## с пгути

#### ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

#### ФГБОУВПО «ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»

#### В.П. КУБАНОВ

# ЛИНЕЙНЫЕ СИММЕТРИЧНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВИБРАТОРЫ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Рекомендовано методическим советом ФГБОУВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по специальности «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» и по направлению «Инфокоммуникационные технологии систем связи».

#### Рецензент:

декан факультета заочного обучения, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Основы конструирования и технологии радиотехнических систем» ГОУВПО ПГУТИ **О.В. Осипов** 

#### Учебное пособие

#### Кубанов В.П.

Линейные симметричные электрические вибраторы в свободном пространстве. — Самара: ПГУТИ, 2011. – 52 с., ил.

Излагаются основные сведения по инженерным методам расчета основных параметров одиночных и связанных линейных симметричных электрических вибраторов в свободном пространстве. Изложение материала сопровождается примерами и результатами расчета параметров разными методами, включая строгий, реализуемый компьютерной программой ММАNA.

Приводятся условия ряда задач для самостоятельного решения. Все задачи, как правило, с ответами. В качестве примера приводится подробное решение пяти типовых задач.

Формулируются вопросы для самоконтроля качества усвоения материала.

#### СОДЕРЖАНИЕ

	ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1.	ЛИНЕЙНЫЙ СИММЕТРИЧНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВИБРАТОР В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ	5
	1.1. Определение	5 5
	1.2. Распределение тока вдоль длины вибратора	3 11
	1.4. Нормированная амплитудная характеристика направленно-	
	сти в случае произвольной ориентации вибратора	15
	1.5. Коэффициент направленного действия	16
	1.6. Мощность излучения и сопротивление излучения	17
	1.7. Входное сопротивление	18
2.	ИЗЛУЧЕНИЕ ДВУХ ЛИНЕЙНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВИБРАТОРОВ	22
	2.1. Направленные свойства системы из двух связанных вибраторов в $E$ – плоскости	22
	$2.\overline{2}$ . Направленные свойства системы из двух связанных вибраторов в $H$ – плоскости	26
	2.3. Входное сопротивление связанных вибраторов	29
	2.4. Система из первичного и вторичного излучателей	32
3.	ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ	36
4.	ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	50
	ЛИТЕРАТУРА	51

#### ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие «Линейные симметричные электрические вибраторы в свободном пространстве» написано для студентов специальностей «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», а также студентов направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (профиль «Сети и системы радиосвязи»). В учебных планах этих специальностей имеются дисциплины, связанные с изучением электромагнитных полей и волн, антенно-фидерных устройств.

Изучение линейного симметричного электрического вибратора представляет большой интерес, так как, во-первых, этот вибратор успешно применяется более восьмидесяти лет как самостоятельная антенна и, во-вторых, он является составным элементом ряда более сложных антенн различных частотных диапазонов волн.

Ученое пособие можно разделить на три части. В первой части (разделы 1 и 2) излагаются основные сведения об излучении в свободном пространстве одиночного линейного симметричного электрического вибратора и системы из двух линейных симметричных электрических вибраторов.

Во второй части (раздел 3) приводятся условия ряда задач для самостоятельного решения. Для всех задач, как правило, приведены ответы. Пять типовых задач полностью решены, что во многом облегчит решение других задач раздела.

Наконец, в третьей части дается материал для самоконтроля качества усвоения темы. Самостоятельная подготовка ответов на вопросы поможет подготовиться к промежуточной аттестации (зачеты, экзамены), проводимой как в традиционной форме, так и форме тестирования.

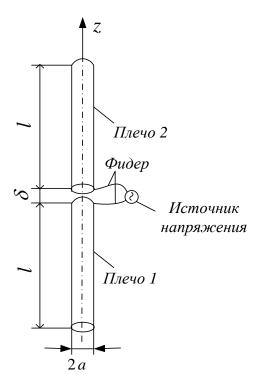
Учебное пособие может быть использовано при подготовке обучающихся по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (профиль «Сети и системы радиосвязи») и по специальности «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», а также бакалавров и специалистов радиотехнических направлений и специальностей. Содержание пособия направлено на формирование необходимых профессиональных компетенций в сферах деятельности: сервисно-эксплуатационной, расчетно-проектной и экспериментально-исследовательской.

