

Теория линий передачи

Распространение электромагнитной энергии по направляющим системам

Направляющая система – это линия, способная передавать электромагнитную энергию в заданном направлении.

Таким канализирующим свойством обладает любая граница раздела сред:

- *металл-диэлектрик* – металлическая линия (кабель, волновод);
- *диэлектрик-воздух* – диэлектрическая линия из материала с $\epsilon > 1$ (диэлектрический волновод, волоконный световод);
- металлодиэлектрическая линия (линия поверхностной волны).

Направляющие системы передачи высокочастотной энергии подразделяются на:

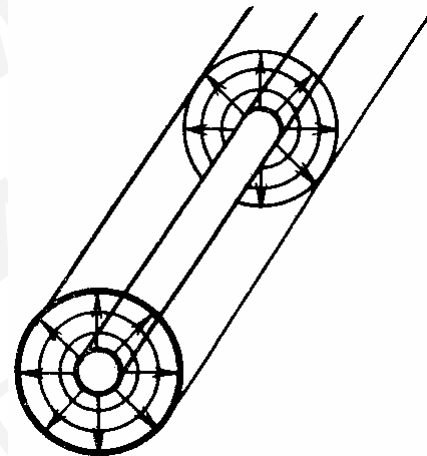
- воздушные линии;
- коаксиальные кабели;
- симметричные кабели;
- световоды;
- волноводы;
- диэлектрические волноводы;
- полосковые (ленточные) линии;
- линии поверхностной волны;
- сверхпроводящие кабели.

Типы и классы электромагнитных волн

Существуют следующие **классы** волн:

- ТЕМ – поперечно-электромагнитная волна;
- ТМ – поперечно-магнитная, или Е-волна;
- ТЕ – поперечно-электрическая, или Н-волна;
- смешанные (дипольные) волны:
 - HE – с преобладанием в поперечном сечении поля Н;
 - EH – с преобладанием в поперечном сечении поля Е.

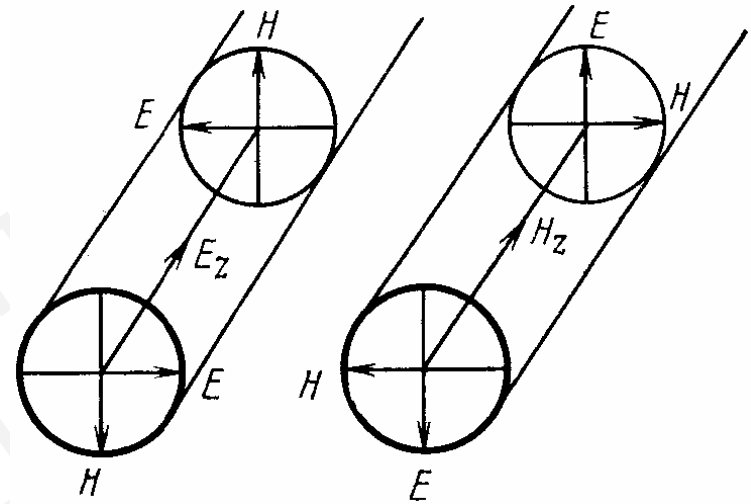
Волна TEM – основная волна; содержит только поперечные составляющие электрического E и магнитного H полей, продольные составляющие E_z и H_z равны нулю; силовые линии поля целиком лежат в поперечных плоскостях и в точности повторяют картину силовых линий поля при статическом напряжении и постоянном токе.



Процесс передачи основных волн TEM связан с потенциальным полем. Для передачи волны TEM требуется разность потенциалов и соответственно двухмерное поле в сечении, поэтому она существует лишь в линиях, содержащих не менее двух изолированных проводов, имеющих разные потенциалы.

Этот класс волн используется при передаче энергии в сравнительно ограниченном диапазоне частот по проводным системам, где определяющими являются токи проводимости $I_{пр}$, в частности при передаче по симметричным и коаксиальным цепям и полосковым линиям.

Волны ТМ и ТЕ – волны высшего порядка; обязательно содержат кроме поперечных составляющих электромагнитных полей (E_{\perp} и H_{\perp}) по одной продольной составляющей поля: для волн ТМ поле $E_z \neq 0$, для волн ТЕ поле $H_z \neq 0$.



Поэтому их силовые линии располагаются как в поперечных, так и в продольных сечениях направляющих систем.

Процесс передачи волн высшего порядка ТЕ и ТМ связан с вихревым полем. Эти волны возбуждаются в весьма высоком диапазоне частот, где определяющими являются токи смещения $I_{см}$.

