

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического приборостроения

Г. Б. Белоцерковский, В. Н. Красюк

ЗАДАЧИ И РАСЧЕТЫ ПО КУРСУ
«УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ»

Учебное пособие

Под редакцией профессора А. П. Голубкова

Санкт-Петербург
2002

УДК 621.396.67(075)

ББК 32.845

Б43

Белоцерковский Г. Б., Красюк В. Н.

Б43 Задачи и расчеты по курсу «Устройства СВЧ и антенны»: Учеб. пособие/ СПбГУАП. СПб., 2002. 178 с.: ил. ISBN 5-8088-0085-4

В пособии приведены задачи, контрольные вопросы и расчеты основных геометрических и электрических характеристик антенн различных диапазонов волн. Рассмотрены вопросы согласования линий передачи с нагрузками с использованием круговой диаграммы Вольперта-Смита. Особое внимание уделяется рассмотрению элементов тракта и устройств СВЧ-диапазона. Используется аппарат волновых матриц рассеяния при анализе нагруженных цепей СВЧ. Значительная часть задач имеет решения, а на большинство даны ответы. Приведена инженерная методика расчета характеристик излучения антенн и волноводных ФАР с однородными диэлектрическими покрытиями для широких пределов толщины и диэлектрических проницаемостей слоев и методика расчета антенн с многослойными диэлектрическими покрытиями.

Книга предназначена для учащихся вузов и техникумов радиотехнических специальностей, изучающих курс «Устройства СВЧ и антенны», а также может быть полезна широкому кругу специалистов.

Рецензенты:

Научный совет по проблемам прикладной радиофизики
Санкт-Петербургского Научного центра РАН;
доктор технических наук *С. С. Щесняк*

Утверждено

редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

ISBN 5-8088-0085-4

© Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения, 2002

© Г. Б. Белоцерковский, В. Н. Красюк,
2002

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие предназначено для углубления и закрепления знаний студентов радиотехнического профиля (направления 552500, 654200, 654400, 658000, 552000), изучающих антенную технику и электродинамику.

Большинство задач было подготовлено ныне покойным Г. Б. Белоцерковским – замечательным педагогом, проработавшим в Ленинградском техникуме авиаприборостроения 35 лет – с 1946 по 1981 годы. Вынужденный уйти из техникума под влиянием сложившейся там обстановки Г. Б. Белоцерковский скончался, оставив после себя 15 изданных учебников и учебных пособий по различным разделам радиотехники (его книги издавались в Китае, Испании, Польше, Болгарии), а также незавершенную и потому неизданную рукопись – задачник по курсу антенн. Эта рукопись, сохранившая свою актуальность и значимость, после проведения доработки положена в основу настоящего пособия.

Нет никакого сомнения в том, что, готовя этот задачник к изданию сейчас, Г. Б. Белоцерковский включил бы в него и новые задачи по сложным новейшим антеннам, методы расчета которых опираются на современную компьютерную технику.

Именно этим задачам посвящены две новые главы (гл. 9 и 10), написанные профессором доктором технических наук В. Н. Красюком при участии кандидата технических наук Л. А. Федоровой. Наряду с написанием нового материала была выполнена работа по уточнению текста задач с учетом появившейся за эти годы новой научной и учебно-методической литературы, составлен перечень этой литературы и отредактирован иллюстративный материал.

Задачник будет полезен студентам, изучающим антенную технику, и инженерно-техническим работникам.

1. КАЧЕСТВЕННЫЕ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН

1.1. Общие сведения об антеннах и их технические показатели

1.1. Описать назначение передающего антенно-фидерного тракта, его фидера и антенны, изображенных на рис. 1.1, а. Какие функции выполняет антенна, если она непосредственно подключена к радиопередатчику?

Развернутый ответ. Передающий антенно-фидерный тракт предназначен для преобразования модулированного тока высокой частоты в свободные электромагнитные волны без искажений закона модуляции. Если антенна непосредственно подключена к радиопередатчику 1, то эта задача полностью решается антенной. Если же передатчик 1 соединяется с передающей антенной через фидер 2, то сначала фидер подводит ток высокой частоты к антенне 3 в виде направляемых (канализируемых) электромагнитных волн, а антенна их излучает, т. е. преобразует в свободные электромагнитные волны.

1.2. Сформулировать назначение приемной антенны 4 (рис. 1.1, б) для двух случаев: антенна непосредственно подключена к радиоприемнику 6; антенна соединяется через фидер 5 с приемником.

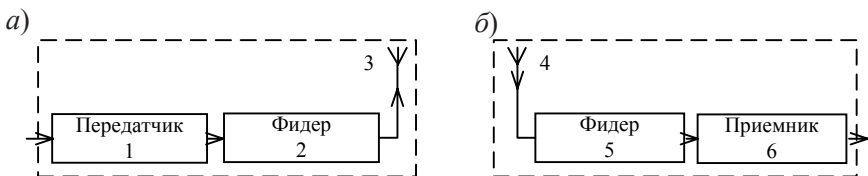


Рис. 1.1

1.3. Какого порядка относительные размеры слабонаправленных, умеренно направленных и остронаправленных антенн?

1.4. Дать классификацию антенн по принципу действия и геометрии излучающей структуры. Перечислить остальные основные признаки классификации антенн.

1.5. Дать определения антенн: проволочной и штыревой, поверхностных волн, апертурной и антенной решетки.

1.6. Перечислить второстепенные признаки антенн. Пояснить их второстепенное значение по сравнению с наиболее характерным основным признаком классификации антенн.

1.7. Что называется сопротивлением излучения антенны и почему оно считается активным?

1.8. Что называется входным сопротивлением антенны. Описать, почему это сопротивление имеет в общем случае комплексный характер и каковы его слагаемые?

1.9. Какими величинами оценивается электрическая прочность антенны?

Решение. Электрическая прочность антенны оценивается максимальным напряжением на входе, при котором не нарушается нормальная работа антенно-фидерного тракта: в нем не происходит электрического пробоя и чрезмерного снижения КПД, а также искажения передаваемых радиосигналов.

1.10. Что называется рабочим диапазоном (полосой пропускания) антенны? При каком условии антенна считается узкополосной, широкополосной и широкодиапазонной?

1.11. Относительная полоса пропускания антенны $\Delta f_{\text{пр}}/f_0 = 120\%$.

Определить коэффициент перекрытия диапазона, если несущая частота излучаемой радиоволны $f_0 = 10^{10}$ Гц.

Поиск решения. На рис. 1.2 показан амплитудно-частотный симметричный спектр, пропускаемый антенной с допустимыми искажениями. По условию задачи абсолютная полоса пропускания $\Delta f_{\text{пр}} = 1,2 f_0$. Вместе с тем граничные частоты спектра частот, пропускаемого антенной: $f_{\text{max}} = f_0 + \Delta f_{\text{пр}}/2$ и $f_{\text{min}} = f_0 - \Delta f_{\text{пр}}/2$. Этого достаточно, чтобы определить коэффициент перекрытия диапазона.

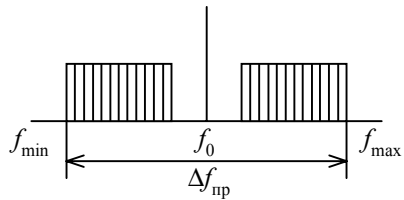


Рис. 1.2

Решение. 1. Абсолютная полоса пропускания антенны

$$\Delta f_{\text{пр}} = 1,2 f_0 = 1,2 \cdot 10^{10} \text{ Гц.}$$

2. Максимальная частота спектра радиосигнала, пропускаемого антенной:

$$f_{\text{max}} = f_0 + \Delta f_{\text{пр}}/2 = 10^{10} + 0,6 \cdot 10^{10} = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ Гц.}$$

3. Минимальная частота спектра радиосигнала, пропускаемого антенной:

$$f_{\text{min}} = f_0 - \Delta f_{\text{пр}}/2 = 10^{10} - 0,6 \cdot 10^{10} = 0,4 \cdot 10^{10} \text{ Гц.}$$

4. Коэффициент перекрытия диапазона частот

$$K_{\text{д}} = f_{\text{max}}/f_{\text{min}} = 1,6 \cdot 10^{10} / 0,4 \cdot 10^{10} = 4.$$

1.12. Коэффициент перекрытия диапазона антенны $K_d = 5$ и несущей длине волны $\lambda = 2$ см. Определить относительную полосу пропускания антенны $\Delta f_{\text{пр}}/f_0$ и $f_{\text{пр}}$.

Ответ. $\Delta f_{\text{пр}}/f_0 = 1,33$; $\Delta f_{\text{пр}} = 2 \cdot 10^{10}$ Гц.

1.13. Дать определения характеристики направленности антенны и, в частности, амплитудной, фазовой и поляризационной характеристик. Что называется функцией направленности и диаграммой направленности антенны?

1.14. Отметить преимущества и недостатки следующих разновидностей диаграмм направленности (ДН): пространственных (трехмерных) и плоскостных (двумерных) в полярных и прямоугольных координатах, ненормированных и нормированных.

Ответ. Пространственные диаграммы сложны в измерениях и построении, но они нагляднее плоскостных ДН. В полярных координатах ДН нагляднее, чем в прямоугольных координатах, но последние дают более четкие очертания боковых лепестков, где уровни полей низкие (это важно для точного вычисления вторичных параметров антенны). Нормированные ДН не зависят от условий возбуждения антенны и на них не сказывается величина мощности, подводимой к антенне, в этом их преимущество перед ненормированными ДН.

1.15. Отметить, как различаются ДН по масштабу отсчета. Как записываются и как взаимосвязаны ненормированные и нормированные функции направленности? Как выражаются нормированные ДН в логарифмическом масштабе?

1.16. Заполнить пропуски следующими словами и символами: *одинаковом расстоянии, комплексной, диаграммой направленности (ДН), двух (одной) угловых координат, функцией направленности, $f^2(\theta)$, единица, единице, $\sin^2\theta$, ненормированная, полярной, прямоугольной, угловых координат, квадрату, $\sin\theta$, нормированная.*

Характеристикой направленности (ХН) антенны называется зависимость ___ амплитуды напряженности поля излучению от ___ точки наблюдения при условии измерения этого поля на ___ от антенны. Функция, выражающая ХН, называется ____, а ее графическое изображение называется ____ (___). Пространственная ДН является функцией ____, а плоскостная ДН является функцией _____. ДН по мощности равна ___ ДН по напряженности поля. Диполь Герца имеет функцию направленности по полю $f(\theta) = ___$ и по мощности $___ = ___$. От условий возбуждения зависит ___ ДН и не зависит ___ ДН. Вторич-

ные параметры легче и точнее определяются по ДН, построенной в __ системе координат, чем в __ системе координат. Главный максимум нормированной ДН всегда равен ____.

1.17. Построить ДН антенны по мощности и по напряженности в прямоугольных координатах согласно данным, приведенным в табл. 1.1.

Таблица 1.1

θ , град	0	± 30	± 60	± 90	± 120	± 150	± 180
Π , кВт/м ²	200	72	15,6	0	8	0	2

Решение. Согласно табл. 1.1 максимум плотности потока мощности $\Pi_m = 200$ кВт/м², значит нормированная ДН по мощности $F(\theta) = f^2(\theta) = \Pi / \Pi_m = \Pi / 200$, а по напряженности поля $f(\theta) = E_m / E_{m_{\max}} = \sqrt{\Pi / \Pi_m}$. Результаты расчета приведены в табл. 1.2 и по этим данным построены ДН на рис. 1.3.

Таблица 1.2

θ , град	0	± 30	± 60	± 90	± 120	± 150	± 180
$f(\theta) = \Pi / \Pi_m$	1	0,36	0,078	0	0,04	0	0,01
$f(\theta) = E_m / E_{m_{\max}}$	1	0,6	0,28	0	0,2	0	0,1

1.18. Диаграммы направленности, полученные в предыдущей задаче, пересчитать для построения в логарифмическом масштабе, выражая плотность потока мощности в децибелах. Принимаем за исходный уровень (0 дБ) тот, который соответствует максимальному излучению.

1.19. Определить уровни первого бокового (УБЛ) и заднего лепестков (УЗЛ) в децибелах по ДН на рис. 1.3.

Ответ. УБЛ = -14 дБ; УЗЛ = -20 дБ.

1.20. Сформулировать определение параметра антенны “ширина диаграммы направленности”.

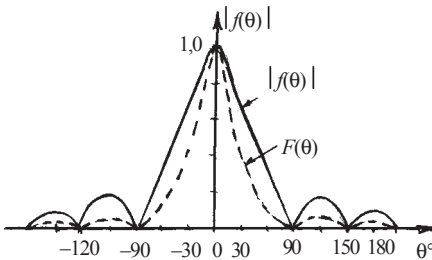


Рис. 1.3

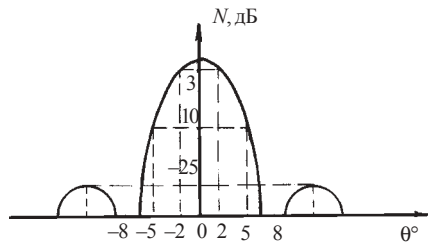


Рис. 1.4

1.21. Определить по изображенной на рис. 1.4 ДН ширину на уровнях половинной мощности (-3 дБ), на уровне $0,1$ мощности и нулевом уровне в градусах, а также уровень первого бокового лепестка.

Ответ. $2\theta_{P/2} = 4^\circ$, $2\theta_0 = 16^\circ$, $2\theta_{0,1P} = 10^\circ$, УБЛ = -25 дБ.

1.22. Сформулировать определения параметров антенны: коэффициент направленного действия (КНД) и коэффициент усиления (КУ). В чем различие между коэффициентами и какая существует зависимость между ними?

1.23. КНД антенн: $D_0 = 1, 58; 4; 10; 50; 100; 2000$, а КУ антенн $G_0 = 1, 26; 2; 8; 15; 1000$. Выразить эти коэффициенты в децибелах.

Ответ. $D_0 = 2; 6; 10; 17; 20; 33$ дБ. $G_0 = 1; 3; 9; 11,8; 30$ дБ.

1.24. КУ антенны $G_0 = 17$ дБ, а КНД $D_0 = 20$ дБ. Каково сопротивление потерь этой антенны, если сопротивлению излучения $R_\Sigma = 4$ Ом. (При решении величину КНД выразить в числовом эквиваленте, т. е. во сколько раз сигнал направленной антенны больше сигнала ненаправленной антенны).

Ответ. $R_\Pi = 4$ Ом.

1.25. Антенна имеет КНД $D_0 = 100$, сопротивление излучения $R_\Sigma = 95$ Ом и сопротивление потерь $R_\Pi = 5$ Ом. Определить КУ антенны G_0 .

Ответ. $G_0 = 95$.

1.26. Изобразить много лепестковую ДН и отметить на ней главный лепесток (луч), боковые и задний лепестки. Что называется уровнем бокового (УБЛ) и заднего (УЗЛ) лепестков?

1.27. Сформулировать определения поляризационных параметров антенны. Что такое поляризационная характеристика и поляризационная диаграмма?

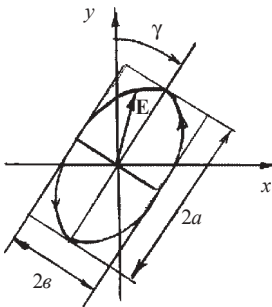


Рис. 1.5

1.28. Описать частные случаи поляризации электромагнитной волны. Как расщепляются волны с круговой и эллиптической поляризацией на линейно-поляризованные волны?

1.29. На рис. 1.5 показан поляризационный эллипс радиоволны, излучаемой антенной. Вектор \mathbf{E} вращается против часовой стрелки при наблюдении волны со стороны антенны. Определить по рисунку поляризационные параметры антенны: коэффициент эллиптичности $K_\epsilon = \frac{b}{a}$ и угол наклона γ .

Ответ. $K_3 = -0,5$ (знак I–I является признаком левой волны), $\gamma = 32^\circ$.

1.30. Начертить поляризационный эллипс, относящийся к антенне с параметрами: коэффициент эллиптичности $K_3 = 0,25$; угол наклона $\gamma = 60^\circ$; волна, наблюдаемая со стороны антенны, правого вращения.

1.2. Элементарные излучатели электромагнитных волн

1.31. Написать уравнения мгновенных и амплитудных значений напряженности электрического и магнитного полей диполя Герца (в его дальней зоне).

1.32. Показать, что диполь Герца (элементарный вибратор), изображенный на рис. 1.6, а, излучает сферические волны.

1.33. Вывести формулу сопротивления излучения диполя Герца. Как зависит это сопротивление от амплитуды и частоты тока, питающего диполь?

1.34. Диполь Герца длиной $l = 10$ см возбуждается синусоидальным током, амплитуда которого $I_m = 2$ А и частота $f = 30$ МГц. Определить амплитуды напряженности электрического E_m и магнитного H_m полей на расстоянии $r = 10$ км от диполя в его экваториальной плоскости. Диполь Герца в сферической системе координат приведен на рис. 1.6, б.

Ответ. $E_m = 377$ мкВ/м, $H_m = 1$ мкА/м.

