя точками в пространстве, на котором фаза векторов $\bar{E}$ и $\bar{H}$ меняется на 2π, $\lambda = \upsilon_ф T = \upsilon_ф / f$, где *T* – период, а *f* – частота гармонического колебания.

В вакууме ($\varepsilon = \varepsilon_0$, $\mu = \mu_0$, $\sigma = 0$)

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{300}{f_{[МГц)}}, м ; \quad (1.2.3)$$

$$\upsilon_ф = c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \cong 3\cdot 10^8, м/с. \quad (1.2.4)$$

Фазовая скорость зависит от неизменных параметров, поэтому в таких средах отсутствуют фазовые искажения сигналов.

В средах без потерь, но с относительными параметрами $\varepsilon' = \varepsilon/\varepsilon_0$ и $\mu' = \mu/\mu_0 \approx 1$ фазовая скорость и длина волны оказываются в $n = \sqrt{\varepsilon'\mu'}$ раз меньшими:

$$\upsilon_{\text{ф}} = \frac{c}{n}; \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n}, \tag{1.2.5}$$

где n – индекс (коэффициент) преломления.

Важным параметром плоской волны является волновое сопротивление среды $Z_{\text{с}}$ или волны $Z_{\text{в}}$. В общем случае они не равны.

Волновое сопротивление волны $Z_{\text{в}}$ равно отношению комплексных амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей в фиксированной точке $z = z_0$ или среды как $\sqrt{\mu/\varepsilon}$. В среде без потерь $Z_{\text{в}} = Z_{\text{с}}$.

$$Z_{\text{в}} = \frac{\dot{E}_m}{\dot{H}_m} = \frac{E_{mx}}{H_{my}} = \frac{k}{\omega\mu} = \sqrt{\mu/\varepsilon} \text{ Ом.} \tag{1.2.6}$$

В вакууме (в свободном пространстве)

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} = 120\pi \text{ Ом.} \tag{1.2.7}$$

В диэлектрических средах без потерь

$$Z_{\text{в}} = \frac{120\pi}{n} \quad \text{Ом.} \tag{1.2.8}$$

Энергетическими характеристиками плоской волны являются мгновенная и средняя плотность потока энергии.

Мгновенное значение вектора Пойнтинга равно

$$\bar{\Pi}(t) = \left[\bar{E}(t), \bar{H}(t)\right] = z^0 |E||H| \cos^2(\omega t - kz + \psi). \tag{1.2.9}$$

Мгновенное значение всегда положительно, следовательно, энергия передается вдоль координаты $z > 0$.

Среднее за период значение вектора Пойнтинга равно

$$\bar{\Pi}_{\text{ср}} = \frac{1}{2}\text{Re}\left[\dot{\bar{E}}_m, \dot{\bar{H}}_m^*\right] = \frac{1}{2}\text{Re}\left[\dot{\bar{E}}_m^*, \dot{\bar{H}}_m\right]. \tag{1.2.10}$$

Для свободного пространства плотность потока мощности

$$\Pi_{\text{ср}} = \frac{|E_m|^2}{240\pi} = \frac{|E_{\text{д}}|}{120\pi}, \tag{1.2.11}$$

где $|E_{\text{д}}| = |E_m|/\sqrt{2}$ – действующее значение напряженности электрического поля.

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru