# Семинар № 3

# Плоские электромагнитные волны.

## § 3.1. Основные теоретические сведения

Плоские электромагнитные волны существуют в однородных безграничных средах. В случае полей, изменяющихся во времени по гармоническому закону, комплексные амплитуды **Е** и **Н** удовлетворяют уравнениям Гельмгольца

,

 (3.1)

где *–* комплексный коэффициент распространения, *β –* коэффициент фазы, *или волновое число; α –* коэффициент ослабления.

Так как исходные уравнения Максвелла дают однозначную связь между **Е** и **Н**, достаточно найти решение лишь одного из этих уравнений.

Частное решение уравнения Гельмгольца описывает однородную плоскую волну. Если последняя распространяется вдоль оси *z* декартовой системы координат, то указанное решение имеет вид:

 (3.2)

Первое слагаемое соответствует прямой (падающей) волне, распространяющейся в направлении положительных значений *z*, второе слагаемое - обратной (отраженной) волне, распространяющейся в направлении отрицательных значений.

Если величины  и  известны, то *β* и *α* можно найти с помощью выражения для корня квадратного из комплексного числа:

,

где – модуль комплексного числа; квадратные корни и  следует считать положительными.

На высоких частотах магнитные свойства большинства сред выражены слабо. Поэтому с достаточной для практических целей степенью точности можно считать



Поскольку

,

комплексный коэффициент распространения

. (3.3)

Коэффициент фазы β характеризует изменение фазы гармонических колебаний при распространении волны. Расстояние, на котором фаза изменяется на *2π* рад, называется *длиной волны:*

.

Плоскость равных фаз называется *фазовым фронтом волны,* а скорость перемещения этой плоскости – *фазовой скоростью:*

. (3.4)

Коэффициент фазы и коэффициент ослабления могут быть выражены следующими формулами:

, (3.5)

. (3.6)

Таким образом, между ними существует соотношение

.

Фазовая скорость

, (3.7)

длина волны

. (3.8)

Отношение фазовой скорости в среде к скорости света называют *коэффициентом преломления:*

.

Из уравнений Максвелла следует, что в случае плоской волны комплексные амплитуды векторов **Е** и **Н** связаны *характеристическим сопротивлением среды:*

, (3.9)

так что

.

Характеристическое сопротивление для немагнитных сред 

 Ом.

Аргумент принимает значения от нуля (диэлектрики без потерь) до π/4 (идеальный металл).

Характеристическое сопротивление для вакуума

 Ом*.*

Векторные уравнения (4.1) означают, что любая координатная составляющая векторов поля удовлетворяет уравнению

,

имеющему в декартовой системе координат частное решение

 . (3.10)

Здесь *С* – константа;  – комплексные постоянные, удовлетворяющие условию

 (3.11)

Если – вещественные числа, то выражение (3.10) описывает *однородную плоскую волну*, распространяющуюся в произвольном относительно исходной системы координат направлении. Эту волну удобно выразить формулой

. (3.12)

Числа  имеют смысл направляющих косинусов, фиксирующих направление распространения волны, а **r** есть радиус-вектор точки (*x, y, z*). Если хотя бы одно из чисел  комплексное, то выражение (3.10) будет описывать *неоднородную плоскую волну:*

, (3.13)

у которой фазовый фронт задается уравнением

,

а плоскость равных амплитуд – уравнением

.

В общем случае фазовый фронт и плоскость равных амплитуд образуют между собой произвольный угол.

Поскольку уравнения Максвелла линейны, любая комбинация их решений также является решением. В частности, если  и  – решения исходных уравнений, то

. (3.14)

также есть решение уравнений Максвелла и, следовательно, оно описывает распространение в пространстве некоторой волны. В зависимости от соотношения между фазами и амплитудами  и  в каждой точке пространства конец вектора **Е** будет перемещаться по эллипсу с различным отношением и ориентацией его полуосей. Такая волна называется волной с *эллиптической поляризацией.* При произвольном значении амплитуд и фаз в выражении (3.14) путем поворота осей вокруг оси *z* всегда можно ввести новую систему координат *(х', у', z*'), в которой сдвиг фаз между координатными составляющими будет равен ±90°, а полуоси эллипса – совпадать с направлением осей системы. Угол поворота, обеспечивающий такое преобразование системы координат, будет определять ориентацию осей эллипса в системе *(х, у, z*). Отношение большой полуоси эллипса к малой называют *коэффициентом эллиптичности kэл*.

Линейно поляризованная волна представляет собой один из предельных случаев эллиптически поляризованной волны. Второй предельный случай имеет место при равенстве амплитуд исходных полей и сдвиге фаз между ними, равном 90°. Здесь конец вектора **Е** перемещается по окружности, и волна называется волной с *круговой поляризацией.* Поле такой волны можно представить выражением

 (3.15)

Знак минус соответствует волне с правой круговой поляризацией, у которой вектор **Е** вращается по часовой стрелке (если смотреть в направлении распространения), а знак плюс – волне с левой круговой поляризацией (направление вращения обратное). Любая волна с линейной поляризацией может быть представлена суммой двух волн с круговой поляризацией, например

, (3.16)

где

 (3.17)

Плоская волна переносит энергию в направлении распространения. Для гармонических полей этот процесс описывается средним значением вектора Пойнтинга:

. (3.18)

Часто **П**ср удобно выражать только через напряженность электрического или магнитного поля:

 (3.19)

В средах без потерь **П**ср не зависит от координаты *z*. Если же среда обладает потерями, то плотность потока мощности плоской электромагнитной волны убывает при распространении по экспоненциальному закону:

. (3.20)

Величину потерь в среде характеризуют *погонным затуханием* ∆ в дБ/м:

,

связанным с коэффициентом ослабления к соотношением ∆ = 8,69α.

Фазовая скорость плоской электромагнитной волны в среде с зависящими от частоты параметрами ε' и ε'' также является функцией частоты. Такое явление называют *дисперсией* фазовой скорости. При распространении сложных сигналов в этом случае будут нарушаться исходные амплитудные и фазовые соотношения между отдельными составляющими спектра и, как следствие, будет изменяться форма сигнала в процессе его распространения.

Для нахождения вида сигнала необходимо пользоваться спектральным или операторным методом, Например, полагая, что



есть Фурье-преобразование сигнала в плоскости *z =* 0, можно найти сигнал для любых значений *z*, используя обратное преобразование

. (3.21)

Пренебрегая потерями в среде и полагая, что сигналы *s(t,z)* являются узкополосными, можно показать, что их огибающая в средах с дисперсией распространяется с *групповой скоростью*

. (3.22)

Если условие узкополосности сигнала не выполняется, то понятие групповой скорости, строго говоря, перестает адекватно описывать трансформацию формы такого сигнала.

## § 3.2.Примеры решения типовых задач.

**3.1.** Плоская электромагнитная волна с частотой 109 Гц распространяется в среде с параметрами .

Определить фазовую скорость, длину волны и коэффициент ослабления.

Решение. Учтем, что и разложим выражение (4.3) в степенной ряд. Ограничиваясь тремя первыми членами, получим

.

Таким образом, для диэлектриков с малыми потерями коэффициент фазы и коэффициент ослабления приближенно равны:

,

.

Используя соотношение (4.4), найдем фазовую скорость волны

.

Полученный результат показывает, что наличие потерь в среде приводит к изменению величины фазовой скорости. Для  поправка составляет 0,125%, так что практически можно положить



По известной величине фазовой скорости найдем длину волны:

.

Подстановка исходных данных в полученную ранее формулу дает:

.

**3.2.** Вычислить фазовую скорость, коэффициент ослабления и глубину проникновения поля для плоской электромагнитной волны c частотой 10МГц, распространяющейся в металле с параметрами σ =5·107 См/м, µ = 1.

Решение. В реальных металлах плотность токов проводимости значительно больше плотности токов смещения. Поэтому выражение (3.3) можно приближенно представить в виде

.

Коэффициент фазы и коэффициент ослабления в рассматриваемой среде численно равны друг другу:

.

По известной величине β можно вычислить фазовую скорость:

.

Под глубиной проникновения поля в металл и понимают расстояние, на котором его амплитуда уменьшается в е раз. Очевидно, что



**3.3.** Плоская электромагнитная волна с частотой 109 Гц распространяется в среде с параметрами ε = 2,25, tgδэ = 0,01, µ *=* 1. Амплитуда электрического поля в плоскости *z* = 0 равна 100 В/м.

Определить среднюю плотность потока мощности в плоскости *z =*1 м.

Решение. Плотность потока мощности плоской электромагнитной волны определяется выражением

.

Таким образом, необходимо вычислить коэффициент ослабления и характеристическое сопротивление. Действуя так же, как в задаче 4.1, можно найти α. Подстановка исходных данных дает α = 0,162 м-1.

При определении характеристического сопротивления для tgδэ<< 1 можно использовать приближенное выражение для квадратного корня, входящего в формулу (3.10). Тогда

.

Следовательно,

,

или после необходимых вычислений Пср(*z =* 1) = 14,38 Вт/м2.

**3.4.** Доказать, что в средах без потерь фазовый фронт и плоскость равных амплитуд неоднородных плоских волн образуют между собой угол 90°.

Решение. В средах без потерь коэффициент распространения γ – действительная величина. Поэтому, если то уравнение для фазового фронта имеет вид

,

а уравнением для плоскости равных амплитуд будет

,

Косинус угла между двумя плоскостями

.

С помощью выражения (4.11) можно найти, что

,

и, следовательно, угол ψ действительно равен 90°.

**3.5.** Вывести формулу для определения коэффициента эллиптичности (отношение большой оси эллипса к малой) плоской электромагнитной волны, для которой в плоскости *z* = 0 поля имеют вид

.

Найти ориентацию осей эллипса по отношению к осям системы координат.

Решение. Перейдем от комплексных амплитуд к мгновенным значениям и введем новые переменные ξ и η:



Разложим косинусы суммы аргументов и решим эти два уравнения относительно соsω*t* и sinω*t*:



Возводя эти уравнения в квадрат и исключив переменную *t*, получим

,

где

.

В системе координат (ξ, η) это есть уравнение эллипса. Путем поворота осей на угол α, удовлетворяющий условию

,

преобразуем уравнение к каноническому виду

.

Используя [3], найдем полуоси эллипса

,

..

Теперь можно вычислить коэффициент эллиптичности как отношение *а* к *b.* В результате несложных преобразований получим

.

Ориентация осей эллипса по отношению к оси *х* исходной системы координат определяется углом α*,* отсчитываемым против часовой стрелки, если смотреть с конца вектора **1**z.

**3.6.** Некоторые вещества (например, водный раствор сахара) имеют различную скорость распространения для волн с левой и правой круговой поляризацией. Это приводит к повороту плоскости поляризации плоской волны с линейной поляризацией в процессе ее распространения. Такое свойство веществ называют оптической активностью.

Считая заданными значения фазовых скоростей для левой υ*л* и правой υ*п* круговой поляризации, вывести формулу, определяющую угол поворота плоскости поляризации волны на участке пути длиной *h* для электромагнитной волны с заданной частотой ω.

Решение. Линейно поляризованную волну, имеющую в плоскости *z* = 0 вид

,

можно представить как сумму двух волн с круговой поляризацией:

.

Волна с правой круговой поляризацией при распространении в направлении оси *z* будет описываться выражением

,

а с левой – выражением

.

В любой плоскости *z* ≠0 сумма этих волн будет представлять собой волну с линейной поляризацией. Координатные составляющие этой волны равны:



Суммарный вектор **Е** образует некоторый угол ϕ с осью *х* координатной системы *(х, у, z),* который зависит от *z.* Тангенс этого угла

.

Таким образом, угол поворота плоскости поляризации на отрезке пути длиной *L* определяется из формулы

.

Обычно различие скоростей распространения υ*л* и υ*п*мало. Поэтому приближенно

,

где υ *–* среднее значение скорости; δυ*–* относительная разность скоростей распространения; λ *=*υ */ f –* длина волны в среде.

## § 3.3. Задачи для самостоятельного решения

**3.7.** В вакууме распространяется плоская электромагнитная волна с частотой 30 МГц.

Определить расстояние, на котором фаза волны изменится на 270° и 2520°.

*Ответ:*7,5 м и 70 м соответственно.

**3.8.** Определить длину и фазовую скорость электромагнитной волны, распространяющейся в среде без потерь с относительными проницаемостями ε = µ = 10, если частота волны 10 МГц.

*Ответ:*3 м, 3·107 м/с.

**3.9.** Характеристическое сопротивление среды равно 1508 Ом, относительная диэлектрическая проницаемость ε = 1.

Определить относительную магнитную проницаемость среды.

*Ответ:* 16.

**3.10.** В среде с параметрами ε = 4, µ = 1, σ = 0 распространяется плоская электромагнитная волна, комплексная амплитуда вектора напряженности электрического поля которой в плоскости *z* = 0,

.

Определить комплексную амплитуду вектора напряженности магнитного поля, если волна распространяется в направлении возрастания координаты *z.*

*Ответ:*А/м.

**3.11.** Используя данные задачи 4.10, найти зависимость от времени векторов напряженности электрического и магнитного полей в плоскости *z=*1 см для электромагнитной волны с частотой 10 ГГц.

*Ответ:*В/м,

мА/м.

**3.12.** Определить характеристическое сопротивление металла с удельной электрической проводимостью 6⋅107 См/м и относительной магнитной проницаемостью µ = 1 на частотах 10 кГц и 1 МГц.

*Ответ:* 25,6·10-6 (1 – *j*) Ом, 25,6·10-5 (1 – *j*) Ом.

**3.13.** Определить комплексную амплитуду вектора напряженности электрического поля плоской электромагнитной волны в металле, с параметрами σ = 6⋅107 См/м, µ = 1 на частотах 10 кГц и 1 МГц, если в заданной точке пространства комплексная амплитуда вектора напряженности магнитного поля  А/м.

*Ответ:* В/м,  В/м.

**3.14.** Плоская электромагнитная волна распространяется в немагнитной среде без потерь с неизвестным значением диэлектрической проницаемости. Измерения показали, что на пути, равном 10 см, колебание с частотой 1 ГГц приобретает дополнительный по сравнению с вакуумом сдвиг по фазе в 40°.

Определить относительную диэлектрическую проницаемость и коэффициент преломления среды.

*Ответ:* ε = 16/9 = 1,78, *п =* 4/3 = 1,33.

**3.15.** Некоторый диэлектрик на частоте 10 ГГц обладает параметрами:
ε = 3,8, µ*=*1, tgδэ=10-4.

Определить длину волны, коэффициент ослабления и характеристическое сопротивление такой среды.

*Ответ:*1,54 см, 2,04·10–2м–1**,** 193ехр (*j* 0,5·10–4) Ом.

**3.16.** Керамика титанат бария (ВаТi O3) на частоте 10 ГГц имеет параметры: ε = 144, µ *=* 1, tgδэ = 0.6.

Определить длину волны, коэффициент ослабления и характеристическое сопротивление данной среды.

*Ответ:*0.24 см, 758м–1**,** 29 ехр ( *j* 0,28 ) Ом.

**3.17.** Во сколько раз уменьшится амплитуда плоской электромагнитной волны с частотой 2 МГц при распространение в среде с параметрами
σ=10–3См/м, ε = 2, µ *=* 1 на пути в 1 м?

*Ответ:* в 1,083 раза.