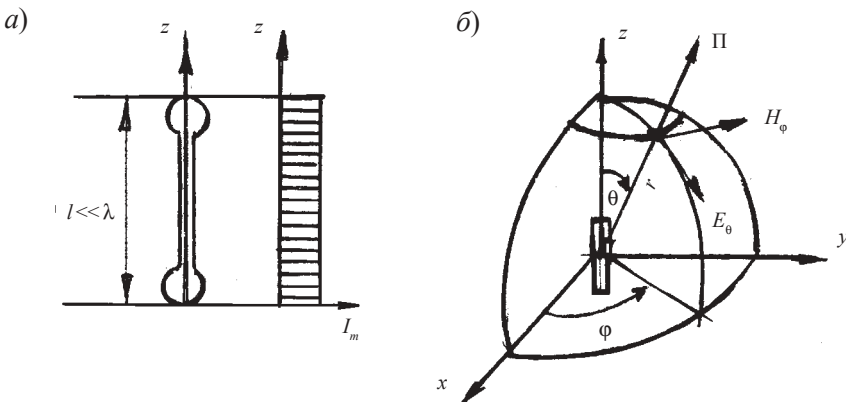


Рис. 1.6

1.35. Определить сопротивление излучения диполя Герца R_Σ по данным задачи (1.34). Как повлияет на величину этого сопротивления увеличение амплитуды тока диполя от $I_m = 2$ А до $I_m = 20$ А?

Ответ. $R_{\Sigma} = 0,08$ Ом при любом токе I_m .

1.36. Вертикальный диполь Герца, возбуждаемый током с амплитудой $I_m = 2$ А, имеет мощность излучения $P_{\Sigma} = 10$ Вт. Определить амплитуды напряженности электрического E_m и магнитного H_m полей в точке наблюдения, наклонная дальность которой $r = 800$ м и зенитный угол $\theta = 30^\circ$.

Поиск решения. Для вычисления E_m и H_m должно быть известно не указанное в условии отношение l/λ . Находим его путем определения сопротивления $R_{\Sigma} = 2P_{\Sigma}/I_m^2$, которое связано с l/λ зависимостью $R_{\Sigma} = 800(l/\lambda)^2$.

Решение. 1. Сопротивление излучения диполя Герца

$$R_{\Sigma} = 2P_{\Sigma}/I_m^2 = \frac{2 \cdot 10}{2^2} = 5 \text{ Ом.}$$

2. Относительная длина диполя

$$l/\lambda = \sqrt{R_{\Sigma}/800} = \sqrt{5/800} = 0,08.$$

3. Амплитуда напряженности магнитного поля в пункте приема

$$H_m = \frac{I_m l}{2r\lambda} \sin \theta = \frac{2 \cdot 0,08}{2 \cdot 800} \sin 30^\circ = 5 \cdot 10^{-5} \text{ А/м.}$$

4. Амплитуда напряженности электрического поля в пункте приема

$$E_m = Z_0 H_m = 120\pi \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 188,4 \cdot 10^{-4} \text{ В/м.}$$

1.37. Определить модуль вектора Пойнтинга по данным задачи (1.36).

Ответ. $\Pi = 4,7 \cdot 10^{-7}$ Вт/м².

1.38. Вибратор с равномерным распределением тока при длине $l = 20$ см и токе с амплитудой $I_m = 20$ А излучает электромагнитные волны, которые на расстоянии $r = 10$ км, отсчитанном в экваториальной плоскости, имеют плотность потока мощности $\Pi = 5 \cdot 10^{-10}$ Вт/м². Требуется определить частоту тока f в вибраторе и амплитуды напряженности электрического E_m , и магнитного H_m полей на этом расстоянии.

Поиск решения. Равномерность распределения тока по длине вибратора позволяет производить расчет по формулам, выведенным для диполя Герца. По одной из этих формул следует, что для определения

частоты f (длины волны λ) нужно предварительно вычислить E_m (или H_m) по заданной плотности потока мощности $\Pi = E^2/Z_0 = E^2/377$. Амплитуду H_m можно также определить, имея в виду, что $H_m = E_m/Z_0 = E_m/377$.

Решение. 1. Действующее значение напряженности электрического поля

$$E = \sqrt{\Pi Z_0} = \sqrt{5 \cdot 10^{-10} \cdot 377} = 43,5 \cdot 10^{-5} \text{ В/м.}$$

2. Амплитуда напряженности электрического поля

$$E_m = \sqrt{2}E = 1,41 \cdot 43,5 \cdot 10^{-5} = 6,13 \cdot 10^{-4} \text{ В/м.}$$

3. Амплитуда напряженности магнитного поля

$$H_m = E_m/Z_0 = 6,13 \cdot 10^{-4} / 377 = 1,63 \cdot 10^{-6} \text{ А/м.}$$

4. Длина волны тока в вибраторе

$$\lambda = \frac{I_m l}{2rH_m} = \frac{20 \cdot 0,2}{2 \cdot 10^4 \cdot 1,63 \cdot 10^{-6}} = 122,6 \text{ м.}$$

5. Частота тока в вибраторе

$$f = 300/\lambda = 300/122,6 = 2,447 \text{ МГц.}$$

1.39. Диполь Герца, имеющий сопротивление излучения $R_\Sigma = 0,8$ Ом, обтекается синусоидальным током с амплитудой $I_m = 0,5$ А. Определить мощность излучения P_Σ и действующие значения напряженности электрического E и магнитного H полей на расстоянии $r = 500$ м от диполя в направлении его максимального излучения.

Ответ. $R_\Sigma = 0,01$ Ом; $H_m = 0,05$ А/м; $E_m = 18,85$ В; $P_\Sigma = 0,1$ Вт.

1.40. Элементарный вибратор длиной $l = 5$ см излучает в свободном пространстве электромагнитные волны длиной $\lambda = 5$ м и мощностью $P_\Sigma = 10$ Вт. Каковы напряженности электрического E_m и магнитного H_m полей и плотность Π потока мощности вибратора на расстоянии 1 км в экваториальной плоскости ($\theta = 90^\circ$) и под углами 60 и 45° к этой плоскости?

Ответ. Результаты расчета приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

θ , град	90	30	45
H_m , А/м	$25 \cdot 10^{-5}$	$12,5 \cdot 10^{-5}$	$17,7 \cdot 10^{-5}$
E_m , В/м	$94,25 \cdot 10^{-3}$	$47,13 \cdot 10^{-3}$	$66,63 \cdot 10^{-3}$
Π , Вт/м	$11,78 \cdot 10^{-6}$	$29,45 \cdot 10^{-7}$	$5,89 \cdot 10^{-6}$

1.41. Элементарный вибратор излучает электромагнитные волны мощностью 20 Вт при сопротивлении излучения 5 Ом. Какую величину имеют амплитуды напряженности электрического и магнитного полей на расстоянии 2 км от вибратора в его экваториальной плоскости ($\theta = 90^\circ$) и под зенитными углами 15 и 30° ?

Ответ. Результаты расчета приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

θ , град	90	30	15
H_m , А/м	$5,58 \cdot 10^{-5}$	$2,79 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-5}$
E_m , В/м	$21,02 \cdot 10^{-3}$	$10,51 \cdot 10^{-3}$	$5,44 \cdot 10^{-3}$

1.42. Определить, во сколько раз благодаря направленности диполя Герца возрастает плотность потока излучаемой им мощности в следующих направлениях: в экваториальной плоскости ($\theta = 90^\circ$), под зенитными углами $\theta = 15, 30, 45, 60^\circ$.

Решение. Поскольку в экваториальной плоскости ($\theta = 90^\circ$) излучение элементарного вибратора наиболее интенсивно, то при угле $\theta = 90^\circ$ увеличение плотности потока мощности численно равно коэффициенту направленного действия $D = 1,5$. Для произвольного зенитного угла θ увеличение происходит в $D f^2(\theta)$, где $f(\theta)$ уравнение нормированной диаграммы направленности по напряженности поля. В данном случае $f(\theta) = \sin\theta$, поэтому искомое значение увеличения плотности потока мощности для $\theta = 15^\circ$ получим $D f^2(\theta) = 1,5 \cdot 0,258^2 = 0,1$; для $\theta = 30^\circ$ получим $1,5 \cdot 0,5^2 = 0,38$; для $\theta = 45^\circ$ получим $1,5 \cdot 0,707^2 = 0,75$; для $\theta = 60^\circ$ получим $1,5 \cdot 0,866^2 = 1,13$.

1.43. Описать классификацию ДН антенны. На примере диполя Герца представить ДН в аналитическом и графическом виде; в E - и H -плоскостях; по напряженности поля и по мощности; в полярных координатах и прямоугольных и, наконец, пространственную ДН.

Ответ. На рис. 1.7, а показаны амплитудные диаграммы диполя Герца в полярной системе координат: в H -плоскости окружность 1 и в E -

плоскости по полю и по мощности – кривые 2 и 3 соответственно. На рис. 1.7, б показаны диаграммы в декартовой системе координат: 4 – диаграмма в H -плоскости, 5 – диаграмма в E -плоскости по полю и 6 – по мощности в E -плоскости.

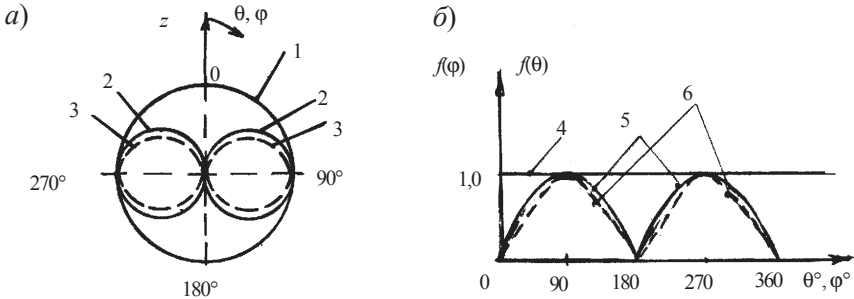


Рис. 1.7

1.44. Вывести формулу зависимости КНД диполя (D_0) с равномерным распределением тока от относительной длины l/λ и сопротивления излучения R_Σ диполя.

1.45. Вычислить КНД D_0 диполя Герца по формуле, полученной в предыдущей задаче.

1.46. Определить КНД вертикального диполя Герца в направлении зенитного угла $\theta = 30^\circ$.

Ответ. $D_0 = 0,375$.

1.47. Определить КНД D_0 диполя, имеющего действующую высоту $h_d = 1$ м и сопротивление излучения $R_\Sigma = 80$ Ом при длине волны $\lambda = 10$ м.

Ответ. $D_0 = 1, 5$.

1.48. Что представляет собой элементарный щелевой вибратор? Какой вид имеет его ДН?

1.49. Описать элементарную рамку в режиме приема. Вывести формулу для электродвижущей силы (ЭДС) наводимой в рамке.

1.50. Исследовать свойства рамочной антенны, опираясь на решение предыдущей задачи. В чем сходство и различие электрического и магнитного диполей?

1.51. Обосновать ДН и взаимное расположение векторов \mathbf{E} , \mathbf{H} , $\mathbf{\Pi}$ полей излучения электрически малой рамки и электрического диполя. Определить каким полям соответствуют векторы 1, 2, 3, 4, изображенные на рис. 1.8.

Ответ. На рис. 1.8, а изображен магнитный диполь. Вектор 1 соответствует E_φ , вектор 4 соответствует H_θ . На рис. 1.8, б изображен электрический диполь. Вектор 2 соответствует H_φ , вектор 3 соответствует E_θ .

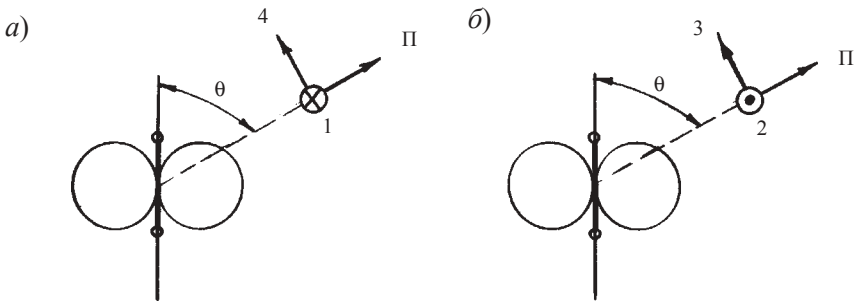


Рис. 1.8

1.52. Рамочная антенна состоит из 30 витков провода, образующих прямоугольную рамку со сторонами $m = 40$ см и $h = 1$ м, принимает радиоволны длиной $\lambda = 400$ м. Определить действующую высоту и сопротивление излучения антенны.

Ответ. $h_d = 0,19$ м; $R_\Sigma = 1,8 \cdot 10^{-4}$ Ом.

1.53. По данным задачи 1.52 определить амплитуду ЭДС, индуктируемой в рамочной антенне, если плоскость рамки совпадает с направлением приема вертикально поляризованных волн, магнитное поле которых имеет амплитуду напряженности $H_m = 10^{-8}$ А/м.

Ответ. $\varepsilon_{A,m} = 0,72$ мкВ.

1.54. Какова будет амплитуда ЭДС в рамочной антенне (см. предыдущую задачу), если плоскость ее расположена относительно направления принимаемой волны под углом $\varphi = 30^\circ$.

Ответ. $\varepsilon_{A,m} = 0,62$ мкВ.

1.55. Доказать, что сопротивление излучения электрически малой рамки, имеющей N витков и площадь сечения S , выражается формулой $R_\Sigma \approx 32000 \left(NS/\lambda^2 \right)^2$.

1.56. Определить сопротивление излучения круглой рамочной антенны, имеющей диаметр 40 см и состоящей из 20 витков провода. Длина волны равна $\lambda = 800$ м. Какова амплитуда ЭДС, индуктируемой в рамке, если волна поляризована вертикально и имеет амплитуду напряженности электрического поля 10 мВ/м?

Ответ. $R_\Sigma = 0,35 \cdot 10^{-6}$ Ом; $\varepsilon_{A,m} = 0,17$ мВ.

1.3. Основы теории приемных антенн

1.57. Описать структуру электромагнитного поля вокруг приемного вибратора. Как интерферируют первичные и вторичные волны в этой области пространства?

1.58. Составить и обосновать эквивалентную схему приемной антенны. Написать уравнение тока в составленной цепи.

1.59. Описать схему применения принципа взаимности к антеннам. В чем выражается обратимость передающей и приемной антенн?

1.60. Какие условия необходимы для выделения максимальной мощности сигнала на входе приемника? Вывести формулу этой мощности.

1.61. В приемной антенне, имеющей внутреннее сопротивление $\dot{Z}_A = (75 + j50)$ Ом радиоволна наводит ЭДС сигнала $\varepsilon_A = 150$ мкВ. Определить входное сопротивление приемника, согласованного с антенной, $\dot{Z}_{пр}$ и мощность сигнала на входе приемника. Эквивалентная схема приемной антенны изображена на рис. 1.9.

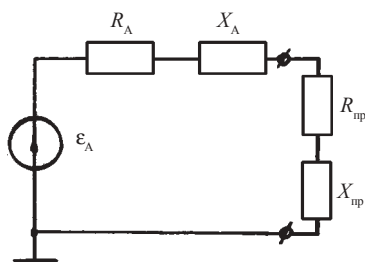


Рис. 1.9

Поиск решения. Для согласования приемника с антенной его входное сопротивление $\dot{Z}_{пр}$ должно быть комплексно сопряженным с внутренним сопротивлением антенны $\dot{Z}_A = R_A + jX_A$, т. е. должно быть $X_{пр} = -X_A$ и $R_{пр} = R_A$. Тогда максимальная (номинальная) мощность сигнала на входе приемника $P_{пр\max} = \varepsilon_A^2 / 4R_A$. По этим формулам определяем искомые величины.

Решение. 1. Реактивная составляющая входного сопротивления приемника

$$X_{пр} = -X_A = 50 \text{ Ом.}$$

2. Активная составляющая входного сопротивления приемника

$$R_{пр} = R_A = 75 \text{ Ом.}$$

3. Комплексное входное сопротивление приемника

$$\dot{Z}_{пр} = R_{пр} + jX_{пр} = (75 - j50) \text{ Ом.}$$

4. Номинальная мощность сигнала на входе приемника

$$P_{пр\max} = \varepsilon_A^2 / 4R_A = (150 \cdot 10^{-6})^2 / 4 \cdot 75 = 0,75 \cdot 10^{-10} \text{ Вт.}$$

1.62. Сформулировать определение характеристики направленности приемной антенны. Показать на примере диполя Герца, что его характеристика направленности одинакова в режимах передачи и приема.

1.63. Сформулировать определения следующих параметров приемной антенны: КПД, КУ, действующая длина (высота) и эффективная площадь.

1.64. Вывести формулу зависимости между КНД и эффективной площадью антенны. Что называется коэффициентом использования площади раскрыва антенны (КИП) ?

1.65. Написать формулу зависимости КУ антенны G_0 от эффективной $S_{\text{эф.А}}$ и геометрической S_A площади ее раскрыва. Что называется коэффициентом эффективности (эффективностью) антенны?

$$\text{Ответ. } G_0 = \eta_A D_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_{\text{эф.А}} \eta_A = \frac{4\pi}{\lambda^2} v S_A \eta_A,$$

где v – коэффициент использования площади раскрыва антенны (КИП), η_A – КПД антенны, $(v\eta_A)$ – коэффициент эффективности (эффективность) антенны.

1.66. Описать в чем выражается согласованность по поляризации приемной антенны и приходящей волны.

