Вариант 03

При выполнении контрольной работы слушатель должен придерживаться следующих правил:

1. При выполнении расчета укажите его цель, приведите ссылку на источник (номер литературы по списку) и номер формулы.   
   Например: Определяем коэффициент затухания по формуле (3.26) [1].
2. Поясните вновь вводимые понятия.
3. Запишите общую формулу, подставьте в нее числовые значения известных величин, приведите результаты промежуточных вычислений и конечный результат. В конечных результатах обязательно поставьте размерности.
4. Все величины должны выражаться в стандартных единицах международной системы СИ.
5. Все расчеты должны выполняться с точностью до третьей-четвертой значащей цифры.
6. Графики должны содержать стандартный масштаб, размерности величин и расчетные точки, рисунки должны быть разборчивы.
7. Анализ результатов.
8. В конце работы привести список использованной литературы, поставив дату выполнения работы и расписаться.

**2. Контрольная работа**

**ЗАДАЧА 1**

Плоская электромагнитная волна с частотой f распространяется в безграничной реальной среде с диэлектрической проницаемостью , магнитной проницаемостью = , проводимостью . Амплитуда напряженности электрического поля в точке с координатой z = 0 Еm.

1. Определить к какому типу относится данная среда на заданной частоте.
2. Рассчитать фазовый набег волны на расстоянии, равном глубине проникновения ∆0.
3. Рассчитать отношение фазовой скорости в реальной среде к фазовой скорости в идеальной среде с теми же значениями диэлектрической и магнитной проницаемости.
4. Вычислить значение амплитуды напряженности магнитного поля в точке с координатой z, равной длине волны в реальной среде.
5. Вычислить значение активной составляющей вектора Пойнтинга в точке с координатой z, равной длине волны в реальной среде.
6. Вычислить рабочее ослабление волны на отрезке, равном длине волны в реальной среде.
7. Построить график зависимости амплитуды напряженности электрического поля от координаты z в интервале 0 < z < 3∆0.

Исходные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| m | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Em, В/м | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1,5 | 2,5 | 3,5 | 4,5 |
| e | 2,0 | 2,5 | 3,5 | 4,0 | 80 | 5,5 | 9,0 | 1,0 | 7,0 | 2,2 |
| n | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| f, мГц | 100 | 200 | 400 | 500 | 800 | 1000 | 1200 | 1450 | 1600 | 1750 |
| s , См/м | 0,01 | 0,06 | 0,08 | 0,02 | 0,04 | 0,1 | 0,2 | 0,05 | 0,09 | 0,03 |

**ЗАДАЧА 2**

Выбрать размеры поперечного сечения прямоугольного волновода, обеспечивающего передачу сигналов в диапазоне частот от f1 до f2 на основной волне. Амплитуда продольной составляющей магнитного поля Н0. Для выбранного волновода рассчитать на центральной частоте диапазона f0:

1. Длину волны в волноводе.
2. Отношение фазовой скорости к групповой скорости в волноводе.
3. Продольную фазовую постоянную.
4. Характеристическое сопротивление.
5. Рабочее ослабление, вносимое отрезком волновода длиною L, если материал стенок волновода имеет удельную проводимость s
6. Вычислить среднюю мощность, которую можно передавать по данному волноводу.
7. Определить типы волн, которые могут существовать в этом волноводе на частоте f0.

Исходные данные приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Исходные данные.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| m | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| f1, ГГц | 14,5 | 11,9 | 9,85 | 8,2 | 6,6 | 5,4 | 4,65 | 3,95 | 3,2 | 2,6 |
| f2, ГГц | 22,0 | 18,0 | 15,0 | 12,5 | 10,0 | 8,2 | 7,0 | 6,0 | 4,9 | 3,9 |
| n | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Н0, А/м | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| Материал стенок | Медь | Латунь | Алюминий | Серебро | Латунь | Алюминий | Медь | Серебро | Латунь | Медь |
| L, м | 5 | 7 | 9 | 10 | 8 | 13 | 6 | 20 | 15 | 12 |

### 3. Краткие теоретические сведения

Под волновым процессом понимают возмущение некоторой величины в пространстве, изменяющееся во времени, перемещающееся с конечной скоростью и переносящее энергию без переноса вещества.