**3.18.** Вывести формулу для определения уменьшения амплитуды поля плоской электромагнитной волны на пути, равном длине волны в среде с потерями. Во сколько раз уменьшится амплитуда поля на указанном расстоянии в среде с параметрами ε = 2,µ *=*1, σ = 10–3 См/м на частоте 10 МГц?

*Ответ:* в 1,327 раза.

**3.19.** Определить длину волны в меди на частоте 1 МГц. Используя полученный результат, пояснить, почему при определении индуктивности катушки со средним диаметром 1 см, выполненной проводом диаметром 0,1мм, поле можно считать стационарным, в то время как для расчета добротности такой катушки необходимо учитывать волновой характер электромагнитного поля.

*Ответ:*0,4189 мм.

**3.20.** Определить толщину медного экрана, который обеспечивает ослабление амплитуды электромагнитного поля в 104 раза на частотах 50 Гц и 50 МГц.

*Ответ:* 9,271 см, 29,374 мкм*.*

**3.21.** Определить толщину экрана, который обеспечивает ослабление амплитуды электромагнитного поля в 104 раза на частоте 50 Гц, если он выполнен из материала с σ =5·107 См/м, µ *=* 900. Сравнить полученный результат с ответом к предыдущей задаче.

*Ответ:* 3,09 мм.

**3.22.** Комплексная абсолютная диэлектрическая проницаемость аммиака (NН3) при давлении 1,33·102 Па вблизи частоты *f0*=23866 МГц описывается выражением

.

Определить коэффициент ослабления волны в такой среде на частотах 23866 и 23866 ± 27 МГц.

*Ответ:* 0,05 и 0,025 м-1 соответственно.

**3.23.** Зависимость коэффициента преломления *п* от температуры принято описывать температурным коэффициентом

.

Полагаяα*n* = 4·10–5 град–1 и *п* ***=***1,5**,** определить изменение фазы плоской электромагнитной волны, прошедшей путь в 1 м, при изменении температуры на1**°** С на частоте 5·1014 Гц. Каково изменение фазы при тех же условиях на частоте 10 ГГц? Предложить способ технического использования этого эффекта.

*Ответ:* 200π, 0,004π.

**3.24.** Некоторые вещества, например монокристалл ниобата лития (LiNb O3), изменяют свои диэлектрические свойства под действием электрического поля (электрооптический эффект), что позволяет создать фазовый модулятор в оптическом диапазоне. Если плоская электромагнитная волна проходит в такой среде путь, существенно меньший длины волны модулирующего электрического поля, то с достаточной степенью точности показатель преломления среды может быть описан функцией, где *F –* частота модуляции.

Определить индекс модуляции *т* и девиацию частоты ∆ω колебания, прошедшего в электрооптическом кристалле путь в 10см, если *п*=1,5, δ*n*=10–5, *F* = 1 кГц, *f* = 5·1014 Гц. Какова была бы длина модулятора, обеспечивающего при тех же параметрах среды прежний индекс модуляции колебания с частотой 10 ГГц?

*Ответ: т* = 5π, ∆ω = 9,87·104 с-1, *l* = 100 м.

**3.25.** Комплексная амплитуда вектора напряженности электрического поля плоской волны, распространяющейся вдоль оси *z,* в плоскости *z* = 0, .

Определить вид поляризации, если ϕ = 60°.

*Ответ:* поляризация эллиптическая с левым вращением вектора Е; большая ось эллипса образует угол 45° с осью *х;*.

**3.26.** Комплексная амплитуда вектора напряженности электрического поля плоской волны, распространяющейся вдоль оси *z*, в плоскости *z* = 0, .

Определить вид поляризации и коэффициент эллиптичности.

*Ответ:* поляризация эллиптическая с правым вращением вектора Е; большая ось эллипса совпадает с осью *х; kэл* =2.

**3.27.** Две плоские электромагнитные волны с левой и правой круговой поляризацией в плоскости *z* =0 имеют векторы напряженности электрического поля:



Определить вид поляризации суммарного поля, если разность фаз .