1.67. Заполнить пропуски следующими словами и символами: *входным, X_A , ЭДС, согласовании, направления, согласованная, квадрату, комплексно сопряженными, R_A , плотность потока, внутренним, эффективная площадь.*

Приемная антенна играет роль источника ___ с ___ сопротивлением $\dot{Z}_A = R_A + jX_A$, нагрузкой которого является приемник с ___ сопротивлением $\dot{Z}_{\text{пр}} = R_{\text{пр}} + jX_{\text{пр}}$. Антенна сообщает приемнику максимальную мощность при полном ___ этих сопротивлений. Иначе говоря, величины \dot{Z}_A и $\dot{Z}_{\text{пр}}$ должны быть ___ $R_{\text{пр}} = X_{\text{пр}} = _$. Характеристикой направленности приемной антенны называется зависимость ___ в антенне от ___ приходящей волны. Эффективная площадь раскрыва антенны равна отношению максимальной мощности, которую извлекает из проходящей электромагнитной волны антенна, ___ с нагрузкой, к ___ мощности данной волны. КНД антенны прямо пропорционален отношению ___ раскрыва антенны к ___ длины волны.

1.68. Описать применение принципа взаимности к антеннам. Показать, что антенна имеет одинаковые параметры (действующую высоту и внутреннее сопротивление) в режимах передачи и приема.

1.69. Определить эффективное значение ЭДС, наводимой в антенне, действующая длина которой $h_d = 5$ м. Антенна полностью согласована с принимаемой волной по поляризации. Амплитуда напряженности электрического поля в пункте приема $E_m = 14,1$ мкВ/м.

Ответ. $\varepsilon_A = 50$ мкВ.

1.70. Определить амплитуду ЭДС, наводимой в вертикальном вибраторе с действующей высотой $h_d = 12$ м, если в пункте приема амплитуда напряженности электрического поля волны $E_m = 120$ мкВ/м и вектор E образует с осью вибратора угол $\theta = 30^\circ$.

Ответ. $\varepsilon_m = 1247$ мкВ.

1.71. Доказать, что сигнал, подводимый к приемнику от полностью согласованной с ним антенны, имеет максимально возможную мощность

$$P_{\text{прmax}} = \frac{E_\tau^2 G_0 \lambda^2}{480\pi^2} \text{ и } \text{ЭДС } \varepsilon_A = \frac{E_\tau \lambda}{\pi} \sqrt{\frac{G_0 R_{A_{\text{вх}}}}{120}},$$

где E_τ – действующее значение тангенциальной составляющей напряженности электрического поля; G_0 – максимальный КУ антенны, $R_{A_{\text{вх}}}$ – активное входное сопротивление антенны.

Решение. Эффективная площадь антенны $S_{\text{эф}}$ связана с КНД D_0 зависимостью $S_{\text{эф}} = D_0 \lambda^2 / 4\pi$. Умножив $S_{\text{эф}}$ на плотность потока мощности $\Pi = E_\tau^2 / 120\pi$, получаем максимальную мощность, улавливаемую антенной,

$$P_{\text{max}} = \Pi S_{\text{эф}} = \frac{D_0 \lambda^2}{4\pi} \frac{E_\tau^2}{120\pi} = \frac{E_\tau^2 D_0 \lambda^2}{480\pi^2}.$$

Так как КПД антенны $\eta_A < 100\%$, то в приемник поступает не вся мощность, а именно

$$P_{\text{прmax}} = P_{\text{max}} \eta_A = \frac{E_\tau^2 D_0 \lambda^2 \eta_A}{480\pi^2}.$$

С другой стороны, $P_{\text{прmax}} = \varepsilon_A^2 / 4R_{A_{\text{вх}}}$ и, следовательно, ЭДС в приемной антенне, согласованной с приемником,

$$\varepsilon_A = \frac{E_\tau \lambda}{\pi} \sqrt{\frac{G_0 R_{A_{\text{вх}}}}{120}}.$$

Как видно, увеличение КУ антенны G_0 способствует повышению мощности и ЭДС сигнала, подводимого от антенны к приемнику.

1.72. Приемная антенна, имеющая действующую высоту $h_d = 1,4$ м и полное сопротивление излучения $R_A = 75$ Ом, полностью согласована с

приемником. Какова мощность сигнала на входе приемника при напряженности поля $E = 200$ мкВ/м?

Ответ. $P_{\text{пр max}} = 2,62 \cdot 10^{-10}$ Вт.

1.73. Приемная антенна, имеющая при длине принимаемой волны $\lambda = 10$ м коэффициент усиления $G_0 = 20$ дБ и активное входное сопротивление $R_{\text{Авх}} = 250$ Ом, согласована с приемником и ориентирована относительно передающей антенны на максимально возможный прием сигналов. Действующее значение напряженности поля в пункте приема $E_{\tau} = 50$ мкВ/м. Определить мощность $P_{\text{пр max}}$ и ЭДС сигнала, подводимого к приемнику.

Ответ. $P_{\text{пр max}} = 0,52 \cdot 10^{-8}$ Вт; $\epsilon_{\text{пр max}} = 2,29$ мВ.

1.74. Как изменится мощность $P_{\text{пр}}$ и ЭДС $\epsilon_{\text{пр}}$ на входе приемника, если по условиям распространения волны линейная поляризация ее изменит угол на $\gamma = 30^\circ$. Остальные исходные данные соответствуют предыдущей задаче.

Поиск решения. Так как ЭДС на входе приемника $\epsilon_{\text{пр}}$ во столько же раз уменьшилась по сравнению с $\epsilon_{\text{пр max}}$, во сколько тангенциальная составляющая напряженности поля E_{τ} уменьшилась за счет несогласования антенны по поляризации, то $E_{\text{пр}} = E_{\text{пр max}} \cos \gamma$, а мощность $P_{\text{пр}} = P_{\text{пр max}} \cos^2 \gamma$.

Решение. 1. ЭДС сигнала на входе приемника

$$\epsilon_{\text{пр}} = \epsilon_{\text{пр max}} \cos \gamma = 2,29 \cos 30^\circ = 0,65 \text{ мВ.}$$

2. Мощность сигнала на входе приемника

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пр max}} \cos^2 \gamma = 0,52 \cos^2 30^\circ = 7,03 \cdot 10^{-10} \text{ Вт.}$$

1.75. Антенна самолетного радиопередатчика излучает вертикально поляризованные волны длиной $\lambda = 5$ м и имеющие в пункте приема напряженность поля $E_{\tau} = 300$ мкВ/м. Эти волны принимаются наземным вертикальным вибратором в направлении зенитного угла $\theta = 45^\circ$.

Параметры приемного вибратора: КУ $G_0 = 3$, активное входное сопротивление $R_{\text{Авх}} = 75$ Ом, вибратор согласован с приемником по сопротивлениям. Нормированная ДН вибратора по напряжению $f(\theta) = \sin \theta$. Определить ЭДС $\epsilon_{\text{пр}}$ и мощность $P_{\text{пр}}$ сигнала на входе приемника.

1.76. Как изменятся ЭДС $\epsilon'_{\text{пр}}$ и мощность $P'_{\text{пр}}$ на входе приемника, если при прочих данных предыдущей задачи произойдет рассогласование по поляризации принимаемой волны с вибратором на угол $\theta = 15^\circ$?

Ответ. $\epsilon'_{\text{пр}} = 0,63$ мВ; $P'_{\text{пр}} = 6,56 \cdot 10^{-10}$ Вт.

1.77. Описать природу помех, наводимых в приемной антенне. Что называется эквивалентной шумовой температурой антенны и спектральной плотностью шумов? Какой формулой выражается зависимость между этими величинами?

1.78. Вывести развернутую формулу эквивалентной шумовой температуры антенны.

1.79. Из формулы, полученной в предыдущей задаче, сделать выводы о факторах, влияющих на эквивалентную шумовую температуру антенны.

1.80. Заполнить пропуски соответствующими словами: *в зенит, приемника, ниже, выше, на Землю, меньше, больше, целесообразно, нецелесообразно, поляризации, комплексно сопряженным, максимумом.*

Приемная антенна отдает наибольшую мощность приемнику, если: она согласована с принимаемой волной по ___; ее внутреннее сопротивление является ___ относительно входного сопротивления ___; направление на передающую радиостанцию совпадает с ___ ДН передающей антенны.

Внутренние шумы влияют на прием сигналов тем меньше, чем ___ КПД антенны и ___ ее физическая температура. Внешние шумы, вносимые в приемник, сказываются ___ с повышением направленности антенны, и при угловой ориентации ее ___, а не ___. Эквивалентная шумовая температура антенны должна быть тем меньше, чем ___ шумовая температура приемника. С увеличением КПД антенны внешние шумы ее сказываются ___. Для приема на низких радиочастотах повышать КПД антенны ___, а на сверхвысоких частотах ___.

1.81. Определить КУ G_0 приемной антенны СВЧ, имеющей КНД $D_0 = 25 \cdot 10^3$ и эффективную шумовую температуру $T_A = 30$ К при температуре внешней среды $T_{A_{\text{физ}}} = 290$ К и внешних шумах, которые оцениваются температурой $T_\Sigma = 5$ К.

Поиск решения. Зная, что $G_0 = D_0 \eta_A$, стремимся сначала найти КПД антенны η_A . Это позволяет сделать формула $T_A = T_{A_{\text{физ}}} (1 - \eta_A) + T_\Sigma$. Затем находим коэффициент усиления.

Библиографический список

1. Белоцерковский Г. Б. Основы радиотехники и антенны. Ч. II. Антенны. М.: Радио и связь, 1982.
2. Лавров А. С., Резников Г. Б. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов.радио, 1974.
3. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1988.
4. Дрбкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов.радио, 1974.

2. СИММЕТРИЧНЫЙ И НЕСИММЕТРИЧНЫЙ ВИБРАТОРЫ

2.1. Симметричный вибратор в свободном пространстве

2.1. Чем отличается линейный вибратор от диполя Герца? В какой последовательности исследуется симметричный вибратор и как при этом используется теория диполя Герца?

2.2. В чем выражается аналогия между симметричным вибратором и разомкнутой двухпроводной линией? Как используется эта аналогия в теории симметричного вибратора?

2.3. Начертить распределение токов и зарядов в симметричном вибраторе длиной $l = \lambda/2$; λ ; $1,5\lambda$; 2λ и в соответствующей по длине разомкнутой двухпроводной линии.

2.4. По кривым распределения тока определить, какому симметричному вибратору соответствует данная на рис. 2.1 разомкнутая двухпроводная линия.

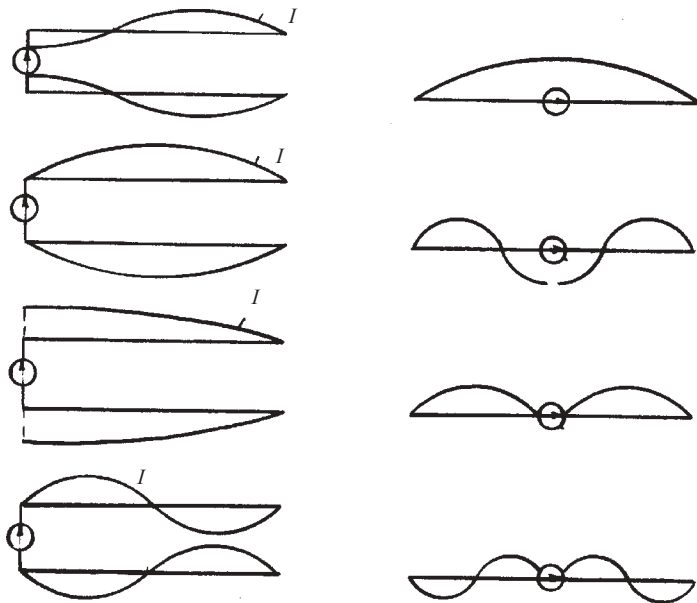


Рис. 2.1

2.5. Описать распределение тока вдоль симметричного и несимметричного вибраторов. Показать, что неравномерность тока в проводах таких вибраторов не противоречит принципу непрерывности тока.

2.6. Описать этапы вывода уравнения для мгновенного значения напряженности электрического поля симметричного вибратора. Почему считают, что поля, возбуждаемые симметричными элементами вибратора, имеют в точке наблюдения одинаковые амплитуды, но различные фазы.

2.7. Написать функцию направленности симметричного вибратора произвольной длины $2l$. Отметить особенности ДН симметричных вибраторов длиной $2l = 0,5\lambda; \lambda; 1,25\lambda; 2\lambda; 4\lambda; 5\lambda$, изображенных на рис. 2.2.

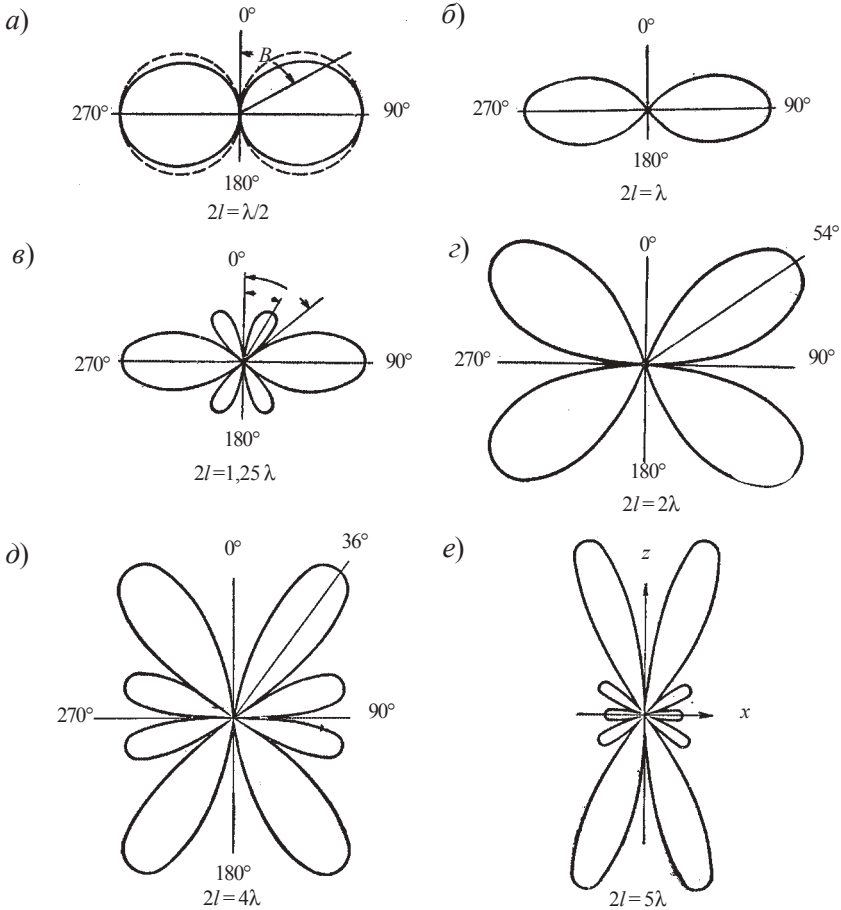


Рис. 2.2

2.8. Начертить ДН симметричного вибратора длиной $2l = \lambda; 2\lambda$ в свободном пространстве. Обратите внимание на то, что вследствие сво-

22

ей осевой симметрии симметричный вибратор ненаправленный в экваториальной плоскости.

2.9. Полуволновой вибратор питается током с амплитудой $I_m = 1$ А в пучности. Каковы действующие значения напряженности электрического E и магнитного H полей этого вибратора на расстоянии $r = 15$ км, отсчитанном в экваториальной плоскости?

Ответ. $E = 2,82 \cdot 10^{-3}$ В/м; $H = 7,48 \cdot 10^{-6}$ А/м.

2.10. Определить амплитудные значения напряженности полей E_m и H_m полуволнового вибратора на расстоянии 30 км от него в экваториальной плоскости при амплитуде тока в пучности 3 А.

Ответ. $E_m = 6 \cdot 10^{-3}$ В/м; $H_m = 1,59 \cdot 10^{-5}$ А/м.

2.11. По данным задачи (2.10) определить E_m и H_m в направлениях, соответствующих зенитным углам $\theta = 60^\circ; 30^\circ$.

Ответ. $E_m = 4,9 \cdot 10^{-3}$ В/м, $H_m = 13 \cdot 10^{-5}$ А/м при $\theta = 60^\circ$;

$E_m = 2,5 \cdot 10^{-3}$ В/м, $H_m = 6,6 \cdot 10^{-5}$ А/м при $\theta = 30^\circ$.

2.12. Плотность потока мощности Π , излучаемой полуволновым вибратором в направлении, соответствующем зенитному углу $\theta = 30^\circ$, оказалась равной 10 Вт/м². На каком расстоянии произведены измерения, если действующее значение тока вибратора в пучности $I = 15$ А?

Поиск решения. Плотность потока мощности полуволнового вибратора максимальна в экваториальной плоскости ($\theta = 90^\circ$) и равна

$\Pi_{\max} = \frac{E_{\max}^2}{Z_0} = \left(\frac{60I}{r}\right)^2 \frac{1}{377}$, а в произвольном направлении равна

$\Pi = \Pi_{\max} f^2(\theta)$; где $f(\theta)$ – нормированная функция направленности вибратора. Зная Π и $f(\theta)$ находим Π_{\max} , а это позволяет определить расстояние r , поскольку известен ток I .

Решение. 1. Максимальная плотность потока мощности

$$\begin{aligned} \Pi_{\max} &= \frac{\Pi}{f^2(\theta)} = \Pi \left[\frac{\sin \theta}{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)} \right]^2 = \\ &= 10^{-7} \cdot \left[\frac{\sin 30^\circ}{\cos(90^\circ \cos 30^\circ)} \right]^2 = 2,33 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

2. Дальность точки наблюдения

$$r = \frac{60I}{\sqrt{377\Pi_{\max}}} = \frac{60 \cdot 15}{\sqrt{377 \cdot 2,33 \cdot 10^{-7}}} = 96 \cdot 10^3 \text{ м} = 96 \text{ км.}$$

2.13. Плотность потока мощности, излучаемой полуволновым вибратором в экваториальной плоскости на расстоянии 10 км от вибратора, равна $0,2 \text{ мВт/м}^2$. Каково действующее значение тока I вибратора в пучности?