### 1. ЛИНЕЙНЫЙ СИММЕТРИЧНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВИБРАТОР В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

#### 1.1. Определение

Вибратором, в соответствии с регламентированными терминами и определениями радиосвязи [1], называется первичный или вторичный излучатель, выполненный из прямых провода или трубы, или совокупности проводов или труб. Симметричный вибратор — это вибратор в виде двух симметрично расположенных в одной плоскости проводников одинаковой длины и формы, к смежным концам которых подводится фидер. В том случае, когда оси проводников симметричного вибратора располагаются на одной прямой, он называется линейным.

На рис. 1.1 изображен линейный симметричный электрический вибратор, представляющий собой тонкий цилиндрический проводник радиусом a, расположенный в свободном воздушном пространстве.



Длина каждого плеча обозначена через l, ширина зазора, к которому подключается фидер — через  $\delta$ . Поскольку обычно  $\delta \ll l$ , то значение 2l можно считать общей длиной вибратора.

Изучение линейного симметричного электрического вибратора представляет большой интерес, так как, во-первых, этот вибратор успешно применяется более восьмидесяти лет как самостоятельная антенна и, вовторых, он является составным элементом ряда сложных антенн различных частотных диапазонов волн.

Результаты теории линейного симметричного электрического вибратора изложены во многих учебниках, учебных пособиях, научных статьях и монографиях, например, в [2,3].

Рис. 1.1

#### 1.2. Распределение тока по длине вибратора

Под воздействием гармонического напряжения, приложенного к зазору на входе вибратора, в его плечах возникают электрические токи, создающие в окружающем пространстве электромагнитное поле. В отличие от элементарно-

го электрического излучателя, где распределение тока вдоль излучателя считается равномерным, для линейного симметричного вибратора закон распределения тока должен быть найден путем решения внутренней задачи теории антенн. Строгое решение этой задачи [3] справедливое как для дальней, так и для ближней зоны излучения, несмотря на простоту геометрии линейного симметричного вибратора, встречает большие математические трудности. В инженерной практике широкое распространение получил приближенный метод расчета тока, базирующийся на использовании теории распространения тока по двухпроводной линии конечной длины.

В первом приближении эту линию можно представить как результат разворота плеч вибратора вокруг точек питания (рис. 1.2).

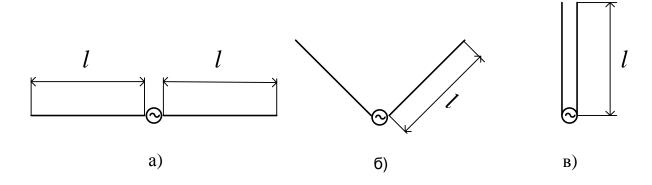


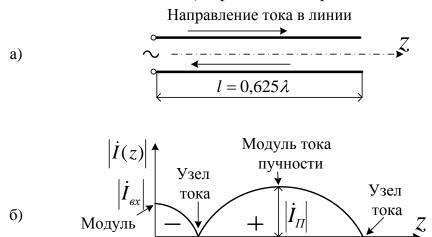
Рис. 1.2

Напомним краткие сведения из теории цепей с распределенными параметрами — режиме стоячих волн в линии без потерь [4]. В разомкнутой двухпроводной линии конечной длины без потерь под воздействием гармонического напряжения возбуждения возникает режим стоячих волн. Стоячие волны тока и напряжения представляют собой суперпозицию двух бегущих волн. Первая волна — падающая. Она распространяется от генератора в сторону конца линии. Вторая волна — отраженная. Она распространяется от нагрузки (разомкнутый конец линии) в сторону генератора. Для линии без потерь амплитуды токов (напряжений) падающей волны и отраженной будут равны в любом сечении линии. Фазы токов (напряжений) падающей и отраженной волн изменяются по линейному закону. Результирующее распределение амплитуды тока (напряжения) вдоль линии зависит от соотношения фаз падающей и отраженной волн. В тех сечениях линии, где фазы противоположны (отличаются на 180°) имеют место узлы тока (напряжения) — мгновенные значения тока (напряжения) тождественно равны нулю. Для тех сечений линии, где фазы совпадают, наблюдаются пучности тока (напряжения). В пучностях амплитуда тока (напряжения) максимальна. Во всех прочих сечениях значение амплитуды тока (напряжения) находится в пределах между нулем и максимальным значением.