*Ответ:* поляризация линейная, вектор Е образует угол 45° с осью *х.*

**3.28.** Монокристалл кварца обладает естественной оптической активностью, т. е. вращает плоскость поляризации волны при ее распространении вдоль определенной кристаллографической оси. Измерения, проведенные на длине волны λ0= 0,6328 мкм, показали, что на пути в 1 мм плоскость поляризации волны поворачивается на 17,32 угл. град.

Определить относительную разность скоростей распространения волн с левой и правой круговой поляризацией в такой среде, полагая показатель преломления равным 1,5 (в среднем для обеих поляризаций).

*Ответ:* 4,06·10–5.

**3.29.** В некоторых веществах молекулы представляют собой структуры в виде нитей, которые выстраиваются вдоль параллельных линий при формировании внутренней структуры вещества. В результате скорость распространения плоских электромагнитных волн с линейной поляризацией зависит от ориентации вектора электрического поли по отношению к этим линиям. Примером такой среды может служить слюда, которая обладает показателями преломления для двух взаимно перпендикулярных направлений вектора **Е**, равными 1,56 и 1,59.

Определить толщину слюдяной пластины, преобразующей линейную поляризацию в круговую для волны с частотой 5·1014 Гц.

*Отлет:* 5 мкм.

**3.30.** Показатель преломления среды – случайная величина с равномерным законом распределения на интервале от 1 до 2. Плоская электромагнитная волна с частотой 300 МГц в плоскости *z* = 0 имеет амплитуду напряженности электрического поля 5 В/м и нулевую начальную фазу.

Определить среднее значение и дисперсию модуля вектора напряженности электрического поля в плоскости *z* = 1 м.

*Ответ:* 0; 12,5 B2/м2.

**3.31.** Однородная плоская электромагнитная волна распространяется в вакууме. Вектор Пойнтинга волны лежит в плоскости *х,* и образует угол ϕ с осью *z.*

Найти расстояние вдоль оси *z,* на котором фаза волны изменится на 360°, если частота колебаний равна 100 МГц, а угол ϕ = 60°.

Ответ: 6м.

**3.32.** Две однородные плоские электромагнитные волны о линейной поляризацией распространяются в вакууме так, что вектор Пойнтинга каждой из них лежит в плоскости *х, z* и образует с осью *z* углы ϕ и 180°–ϕ.

Определить закон изменения вектора напряженности суммарного электрического поля, если в точке начала координат комплексные амплитуды волнВ/м. Определить расстояние вдоль оси *z* между пучностями электрического поля, если частота колебаний равна 100 МГц, а угол ϕ = 60°.

*Ответ:* В/м;

расстояние между пучностями равно 3 м.

**3.33.** В вакууме распространяется неоднородная плоская электромагнитная волна с частотой 300 МГц. Плоскость равных амплитуд параллельна плоскости *z*= 0. Фазовый фронт движется вдоль оси *х* со скоростью 108 м/с.

Определить напряженность поля в плоскости *z =*0,1 м, если в плоскости
*z =*0 она равна 1 В/м, а при *z*= ∞ обращается в нуль.

Ответ: 0,169 В/м.

**3.34.** В металле с удельной электрической проводимостью σ=5⋅107См/м распространяется неоднородная плоская волна. Плоскость равных амплитуд параллельна плоскости *z* = 0. Фаза вдоль оси *х* изменяется по закону*.*

Определить направление движения фазового фронта, если µа=µ0, λ0=3см.

*Ответ:* под углом 15,37 угл. сек. к оси *z*.

**3.35.** В среде с параметрами ε = 2.25, µ = 1, σ = 0 распространяется плоская электромагнитная волна с амплитудой напряженности электрического поля 100 В/м.

Определить плотность потока мощности, переносимой волной в направлении распространения.

*Ответ:* 19,894 Вт/м2.