Ответ. $I = 1,45 \text{ А}$.

2.14. Поток мощности, излучаемой полуволновым вибратором в направлении зенитного угла 60° , имеет на расстоянии 10 км от вибратора плотность $2 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2$. Чему равна амплитуда I_m тока вибратора в пучности?

Ответ. $I_m = 0,72 \text{ А}$.

2.15. Напряженность электрического поля излучения вертикального симметричного вибратора длиной $2l = \lambda$ на расстоянии от него $r = 240 \text{ км}$ имеет в направлении зенитного угла $\theta = 90^\circ$ амплитуду $E_m = 1 \text{ мВ/м}$. Определить амплитуду в пучности тока вибратора.

Ответ. $I_m = 2 \text{ А}$.

2.16. Рассчитать и построить E -плоскостную ДН симметричного вибратора длиной $2l = 1,5\lambda$.

Решение. Расчет диаграммы начинаем с определения направлений нулевого излучения ($\theta = \theta_0$). Из уравнения

$$f(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda} \cos \theta\right) - \cos \frac{2\pi l}{\lambda}}{\sin \theta} \text{ получим, что } f(\theta) = 0$$

$$\text{при } \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda} \cos \theta_0\right) - \cos \frac{2\pi l}{\lambda} = 0 \text{ или } 2 \frac{\pi l}{\lambda} = 2 \frac{\pi l}{\lambda} \cos \theta_0 + k\pi,$$

где $k = 0, 1, 2, 3$.

$$\text{Это соответствует } \cos \theta_0 = \frac{\frac{2\pi l}{\lambda} - k\pi}{\frac{2\pi l}{\lambda}} = 1 - \frac{k\lambda}{2l} = 1 - \frac{2}{3}k, \text{ откуда}$$

$$\cos \theta_0 = 1; \cos \theta_0 = \frac{1}{3} \text{ или } \theta_0 = 0^\circ; 70^\circ 32'.$$

Имея в виду вычисленные направления нулевого излучения, задаем-ся различными значениями θ от 0 до 90° и определяем для них $f(\theta)$. Результаты расчета сводим в табл. 2.1 и строим ДН (рис. 2.3).

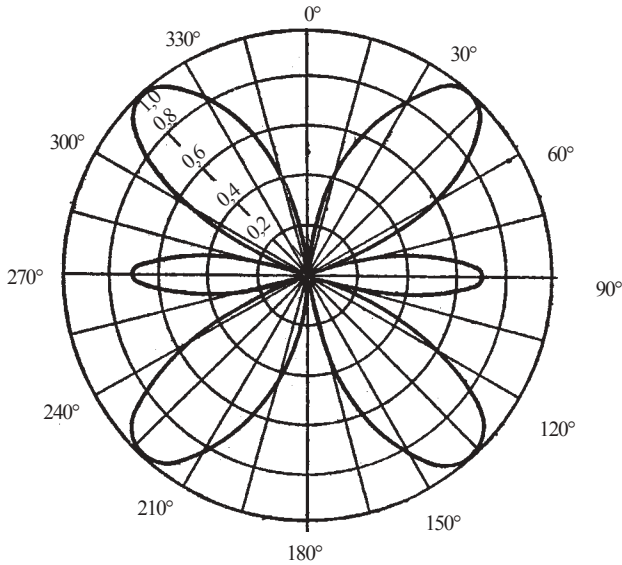


Рис. 2.3

Таблица 2.1

θ , град	0	10	20	30	35	40	42°45'
$f(\theta)$	0	-0,402	-0,807	-1,18	-1,29	-1,38	-1,399
$\frac{f(\theta)}{ f(\theta)_{\max} }$	0	-0,291	-0,576	-0,844	-0,922	-0,986	-1,00

Окончание табл. 2.1

θ , град	45	55	65	70,5	75	85	90
$f(\theta)$	-1,39	-1,1	-0,449	0	0,354	0,876	1,0
$\frac{f(\theta)}{ f(\theta)_{\max} }$	-0,994	-0,786	-0,321	0	0,254	0,625	0,714

2.17. Вставить пропущенные слова: *фазе, фаза, амплитуде, амплитуду, симметричных, четному, противоположными, целому, полу-*

сферу, своей оси, длин, увеличением, равны, оси, удаляется, хода, лепестков.

Тонким симметричным вибратором является прямолинейный провод, в ___ точках которого токи ___ и совпадают по ___ и ___. Поля симметричных элементов вибратора имеют в точке наблюдения практически одинаковую ___, но ___ их полей различна за счет разности ___ лучей. Симметричный вибратор любой длины l не излучает в направлении ___. Не излучает симметричный вибратор и в экваториальной плоскости, если длина вибратора l равна ___ числу длин волн, так как при этом протяженность участков вибратора с ___ направлениями токов одинаковая. Если длина l равна ___ числу ___ волн, то на одну ___ пространства приходится столько же ___ ДН вибратора. С увеличением длины главный максимум ДН ___ от экваториальной плоскости вибратора к его ___.

2.18. Вибратор имеет сопротивление излучения $R_{\Sigma} = 5$ Ом и КПД $\eta_A = 25\%$. Определить сопротивление потерь R_{Π} и полное сопротивление R_A вибратора, причем все эти сопротивления отнесены к одному и тому же сечению вибратора.

Ответ. $R_{\Pi} = 15$ Ом; $R_A = 20$ Ом.

2.19. Мощность излучения антенны $P_{\Sigma} = 100$ Вт и мощность потерь в ней $P_{\Pi} = 400$ Вт при амплитудах тока в основании $I_{mo} = 10$ А и в пучности $I_{m\Pi} = 15$ А. Определить сопротивления излучения $R_{\Sigma o}$, $R_{\Sigma пуч}$ и потерь $R_{\Pi o}$, $R_{\Pi пуч}$, отнесенные соответственно к току в основании и пучности.

Ответ. $R_{\Sigma o} = 2$ Ом; $R_{\Pi o} = 8$ Ом; $R_{\Sigma пуч} = 0,89$ Ом; $R_{\Pi пуч} = 3,56$ Ом.

2.2. Вибратор над поверхностью земли

2.20. Описать, как применяется метод зеркальных изображений для определения электрического поля точечного заряда и вибраторов, расположенных над идеально проводящим плоским экраном.

2.21. Имеется горизонтальный вибратор, расположенный на высоте h над горизонтальным идеально проводящим экраном. Вывести формулу разности хода лучей действительного вибратора и эквивалентного экрану мнимого вибратора.

2.22. Исследовать формулу $f(\delta) = \sin(\beta h \sin \delta)$, для приближенного расчета ДН горизонтального вибратора, подвешенного над идеальным горизонтальным экраном на высоте: $h = \lambda/4$; $\lambda/2$; λ ; 2λ . Здесь введены обозначения: δ – угол наклона луча к земной поверхности; $\beta = 2\pi/\lambda$ – коэффициент фазы.

2.23. Вывести уравнение мгновенного значения напряженности электрического поля горизонтального вибратора, расположенного на высоте h над идеально проводящим горизонтальным экраном.

2.24. Горизонтальный полуволновой вибратор расположен на высоте h над идеально проводящей поверхностью земли. Определить амплитуды напряженности электрического и магнитного полей вибратора на расстоянии 50 км вдоль поверхности земли ($\delta = 0^\circ$) и под углами места $\delta = 5; 10^\circ$, если действующее значение тока в пучности равно 3 А. Результаты расчета приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

δ , град	0	5	10
E_m , мВ/м	0	5,29	9,00
H_m , мкА/м	0	14,0	23,9

2.25. Горизонтальный вибратор подвешен над землей на высоте $h = \lambda$. Какой разности хода волн Δr от этого вибратора и его зеркального изображения соответствуют максимумы и минимумы излучения вибратора? Сколько лепестков в ДН вибратора в вертикальной плоскости?

Ответ. Минимумы излучения получаются при разности хода волн $2h \sin \delta_0 = 1, \lambda, 2\lambda$ (это соответствует $\delta_0 = 0, 30, 90, 150, 180^\circ$), а максимумы излучения получаются при разности хода $2h \sin \delta_{\max} = 0,5\lambda; 1,5\lambda$ (это соответствует $\delta_{\max} = 14^\circ 29'; 48^\circ 36'; 131^\circ 12'; 165^\circ 31'$). Число лепестков в ДН вибратора в вертикальной плоскости равно четырем (рис. 2.4).

2.26. Горизонтальный вибратор подвешен над землей на высоте $h = 2\lambda$. Какой разности хода волн Δr от этого вибратора и его зеркального изображения соответствуют максимумы и минимумы излучения вибратора? Сколько лепестков в ДН вибратора в вертикальной плоскости?

Ответ. Минимумы излучения получаются при разности хода $\Delta r = 0; \lambda; 2\lambda; 3\lambda; 4\lambda$; а максимумы – при $\Delta r = 0,5\lambda; 1,5\lambda; 2,5\lambda; 3,5\lambda$. Число

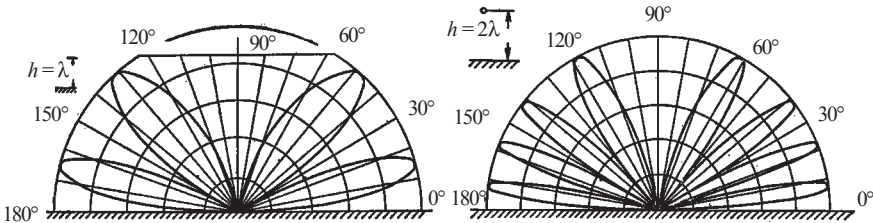


Рис. 2.4

Рис. 2.5

лепестков 8, т. е. равно числу четвертей длин волн, укладываемых по высоте вибратора. ДН приведена на рис. 2.5.

2.27. Доказать, что число лепестков ДН в вертикальной плоскости горизонтального вибратора, подвешенного над идеально проводящей землей на высоте h , всегда равно целому числу четвертей длины волн, укладываемых в высоте подвеса.

2.28. По изображенным на рис. 2.6, *а*, *б* ДН горизонтального вибратора в его экваториальной (вертикальной) плоскости определить относительную высоту h/λ подвеса этого вибратора над идеально проводящим экраном.

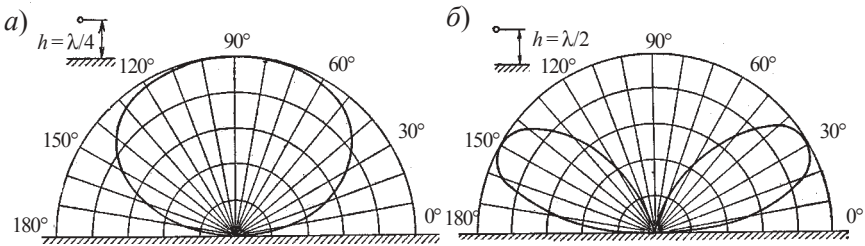


Рис. 2.6

2.29. Рассчитать и построить ДН горизонтального вибратора в вертикальной плоскости, если вибратор находится на высоте $h = \lambda$ и ось его перпендикулярна этой плоскости.

Решение. Для построения нормированной ДН пользуемся ее уравнением $f(\delta) = \sin(\beta h \sin \delta)$. Направления нулевого излучения ($\delta = \delta_0$) определяются равенством $\sin(\beta h \sin \delta_0) = 0$ или $\beta h \sin \delta_0 = k\pi$, где $k = 0, 1, 2, 3$, что при $h = \lambda$ соответствует $\sin \delta_0 = k\pi/\beta h = k\lambda/2h = k/2 = 0; 0,5; 1,0$ или $\delta_0 = 0, 30, 90^\circ$. Направления максимального излучения ($\delta_0 = \delta_{\max}$) соответствуют $\sin(\beta h \sin \delta_{\max}) = 1$ или $\beta h \sin \delta_{\max} = (2k + 1)\frac{\pi}{2}$, где $k = 0, 1, 2, 3 \dots$. Отсюда следует, что при $h = \lambda$

$$\sin \delta_{\max} = \frac{(2k + 1)\pi}{2\beta h} = \frac{(2k + 1)\lambda}{4h} = \frac{2k + 1}{4} = \frac{1}{4}, \frac{3}{4}$$

или $\delta_{\max} = 14^{\circ}29'; 48^{\circ}36'$. Вычисляем $f(\delta)$ для промежуточных значений угла δ . Результаты расчета сводим в табл. 2.3. ДН изображена на рис. 2.4.

Таблица 2.3

δ , град	0	5	10	$14^{\circ}30'$	20	25	30
$f(\delta)$	0	0,52	0,89	1,0	0,83	0,47	0

Продолжение табл. 2.3

δ , град	35	40	45	$48^{\circ}40'$	50	55	60
$f(\delta)$	-0,45	-0,78	-0,96	-1	-0,99	-0,9	-0,74

Окончание табл.2.3

δ , град	65	70	75	80	85	90
$f(\delta)$	-0,56	-0,37	-0,21	-0,1	-0,035	0

2.30. Написать функцию направленности в вертикальной (меридиональной) плоскости вертикального вибратора, расположенного на высоте h над идеально проводящим горизонтальным экраном. Сравнить влияние такого экрана на ДН горизонтального и вертикального вибраторов.

2.31. Вертикальный вибратор длиной λ имеет высоту подвеса, равную 2λ . Какими уравнениями выражаются мгновенные значения напряженности полей E , H и нормированная диаграмма направленности $f(\delta)$ такого вибратора?

$$\text{Ответ. } E_{\text{МГН}} = \left[\frac{120I_m \cos(\pi \sin \delta) + 1}{r \cos \delta} \cos(4\pi \sin \delta) \right] \sin(\omega t - \beta r);$$

$$H_{\text{МГН}} = \left[\frac{I_m \cos(\pi \sin \delta) + 1}{\pi r \cos \delta} \cos(4\pi \sin \delta) \right] \sin(\omega t - \beta r);$$

$$f(\delta) = \frac{\cos(\pi \sin \delta) + 1}{\cos \delta} \cos(4\pi \sin \delta).$$

2.32. На рис. 2.7 показана ДН в меридиональной (вертикальной) плоскости симметричного вибратора, вертикально расположенного над идеально проводящим экраном на высоте $h = 2\lambda$. Определить разность хода лучей Δr от вибратора и его зеркального изображения в заданных на рисунке направлениях максимального или нулевого излучения (влиянием направленности самого вибратора на эти направления пренебрегаем).

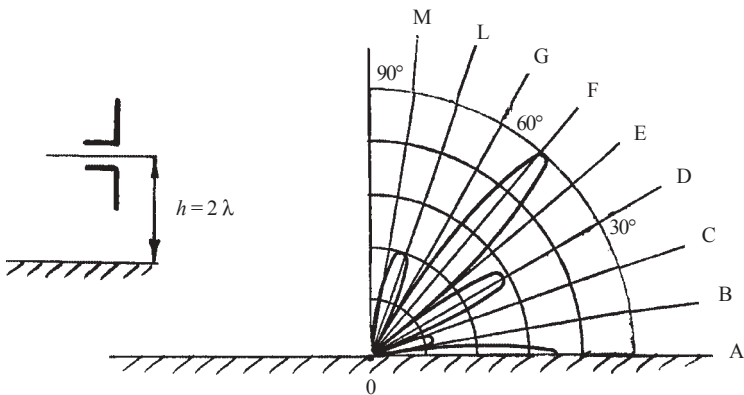


Рис. 2.7

2.33. Четвертьволновый заземленный вибратор питается синусоидальным током с амплитудой $I_m = 1,2$ А. Чему равны амплитуды напряженности электрического и магнитного полей вибратора на расстоянии $r = 10$ км от антенны, отсчитанном на поверхности земли, и под углом места $\delta = 10^\circ$, если распространение волн происходит в идеальных условиях?

Поиск решения. Благодаря отражению от поверхности земли поля четвертьволнового заземленного вибратора имеют в экваториальной плоскости в два раза большую величину, чем поля симметричного полуволнового вибратора в той же плоскости, т. е. $E_{m_{\max}} = 120I_m/r$, а

$H_{m_{\max}} = E_{m_{\max}}/Z_0$. Умножаем это на функцию направленности полуволнового вибратора $f(\delta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin\theta} = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\sin\delta\right)}{\cos\delta}$ (заметим, что $\delta = 90^\circ - \theta$) и получаем искомые величины.

Решение. 1. Амплитуда напряженности электрического поля четвертьволнового заземленного вибратора на поверхности земли

$$E_{m_{\max}} = 120I_m/r = 120 \cdot 1,2 / 10^4 = 144 \cdot 10^{-4} \text{ В/м} = 14,4 \text{ мВ/м.}$$

2. Амплитуды напряженности полей вибратора под углом места $\delta = 10^\circ$

$$E_m = E_{m_{\max}} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \delta\right)}{\cos \delta} = 1,44 \frac{\cos(90^\circ \sin 10^\circ)}{\cos 10^\circ} = 1,41 \text{ мВ/м,}$$

$$H_m = E_m / Z_0 = 14,1 / 377 = 3,74 \cdot 10^{-2} \text{ мА/м.}$$

2.34. Описать влияние поверхности земли на ДН вибраторов. Сравнить ДН горизонтального вибратора в экваториальной (вертикальной) плоскости при высоте подвеса $h = 1,5$ м над поверхностью земли с идеальной и реальной проводимостью почвы.