На рис. 1.3а, который повторяет рис. 1.2в, изображена двухпроводная линия без потерь, длина которой  $l=0.625\lambda$ . Линия ориентирована вдоль оси z.

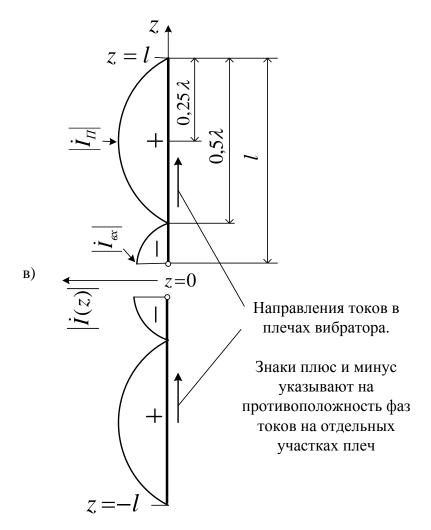
Начало координат совпадает с сечением линии, где включается генератор возбуждения.

Кривая, характеризующая распределение модуля тока (ток, в общем случае, является комплексной величиной), приведена на рис. 1.3б.



Модуль входного

тока Знаки плюс и минус указывают на противоположность фаз токов на отдельных участках провода линии



Функция распределения тока при этом описывается выражением:

$$\dot{I}(z) = (\dot{I}_{\text{BX}}/\sin kl)\sin k(l-z). \tag{1.1}$$

В (1.1)  $k=2\pi/\lambda$  – коэффициент фазы волны тока, совпадающий с коэффициентом фазы электромагнитной волны в свободном пространстве. Заметим, что в аргументе функции синуса выражение в скобах (l-z) представляет собой значение расстояния от разомкнутого конца линии до сечения линии с координатой z. Смысл прочих величин очевиден из рис. 1.3а и рис. 1.3б.

Если провода такой линии развернуть относительно точек возбуждения, осуществив переход обратный, показанному на рис.1.2 (от рис. 1.2а к рис.1.2в), получится конструкция линейного симметричного электрического вибратора с распределением модуля тока по плечам вибратора, повторяющим распределение тока вдоль двухпроводной линии — рис. 1.3в. Отметим, что для вибратора ввиду симметрии картины распределения амплитуды тока относительно точек питания (возбуждения) в (1.1) необходимо ввести |z|, то есть:

$$\dot{I}(z) = (\dot{I}_{\text{BX}}/\sin kl)\sin k(l - |z|). \tag{1.2}$$

Функция (1.2) соответствует чисто стоячей волне тока с нулевым значением на концах антенны (узел тока); при |z| < l узлы и пучности тока чередуются через  $\lambda/4$ . Переходу  $|\dot{I}(z)|$  через нуль соответствует изменение фазы тока на противоположное, что отражено соответствующими значками на рис. 1.3в. Первый множитель в (1.2) имеет смысл тока в пучности:

$$\dot{I}_{\Pi} = \dot{I}_{\text{BX}} / \sin kl. \tag{1.3}$$

С учетом (1.3) формула (1.2) приобретает вид:

$$\dot{I}(z) = \dot{I}_{\Pi} \sin k(l - |z|). \tag{1.4}$$

Рассмотренная аналогия двухпроводной линии и линейного симметричного вибратора весьма приближенна. Это следует из того, что линия служит для канализации электромагнитных волн и является практически неизлучающей системой; вибратор же излучает электромагнитные волны.

В разомкнутой линии, выполненной из идеального проводника, нет потерь энергии. В вибраторе, выполненном даже из идеального проводника, обязательно есть потери (полезные) на излучение. Отсюда следует, что ток в вибраторе, строго говоря, не может быть распределен по закону стоячей волны (1.2) или (1.4). В случаях, когда нужно учесть влияние расхода энергии (потерь, связанных с излучением) на распределение тока, можно воспользоваться выражением для разомкнутой линии с потерями [4]:

$$\dot{I}(z) = (\dot{I}_{\rm BX}/\sin\gamma l)) {\rm s}h\,\gamma(l-|z|) = \dot{I}_{\Pi}\,{\rm s}h\,\gamma(l-|z|),$$
 (1.5) где:  $\gamma = \alpha + j\beta$ ,  $\alpha$  – коэффициент затухания,  $\beta$  – коэффициент фазы, который в общем случае не равен  $k$ . Методика расчета коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  дана ниже (см. раздел 1.7).