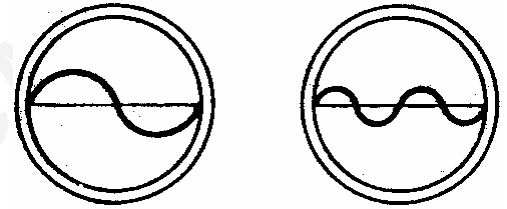
Волны ТЕ и ТМ можно передавать по однопроводным направляющим системам, например металлическим и диэлектрическим волноводам и однопроводным линиям. При этом продольная составляющая поля E_z или H_z задает направление движению энергии вдоль линии.

Разность потенциалов создается между полюсами волн, а также между полюсами и стенками волновода. Поэтому по волноводу передаются лишь очень короткие волны. Длина волн должна быть такой, чтобы в сечении волновода уложилось целое число полуволн или хотя бы одна полуволна.

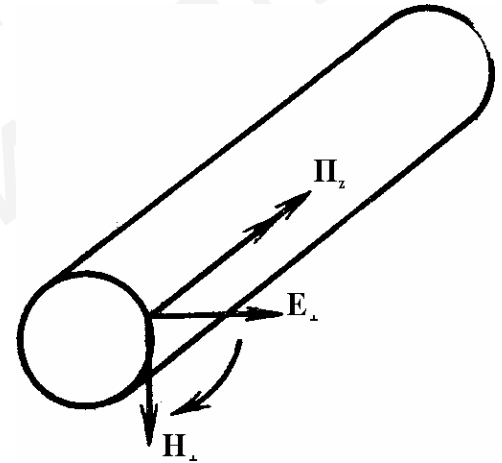
Смешанные (дипольные) волны представляют собой нераздельную сумму волн Е и Н и содержат все шесть компонентов поля, в том числе обе продольные составляющие E_z и H_z . К числу таких смешанных волн относятся поля в диэлектрических волноводах.

Наряду с делением на классы электромагнитные волны делятся также по типам. **Тип** волны (мода) определяется сложностью структуры, т.е. числом максимумов и минимумов поля в поперечном сечении.

Мода обозначается двумя числовыми индексами n и m . Индекс n означает в круглых волноводах число полных изменений поля по окружности волновода, а индекс m – число изменений поля по диаметру (TE_{nm} , TM_{nm}).



Для передачи энергии вдоль оси направляющей системы она должна иметь продольную компоненту направления движения энергии (вектор Пойнтинга Π_z). Для этого необходимо, чтобы электрические и магнитные поля располагались в поперечной плоскости. Поэтому обязательным условием распространения энергии является наличие составляющих E_{\perp} и H_{\perp} , образующих с продольной компонентой вектора Пойнтинга Π_z правовинтовую систему по правилу буравчика.



Для этого необходимо, чтобы электрические и магнитные поля располагались в поперечной плоскости. Поэтому обязательным условием распространения энергии является наличие составляющих E_{\perp} и H_{\perp} , образующих с продольной компонентой вектора Пойнтинга Π_z правовинтовую систему по правилу буравчика.

Основные уравнения электромагнитного поля

Если к проводам линии подключить генератор, создающий ЭДС, то между проводами возникает переменное электромагнитное поле. Это поле, окружая провода, движется вдоль них со скоростью, близкой к скорости света. Индуцированное напряжение вызывает движение электронов, которое можно обнаружить в виде тока в проводах.

Напряженность электрического поля E соответствует напряжению U , а напряженность магнитного поля H – току I . Таким образом, напряжение и ток в линии передачи возникают благодаря изменению электромагнитного поля.

Основные закономерности электромагнитного поля формулируются системой уравнений Максвелла

$$\begin{cases} \operatorname{rot} H = \sigma E + j\omega \epsilon E = I_{\text{пр}} + I_{\text{см}}; \\ \operatorname{rot} E = -j\omega \mu H, \end{cases}$$

где σ – проводимость среды;

ε – диэлектрическая проницаемость среды;

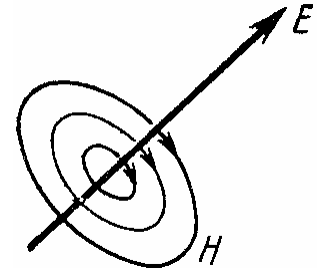
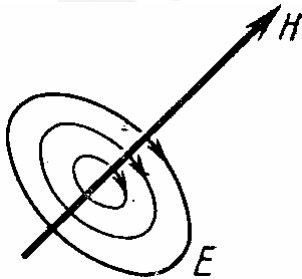
μ – магнитная проницаемость среды;

$I_{\text{пр}}$ – ток проводимости, т.е. ток в металлических массах;

$I_{\text{см}}$ – ток смещения, т.е. ток в диэлектрике.