2.35. Заполнить пропуски следующими словами: *разность, экваториальной, интерференции, направления, вертикального, горизонтального, меридиональной, идеально, экрана.*

Два и более ненаправленных излучателей вызывают направленное излучение благодаря ___ их полей. При этом сказывается то, что ___ хода волн от излучателей зависит от ___ на точку наблюдения. Функция $f_p(\delta) = 2 \sin(\beta h \sin \delta)$ выражает влияние ___ проводящего экрана, на ДН ___ вибратора в ___ (вертикальной) плоскости. Функция $f_p(\delta) = 2 \cos(\beta h \sin \delta)$ выражает влияние идеально проводящего ___ на ДН ___ вибратора в ___ (вертикальной) плоскости.

2.36. Дать определение понятия “заземленный вертикальный вибратор”. Показать распределение тока по геометрической и действующей высоте (длине) вибратора. Что является условием эквивалентности проволочных вибраторов?

2.37. Вывести формулу зависимости действующей высоты h_d вибратора от его относительной высоты h/λ .

2.38. Применить полученную в задаче 2.37 формулу к частным случаям: $h \ll \lambda$; $h = \lambda/4$; $2l = \lambda/2$ (симметричный полуволновой вибратор).

2.39. Вертикальный заземленный вибратор высотой $h = 1$ м излучает волны длиной $\lambda = 20$ м. Определить действующую высоту вибратора h_d .

Ответ. $h_d \approx 0,5$ м.

2.40. Определить действующую высоту симметричного вибратора длиной $2l = 10$ см, который, находясь в свободном пространстве, излучает волны длиной $\lambda = 2$ м.

Ответ. $h_d = 5$ см.

2.41. Определить действующую высоту h_d и сопротивление излучения R_Σ заземленного вибратора высотой $h = 60$ м при длине волны $\lambda = 400$ м.

Ответ. $h_d \approx 30$ м, $R_\Sigma = 9$ Ом.

2.42. Описать вибратор с емкостной нагрузкой. Показать распределение тока вдоль вибратора в отсутствии и при наличии емкостной нагрузки.

2.43. Заполнить пропуски следующими словами и символами: *напряженности, $\lambda/2\pi$, максимума, $h/2$, меньше, увеличивает, равных, моментов тока, λ/π , 36%.*

Эквивалентными считаются такие вибраторы, которые при ___ токах питания создают поля равной ___ в направлении ___ излучения. Это имеет место при равенстве их _____. Если геометрическая высота (длина) вибратора $h \ll \lambda$, то его действующая высота (длина) $h_d \approx$ _____. Четвертьволновый заземленный вибратор имеет $h_d =$ ____, а симметричный полуволновой вибратор имеет $h_d =$ ____, т. е. их действующая длина ___ геометрической длины на _____. Емкостная нагрузка вибратора ___ его действующую высоту.

2.44. Написать и обосновать формулы расчета сопротивлений излучения симметричного и заземленного несимметричного вибраторов по их действующей длине. В каком соотношении находятся сопротивления излучения симметричного и несимметричного вибраторов, соответствующих по относительной длине?

2.45. Чем обусловлена принципиальная погрешность в расчетах сопротивления излучения вибратора по его действующей длине? Изобразить зависимость уточненных значений сопротивления излучения вибратора от его относительной длины.

2.46. Определить погрешность вычисления сопротивления излучения четвертьволнового заземленного и полуволнового симметричного вибраторов по их действующим высотам.

Решение. Исходя из значений действующих высот вибраторов находим, что сопротивления излучения полуволнового симметричного и четвертьволнового заземленного вибраторов соответственно равны 81,1 Ом и 40,6 Ом, тогда как в действительности эти сопротивления 73,1 Ом и 36,5 Ом. Погрешность вычислений равна: $(81,1 - 73,1) / 73,1 = (40,5 - 36,5) / 36,5 = 0,108 = 10,8\%$. Причина погрешности в том, что формула действующей высоты вибратора выведена исходя из эквива-

лентности данного и элементарного вибраторов в направлении их максимального излучения, а в остальных направлениях – вследствие различия в ДН эквивалентность вибраторов нарушается. Чем больше отличаются ДН данного и элементарного вибраторов, тем менее точны

$$\text{формулы } R_{\Sigma 0} = 1600 \left(\frac{h_d}{\lambda} \right)^2 \text{ и } R_{\Sigma} = 800 \left(\frac{h_d}{\lambda} \right)^2 .$$

2.47. Определить КНД симметричного полуволнового и заземленного четвертьволнового вибраторов. Чем объясняется широкое применение полуволновых вибраторов на практике?

2.48. Определить во сколько раз возрастает плотность потока мощности полуволнового вибратора в экваториальной плоскости ($\theta = 90^\circ$) и под зенитными углами $\theta = 30, 60^\circ$ за счет направленности излучения этого вибратора.

Ответ. При $\theta = 90^\circ$ – в 1,64 раза; при $\theta = 60^\circ$ – в 0,73; при $\theta = 30^\circ$ – в 0,28.

2.49. Описать и изобразить частотные характеристики входного сопротивления симметричного вибратора. Написать формулы этого сопротивления при последовательном резонансе, параллельном резонансе и расстройке частоты вибратора.

2.50. Описать, что такое волновое сопротивление вибратора и как оно зависит от геометрических размеров вибратора.

2.51. Какие особенности имеют частотные характеристики симметричного и несимметричного вибраторов?

2.52. Определить входное сопротивление $Z_{вхА}$ симметричного вибратора длиной $2l = \lambda = 15$ м. Радиус провода вибратора $r = 10$ мм.

Поиск решения. В общем случае $Z_{вхА} = R_{вхА} + jX_{вхА}$, но так как длина вибратора резонансная ($2l = \lambda$), то реактивная составляющая вход-

ного сопротивления $X_{вхА} = 0$, а активная составляющая $R_{вхА} = \frac{Z_{вА}^2}{R_{\Sigma\Pi}}$

(резонанс в вибраторе параллельный). Сопротивление излучения вибратора при $2l = \lambda$ $R_{\Sigma\Pi} = 200$ Ом, а неизвестное волновое сопротивление находим по формуле $Z_{вА} = 276 \lg(2l/r) - 120$.

Решение. 1. Волновое сопротивление вибратора

$$\begin{aligned} Z_{вА} &= 276 \lg(2l/r) - 120 = 276 \lg(15/10^{-2}) - 120 = \\ &= 276 \cdot 3,176 - 120 = 757 \text{ Ом} \end{aligned}$$

2. Входное сопротивление вибратора

$$\dot{Z}_{\text{вх}\Lambda} = R_{\text{вх}\Lambda} = Z_{\text{в}\Lambda}^2 / R_{\Sigma\Pi} = 757^2 / 200 = 2865 \text{ Ом.}$$

2.53. Определить входное сопротивление $Z_{\text{вх}\Lambda}$ вертикального заземленного вибратора высотой $h = 30$ м при длине волны $\lambda = 700$ м. Радиус провода вибратора $r = 4$ мм. Сопротивление потерь в антенне, отнесенное к току у основания антенны, $R_{\text{п.о}} = 2$ Ом.

Решение. 1. Найдем действующую высоту антенны

$$h_{\text{д}} = \frac{\lambda \text{tg}(\pi h / \lambda)}{2\pi} = \frac{700 \text{tg}(180 \cdot 30 / 700)^\circ}{6,28} = \frac{700 \text{tg}(7,72)^\circ}{6,28} = 15,15 \text{ м}$$

и сопротивление излучения антенны

$$R_{\Sigma\text{o}} = 1600 (h_{\text{д}} / \lambda)^2 = 1600 (15,15 / 700)^2 = 0,74 \text{ Ом.}$$

Тогда активная составляющая входного сопротивления антенны

$$R_{\text{вх}\Lambda} = R_{\Lambda} = R_{\Sigma\text{o}} + R_{\text{п.о}} = 0,74 + 2 = 2,74 \text{ Ом.}$$

2. Волновое сопротивление вибратора

$$\begin{aligned} Z_{\text{в}\Lambda} &= 276 \lg(l / \lambda) - 120 = 276 \lg(2h / r) - 120 = \\ &= 276 \lg(2 \cdot 30 / 4 \cdot 10^{-2}) - 120 = 757 \text{ Ом,} \end{aligned}$$

а реактивная составляющая входного сопротивления антенны

$$X_{\text{вх}\Lambda} = X_{\Lambda} = -Z_{\text{в}\Lambda} \text{ctg}\beta h = -757 \text{ctg}(360 \cdot 30 / 700) = -2742,9 \text{ Ом.}$$

2.54. Определить входное сопротивление и КПД вертикального заземленного вибратора высотой 20 м при длине волны 500 м. Радиус провода вибратора 5 мм. Сопротивление потерь в антенне, отнесенное к току у основания антенны, 0,5 Ом.

Ответ. $R_{\text{вх}} = 1,14$ Ом; $X_{\text{вх}} = -2285$ Ом; $\eta_{\Lambda} = 56,1\%$.

2.55. Какую геометрическую длину $2l_{\text{геом}}$ должен иметь симметричный вибратор с размерами $2l \approx \lambda/2$ при длине волны $\lambda = 10$ м и диаметре трубки, из которой изготовлен вибратор, $2r = 10$ мм?

Поиск решения. Резонансная длина вибратора $2l_{\text{геом}}$ меньше, чем $\lambda/2$,

на небольшую величину $2\Delta l = \frac{42,5\lambda}{\pi Z_{\text{в}\Lambda}}$. Следовательно, нужно сначала определить волновое сопротивление вибратора

$$Z_{\text{вА}} = 276 \lg(2l/r) - 120 \approx 276 \lg(\lambda/2r) - 120,$$

затем вычислить укорочение вибратора $2\Delta l$ и, наконец, его геометрическую длину $2l_{\text{геом}} = (\lambda/2) - 2\Delta l$.

Решение. 1. Волновое сопротивление вибратора

$$Z_{\text{вА}} \approx 276 \lg(\lambda/2r) - 120 = 276 \lg(10/2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}) - 120 = 708 \text{ Ом.}$$

2. Укорочение вибратора

$$2\Delta l = 42,5 \lambda / \pi Z_{\text{вА}} = 42,5 \cdot 10 / 3,14 \cdot 708 = 0,19 \text{ м.}$$

3. Геометрическая длина вибратора

$$2l_{\text{геом}} = (\lambda/2) - 2\Delta l = (10/2) - 0,19 = 4,81 \text{ м.}$$

2.56. Определить комплексное входное сопротивление $\dot{Z}_{\text{вхА}}$ симметричного вибратора длиной $2l = 2$ м при длине волны $\lambda = 10$ м, радиусе провода вибратора $r = 4$ мм и сопротивлении потерь, отнесенном к клеммам вибратора, $R_{\text{п.о}} = 3$ Ом.

Поиск решения. Комплексное входное сопротивление симметричного вибратора $\dot{Z}_{\text{вхА}} = R_{\text{вхА}} + jX_{\text{вхА}}$ имеет активную $R_{\text{вхА}}$ и реактивную $X_{\text{вхА}}$ составляющие, которые, учитывая, что $2l \ll \lambda$, определяем по формуле

$$R_{\text{вхА}} = R_{\Sigma 0} + R_{\text{п.о}} \text{ и } X_{\text{вхА}} = -Z_{\text{вА}} \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi}{\lambda} l\right),$$

где сопротивление излучения $R_{\Sigma 0} = 800(h/\lambda)^2$ и волновое сопротивление $Z_{\text{вА}} = 276 \lg(2l/r) - 120$. Действующая высота вибратора $h_{\text{д}} \approx l$, а

более точно $h_{\text{д}} = 2 \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2} l\right)}{\beta} = \frac{\lambda \operatorname{tg}\left(\frac{\pi l}{\lambda}\right)}{\pi}$ (коэффициентом 2 учитывается,

что симметричный вибратора имеет в два раза большую действующую длину, чем соответствующий его плечу несимметричный заземленный вибратор).

Решение. 1. Волновое сопротивление вибратора

$$Z_{\text{вА}} = 276 \lg(2l/r) - 120 = 276 \lg\left(2 \cdot 10^3 / 4\right) - 120 = 625 \text{ Ом.}$$

2. Действующая длина вибратора

$$h_d = \frac{\lambda \operatorname{tg}\left(\frac{\pi l}{\lambda}\right)}{\pi} = \frac{10 \operatorname{tg}\left(180^\circ \cdot \frac{2}{2 \cdot 10}\right)}{\pi} = 1,03 \text{ м.}$$

3. Сопротивление излучения вибратора

$$R_{\Sigma_0} = 800(h_d/\lambda)^2 = 800(1,03/10)^2 \approx 8,5 \text{ Ом.}$$

4. Активная составляющая входного сопротивления вибратора

$$R_{\text{вх}_A} = R_{\Sigma_0} + R_{\text{п.о}} = 8,5 + 3 = 11,5 \text{ Ом.}$$

5. Реактивная составляющая входного сопротивления вибратора

$$X_{\text{вх}_A} = -Z_{\text{в}_A} \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi}{\lambda} l\right) = -625 \operatorname{ctg}\left(\frac{360^\circ \cdot 1}{10}\right) = -860 \text{ Ом.}$$

6. Комплексное входное сопротивление вибратора

$$\dot{Z}_{\text{вх}_A} = R_{\text{вх}_A} + jX_{\text{вх}_A} = (11,5 - j860) \text{ Ом.}$$

2.57. Заполнить пропуски соответствующими словами и цифрами: гармоникой, добротность уменьшается, параллельный, последовательный, минимальная, максимальная, основной, активный, 4, 2, четному.

С увеличением диаметра вибратора ___ волновое сопротивление, а с ним и, ___ вибратора. Наибольшую из резонансных волн вибратора называют его ___ волной или первой ___. Симметричный вибратор, длина которого равна нечетному числу полуволн, настроен на ___ резонанс, а если ___ числу полуволн, то на ___ резонанс. При этом входное сопротивление вибратора имеет ___ характер, но в первом случае величина его ___, а во втором случае ___. Симметричный вибратор длиной $2l$ имеет основную волну $\lambda_0 = __ l$. Несимметричный вибратор высотой h имеет основную волну $\lambda_0 = __ h$.

Библиографический список

1. Белоцерковский Г. Б. Основы радиотехники и антенны. Ч. II. Антенны. М.: Радио и связь, 1982.

2. Дробкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов.радио, 1974.

3. *Марков Г. Т., Сазонов Д. М.* Антенны. М.: Энергия, 1975.
4. *Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н.* Антенны УКВ. М.: Связь, 1977.
5. *Пистолькорс А. А.* Антенны. М.: Связьиздат, 1948.

3. АНТЕННЫ СВЕРХДЛИННЫХ, ДЛИННЫХ, СРЕДНИХ И КОРОТКИХ ВОЛН

3.1. Вертикальные несимметричные вибраторы

3.1. Перечислить особенности антенн километровых длинных волн (ДВ) и меридиальных сверхдлинных волн (СДВ). Почему антенны этих диапазонов выполняют в виде вертикальных заземленных проводов с сильно развитой горизонтальной частью? Какие функции выполняют вертикальная и горизонтальная части антенны?

3.2. Во сколько раз увеличится сопротивление излучения вертикального заземленного провода, длина которого значительно меньше длины волны λ , если антенну снабдить горизонтальной частью, при которой ток в вертикальном проводе распределится равномерно?

3.3. Определить КПД антенны в виде вертикального заземленного вибратора (рис. 3.1, а) высотой $h = 60$ м при длине волны $\lambda = 1200$ м, собственной длине волны $\lambda_0 = 900$ м и заземлении удовлетворительного качества ($A = 3$ Ом).

Ответ. $\eta_A = 20\%$

3.4. Определить мощность, подводимую к антенне в виде вертикального заземленного вибратора высотой $h = 30$ м, если длина волны $\lambda = 1500$ м, собственная длина волны антенны $\lambda_0 = 1000$ м, излучаемая мощность $P_\Sigma = 100$ Вт и заземление удовлетворительного качества ($A = 2,5$ Ом).

Ответ. $P_A = 685$ Вт.

3.5. Отметить особенности антенн гектометровых (средних) волн (СВ). Какие требования предъявляются к ДН антифединговых антенн?

3.6. Описать схемы настройки в резонанс проволочных антенн при удлинении и укорочении резонансной длины волны вертикального вибратора.

3.7. Определить индуктивность удлинительной катушки, предназначенной для настройки вертикального заземленного вибратора, имеющего высоту 150 м и волновое сопротивление 500 Ом, в резонанс на волну $\lambda = 800$ м.

Ответ. $L_{\text{удл}} = 88,1$ мкГн.

3.8. Определить емкость укорачивающего конденсатора, необходимую для настройки вертикального заземленного вибратора, имеющего высоту 100 м и волновое сопротивление 450 Ом, в резонанс на волну $\lambda = 250$ м.

Ответ. $C_{ук} = 214,8$ пФ.

3.9. Вертикальный заземленный вибратор, имеющий высоту 100 м и волновое сопротивление 400 Ом, настраивается в резонанс на рабочую волну 800 м. Требуется определить характер и величину элемента настройки вибратора.

Ответ. $L_{удл} = 170$ мкГн.

3.10. Описать схемы настройки в резонанс вибратора с верхней частью.

3.11. Изобразить распределение амплитудных значений напряжения и тока в вертикальном заземленном вибраторе с удлинением и укорочением резонансной длины волны.

3.12. Изобразить распределение амплитудных значений напряжения и тока в Г-образной антенне (рис. 3.1, б) при удлинении и укорочении резонансной длины волны.

3.13. Изобразить распределение амплитудных значений напряжения и тока в Т-образной (рис. 3.1, в) антенне при удлинении и укорочении резонансной длины волны.