Заметим, что в (1.5) используется гиперболическая функция синуса в отличие от (1.2) и (1.4), где применена тригонометрическая функция синуса.

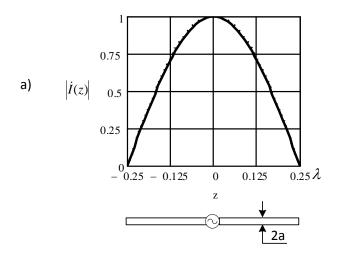
Читатель может самостоятельно убедиться, что формула (1.5) переходит в формулу (1.2), если принять  $\alpha=0$ ,  $\beta=k$ , где  $k=2\pi/\lambda$  – коэффициент фазы в свободном пространстве.

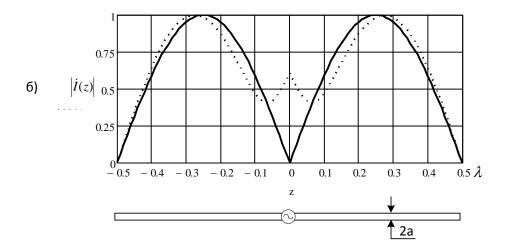
На рис. 1.4 приведены распределения модуля тока для линейных симметричных электрических вибраторов различной длины: рис. а  $-l=0.25\lambda$ , рис. б  $-l=0.5\lambda$ , рис. в  $-l=0.625\lambda$ . Толщина проводника плеча всех вибраторов одинакова  $-d=2a=0.01\lambda$ . Сплошной линией показано распределение, рассчитанное по формуле (1.4), пунктирной — по формуле (1.5). В расчетах принято, что значение модуля тока в пучности  $|\dot{I}_{\Pi}|=1$ , а все значения каждого распределения тока нормировались относительно своего максимального значения.

В расчетах по формуле (1.5) коэффициент затухания  $\alpha$  принимал значения: рис. а –  $\alpha$  = 0,837 1/м, рис. б –  $\alpha$  = 0,92 1/м,, рис. в –  $\alpha$  = 0,425 1/м. Коэффициент фазы  $\beta$  рассчитывался по формулам: рис. а –  $\beta$  = 1,04k, рис. б –  $\beta$  = 1,13k, рис. в –  $\beta$  = 1,06k.

Заметим, что распределения, приведенные на рис. 1.3в и на рис. 1.4в (сплошная линия), визуально отличаются, хотя отношение  $l/\lambda$  одно и то же:  $l/\lambda = 0,625$ . Дело в том, что кривая на рис. 1.3в построена без расчетов — она просто отображает характер распределения. Сплошная линия на рис. 1.4в — результат расчета по формуле (1.4).

Анализ распределений тока с учетом потерь, приведенных на рис. 1.4 пунктирными линиями, показывает, что на концах тонких вибраторов, ток всегда равен нулю (если можно пренебречь поперечными (торцевыми) токами), другие нулевые значения отсутствуют, потому что при наличии потерь амплитуда падающей волны в каждой точке преобладает над амплитудой отраженной волны.





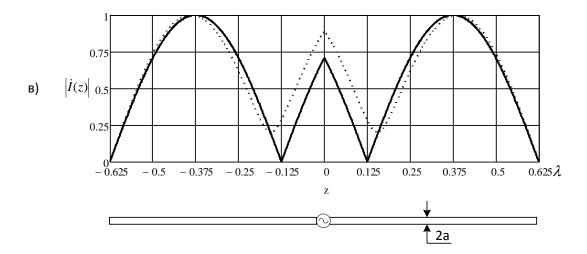


Рис. 1.4

#### 1.3. Амплитудные характеристика и диаграмма направленности

Опыт и наличие большого числа экспериментальных данных позволяют сделать вывод о том, что при инженерных расчетах поля, создаваемого линейным симметричным электрическим вибратором в дальней зоне, вполне допустимо пользоваться формулами, полученными в предположении синусоидального распределения тока вдоль плеч вибратора — формула (1.4).