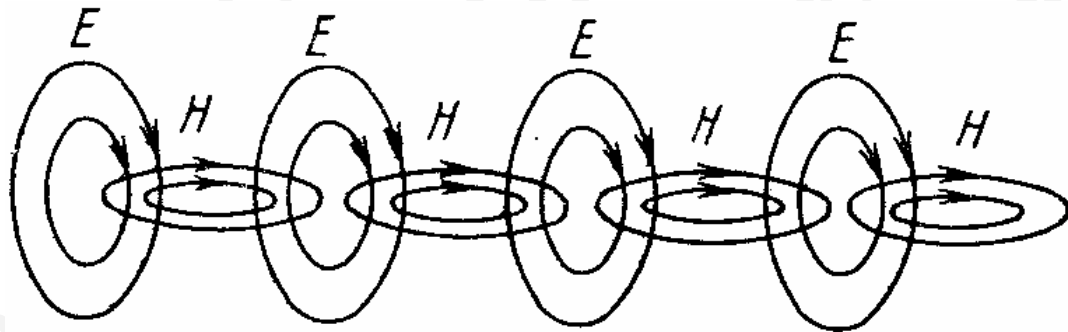
В металлических средах $I_{\text{пр}} \gg I_{\text{см}}$, поэтому можно считать $j\omega\varepsilon E \approx 0$. В диэлектрике $I_{\text{пр}} \ll I_{\text{см}}$, поэтому $\sigma E \approx 0$.

Первое уравнение системы означает, что электрическое поле создает вокруг себя линии магнитного поля.



Второе уравнение системы означает, что всякое изменение магнитного поля сопровождается образованием электрического поля.

В целом изменение одного поля вызывает появление другого поля и в результате действует и распространяется комплексное электромагнитное поле, переносящее энергию в атмосфере, в кабелях, в волноводах и в любых других направляющих системах.



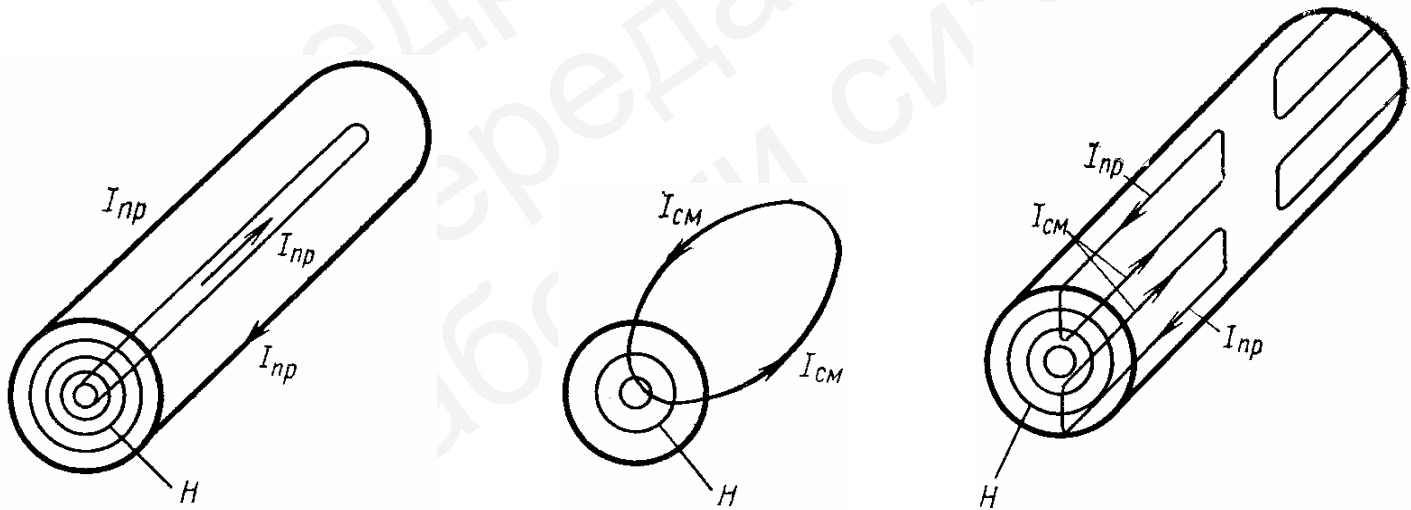
Поэтому энергию можно передавать по двум проводам (кабель), по однопроводной системе (полый цилиндр, изолированный провод) и вообще без проводов (радиопередача).

