**Тема 2. Электромагнитные волны в направляющих системах**

**Лекция 12.** Линии передачи с волнами типа Т.

Электромагнитные волны, векторы напряженности электрического и магнитного полей которых лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения, называют поперечными электромагнитными волнами или волнами типа Т.

Волна типа Т в отличие от волн типов Н и Е распространяется в линии при любой частоте (ωкрТ = 0), что важно для практики.

Для волн типа Т поперечное волновое число g = 0, поэтому продольное волновое число h оказывается таким же, как и в случае однородной плоской волны. Для линии без потерь

(9.1)

откуда

(9.2)

(9.3)

Здесь — длина однородной плоской волны в заполняющем диэлектрике с параметрами .

Характеристическое сопротивление волны типа Т в линии без потерь, обозначаемое ZcT и равное отношению поперечной составляющей напряженности электрического поля и поперечной составляющей напряженности магнитного поля бегущей волны, совпадает с аналогичной, величиной, вычисленной для однородной плоской волны в неограниченном пространстве:

(9.4)

Комплексные амплитуды полей типа Т в поперечной плоскости удовлетворяют векторным уравнениям Лапласа:

(9.5)

Распределение электрического и магнитного полей вдоль продольной оси z можно записать в виде бегущей волны:

(9.6)

где — коэффициент распространения: **Е0** и **Н0** определяются уравнениями (9.5).

Электрические и магнитные поля волны типа Т в плоскости поперечного сечения линии передачи по структуре будут такими же, как и постоянные во времени электрические и магнитные поля, существующие в системе при тех же граничных условиях. Это означает, что распространение волны типа Т возможно лишь в линиях, которые могут быть использованы для передачи постоянного тока (двухпроводные, коаксиальные, полосковые и др.).

Статический характер поперечного распределения электрического поля позволяет определить разность потенциалов между проводниками линии (рис. 9.1):

(9.7)

не зависящую от выбора пути интегрирования *L* в поперечной плоскости. Ток вдоль проводников:

(9.8)

находят интегрированием вектора *ηэ* плотности поверхностного электрического тока по контуру сечения проводника *l*.

Линии передачи с волной типа Т характеризуются волновым сопротивлением ZB, равным отношению комплексных амплитуд напряжения и тока в режиме бегущих волн и выражающимся через погонные индуктивность *L1* и емкость С1 линии следующим образом:

(9.9)

Фазовая скорость в линии передачи с волной типа Т (9.10)

Мощность, переносимая волной по линии передачи,

(9.11)

или

(9.12)

где интегрирование ведется по поперечному сечению линии.

Коэффициент ослабления *α* волны в линии передачи складывается из коэффициента , учитывающего потери в диэлектрике, и коэффициента , описывающего потери в металле:

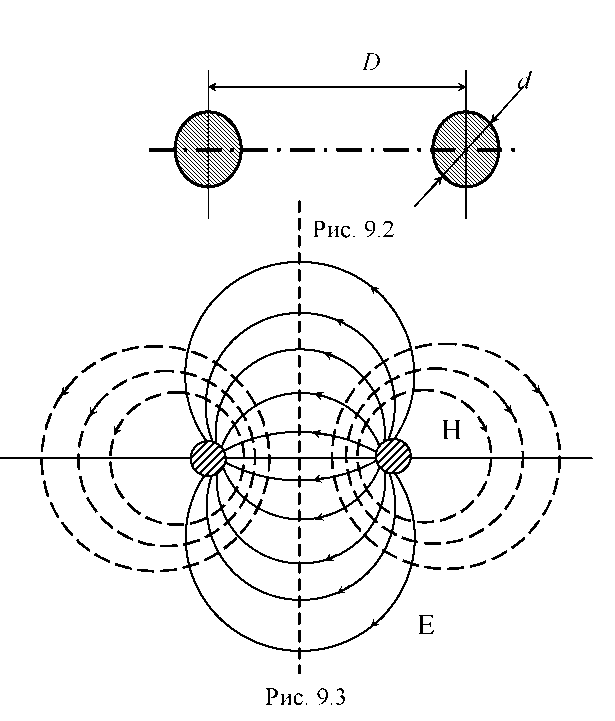
м-1, (9.13)

здесь

(9.14)

(9.15)

где Rs — поверхностное сопротивление металла.