Поместим линейный симметричный электрический вибратор в центр сферической системы координат, показанной на рис. 1.5а. Мысленно разобьем вибратор на бесконечно большое число элементов dz (рис. 1.5б). Так как длина каждого элемента бесконечно мала, то можно полагать, что в пределах его ток не изменяется ни по амплитуде, ни по фазе. Таким образом, весь вибратор можно рассматривать как совокупность элементарных электрических излучателей dz и поле линейного симметричного электрического вибратора в произвольной точке наблюдения M рассматривать как результат сложения (интерференции) полей, создаваемых элементарными излучателями. Ввиду малости воздушного промежутка (зазора) между плечами вибратора можно пренебречь влиянием электрического поля, существующего в нем, на излучение и считать, что электрический ток течет по сплошному проводнику длиной 2l.

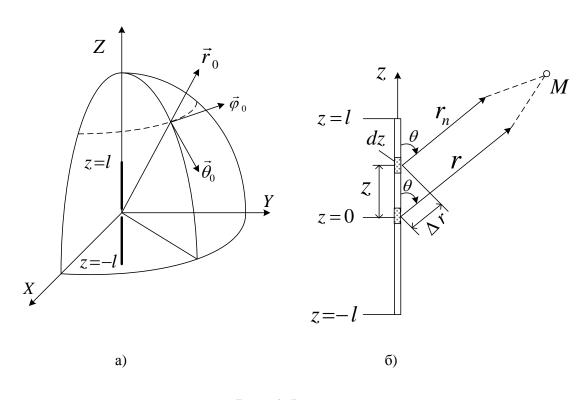


Рис. 1.5

Проведем от элемента dz и от центра вибратора линии в точку наблюдения  $r_n$  и r. Элемент dz создает в точке наблюдения M напряженность электрического поля  $\vec{E} = \vec{\theta}_0 E_\theta$ , характеризуемую комплексной амплитудой, которую, с учетом обозначений рис. 1.56, можно представить в виде [5]:

$$d\vec{E}_m = \vec{\theta}_0 \dot{E}_{\theta m} = \vec{\theta}_0 j \left[ W_0 \dot{I}(z) dz / 2 r_n \lambda \right] \sin \theta \, e^{-jkr_n}, \tag{1.6}$$

где  $\dot{I}(z)$  — ток (1.4.), соответствующий координате z, определяемой положением элемента dz (рис. 1.56),  $W_0$  — волновое сопротивление свободного пространства.

Поскольку расстояние до точки наблюдения очень велико по сравнению с длиной вибратора, то направления  $r_n$  и r на точку M можно считать параллельными, как это показано на рис. 1.56.

Выразим расстояние  $r_n$  через расстояние r. Из рис. 1.56 находим, что разность расстояний от центра вибратора и элемента dz до точки наблюдения равна  $\Delta r = r - r_n = z \cos \theta$ , откуда следует

$$r_n = r - z\cos\theta. \tag{1.7}$$

Величину  $\Delta r$  часто называют разностью хода лучей. Так как точка наблюдения находится в дальней зоне, то значение  $\Delta r$  мало по сравнению с r, а расстояния  $r_n$  и r незначительно отличаются друг от друга. Это дает основание заменить в знаменателе амплитудного множителя (1.6)  $r_n$  на r и комплексную амплитуду составляющей напряженности электрического поля излучения элемента dz записать в виде:

$$d\vec{E}_m = \vec{\theta}_0 j [W_0 \dot{I}(z) dz/2 \, r \, \lambda] \sin \theta \, e^{-jkr_n}. \tag{1.8}$$

Однако пренебрегать разностью хода в фазовых множителях элементов dz ни в коем случае нельзя, так как пространственный сдвиг фаз между полями элемента, расположенного в середине вибратора (z=0), и элемента, для которого  $z\neq 0$ , определяется отношением разности хода лучей не к расстоянию, а к длине волны  $kr-kr_n=(2\pi/\lambda)z\cos\theta=2\pi(z\cos\theta/\lambda)$ .