Математически волновой процесс описывается однородным уравнением Гельмгольца:

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image573.gif(1)

где D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image574.gif- оператор Лапласа;

k = D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image575.gif- волновое число или постоянная распространения;

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image576.gif- абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости;

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Im_2.gif, D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Im_3.gif- относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости.

Плоская электромагнитная волна - это волновой процесс, у которого амплитуды электрической и магнитной составляющих поля во всех точках плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, имеют одинаковые значения. Если принять в качестве направления распространения плоской электромагнитной волны ось z в декартовой системе координат то, согласно определению, поле плоской электромагнитной волны не зависит от поперечных координат х и у. Следовательно, D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Im_4.gifи уравнение (1) принимает следующий вид:

*D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image577.gif*

Решение данного дифференциального уравнения 2-го порядка имеет вид:

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image578.gif(2)

где D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image579.gif- амплитуда и фаза падающей (прямой) волны, перемещающейся вдоль положительного направления оси z;

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image580.gif**-** амплитуда и фаза отраженной (обратной) волны, перемещающейся вдоль отрицательного направления оси *z;*

1. **Плоская электромагнитная волна в идеальной среде.**

Идеальной средой принято называть среду в которой отсутствуют потери энергии при распространении электромагнитной волны. Рассмотрим случай безграничной среды - это означает, что отраженная волна отсутствует. Тогда, на основании (2), вектор напряженности электрическою поля плоской электромагнитной волны равен

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image581.gif(3)

Воспользовавшись вторым уравнением Максвелла, можно исходя из (3) определить вектор напряженности магнитного поля плоской электромагнитной волны как:

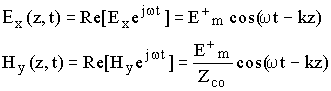
D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image582.gif(4)

Откуда следует что, во-первых, вектор напряженности магнитного поля перпендикулярен вектору напряженности электрического поля, а во-вторых, вектор Н прямо пропорционален вектору Е. Последнее означает, что электрическое и магнитное поля колеблются в пространстве синхронно и синфазно. Коэффициент пропорциональности, определяемый как Ех /Ну называется характеристическим сопротивлением данной среды Zсо:

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image583.gif(5)

Видно, что *Zco* полностью определяется лишь параметрами самой среды.

Введем временную зависимость в е-jw t и перейдем от комплексных значений в (3) и (4) к мгновенным, в результате получим:

(6)

где (w t -k z) - фаза колебаний.

Если зафиксировать время t ( t = 0), то амплитуда принимает те же самые значения через расстояние z = 2p /k. Это расстояние носит название длины волны: l = 2p /k. Отсюда волновое число можно определить как:

k = 2p / l .

Плоскость, в которой ( w t - k z) = const называется фазовым или волновым фронтом электромагнитной волны. Скорость перемещения фазового фронта называется фазовой скоростью, которая определяется из условия: w ∆t - k∆z = 0. Отсюда фазовая скорость плоской электромагнитной волны в идеальной среде равна:

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image585.gif(7)

где D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image586.gif- скорость света.

1. **Плоская электромагнитная волна в реальной среде.**

При распространении электромагнитных волн в реальных средах происходит частичное рассеивание их энергии, которое обусловлено потерями в среде. Различают два вида потерь в среде:

1) Поляризационные (диэлектрические) потери. Механизм их появления можно пояснить следующим образом. При отсутствии внешнего электрического поля каждый атом вещества, из которого состоит среда, упрощенно представляет собой положительно заряженное ядро с отрицательными электронами, вращающимися по круговой орбите. Центры положительного и отрицательного зарядов совпадают и суммарный заряд атома равен нулю. Под влиянием внешнего электрического поля орбита электрона (электронов) вытягивается, стремясь к эллиптической В этом случае центры положительного и отрицательного заряда перестают совпадать друг с другом и атом начинает вести себя подобно электрическому диполю. Диполи отдельных атомов всего вещества ориентируются определенным образом относительно приложенного внешнего поля. Этот процесс принято называть электронной поляризацией. В переменном электрическом поле ориентация диполей меняется с частотой w , возникающие при этом "трения" при смещении отдельных диполей вещества и обуславливают поляризационные (диэлектрические) потери. Их учет производится путем введения комплексной абсолютной диэлектрической проницаемости:

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image587.gifгде D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image588.gif

2) Потери, обусловленные проводимостью вещества. Они возникают вследствие столкновения свободных носителей заряда (электронов) с атомами кристаллической решетки. Поскольку упорядоченное движение электронов создает электрический ток, называемый током проводимости, то принято говорить, что данный вид потерь обусловлен протеканием в среде токов проводимости. Эти потери в среде пропорциональны отношению удельной электрической проводимости s к частоте поля w .

При фиксированной частоте эти два вида потерь с макроскопической точки зрения неразличимы: как те, так и другие потери приводят к преобразованию электромагнитной энергии в другие виды энергий. Вследствие этого комплексная диэлектрическая проницаемость среды с учетом обеих видов потерь запишется как:

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image589.gif

Можно формально ввести понятие эквивалентной проводимости среды, соответствующую поляризационным потерям как: D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image590.gif.

Отсюда: D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image591.gif

Тогда окончательно получаем:

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image592.gif(8)

Отношение D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image593.gifD:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image594.gif- носит название тангенса угла потерь.

Отношение D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image595.gif- носит название тангенса угла диэлектрических потерь.

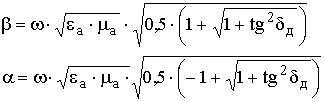
Разделение сред на диэлектрические и проводящие с физической точки зрения связано с наличием свободных носителей заряда. В то же время можно сказать, что разделение сред на диэлектрики и проводники достаточно условно, поскольку как следует из (8). одна и та же среда может вести себя по разному на различных частотах (например, морская вода на НЧ является проводником, а на СВЧ - диэлектриком). Диэлектрические среды, для которых справедливо неравенство s экв/w e > > s /w e а, имеют следующий вид записи комплексного значения D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image596.gif:

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image597.gif(9)

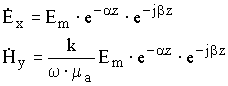
Вследствие этого, волновое число также является комплексной величиной:

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image598.gif(10)

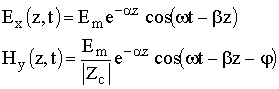
Вещественную часть волнового числа b называют фазовой постоянной, а мнимую часть a *-* коэффициентом затухания. Значения b и a можно найти непосредственно из (10):

(11)

Таким образом, с учетом выражений (3), (4) и (10) уравнение плоской электромагнитной волны в реальной безграничной среде запишется как:



Введем временную зависимость еjw t и перейдем к мгновенным значениям Ех и Ну , в результате получим:

(12)

где D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image602.gif**-** модуль характеристического сопротивления реальной среды.

Сравнивая уравнения (6) и (12), можно выявить следующие различия между плоской электромагнитной волной в идеальной и реальной среде:

а) Векторы Е и Н сдвинуты по фазе на угол равный j ;

б)Множитель е-a z указывает на экспоненциальное ослабление поля в направлении распространения волны, что связано с преобразованием части электромагнитной энергии в другие виды энергий. Отсюда очевиден физический смысл коэффициента затухания: a характеризует уменьшение амплитуды волны на единицу длины.

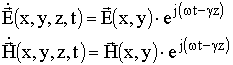
с) Роль волнового числа (постоянной распространения) электромагнитной волны в реальной среде играет вещественная часть b комплексного волнового числа. Постоянная распространения b характеризует изменение фазы волны на единицу длины. По аналогии с идеальной средой, для реальной среды длина волны и фазовая скорость будут определяться как:

l = 2p /b ; Vф = w /b (13)

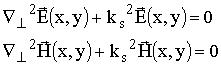
1. **Направляющие системы. Направляемые электромагнитные волны**

Под направляющей системой понимают устройство, ограниченное в двух измерениях и осуществляющее передачу электромагнитной энергии в третьем измерении. Волны, которые распространяются в таких направляющих системах получили название – направляемые электромагнитные волны, а направляющие системы называются волноводами.

Общая запись полей для произвольного сечения волновода выглядит следующим образом:

(14)

Для конкретизации задаются D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image604.gif.

(15)

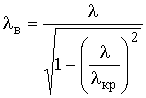
где Е(х,у), Н(х,у) – поля в поперечном сечении волновода;

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image606.gif- продольное волновое число;

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image607.gif- поперечное волновое число;

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image608.gif- волновое число в свободном пространстве.

k2 = ks2 + g 2;

- длина волны в волноводе;

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image610.gif- поперечный оператор Лапласа

1. **Классификация электромагнитных волн**

В основе классификации электромагнитных волн лежит критерий – наличие или отсутствие одной из продольных составляющих. Классификация волн позволяет упростить анализ волн в волноводе и записать все поперечные составляющие полей через одну продольную составляющую.

Различают четыре класса полей:

Е – волны Еz ¹ 0, Hz = 0;

H – волны Нz ¹ 0, Еz = 0;

Т – волны Нz = 0, Еz = 0;

Гибридные волны Нz ¹ 0, Еz ¹ 0.

Прямоугольный волновод это металлическая труба прямоугольного сечения. Размер широкой стенки – а, размер узкой стенки – b.

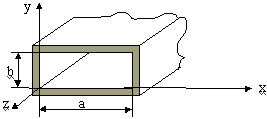


Рисунок 6.1 Прямоугольный волновод

Поля в прямоугольном волноводе можно рассчитать через продольную составляющую Нz либо Еz.

1. **Н-волны в прямоугольном волноводе**

(Нz ¹ 0, Ez = 0)

Составляющая Нz удовлетворяет волновому уравнению

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image611.gif(16)

Наиболее удобным методом решения данного уравнения является метод разделения переменных по Фурье:

Нz(х, у) = h1(x) h2(y)

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image612.gif

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image613.gif- константы разделения

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image614.gif(17)

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image615.gif(18)

Граничные условия для данной задачи

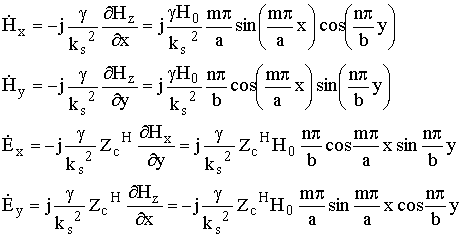
D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image616.gif; Ех = 0 при у = 0; у = b

Еу = 0 при х = 0; у = а

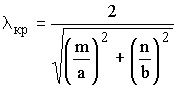
А = 0, С = 0, В . D = Н; kх = D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image617.gif, где m = 0, 1, 2,…

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image618.gif, где n = 0, 1, 2, …

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image619.gif(19)

Поперечные составляющие полей   
  
ý

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image621.gif- характеристическое сопротивление (20)

- критическая длина волны (21)

Каждому набору значений m и n соответствует свое распределение поля в волноводе и своя критическая длина волны. Индексы m и n определяют распределение поля по координатам х и у. С учетом периодичности функции cos, число m имеет смысл – количество полуволн, укладывающихся вдоль а, а n – число полуволн, укладывающихся вдоль b. Условием распространения волны в волноводе является l ген < l кр.

Критическая длина волны зависит от размеров поперечного сечения **а** и **b** и значений индексов **m** и **n**. Максимальная l кр будет для индексов m = 1, n = 0, l кр = 2а. У всех других волн l кр меньше. Волну Н10 называют основной волной в волноводе. Она наиболее часто используется.

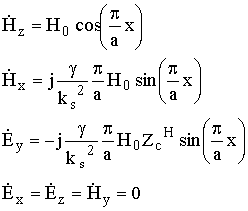
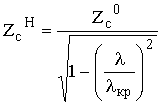
Одноволновый режим для стандартного волновода (2b < а) а £ l ген £ 2а. Диапазон использования одноволновой области 80 – 85%. Не рекомендуется подходить к критическому режиму (слева и справа).