Интегрирование в числителе ведется по контуру сечения линии, в знаменателе — по поперечному сечению линии.

**Двухпроводные линии передачи**

Двухпроводная линия образована системой из двух параллельных проводников, окруженных однородным веществом c параметрами .

На рис. 9.2 показана симметричная двухпроводная линия передачи из одинаковых проводников круглого сечения.

Рассмотрим основные расчетные соотношения для этой линии.

Комплексные амплитуды тока *I* и напряжения U для бесконечной линии без потерь:

(9.16)

Погонные параметры двухпроводной линии передачи

(9.17)

(9.18)

Волновое сопротивление

(9.19)

Картина силовых линий электромагнитного поля показана на рис. 9.3. Мощность, переносимая волной типа Т в двухпроводной линии передачи:

(9.20)

Напряженность электрического поля максимальна на участках поверхности, которые наиболее близки друг к другу. Приближенно при d/D < 0,4

(9.21)

Диэлектрик способен выдержать без электрического пробоя некоторое предельное значение напряженности электрического поля *Епред*, которое и определяет предельную переносимую мощность.

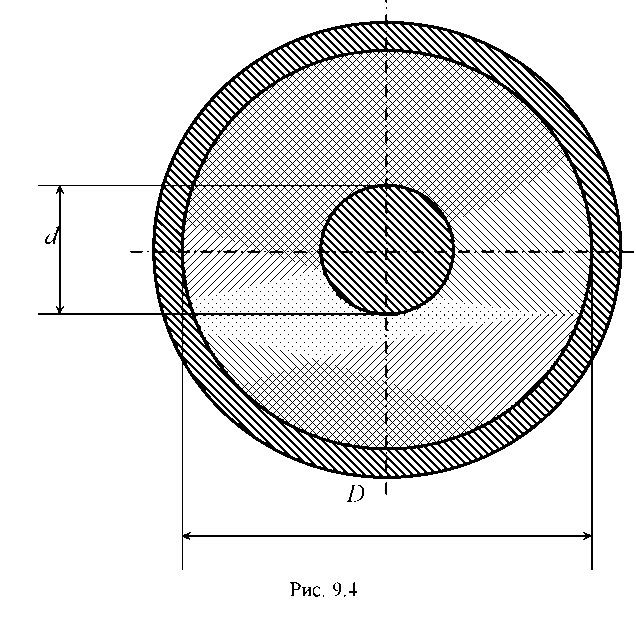
Коэффициент ослабления волны за счет потерь в диэлектрике определяется формулой (9.14). Коэффициент ослабления, обусловленный сопротивлением проводников.

(9.22)

Здесь квадратный корень учитывает повышение ослабления вследствие неравномерного распределения тока; при d<D/3 этой поправкой можно пренебречь.

**Коаксиальные линии передачи**

Коаксиальная линия передачи представляет собой систему из двух соосных металлических цилиндров с диаметрами d и D, разделенных слоем диэлектрика с

проницаемостью εа и μа (рис. 9.4). Комплексная амплитуда вектора Е бегущей волны в коаксиальной линии передачи без потерь

(9.23)

где U — комплексная амплитуда напряжения (разности потенциалов)

между внутренним и внешним проводниками в сечении r = 0.