Передача по волноводам и радиопередача принципиально одинаковы. Отличие состоит в том, что в волноводе энергия сосредоточена в ограниченном объеме и канализируется в заданном направлении.

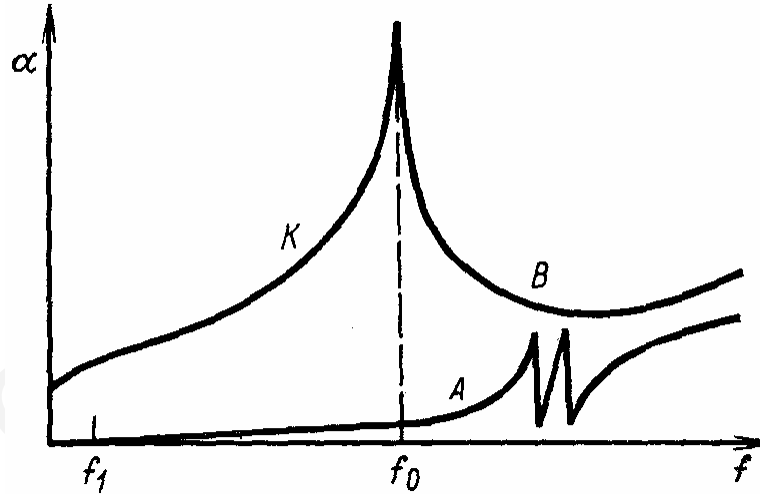
В *кабелях* (симметричных и коаксиальных) в прямом и обратном проводах циркулируют токи проводимости $I_{\text{пр}}$.

При распространении волн в *атмосфере* действуют (по замкнутым путям) токи смещения $I_{\text{см}}$.

В *волноводах* действуют суммарные токи смещения внутри волновода и токи проводимости в его стенках ($I_{\text{см}} + I_{\text{пр}}$).



Частотные ограничения при передаче энергии



По кабелям (K) передается полоса частот от 0 до f_0 – длина волны соизмерима с поперечными размерами кабеля $f_0 = c/\lambda$, $\lambda \approx a$, a – расстояние между проводами.

При частотах, больших f_0 , в открытых кабельных линиях появляются высшие составляющие поля (TE и TM), возникает антенный эффект (излучение) и передача вдоль цепи становится невозможной.

В *атмосфере* (А) распространяются волны широкого диапазона – от длинных волн ($f_1 = 15$ кГц) до самых коротких (диапазон СВЧ).

По *волноводу* (В) могут передаваться лишь высокочастотные колебания, длина которых меньше или соизмерима с его поперечными размерами, например диаметром D в круглом волноводе – $\lambda \leq D$.

Режимы передачи

Режим передачи зависит от диапазоном используемых частот и определяется значениями правых частей системы уравнений Максвелла.

Статический режим соответствует объемным статическим зарядам электрического или магнитного характера

	Металл	Диэлектрик
rot H	0	0
rot E	0	0

Стационарный режим относится к случаю передачи по проводам постоянного тока (σE). Постоянный ток создает магнитное поле ($\text{rot } H$), а электрическое поле не индуктируется ($\text{rot } E = 0$)

	Металл	Диэлектрик
rot H	σE	0
rot E	0	0

Квазистационарный режим охватывает сравнительно медленно изменяющиеся поля, когда токами смещения в диэлектрике можно пренебречь. Этот режим справедлив для частот, при которых длина волны существенно больше, чем поперечные размеры линии ($\lambda \gg D$)

	Металл	Диэлектрик
rot H	σE	0
rot E	$-j\omega\mu H$	$-j\omega\mu H$

По этим формулам можно рассчитывать различные проводные системы (воздушные линии, симметричные и коаксиальные кабели) в диапазоне частот до 10^9 Гц.

Волновой режим соответствует процессам в свободном пространстве и диэлектрике, где токи проводимости отсутствуют

	Металл	Диэлектрик
rot H	0	$j\omega\epsilon E$
rot E	0	$-j\omega\mu H$

Этими формулами пользуются при расчете процессов распространения и излучения волн в радиотехнике.

Электродинамический режим относится к области высоких частот и коротких волн, когда необходимо учитывать как токи проводимости, так и токи смещения

	Металл	Диэлектрик
rot H	σE	$j\omega\epsilon E$
rot E	$-j\omega\mu H$	$-j\omega\mu H$

Сюда относится передача по волноводам, световодам и радиочастотным линиям передачи в области СВЧ ($f > 10^{10}$ Гц), т.е. когда длина волны меньше, чем поперечные размеры линий ($\lambda < D$).