1. **Основная волна в прямоугольном волноводе**

Основная волна в прямоугольном волноводе Н10 имеет следующие преимущества:

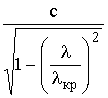
* 1. Имеет место максимальный диапазон одноволновой передачи.
  2. Потери энергии минимальны.
  3. Поперечные размеры волновода наименьшие.

Составляющие полей волны Н10:

еj(w t -g z) (22)   
- характеристическое сопротивление для Н – волн в волноводе  
D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image625.gifOм – характеристическое сопротивление в свободном пространстве.

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image626.gif

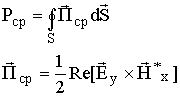
Электрическое поле волны Н10 имеет одну составляющую Еу, она максимальна в середине волновода. Поле D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image627.gifнаправлено от одной стенки к другой. Магнитное поле имеет две составляющие Нх и Нz. У боковых стенок волновода Нz максимальна. В силу непрерывности линий магнитного поля Нz замыкается через Нх. Эта картинка перемещается в волноводе с фазовой скоростью (Vф), которая определяется следующим образом:

Vф = (23)

с – скорость света, с = 3 . 108 м/сек.

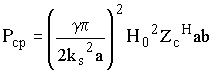
1. **Передача энергии по волноводу**

Энергия, передаваемая по волноводу, определяется поперечными составляющими полей

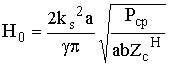
(24)

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image630.gif- вектор Пойнтинга.

Средняя мощность

(25)

Рср. в волноводе зависит от амплитуды продольной составляющей магнитного поля Н0

(26)

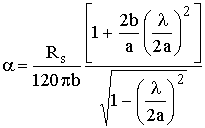
1. **Потери энергии в волноводе**

Можно выделить три основных фактора, которые несут ответственность за потери энергии:

* 1. Конечная проводимость стенок волновода. За счет этого часть токов преобразуется в тепло (омические потери).
  2. Несовершенство среды заполняющей волновод (диэлектрические потери).
  3. Связан с нарушением однородности стенок. Из-за непрерывной эксплуатации или других факторов образуются щели и через них происходит излучение.

Любая из этих причин приводит к тому, что постоянная распространения g будет комплексной величиной как и в случае плоских волн.

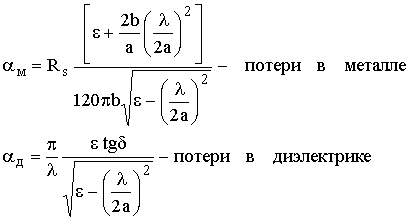
D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image_464.gif= D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image_182.gif- jD:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image_181.gif ; D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image_182.gif= D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image633.gif;

(27)

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Image635.gif- поверхностное сопротивление.

Волновод, заполненный диэлектриком D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Im_5.gif.

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\images\i\Im_6.gif

(28)

**Пример контрольной работы**  
Задача №1

Плоская электромагнитная волна с частотой 878 МГц распространяется в безграничной реальной среде с диэлектрической проницаемостью 5; магнитной проницаемостью 1, с проводимостью 0,1 См/м. При z=0, Em=1 В/м.

1. Определить к какому типу относится данная среда на заданной частоте.
2. Рассчитать фазовый набег волны на расстоянии, равном глубине проникновения Δ0.
3. Рассчитать отношение фазовой скорости в реальной среде к фазовой скорости в идеальной среде с теми же значениями диэлектрической и магнитной проницаемости.
4. Вычислить значение амплитуды напряжённости магнитного поля в точке с координатами z, равной длине волны в реальной среде.
5. Вычислить значение активной составляющей вектора Пойнтинга в точке с координатой z, равной длине волны в реальной среде.
6. Вычислить рабочее ослабление волны на отрезке, равном длине волны в реальной среде.
7. Построить график зависимости амплитуды напряжённости электрического поля от координаты z в интервале 0<z<3Δ.