Для линии без потерь

(9.24)

Погонные параметры коаксиальной линии передачи:

(9.25)

(9.26)

Волновое сопротивление коаксиальной линии передачи

(9.27)

Переносимая .мощность

(9.28)

(9.29)

Выражение (9.28) можно представить в виде

(9.30)

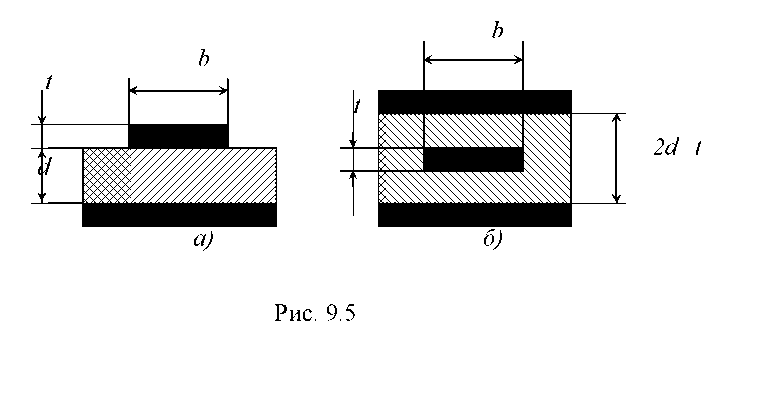
Коэффициент ослабления волны типа Т в коаксиальной линии передачи, учитывающий потери в диэлектрике, определяется формулой (9.14). Коэффициент ослабления, обусловленный потерями в металле:

(9.31)

где и — поверхностные сопротивления металла внутреннего и внешнего цилиндров соответственно.

В коаксиальной линии передачи волны электрического и магнитного типов являются высшими типами волн. Обычно они не используются для передачи, но могут возникать как паразитные. Для подавления волн высших типов достаточно, чтобы частота колебаний удовлетворяла неравенству

(9.32)

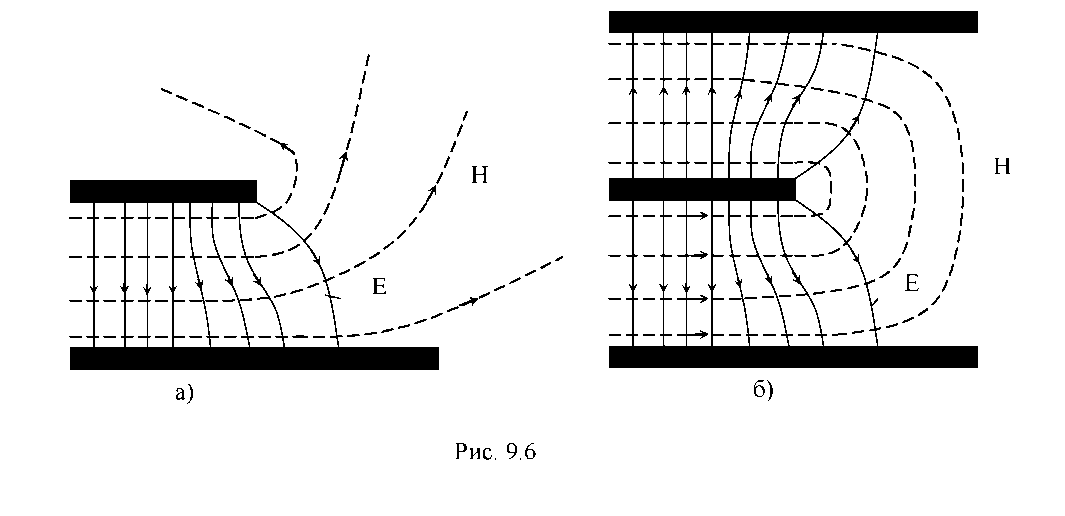
**Полосковые линии передачи**

В технике СВЧ широко применяют направляющие системы, называемые полосковыми линиями передачи, которые особенно удобны в печатных и интегральных схемах СВЧ. На рис. 9.5, а и б изображены полосковые линии передачи несимметричного и симметричного типов. Эти линии либо заполнены воздухом, либо имеют основание из твердого диэлектрика.

Строгая теория полосковых линий довольно сложна. Так называемая квази-Т-волна в этих линиях может существовать, если ширина токонесущего проводника и расстояние между ним и заземленной пластиной меньше половины длины волны в линии передачи. При этом электрическое и магнитное поля сосредоточены в основном в пространстве между проводником и заземленной пластиной. Электрическое поле в поперечной плоскости может быть описано уравнением Лапласа (9.5).