3.14. Рассчитать резонансную длину волны и параметры элемента настройки Т-образной антенны, имеющей волновое сопротивление вертикального провода $Z_{в.в} = 550$ Ом, волновое сопротивление горизонтального провода $Z_{в.г} = 400$ Ом, высоту $h = 50$ м и длину горизонтальной части $l_{г} = 120$ м. Рабочая длина волны $\lambda = 900$ м.

Решение. 1. Для определения резонансной длины волны λ_0 задаемся различными значениями λ в м, для которых вычисляем

$$\frac{2\pi}{\lambda}h = \left(\frac{360^\circ \cdot 50}{\lambda} \right) = \left(\frac{18000}{\lambda} \right)^\circ; \quad \frac{2\pi}{\lambda} \frac{l_{г}}{2} = \left(\frac{180^\circ \cdot 120}{\lambda} \right) = \left(\frac{21600}{\lambda} \right)^\circ;$$

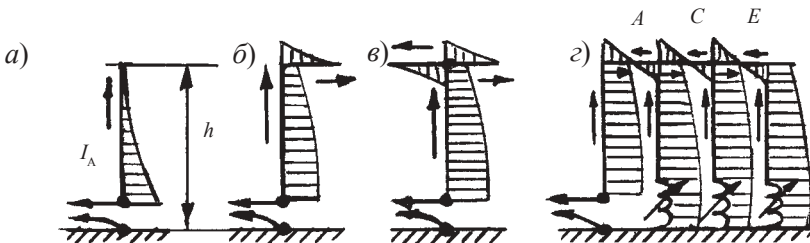


Рис. 3.1

$$\operatorname{tg} \frac{2\pi h}{\lambda} = \operatorname{tg} \left(\frac{18000}{\lambda} \right)^\circ; \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi l_\Gamma}{\lambda} \right) = \operatorname{ctg} \left(\frac{21600}{\lambda} \right)^\circ; \quad (3.1)$$

$$\frac{Z_{\text{в.}\Gamma}}{2Z_{\text{в.в}}} \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi l_\Gamma}{\lambda} \right) = \frac{400}{2 \cdot 550} \operatorname{ctg} \left(\frac{21600}{\lambda} \right)^\circ = 0,36 \operatorname{ctg} \left(\frac{21600}{\lambda} \right)^\circ. \quad (3.2)$$

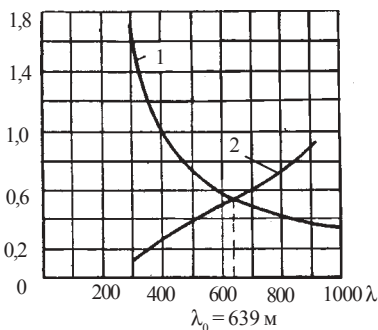


Рис. 3.2

2. По данным уравнениям (3.1) и (3.2) рассчитана табл. 3.1 и построены соответственно две кривые 1 и 2 (рис. 3.2), точка пересечения которых определяет резонансную длину волны $\lambda_0 = 639$ м. Так как рабочая длина волны λ больше резонансной длины волны антенны, то в данном случае настройка ее производится при помощи удлинительной катушки.

Таблица 3.1

λ , м	300	400	500	600	640	650	700	800	1000
$\operatorname{tg} \frac{2\pi h}{\lambda} = \operatorname{tg} \left(\frac{18000}{\lambda} \right)^\circ$	1,732	1	0,726	0,577	0,534	0,525	0,481	0,414	0,325
$\frac{Z_{\text{в.}\Gamma}}{2Z_{\text{в.в}}} \operatorname{ctg} \left(\frac{21600}{\lambda} \right)^\circ$	0,117	0,261	0,383	0,496	0,538	0,549	0,601	0,707	0,919

3. Размер l'_Γ эквивалентного вертикального вибратора определяем по формуле

$$\operatorname{ctg} \frac{2\pi l'_\Gamma}{\lambda_0} = \frac{Z_{\text{в.}\Gamma}}{2Z_{\text{в.в}}} \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi \cdot l_\Gamma}{\lambda_0} \right) = 0,36 \operatorname{ctg} \left(\frac{21600}{639} \right)^\circ = 0,538.$$

Отсюда следует, что

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} l'_\Gamma = \operatorname{arcctg} 0,538 = 61,74^\circ, \text{ а } l'_\Gamma = \frac{61,74 \cdot 639}{360} = 109,6 \text{ м.}$$

4. Теперь найдем полную длину эквивалентного вертикального вибратора

$$l_{0e} = h + l'_\Gamma = 50 + 109,6 = 159,6 \text{ м,}$$

индуктивность удлинительной катушки

$$L_{\text{удл}} = \frac{\lambda}{1880} Z_{\text{в.в}} \text{ctg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} l_{0e} \right) = \frac{900 \cdot 550}{1880} \text{ctg} \left(\frac{360^\circ \cdot 159,6}{900} \right) = 541 \text{ мкГн.}$$

3.15. Определить амплитудные значения напряжения и тока в точках A , B , C Г-образной антенны (см. рис. 3.3), имеющей волновое сопротивление $Z_{\text{в.Г}} = 450 \text{ Ом}$, $Z_{\text{в.в}} = 550 \text{ Ом}$, длину горизонтальной части $l_{\text{Г}} = 80 \text{ м}$ и высоту $h = 60 \text{ м}$, если длина волны $\lambda = 720 \text{ м}$ и амплитуда тока в основании антенны $I_{m0} = 10 \text{ А}$.

Решение. 1. Определяем коэффициент фазы

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{360^\circ}{720} = 0,5 \text{ град/м.}$$

2. Размер $l'_{\text{Г}}$ эквивалентного вертикального вибратора определяем по формуле

$$\text{ctg} \beta l'_{\text{Г}} = \frac{Z_{\text{в.Г}}}{Z_{\text{в.в}}} \text{ctg} \beta l_{\text{Г}} = \frac{450}{550} \text{ctg} (0,5 \cdot 80) = 0,976,$$

откуда

$$\beta l'_{\text{Г}} = \text{arcctg} 0,976 = 44,8^\circ,$$

и

$$l'_{\text{Г}} = \frac{44,8}{\beta} = \frac{44,8}{0,5} = 89,6 \text{ м.}$$

Отсюда полная длина эквивалентного вертикального вибратора

$$l_{0e} = h + l'_{\text{Г}} = 60 + 89,6 = 149,6.$$

3. Амплитуда напряжения у основания (в точке A) антенны

$$U_{mA} = Z_{\text{в.в}} I_{m0} \text{ctg} \beta l_{0e} = 550 \cdot 10 \text{ctg} (0,5 \cdot 149,6) = 1495 \text{ В.}$$

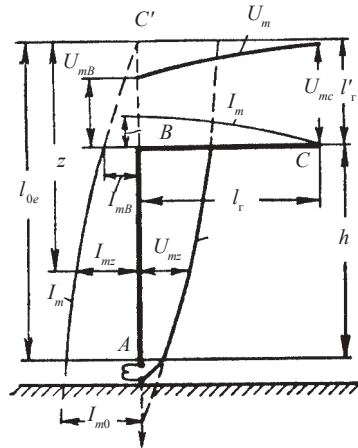


Рис. 3.3

4. Амплитуда напряжения и тока в точке B соединения горизонтального и вертикального проводов

$$U_{m_B} = Z_{в.в} \frac{I_{m0} \cos \beta l'_r}{\sin \beta l_{0e}} = \frac{550 \cdot 10 \cdot \cos(0,5 \cdot 89,6)}{\sin(0,5 \cdot 149,6)} = 4040 \text{ В.}$$

$$I_{m_B} = \frac{I_{m0} \sin \beta l'_r}{\sin \beta l_{0e}} = \frac{10 \sin(44,8)^\circ}{\sin(74,8)^\circ} = \frac{10 \cdot 0,705}{0,965} = 7,3 \text{ А.}$$

5. Амплитуда напряжения в пучности (в точке C)

$$U_{m_C} = \frac{Z_{в.в} I_{m0} \cos \beta l'_r}{\cos \beta l_r \sin \beta l_{0e}} = \frac{550 \cdot 10 \cos(44,8)^\circ}{\cos 40^\circ \sin(74,8)^\circ} = 7430 \text{ В.}$$

3.16. Определить КПД Г-образной антенны с высотой эквивалентного вибратора $l_{0e} = 177,5$ м и высотой антенны $h = 50$ м при наличии удовлетворительного заземления ($A = 3$ Ом), собственной длине волны $\lambda_0 = 639$ м и длине волны $\lambda = 900$ м.

Решение. 1. Определяем действующую высоту антенны по формуле

$$h_d = \frac{2 \sin \left[\beta \left(l_{0e} - \frac{h}{2} \right) \right] \sin \frac{\beta h}{2}}{\beta \sin \beta l_{0e}} =$$

$$= \frac{2 \sin [0,4(177,5 - 25)]^\circ \sin(0,4 \cdot 25)^\circ}{\frac{2\pi}{900} \sin(0,4 \cdot 177,5)^\circ} = \frac{2 \sin 61^\circ \sin 10^\circ}{0,697 \cdot 10^{-2} \sin 71^\circ} = 46,4 \text{ м.}$$

2. Находим сопротивление излучения

$$R_\Sigma = 1600 \left(\frac{h_d}{\lambda} \right)^2 = 1600 \left(\frac{46,4}{800} \right)^2 = 4,3 \text{ Ом.}$$

3. Сопротивление потерь в антенне

$$R_{\Pi} = A \frac{\lambda}{\lambda_0} = 3 \cdot \frac{900}{639} = 4,2 \text{ Ом.}$$

4. КПД антенны

$$\eta_A = \frac{R_{\Sigma}}{R_{\Sigma} + R_{\Pi}} = \frac{4,3}{4,3 + 4,2} \cdot 100\% = 50,6\%.$$

3.17. Описать сложную антенну с вертикальными связанными вибраторами. Как осуществляется питание и настройка таких антенн? Какие преимущества и недостатки имеют они по сравнению с простыми Г- и Т-образными антеннами?

3.18. Обосновать распределение тока в сложной антенне со связанными снижениями (вертикальными вибраторами, рис. 3.1, з). Почему амплитуда тока в точках *A*, *C*, *E*, нулевая и мало изменяется вдоль вертикальных вибраторов, а на участках настройки переменными индуктивностями *L* вовсе не изменяется.

3.19. Собственное сопротивление излучения каждого из трех ($n = 3$) снижений антенны (рис. 3.1, з) $R_{\Sigma 1} = 5$ Ом. Определить полное сопротивление излучения $R_{\Sigma A}$ всей антенны и ее КПД, если полное сопротивление потерь $R_{\Sigma \Pi} = 10$ Ом.

Решение. Снижения рассматриваемой антенны настолько связаны между собой, что собственное сопротивление излучения каждого вибратора и сопротивление, наводимое в нем каждым другим вибратором, можно считать равными. Значит, полное сопротивление излучения одного снижения $R_{\Sigma 1\text{сн}} = nR_{\Sigma 1}$, а всех снижений $nR_{\Sigma 1\text{сн}} = n^2R_{\Sigma 1} = 9 \cdot 5 = 45$ Ом.

Относительная высота антенны h/λ на ДВ и СДВ очень мала, и притом токи в горизонтальных проводах антенны и их зеркальном изображении противоположны по фазе. Следовательно, можно пренебречь излучением горизонтальных проводов и считать, что сопротивление излучения всей антенны

$$R_{\Sigma A} = n^2 R_{\Sigma 1} \text{ Ом,}$$

а КПД антенны

$$\eta_A = \frac{R_{\Sigma A}}{R_{\Sigma A} + R_{\Pi}} \cdot 100\% = \frac{45}{45 + 10} \cdot 100\% = 82\%.$$

Как видно, увеличение числа снижений от одного до трех повысило КПД антенны почти в 2,5 раз.

3.20. Описать устройство средневолновых антенн в виде антенн-башен, антенн-мачт и схем нижнего и шунтового питания.

3.21. Описать схемы верхнего и среднего питания антенн-мачт. Показать цепи тока в этих антеннах.

3.22. Описать антифединговые антенны и отметить их особенности.

3.2. Рамочные антенны

3.23. Описать применение рамочной антенны на СДВ, ДВ и СВ. Как осуществляется электрическая симметрия рамки?

3.24. Рамочная антенна состоит из 30 витков провода, образующих прямоугольную рамку со сторонами $m = 40$ см и $h = 1$ м, принимает радиоволны длиной $\lambda = 400$ м. Определить действующую высоту и сопротивление излучения антенны.

Ответ. $h_d = 0,19$ м; $R_\Sigma = 1,8 \cdot 10^{-4}$ Ом.

3.25. По данным задачи 3.24 определить амплитуду ЭДС, индуктируемой в рамочной антенне, если плоскость рамки совпадает с направлением приема вертикально поляризованных волн, магнитное поле которых имеет амплитуду напряженности $H_m = 10^{-8}$ А/м.

Ответ. $\epsilon_{Am} = 0,72$ мкВ.

3.26. Какой будет амплитуда ЭДС в рамочной антенне (см. задачу 3.25), если плоскость ее расположена относительно направления принимаемой волны под углом $\varphi = 30^\circ$.

Ответ. $\epsilon_{Am} = 0,62$ мкВ.

3.27. Определить сопротивление излучения круглой рамочной антенны, имеющей диаметр 40 см и состоящей из 20 витков провода. Длина волны равна 800 м. Какова амплитуда ЭДС, индуктируемой в рамке, если волна поляризована вертикально и имеет амплитуду напряженности электрического поля 10 мВ/м?

Ответ. $R_\Sigma = 0,36 \cdot 10^{-6}$ Ом; $\epsilon_{Am} = 0,17$ мВ.

3.28. Описать устройство, схему включения и свойства рамочной антенны с магнитодиэлектрическим сердечником.

3.29. Описать схему и принцип работы кардиоидной антенны.

3.30. Какие необходимы дополнения к рамке, чтобы ДН антенны приобрела форму кардиоиды? Обосновать получение ДН формы кардиоиды графическим путем.

3.3. Горизонтальные симметричные вибраторы

3.31. Описать особенности антенн декаметровых (коротких) волн (КВ). Почему коротковолновые КВ-антенны желательно иметь диапозонными? Почему луч КВ-антенны должен иметь определенный

наклон и в ее ДН боковые и задний лепестки должны быть сведены к минимуму?

3.32. Обосновать целесообразность преимущественного применения на КВ горизонтальных, а не вертикальных, вибраторов и систем разнесенных антенн.

3.33. Из каких соображений выбираются длина и высота подвеса симметричного горизонтального вибратора (ВГ)?

3.34. Какую длину должен иметь тонкий ВГ для работы в диапазоне волн $\lambda_{\min} = 20$ м, $\lambda_{\max} = 50$ м?

Решение. Вибратор ВГ при длине l может работать в диапазоне волн $0,8l < \lambda < 4l$ но так как в данном случае требуется меньший коэффициент перекрытия диапазона $\lambda_{\max}/\lambda_{\min} = 50/20 = 2,5$, то можно улучшить согласование вибратора с фидером, установив $l = \lambda_{\min}/1,5 = \lambda_{\max}/3,75 = 13,3$ м.

3.35. Тонкий ВГ имеет длину 15 м. В каком диапазоне волн может работать этот вибратора?

Решение. Вибратор может работать в диапазоне волн

$$\lambda_{\min} = 0,8l = 0,8 \cdot 15 = 12 \text{ м}, \quad \lambda_{\max} = 4l = 4 \cdot 15 = 60 \text{ м}.$$

Более эффективно вибратор работает на волнах $\lambda = (1,5-3,5)l = 22,5-52,5$ м.

3.36. Определить угол наклона луча δ_{\max} и дальность связи D в случае применения ВГ, расположенного на высоте $h = \lambda/2$, при отражении волн от ионизированного слоя, находящегося на высоте $H = 300$ км.

Решение. Угол наклона луча определяется выражением

$$\sin \delta_{\max} = \lambda/4h = 0,5, \text{ откуда } \delta_{\max} = 30^\circ.$$

Дальность связи согласно выражению

$$D = \frac{8Hh\sqrt{1-\lambda^2/16h^2}}{\lambda} = \frac{8 \cdot 300 \cdot \sqrt{1-1/4}}{2} = 1020 \text{ км}.$$

3.37. На какой высоте h должен быть подвешен ВГ, чтобы при отражении электромагнитной волны от ионизированного слоя высотой 350 км и длине волны $\lambda = 40$ м обеспечить связь на расстояние $D = 1000$ км?

Ответ. $h = 17,4$ м.

3.38. Описать схему параллельного питания симметричного вибратора.

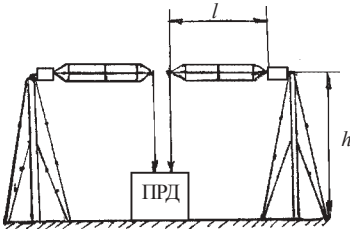


Рис. 3.4

3.39. Описать диполь Надененко (рис. 3.4), его принципиальные особенности и конструктивное выполнение.

3.40. На каком расстоянии x от середины ВГ, волновое сопротивление которого равно 570 Ом , следует включить концы двухпроводного фидера, имеющего волновое сопротивление 600 Ом , если согласование вибратора с фидером про-

изводится по схеме параллельного питания на волне $\lambda = 30 \text{ м}$?

Ответ. $x = 0,06\lambda = 1,8 \text{ м}$.

3.41. Какое должно быть установлено соотношение между радиусом вибратора и длиной волны, чтобы волновое сопротивление вибратора было равно 300 Ом ?