Дано:

ƒ=878·106 Гц; μ=1; ε =5; σ =0,1 См/м; Em=1 В/М;

ω=2π ƒ =2·3,14·8,78·106 =5,517·109;

μ0=4π\*10-7=1,257\*10-7=1,257\*10-6 Гн/м;

ε0=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image245.gif\*10-9=8,84\*10-12 Ф/м;

1.1. Определить к какому типу относится данная среда на заданной частоте.

tgΔ=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image246.gif

tgΔ=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image247.gif=0,41;

Δ=arctg(0,41)=0,39;

tgΔ≈1 - реальная среда, с потерями.

1.2 Рассчитать фазовый набег волны на расстоянии, равном глубине проникновения Δ0 .

Ф=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image248.gif·D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image249.gif; λреал=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image250.gif;

Ф=2π·D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image251.gif·D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image252.gif==β·D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image252.gif [рад];

Δ0=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image253.gif [1/м];

β=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image254.gif\*D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image255.gif\*D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image256.gif [рад/м];

α=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image257.gif\*D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image255.gif\*D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image258.gif [1/м];

β=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image259.gif\*D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image260.gif\*D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image261.gif=41,12\*D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image262.gif=41,94 [рад/м];

α=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image259.gif\*D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image263.gif\*D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image264.gif= 41,12\*0,2=8,26 [1/м];

Δ0=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image253.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image265.gif=0,12 [м];

Ф=41,94\*0,12= 5,077 [рад].

1.3 Рассчитать отношение фазовой скорости в реальной среде к фазовой скорости в идеальной среде с теми же значениями диэлектрической и магнитной проницаемости.

υФи =D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image266.gif; υФр =D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image267.gif;

β=41,94 [рад/м];

υФи =D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image268.gif=3\*108 [м/с];

υФр =D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image269.gif=1,132·108 [м/с];

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image270.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image271.gif=0,376

1.4 Вычислить значение амплитуды напряжённости магнитного поля в точке с координатами z, равной длине волны в реальной среде.

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image272.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image273.gif ·D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image274.gif;

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image275.gif=1; Em=1 [В/м];

Z=λреал=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image276.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image277.gif=0,15 м;

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image278.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image279.gif= 162.18 [Ом];

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image278.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image280.gif=162,18 [Ом];

α=8,26 [1/м];

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image272.gif=1·D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image281.gif·D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image282.gif= 6,17·103·D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image283.gif;

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image284.gif=1,787·10-3 [А/м];

1.5 Вычислить значение активной составляющей вектора Пойнтинга в точке с координатой z, равной длине волны в реальной среде.

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image285.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image286.gif;

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image285.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image287.gif=0,5·0,0062·D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image288.gif·0,98=2,544·10-4 ;

1.6 Вычислить рабочее ослабление волны на отрезке, равном длине волны в реальной среде.

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image289.gif=0.15

aр =8.68·α·D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image290.gif [Дб];

aр =8,68·8,26·0,15=10,75 [Дб];

1.7 Построить график зависимости амплитуды напряжённости электрического поля от координаты z в интервале 0<z<3 Δ0 .

3Δ=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image291.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image292.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image293.gif=0,363 м;

0<z<0,363;

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image294.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image295.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image296.gif

Z=0 => D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image294.gif=1;

Z=0,050 => D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image294.gif=0,662·D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image297.gif

Z=0,10 => D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image294.gif=0,438D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image298.gif

Z=0,150 => D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image294.gif=0,284D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image299.gif

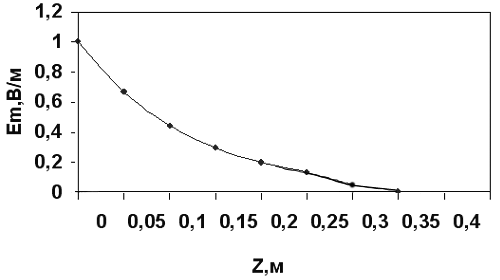
Z=0,20 => D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image294.gif=0,1927D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image300.gif

Z=0,50 => D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image294.gif=0,1268D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image301.gif

Z=0,30 => D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image294.gif=0,0083D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image302.gif

Z=0,3630 => D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image294.gif=0,00499D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image303.gif

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Z | м | 0 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,363 |
| Em | В/м | 1 | 0,662 | 0,438 | 0,289 | 0,193 | 0,126 | 0,008 | 0,005 |



Задача №2

Выбрать размеры поперечного сечения прямоугольного волновода, обеспечивающего передачу сигналов в диапазоне частот от 8500 МГц до 9000 МГц на основной волне. Амплитуда продольной составляющей магнитного поля Н0=2 А/м. Для выбранного волновода рассчитать на центральной частоте диапазона ƒ 0.