В полосковых линиях передачи с диэлектрическим основанием волны типа Т не могут распространяться в чистом виде из-за неоднородности диэлектрика. Однако теория и опыт показывают, что поля и поток мощности сосредоточиваются главным образом в диэлектрике между токонесущим проводником и заземленной пластиной. Поэтому можно принять допущение об однородности диэлектрика, заполняющего всю линию передачи.

Картины силовых линий электромагнитного поля в полосковых линиях передачи приведены на рис. 9.6, а и б. Для практических расчетов удобны следующие приближенные соотношения, которые хорошо согласуются с опытными данными.



Погонные емкости (Ф/м) рассчитывают по формулам:

для несимметричной полосковой линии передачи (см. рис. 9.5, а)

(9.33)

(9.34)

(9.35)

для симметричной полосковой линии передачи (см. рис. 9.5, б)

(9.36)

(9.37)

(9.38)

Волновые сопротивления с учетом толщины токонесущего проводника *t* рассчитывают по формулам:

для несимметричной линии передачи

(9.39)

(9.40)

для симметричной линии передачи

(9.41)

(9.42)

Волновые сопротивления без учета толщины проводника определяются соотношениями:

для несимметричной линии передачи

(9.43)

для симметричной линии передачи

(9.44)

Передаваемая мощность в несимметричной полосковой линии передачи

(9.45)

где Е0 — амплитуда напряженности поля в центре линии, В/м.

Значения коэффициентов rB и rA в зависимости от отношения b/d определяют по таблицам в Приложении IV,

При b/d 1 в формуле (9.45) можно принять, что

(9.46)

в результате чего она упрощается:

(9.47)

Предельная мощность в полосковых линиях передачи ограничивается условиями пробоя и допустимым нагревом диэлектрика. Если пробой диэлектрика определяет предел мощности в импульсе, то нагрев ограничивает передаваемую мощность при непрерывной работе или среднюю мощность в импульсном режиме.

Предельная мощность полосковых линий передачи, обусловленная условиями электрического пробоя, ограничивается максимально допустимой величиной напряженности электрического поля у края проводника, так как поле внутри линии неравномерно:

(9.48)

где учитывает неравномерность распределения напряженности электрического поля в плоскости поперечного сечения несимметричной полосковой линии.

Для несимметричной полосковой линии передачи

(9.49)

При малых значениях t/d

(9.50)

Для несимметричной полосковой линии передачи, учитывая выражения (9.47), (9.48) и заменяя Еmax на Епред, получим

(9.51)

На основании неравенства (9.50) формулу (9.51) можно упростить:

(9.52)

Передаваемая мощность в симметричной полосковой линии передачи

(9.53)

где

(9.54)

Это коэффициент, учитывающий неравномерность распределения напряженности электрического поля в плоскости поперечного сечения. Значения rс для различных отношений b/d приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| b/d | 1 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 9 | 14 | 20 |
| rc | 0,89 | 0,92 | 0,945 | 0,948 | 0,98 | 0,99 | 0,9909 | 0,999 | 0,9996 | 0,9999 | 0,99999 | 0,999999 |

Если геометрические размеры удовлетворяют неравенствам t/d < 0.3; b/d > 1, то выражение (9.53) можно преобразовать к виду

(9.55)

Предельная мощность в симметричной полосковой линии передачи

(9.56)

Коэффициент ослабления, обусловленный потерями в проводящих пластинах несимметричной полосковой линии передач

(9.57)

Здесь коэффициент определяют по соотношению (9.49) или (9.50), а значения и — по таблицам в Приложении IV. Коэффициент ослабления, обусловленный потерями в проводящих пластинах симметричной полосковой линии передачи (при t/d < 0,3, b / d > 1),

(9.58)

В формулах (9.57), (9.58) — поверхностное сопротивление металла.

Коэффициент ослабления волны типа Т в полосковой линии передачи за счет потерь в диэлектрике определяется соотношением (9.14).