**3.36.** Амплитуда напряженности магнитного поля плоской электромагнитной волны, распространяющейся в среде с параметрами ε=3,8, µ=1, σ = 2·10-4 См/м, в плоскости *z* = 0 равна 1 А/м.

Определить плотность потока мощности волны на расстоянии *z*, равном 1 м от начала координат.

*Ответ:* 94,844 Вт/м2.

**3.37.** Для плоской электромагнитной волны, распространяющейся в среде с параметрами ε=144, µ=1, tgδэ=2·10-4, определить плотность потока мощности в плоскости *z*=0 на частоте 10 ГГц, если амплитуда напряженности электрического поля в этой плоскости равна 100 В/м.

*Ответ:* 165 Вт/м2.

**3.38.** Среднее значение вектора Пойнтинга плоской электромагнитной волны в процессе распространения уменьшается на 10% на пути длиной 2 м. Определить коэффициент ослабления волны.

*Ответ:* 0,025 м–1.

**3.39.** Пучок оптического квантового генератора (лазера) имеет площадь поперечного сечения 4 мм2. Мощность генератора 100 Вт.

Определить напряженность электрического поля, полагая, что в пределах пучка излучение квантового генератора представляет собой плоскую электромагнитную волну.

*Ответ:* 13,73 В/м.

**3.40.** Некоторые современные лазеры обладают импульсной мощностью порядка 106 Вт.

Определить максимальную площадь поперечного сечения пучка, при котором происходит электрический пробой воздуха. При расчетах различием электрических свойств воздуха и вакуума пренебречь, напряженность электрического поля, обеспечивающего пробой, положить равной 30 кВ/см.

*Ответ:* 0,838 см3.

**3.41.** В лазере, работающем на длине волны 3,39 мкм, в качестве среды, обеспечивающей усиление, используется плазма газового разряда в смеси неона и гелия при малом давлении. На рабочей длине волны свойства такой среды для малой напряженности электрического поля можно описать отрицательной электрической проводимостью σ=–1,35·10-2 См/м и относительными магнитной и диэлектрической проницаемостями, приближенно равными единице.

Определить коэффициент усиления по мощности для плоской электромагнитной волны на пути в 1 м в такой среде.

*Ответ:* 164 раза или 22 дБ/м.

**3.42. \*** В соответствии с принципами теории относительности сигнал не может распространяться со скоростью, большей скорости света. Если относительная диэлектрическая проницаемость среды зависит от частоты, оставаясь всегда положительной величиной, то какое ограничение накладывается на возможную зависимость показатели преломления от частоты для физически реальных сред с ε *>* 0?

*Указание:* для решения задачи воспользоваться понятием групповой скорости.

*Ответ:*.

**3.43.** В среде с показателем преломления, зависящим от частоты, распространяются два узкополосных радиоимпульса с несущими частотами 10 и 20 ГГц.

Определить разность времен запаздывания импульсов на расстоянии 100 км от точки, где они совпали по времени, если закон изменения показателя преломления записывается в виде *п*(ω) = 10–10 ω.

*Ответ:* импульс с несущей частотой 20 ГГц будет опережать второй импульс на 41,9 мс.

**3.44.** В плоскости *z =* 0 плоская электромагнитная волна представляет собой амплитудно-модулированное колебание с вектором напряженности электрического поля

 В/м.

Определить напряженность электрического поля в плоскости *z* = 1 м, если волна распространяется в среде с комплексным показателем преломления

.

При расчетах положить *М* = 0,5, Ω = 2·108 с-1, ω = 5π · 1010 с–1.

Ответ:  В/м.

***Литература***

1*.* ***Лялин К.С., Приходько Д.В.*** Электродинамика СВЧ. Ч.1. – М.: МИЭТ, 2009, стр. 41 - 45

2*.* ***Баскаков С.И.*** Электродинамика и распространение радиоволн. Сборник задач. – М. Высшая школа, 1981 г., глава 5.

3. ***Григорьев А.Д.*** Электродинамика и техника СВЧ. - М.: Высшая школа, 1990, стр. 26 - 38