1. Длину волны в волноводе.
2. Отношение фазовой скорости с групповой скорости в волноводе.
3. Продольную фазовую постоянную.
4. Характеристическое сопротивление.
5. Рабочее ослабление, вносимое отрезком волновода длиною в L , если материал стенок волновода имеет удельную проводимость σ.
6. Вычислить предельную мощность, которую можно передавать по данному волноводу.
7. Определить типы волн, которые могут существовать в этом волноводе на частоте ƒ 0.

2.1 Длину волны в волноводе.

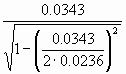
ƒ 1 = 8500·106 Гц; ƒ 2 = 9000·106 [Гц];

ƒ 0 =D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image305.gif=8750·106 [Гц];

λ0=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image306.gif=0,0343 [м];

a=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image307.gif => a =D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image308.gif=0,0236 [м];

b=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image309.gif=0.0118 [м];

λb===D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image312.gif=0.05 [м];

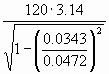
2.2 Отношение фазовой скорости с групповой скорости в волноводе.

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image313.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image314.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image315.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image316.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image317.gif=2,127 [м];

2.3 Продольную фазовую постоянную.

γ=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image318.gif=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image319.gif=125,7 [рад/м];

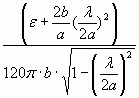
2.4 Характеристическое сопротивление.

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image320.gif===548,78 [Ом];

2.5 Рабочее ослабление, вносимое отрезком волновода длиною в D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image290.gif, если материал стенок волновода имеет удельную проводимость 5,7·е107См/м.

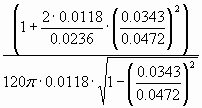
D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image323.gif=10 [м]; σ =5,7·107 [См/м];

ap=8.68·αm·D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image324.gif [Дб];

αm=R5;

RS=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image326.gif [Ом];

RS=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image327.gif=2,46·10-2 [Ом];

αm=2,46·10-2·=1,2·10-2 [1/м].

ap=8.68·1.2·10-2·10=1.042 [Дб];

2.6 Вычислить среднюю мощность, которую можно передавать по данному волноводу.

Рср=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image329.gif

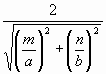
ks = D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image330.gif

Рср=D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image331.gif [Вт];

2.7 Определить типы волн, которые могут существовать в этом волноводе на частоте ƒ0.

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image332.gif≤ λкр - условие существования

D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image333.gif= D:\YandexDisk\_ОБУЧЕНИЕ_2 СибГУТИ 7-ий семестр\Электромагнитные поля и волны\pages\other\img\Image334.gif=0,034 [м];

λкр=

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| m | n | λкр |
| 0 | 1 | 0.0236 |
| 0 | 2 | 0.0118 |
| 0 | 3 | 0.0079 |
| 0 | 4 | 0.0059 |
| 1 | 0 | 0.0472 |
| 1 | 1 | 0.0211 |
| 1 | 2 | 0.0115 |
| 1 | 3 | 0.0078 |
| 2 | 0 | 0.0236 |
| 2 | 1 | 0.0167 |
| 2 | 2 | 0.0106 |
| 2 | 3 | 0.0075 |
| 3 | 0 | 0.0157 |
| 3 | 1 | 0.0131 |
| 3 | 2 | 0.009 |
| 3 | 3 | 0.007 |
| 4 | 0 | 0.0118 |

В волноводе не существуют: Е11, Е12, Е21, Н01, Н02, Н10, Н11, Н12, Н20, Н21, Н30, Н31,Н40.

На частоте ƒ0 существует только волна H10 .