Решение. Волновое сопротивление вибратора рассчитывается по формуле $Z_{вА} = 276 \lg(\lambda/\pi r) - 120$.

Учитывая, что $Z_{вА} = 300 \text{ Ом}$, получим $\lg(\lambda/\pi r) = 420/276 = 1,52$; $\lambda/\pi r = 33,1$; $r/\lambda = 1/\pi \cdot 33,1 = 0,96 \cdot 10^{-2}$.

Значит, диаметр вибратора $2r$ должен составлять примерно $0,02$ от длины волны λ . Например, при $\lambda = 60 \text{ м}$ диаметр $2r = 0,02 \cdot 60 = 1,2 \text{ м}$. Такие толстые вибраторы используются для работы в широком диапазоне волн. Диполь Надененко, например, изготавливается не сплошным, а в виде параллельных проводов, расположенных по образующим цилиндра большого диаметра.

3.42. Имеется диполь Надененко ВГД $\frac{20}{15} 2$, стороны которого образованы восемью проводами диаметром $2r' = 3 \text{ мм}$. Определить волновое сопротивление диполя.

Решение. 1. Расшифровываем обозначение диполя ВГД $\frac{20}{15} 2$: вибратор горизонтальный диапазонный с длиной одного плеча $l = 20 \text{ м}$, со средней высотой подвеса над землей $h = 15 \text{ м}$ и диаметром вибратора $2r = 2 \text{ м}$.

2. Находим эквивалентный радиус диполя Надененко (r_3 – это радиус сплошного вибратора, имеющего такое же волновое сопротивление $Z_{вА}$, как диполь Надененко). Расчет r_3 производится по формуле

$$r_3 = r^n \sqrt{\frac{nr'}{r}} = 1 \cdot 8 \sqrt{\frac{8 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{1}} = 0,58,$$

где n – число проводов в цилиндре, принято равным восьми; r' – радиус проводов, расположенных по образующим цилиндров диполя; r – радиус цилиндрической поверхности вибратора.

3. Волновое сопротивление диполя

$$Z_{вА} = 276 \lg(\lambda/\pi r) - 120 = 276 \lg(40/2 \cdot 0,58) = 304,3 \text{ Ом.}$$

3.43. Диполь Надененко длиной 30 м изготовлен из шести проводов радиусом 1,5 мм, расположенных по образующим цилиндра радиусом 0,75 м. Каково волновое сопротивление диполя?

Ответ. $Z_{вА} = 287 \text{ Ом.}$

3.4. Синфазная горизонтальная антенна

3.44. Описать схему и конструкцию синфазной горизонтальной (СГ) антенны.

3.45. Перечислить и обосновать основные электрические показатели СГ-антенн. Как производится согласование антенны с фидерами?

3.46. Какого порядка рабочий диапазон СГ-антенн? Чем объясняется узкая полоса СГ-антенн?

3.47. Определить среднее значение сопротивления излучения $R_{\Sigma 1}$, приходящегося на один вибратор антенны СГ $\frac{2}{4} P$, если $R_{\Sigma А} = 1117 \text{ Ом.}$

Почему каждое из этих сопротивлений больше, чем для одиночного вибратора?

Решение. Для антенны СГ $\frac{n}{p} P$, где n – число этажей, p – число вибраторов в этаже, а P – указывает на наличие рефлектора в этаже, среднее значение сопротивления излучения одного вибратора $R_{\Sigma 1}$ в np раз меньше сопротивления излучения всей антенны $R_{\Sigma А}$. В данном случае (СГ $\frac{2}{4} P$, $R_{\Sigma А} = 1117 \text{ Ом}$) имеем

$$R_{\Sigma 1} = R_{\Sigma А} / np = 1117 / 2 \cdot 4 = 139 \text{ Ом.}$$

Поскольку питание антенн СГ производится в пучности напряжения вибратора, то можно рассматривать эту антенну как совокупность волновых вибраторов, каждый из которых образован двумя полуволновыми

ми вибраторами одного этажа с общей линией питания. Одиночный волновой вибратор имеет $R_{\Sigma\Pi} = 200 \text{ Ом}$, т.е. меньше, чем приходится на один волновой вибратор данной антенны ($2R_{\Sigma\Pi} = 2 \cdot 139 = 278 \text{ Ом}$). Причина этого – внесение сопротивления в каждый вибратор рефлектором, другими вибраторами, собственно антенны и землей.

3.48. Определить входное сопротивление антенн $\text{СГ} \frac{2}{4} \text{P}$ ($R_{\Sigma\text{А}} = 1117 \text{ Ом}$)

и $\text{СГ} \frac{2}{8} \text{P}$ ($R_{\Sigma\text{А}} = 2300 \text{ Ом}$), полагая, что волновое сопротивление одного вибратора $Z_{\text{вА}} = 1000 \text{ Ом}$.

Ответ. $R_{\text{вх}} = 895 \text{ Ом}$ для $\text{СГ} \frac{2}{4} \text{P}$; $R_{\text{вх}} = 435 \text{ Ом}$ для $\text{СГ} \frac{2}{8} \text{P}$.

3.49. Рассчитать коэффициент стоячей волны (КСВ) на всех участках фидеров, питающих антенну $\text{СГ} \frac{4}{8} \text{P}$ (рис. 3.5), при условии, что волновое сопротивление фидера $Z_{\text{в.ф}} = 600 \text{ Ом}$, а волновое сопротивление вибраторов $Z_{\text{вА}} = 1000 \text{ Ом}$. Сопротивление излучения всей антенны $R_{\Sigma\text{А}} = 4359 \text{ Ом}$.

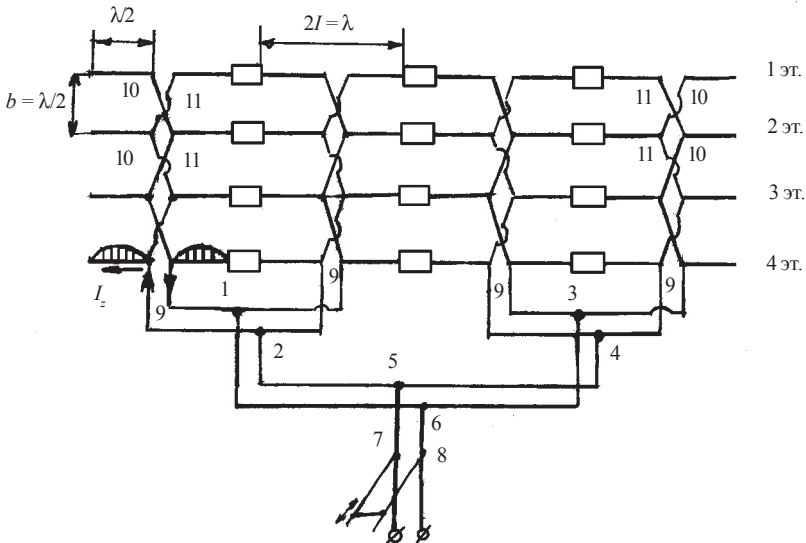


Рис. 3.5

Решение. На уровне верхнего первого этажа (1 эт.) входное сопротивление волнового вибратора, подключенного к линии питания одной секции 9, равно

$$R_{\text{вх1}} = \frac{Z_{\text{вА}}^2}{R_{\Sigma\Pi}} = \frac{1000^2 \left(\frac{np}{2} \right)}{R_{\Sigma\Lambda}} = \frac{10^6 \cdot 16}{4359} = 3680 \text{ Ом},$$

где $R_{\Sigma\text{пуч}} = R_{\Sigma\Lambda} / \left(\frac{np}{2} \right)$ – сопротивление излучения, отнесенное к пучности тока одного волнового вибратора.

Ниже этажом (2 эт.) входное сопротивление $R_{\text{вх2}} = \frac{R_{\text{вх1}}}{2} = 1840 \text{ Ом}$.

Еще ниже этажом (3 эт.) входное сопротивление $R_{\text{вх3}} = \frac{R_{\text{вх1}}}{3} = 1227 \text{ Ом}$.

На нижнем этаже (4 эт.) антенны входное сопротивление $R_{\text{вх4}} = \frac{R_{\text{вх1}}}{4} = 920 \text{ Ом}$.

К точкам 1–2 подключаются параллельно две секции, а потому входное сопротивление на них $R_{1-2} = \frac{R_{\text{вх4}}}{2} = 460 \text{ Ом}$.

К точкам 5–6 подключаются параллельно два равных сопротивления $R_{\text{вх1-2}}$ и $R_{\text{вх3-4}}$, следовательно, $R_{\text{вх5-6}} = \frac{R_{\text{вх1-2}}}{2} = 280 \text{ Ом}$.

Теперь определяем коэффициенты стоячих волн на участках фидеров между 1-м и 2-м этажами, 2-м и 3-м этажами и т. д.

$$k_{\text{с.в1-2}} = \frac{R_{\text{вх1}}}{Z_{\text{в.ф}}} = \frac{3680}{600} = 6,1;$$

$$k_{\text{с.в2-3}} = \frac{R_{\text{вх2}}}{Z_{\text{в.ф}}} = \frac{1840}{600} = 3,1; \quad k_{\text{с.в3-4}} = \frac{R_{\text{вх3}}}{Z_{\text{в.ф}}} = \frac{1227}{600} = 2,1;$$

$$k_{c.в4-(1-2)} = \frac{R_{вх4}}{Z_{в.ф}} = \frac{920}{600} = 1,5; \quad k_{c.в(1-2)-(5-6)} = \frac{Z_{в.ф}}{R_{вх(1-2)}} = \frac{600}{460} = 1,3;$$

$$k_{c.в(7-8)-(5-6)} = \frac{Z_{в.ф}}{R_{вх(5-6)}} = \frac{600}{280} = 2,1.$$

3.50. Определить КСВ на всех участках фидеров, питающих антенну СГ $\frac{2}{4}$ Р ($R_{\Sigma A} = 1117$ Ом), при условии, что волновое сопротивление фидера $Z_{в.ф} = 600$ Ом, а волновое сопротивление вибраторов $Z_{в.а} = 1000$ Ом.

Ответ. Коэффициент стоячей волны в фидере, начиная от верхнего этажа и кончая главным фидером, принимает значения 6; 3; 1,5; 1,6.

3.51. Мощность, излучаемая антенной СГ $\frac{2}{4}$ Р, равна 10 кВт. Определить амплитуды токов и напряжений вибраторов в пучностях, полагая, что волновое сопротивление вибратора равно 1000 Ом.

Решение. 1. Определяем среднюю мощность, излучаемую одним вибратором:

$$P_{\Sigma 1} = \frac{P_{\Sigma A}}{mn} = \frac{10}{4 \cdot 2} = 1,25 \text{ кВт.}$$

2. Среднее значение сопротивления излучения одного вибратора

$$R_{\Sigma 1} = \frac{R_{\Sigma A}}{mn} = \frac{1117}{8} = 139 \text{ Ом.}$$

3. Амплитуда тока вибратора в пучности

$$U_{m_{пуч}} = I_{m_{пуч}} Z_{вА} = 4,3 \cdot 10^3 = 4300 \text{ В} = 4,3 \text{ кВ.}$$

3.52. Амплитуда напряжения в пучности одного вибратора антенны СГ $\frac{4}{8}$ Р равна 2 кВ. Определить мощность, излучаемую антенной, полагая, что волновое сопротивление вибратора 1000 Ом. Сопротивление излучения антенны $R_{\Sigma A} = 4359$ Ом.

Ответ. $P_{\Sigma A} = 8,7$ кВт.

3.53. Описать синфазную диапазонную антенну. Какие средства применяются для расширения диапазона частот синфазных вибраторных антенн?

3.5. Ромбические антенны

3.54. Описать схему простой ромбической антенны.

3.55. Описать излучение провода с бегущей волной тока. Написать функцию направленности провода и отметить особенности ДН, выражаемой этой функцией.

3.56. Почему провод, обтекаемый бегущей волной тока, создает однопольное излучение, а провод со стоячей волной тока излучает и в обратном направлении?

3.57. Из каких соображений выбираются режим работы антенны и взаимное расположение проводов в ней?

3.58. Описать конструктивное выполнение простой ромбической антенны.

3.59. Расшифровать следующие обозначения: РГ $\frac{65}{4}1$; РГ $\frac{57}{1,7}0,5$; РГД $\frac{70}{6}1,25$.

3.60. Определить оптимальные углы ромба при длине каждой стороны его $l = 2\lambda; 3\lambda; 4\lambda; 5\lambda; 6\lambda; 8\lambda; 10\lambda$.

Решение. Максимум излучения провода, обтекаемого бегущей волной тока, направлен под углом, косинус которого $\cos \varphi_{\max} = 1 - \frac{\lambda}{2l}$. Острый угол ромба равен $2\varphi_{\max}$, а тупой угол $2\gamma = 180^\circ - 2\varphi_{\max}$.

Таблица 3.2

Длина провода	2λ	3λ	4λ	5λ	6λ	8λ	10λ
φ_{\max}°	41,4	33,5	28,9	25,8	23,6	20,6	18,2
Острый угол $2\varphi_{\max}^\circ$	82,8	67	57,8	51,6	47,2	41,2	36,4
Тупой угол ромба $2\gamma^\circ = 180^\circ - 2\varphi_{\max}^\circ$	97,2	113	122,2	128,4	132,8	138,8	143,6

Как видно из расчета при изменении длины волны $l > 4\lambda$ получается весьма незначительное изменение углов ромба, что сохраняет неизмен-

ным направление максимального излучения и приема, которое совпадает с главной диагональю ромба. В этом одна из причин хороших диапозонных свойств ромбической антенны. Заметим, что если учесть затухание волн в проводе, то углы φ_{\max} окажутся несколько меньше, а углы γ – соответственно больше.

3.61. Определить высоту h ромбической антенны в длинах волн при оптимальном угле наклона луча $\delta = 15^\circ$.

Ответ. $h \approx \lambda_0$.

3.62. Выбрать стандартную ромбическую антенну для связи на расстоянии 2000 км.

Решение. Сначала определяем высоту антенны. Так как при связи более чем на 1500 км оптимальный угол наклона луча к земной поверхности равен $\delta_{\text{опт}} = 15^\circ$, то $h = \lambda_0$ (см. задачу 3.61).

Затем находим длину провода ромба l . Чем больше эта длина, тем меньше сказывается изменение длины волны на направлении максимального излучения антенны и тем уже главный лепесток ДН. Вместе с тем уменьшается угол наклона луча в вертикальной плоскости, поскольку каждый провод ромба служит осью, относительно которой ориентируется ДН всей антенны. Поэтому имеется определенная зависимость между наиболее выгодными значениями угла наклона луча в вертикальной плоскости $\delta_{\text{опт}}$ и половиной тупого угла ромба γ , а именно $\gamma = 90^\circ - \delta_{\text{опт}} = 90 - 15 = 75^\circ$.

Этому углу согласно табл. 3.2 соответствует длина $l > 10\lambda_0$. Если учесть затухание в проводе, то углу $\gamma = 75^\circ$ соответствует длина провода $l = 7,5\lambda_0$, но при такой величине l антенна окажется чрезмерно громоздкой. Поэтому предпочитают устанавливать длину $l = 4\lambda_0$, которой соответствует угол $\gamma = 65^\circ$. Итак, в данном случае целесообразно

использовать антенну $P \frac{65}{4} 1$ с параметрами ($\gamma = 65^\circ$, $l = 4\lambda_0$, $h = \lambda_0$).

3.63. Определить высоту h ромбической антенны в длинах волн при оптимальном угле наклона луча $\delta = 15^\circ$.

Ответ. $h \approx \lambda_0$.

3.64. Определить высоту h ромбической антенны в длинах волн при оптимальном угле наклона луча $\delta = 30^\circ$

Ответ. $h \approx 0,5\lambda_0$.

3.65. Описать двойную ромбическую антенну и отметить преимущества ее перед простой ромбической антенной.

3.6. Антенна бегущей волны

3.66. Описать конструкцию и обозначение КВ-антенны бегущей волны.

3.67. Описать принцип действия антенны бегущей волны (АБВ).

3.68. Описать влияние элементов связи на характеристики АБВ.

3.69. Составить функцию направленности АБВ. Нарисовать ДН АБВ в горизонтальной и вертикальной плоскости.

3.70. С какой целью применяют параллельное соединение полотен в АБВ? Привести пример типовой сдвоенной АБВ.

3.71. Определить фазовую скорость V_{ϕ} , которую целесообразно установить в линии АБВ, имеющей длину 91,2 м и работающей в диапазоне волн $\lambda = 14\text{--}25$ м.

Решение. Коэффициент замедления волны, при котором получается максимальный коэффициент усиления антенны, определяется по формуле

$$\xi_{\text{опт}} = 1 + \frac{\lambda}{2l_A} = 1 + \frac{14}{2 \cdot 91,2} = 1,08.$$

Подставляем в эту формулу $l_A = 91,2$ м и $\lambda = \lambda_{\min} = 14$ м (наибольшее замедление получается при минимальной длине волны). Этому соответствует фазовая скорость в линии

$$V_{\phi} = \frac{C}{\xi_{\text{опт}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,08} = 2,778 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

3.72. При какой фазовой скорости в собирательной линии АБВ имеет максимальный коэффициент усиления, если длина собирательной линии равна 100 м, а длина волны 25 м?

Ответ. $V_{\phi} = 2,667 \cdot 10^8$ м/с.

3.73. Рассчитать фазовую скорость волн в собирательной линии антенны бегущей волны $B \frac{39}{4} \cdot \frac{4}{2,4} 16$ полагая, что волновое сопротивление линии при отключенных вибраторах равно 600 Ом.

Решение. Погонная емкость собирательной линии антенны (без вибраторов) определяется исходя из того, что волновое сопротивление этой линии $Z_{\text{в.л}} = 600$ Ом, а скорость распространения волн в ней $C = 3 \cdot 10^8$ м/с:

$$Z_{\text{в.л}} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}; \quad C = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}},$$

откуда

$$C_1 = \frac{1}{CZ_{в.л}} = \frac{1}{3 \cdot 10^8 \cdot 600} = 5,111 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

За счет конденсаторов связи, емкость которых согласно наименованию антенны равна $C_{\kappa} = 4,4 \text{ пФ}$, погонная емкость собирательной линии увеличивается. Поскольку через участок линии, равный $2,4 \text{ м}$, эти конденсаторы соединяются попарно последовательно, то дополнительная погонная емкость

$$\frac{C_{\kappa}}{2l} = \frac{4,4 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 2,4} = 0,9188 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Если пренебречь шунтирующим действием вибраторов, то фазовая скорость в линии выразится формулой

$$V_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{L_1 \left(C_1 + \frac{C_{\kappa}}{2l} \right)}},$$

а коэффициент замедления волн в линии

$$\xi = \frac{C}{V_{\phi}} = \frac{\sqrt{L_1 \left(C_1 + \frac{C_{\kappa}}{2l} \right)}}{\sqrt{L_1 C_1}} = \sqrt{\frac{C_1 + \frac{C_{\kappa}}{2l}}{C_1}} = \sqrt{\frac{5,1111 + 0,9188}{5,1111}} = 1,098.$$

Фазовая скорость волн в линии антенны

$$V_{\phi} = \frac{C}{\xi} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,098} = 2,7322 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

3.74. Рассчитать коэффициент замедления и фазовую скорость волн

в собирательной линии антенны $B \frac{24}{8} \cdot \frac{15}{3,96} 16$ полагая, что волновое сопротивление линии без шунтирующих элементов равно 600 Ом .

Ответ. $\xi = 1,168$; $V_{\phi} = 2,525 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

3.7. Согласование фидера с нагрузкой

3.75. В чем физический смысл согласования сопротивлений при помощи четвертьволнового трансформатора? Почему трансформатор с обоих концов должен подключаться к сечениям с активным входным сопротивлением?

3.76. Определить волновое сопротивление четвертьволнового трансформатора $Z_{B,C}$, согласующего отрезки двухпроводных линий с волновыми сопротивлениями $Z_{B1} = 400$ Ом и $Z_{B2} = 600$ Ом (рис. 3.6). Вычислить также амплитуды напряжения U_{m2} и токов I_{m1} , I_{m2} на концах трансформатора, если известно, что амплитуда напряжения на первой линии $U_{m1} = 100$ В.

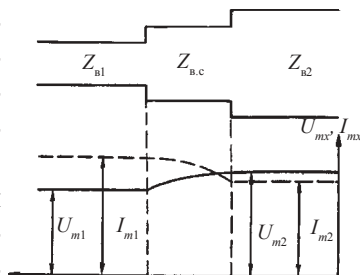


Рис. 3.6

Ответ. $Z_{B,C} = 491$ Ом; $U_{m2} = 125$ В; $I_{m2} = 0,2$ А; $I_{m1} = 0,25$ А.

3.77. Определить волновые сопротивления $Z'_{B,C}$, $Z''_{B,C}$ двух четвертьволновых отрезков, образующих широкополосный трансформатор для согласования коаксиальных линий с волновыми сопротивлениями $Z_{B1} = 50$ Ом и $Z_{B2} = 75$ Ом.

Решение. Волновые сопротивления $Z'_{B,C}$, $Z''_{B,C}$ двух трансформаторов длиной $\lambda_0/4$ каждый, которые обеспечивают широкополосное согласование сопротивлений Z_{B1} и Z_{B2} :

$$Z'_{B,C} = \sqrt{Z_{B1} \sqrt{Z_{B1} Z_{B2}}} = \sqrt{50 \sqrt{50 \cdot 75}} = 55,5 \text{ Ом};$$

$$Z''_{B,C} = \sqrt{Z_{B2} \sqrt{Z_{B1} Z_{B2}}} = \sqrt{75 \sqrt{50 \cdot 75}} = 67,6 \text{ Ом}.$$

3.78. Широкополосный трансформатор состоит из двух четвертьволновых отрезков с волновыми сопротивлениями $Z'_{B,C} = 52$ Ом и $Z''_{B,C} = 65$ Ом. Чему равны волновые сопротивления линий?

Ответ. $Z_{B1} = 46,7$ Ом; $Z_{B2} = 71,8$ Ом.

3.79. Рассчитать экспоненциальный фидерный трансформатор, предназначенный для согласования антенны с активным входным сопротивлением 600 Ом и фидера с волновым сопротивлением 300 Ом. Фидер выполнен из двух медных проводов диаметром $2r = 3$ мм. Допустимый КСВ равен 1,1 на волне $\lambda_{max} = 80$ м.

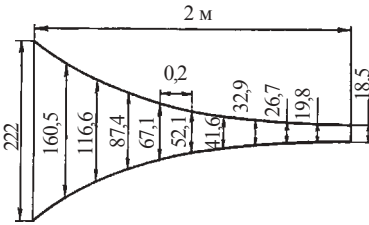
Решение. 1. Определяем коэффициент b , характеризующий степень изменения параметров трансформатора

$$|b| = \frac{8\pi}{\lambda_{\max}} k_{c.в} = \frac{8\pi}{80} 1,1 = 0,345 \frac{1}{\text{м}}$$

2. Определяем длину трансформатора

$$l = \frac{2,3}{b} \lg \frac{Z_{в2}}{Z_{в1}} = \frac{2,3}{0,345} \lg \frac{600}{300} = 2 \text{ м.}$$

3. Определяем волновые сопротивления $Z_{в}$ и расстояния между проводами a_x в различных сечениях трансформатора ($x = 0, 2, 4, \dots, 20$ м). При этом имеем в виду, что крайние значения волновых сопротивлений равны 600 и 300 Ом и для воздушной двухпроводной линии, являющейся к тому же экспоненциальным трансформатором, справедливы равенства:



$$Z_{вх} = 276 \lg \frac{a_x}{r_1}; \quad Z_{вх} = Z_{в2} e^{-bx}$$

Рис. 3.7

Результаты расчета приведены в табл. 3.3 и иллюстрируются рис. 3.7.

Таблица 3.3

x , мм	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
bx	0	0,138	0,276	0,414	0,552	0,690
e^{-bx}	1	0,871	0,759	0,661	0,576	0,500
$Z_{вх}$	600	522,7	455,3	396,6	345,7	300
$\lg(a_x/r_1)$	2,17	1,89	1,65	1,44	1,25	1,086
(a_x/r_1)	148	77,7	44,7	27,7	17,8	12,3
a_x , мм	222	116,6	67,1	41,6	26,7	18,5

3.80. Докажите, что в любой линии, замкнутой на комплексное или активное сопротивление, не равное волновому, имеется в пределах любого участка длиной $\lambda/4$ такое сечение, в котором активная составляющая эквивалентного сопротивления равна волновому сопротивлению линии. Почему в это сечение включается согласующий шлейф и в чем проявляется его действие?

3.81. Определить место включения и длину шлейфа для согласования двухпроводного фидера с нагрузкой, если при помощи измерительной линии установлено, что в отсутствие шлейфа КСВ равен 4 и расстояние от нагрузки до ближайшего минимума напряжения равно $0,19\lambda$.

Решение. Для решения воспользуемся круговой диаграммой проводимостей (сопротивлений) Вольперта–Смита.

1. От нижней точки окружности постоянного КСВ ($k_{с.в} = 4$) на диаграмме проводимостей (рис. 3.8) совершаем поворот против часовой стрелки (к нагрузке) на $0,19\lambda$ и проводим прямую ab , соединяющую центр диаграммы с меткой $0,25+0,19 = 0,44 \lambda$ на шкале δ . Затем, находим нормированную проводимость нагрузки по точке b пересечения линии ab с окружностью постоянного КСВ, равного 4:

$$y_2 = 0,284 + j0,374.$$

2. Определяем расстояние l_1 от нагрузки до сечения линии с входной нормированной проводимостью, равной волновой ($g = 1$). Так как на данном участке линии $k_{с.в} = 4$, то для этого проводим прямые линии ab' и av' через точки пересечения z и e окружности постоянного $k_{с.в} = 4$ и окружность нормированной активной постоянной проводимости $g = 1$.

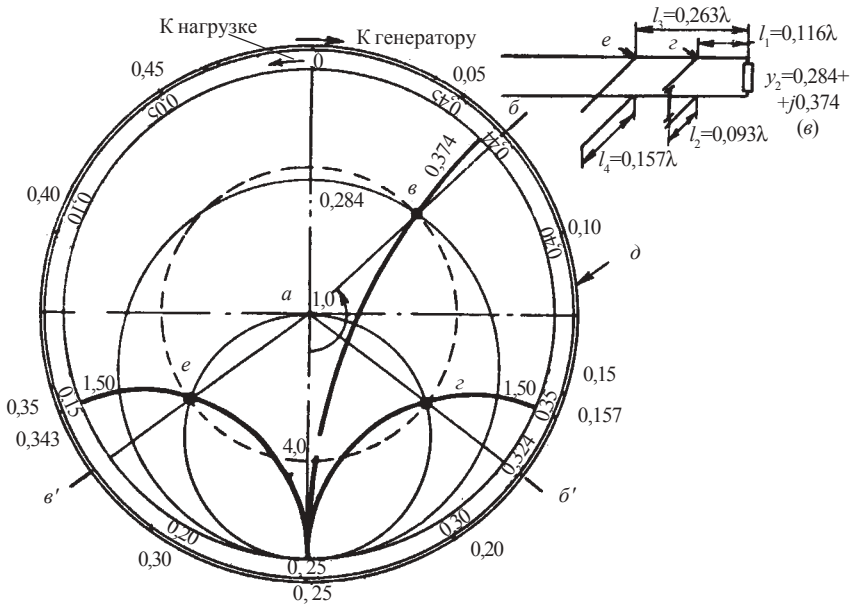


Рис. 3.8

Наличие двух точек пересечения подтверждает возможность согласования при двух различных положениях шлейфа. Линия ab' пересекает шкалу δ в положении $0,324\lambda$, а линия av' – в положении $0,177\lambda$. Следовательно, в первом случае расстояние $l_1 = 0,44 - 0,324 = 0,116\lambda$; во втором случае $l_1 = 0,44 - 0,177 = 0,263\lambda$.

3. Определяем нормированную реактивную составляющую входной проводимости линии в месте подключения шлейфа.

Согласно положению точек z и e на круговой диаграмме эта проводимость в первом случае $b_{\text{вх}} = 1,5$, а во втором случае $b_{\text{вх}} = -1,5$. Следовательно, в первом случае проводимость шлейфа должна быть индуктивной ($b_{\text{шл}} = -1,5$), а во втором случае – емкостной ($b_{\text{шл}} = 1,5$). Это значит, что

при длине шлейфа $l_2 < \frac{\lambda}{4}$ первый шлейф является короткозамкнутым, а второй – разомкнутым. Для определения длины короткозамкнутого шлейфа l_2 совершаем поворот вдоль внешней окружности диаграммы от ее нижней точки ($b = \infty$) по часовой стрелке (к генератору) до получения $b_{\text{шл}} = -1,5$. При этом линия вращения пересекает шкалу δ на метке $0,343\lambda$. Следовательно, длина шлейфа $l_2 = 0,343 - 0,25 = 0,093\lambda$. Во втором случае поворот начинают с верхней точки диаграммы ($b = 0$) в направлении по часовой стрелке до пересечения с кривой постоянной реактивной проводимости $b = 1,5$. Эта точка соответствует длине разомкнутого шлейфа $l_2 = 1,157\lambda$.

3.82. Определить место включения и длину короткозамкнутого шлейфа для согласования коаксиального фидера с его нагрузкой, имеющей комплексное сопротивление $Z_2 = (100 + j60)$ Ом. Волновое сопротивление фидера 50 Ом; на максимальной длине волны рабочего диапазона 40 м допустимый КСВ равен 1,05.

Ответ. Расстояние $l_1 = 0,205\lambda$, длина шлейфа $l_2 = 0,115\lambda$.

3.83. Определить входную проводимость металлического изолятора, изображенного на рис. 3.9, при длине волны $\lambda = 15\lambda_0$ и волновых сопротивлениях $Z_{\text{в1}} = 100$ Ом, $Z_{\text{в2}} = 82$ Ом.

Решение. 1. Определяем размер l изолятора:

$$l = 0,25\lambda_0 = \frac{0,25\lambda}{1,15} = 0,2175\lambda.$$

2. Проводимость основной линии с волновым сопротивлением $Z_{\text{в1}} = 100$ Ом, отнесенная к волновой проводимости металлического изолятора ($1/Z_{\text{в2}} = 1/82$) 1/Ом, равна $y_{\text{де}} = g_{\text{де}} = 0,0182 = 0,82$.

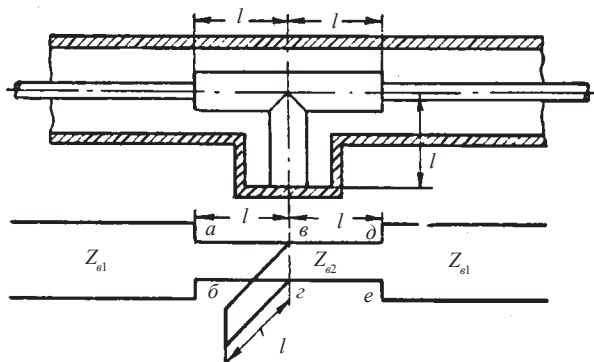


Рис. 3.9

Эта нормированная проводимость отражена на круговой диаграмме (рис. 3.10) точкой А и соответствует нагрузке на диапазонный изолятор в сечении de .

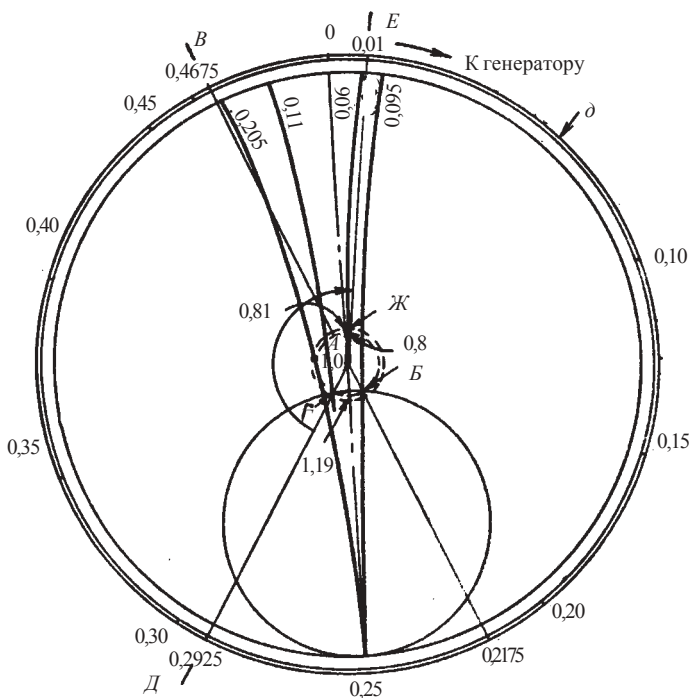


Рис. 3.10

3. Определяем нормированную проводимость в сечении $вz$ со стороны линии $в - \partial, z - e$. Для этого совершаем поворот по часовой стрелке от А до Б вдоль линии постоянного коэффициента бегущей волны (КБВ) $k_{б.в}$, равного 0,82 на угол, соответствующий $0,2175\lambda$. В точке Б $y'_{вz} = 1,19 + j0,095$.

4. Определяем нормированную проводимость, вносимую короткозамкнутым шлейфом в сечение $вz$. Для этого совершаем поворот по часовой стрелке вдоль внешней окружности диаграммы на $0,2175\lambda$ ($0,2500 + +0,2175 = 0,4675\lambda$) от нижней точки ($y = \infty$) до точки В. В этой точке $y''_{вz} = -j0,205$.

5. Суммарная нормированная проводимость в сечении $вz$ (точка Г на диаграмме)

$$y_{вz} = y'_{вz} + y''_{вz} = 1,19 + j0,095 - j0,205 = 1,19 - j0,11$$

определяет нагрузку на линию $a - в, б - z$. В точке Г коэффициент бегущей волны $k_{б.в} = 0,81$. Линия, проходящая через центр диаграммы и точку Г, пересекает шкалу ∂ в положении $0,2925\lambda$ (точка Д).

6. Определяем нормированную проводимость в сечении $аб$ со стороны диапазонного изолятора.

Для этого совершаем поворот линии 1–Д по часовой стрелке $0,2175\lambda$ ($0,2925 + 0,2175 = 0,51\lambda$ или $0,01\lambda$).

В новом положении линия 1–Е пересекает окружность КБВ, равного 0,81 в точке Ж, где $y_{аб} = 0,081 + j0,06$.

Полная проводимость в сечении $аб$ будет

$$Y_{аб} = y_{аб} \frac{1}{Z_{в2}} = \frac{0,81 + j0,06}{82} = (0,00989 + j0,000732) \text{ 1/Ом,}$$

т. е. весьма близкой к проводимости основной линии, что и требовалось доказать.

Библиографический список

1. Айзенберг Г. З. Антенны для магистральных радиосвязей. М.: Связь, 1948.
2. Береговые антенно-фидерные устройства. М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1958.
3. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высш. шк., 1972.