На основании формул (1.8) и (1.7) получаем:

$$d\vec{E}_m = \vec{\theta}_0 j [W_0 \dot{I}(z) dz / 2 r \lambda] \sin \theta \, e^{-jkr} e^{jkz \cos \theta}. \tag{1.9}$$

Очевидно, что выражение (1.9) будет справедливо для любого из элементов dz, на которые мы мысленно разбили вибратор.

Для определения комплексной амплитуды напряженности электрического поля, создаваемого в точке наблюдения всем симметричным вибратором, необходимо выражение (1.9) проинтегрировать по всей длине вибратора: от -l (нижний конец вибратора на рис. 1.5a) до +l (верхний конец):

$$\dot{\vec{E}}_m = \vec{\theta}_0 j(W_0/2 \, r \, \lambda) \sin \theta \, e^{-jkr} \int_{-l}^{l} \dot{I}(z) e^{jkz \cos \theta} dz. \tag{1.10}$$

Функция  $\dot{I}(z)$  определяется формулой (1.4), поэтому:

$$\dot{\vec{E}}_{m} = \vec{\theta}_{0} j (W_{0} \dot{I}_{\Pi} / 2 \, r \, \lambda) \sin \theta \, e^{-jkr} \int_{-l}^{l} \sin k (l - |z|) \, e^{jkz \cos \theta} dz. \tag{1.11}$$

После вычисления интеграла  $\int_{-l}^{l} \sin k(l-|z|) \ e^{jkz\cos\theta} dz$  и подстановки результата интегрирования в (1.11) получается следующая формула для расчета комплексной амплитуды напряженности электрического поля линейного симметричного электрического вибратора в дальней зоне:

$$\dot{\vec{E}}_m = \vec{\theta}_0 (W_0 \dot{I}_{\Pi} / 2\pi \, r \,) \times$$

$$\sin \theta \times [\cos(kl\cos\theta) - \cos kl]/(\sin\theta)^2 \times ie^{-jkr}. \tag{1.12}$$

По аналогии с анализом направленных свойств элементарного электрического излучателя в формуле (1.12) можно выделить три характерных множителя: не зависящего от направления на точку наблюдения, определяемого углами  $\theta$  и  $\varphi$  ( $A = W_0 \dot{I}_\Pi / 2\pi r$ ) — из первой строки формулы; зависящего от направления на точку наблюдения  $\sin \theta \times [\cos(kl\cos\theta) - \cos kl]/(\sin\theta)^2$  — вторая строка формулы и фазового множителя  $je^{-jkr}$  — третья строка.

Произведение сомножителей, входящих в две первые строки формулы (1.12):

 $f(\theta) = A \sin \theta \times [\cos(kl\cos\theta) - \cos kl]/(\sin\theta)^2$  (1.13) при фиксированном расстоянии r определяет зависимость значений напряженности поля от угловой координаты  $\theta$ , то есть является характеристикой направленности линейного симметричного электрического вибратора в меридиональной плоскости.

В формулах (1.12) и (1.13) преднамеренно не сокращен множитель  $\sin \theta$ . Из (1.13) следует, что направленные свойства линейного симметричного электрического вибратора определяются направленными свойствами элемента dz (элементарного электрического излучателя) — множитель  $\sin \theta$  и множителем системы (совокупности элементарных электрических излучателей) —  $[\cos(kl\cos\theta) - \cos kl]/(\sin\theta)^2$ .

Заметим, что  $f(\theta)$  определяет не только значение, но, в определенной степени, и фазу напряженности поля, так как при переходе функции через нуль меняется её знак, что соответствует скачку фазы напряженности поля на  $180^\circ$ . Поэтому модуль функции  $|f(\theta)|$  — амплитудная характеристика направленности линейного симметричного электрического вибратора в меридиональной плоскости. Значение напряженности поля связано с амплитудной характеристикой направленности соотношением:

$$|\dot{E}_m| = A|f(\theta)|. \tag{1.14}$$

Когда речь идет о направленных свойствах антенн, то интересуются характером зависимости напряженности поля от направления на точку наблюдения, а не абсолютным значением напряженности поля. Поэтому обычно используют понятие нормированной, то есть отнесенной к максимальному значению, амплитудной характеристики направленности  $F(\theta)$ .

На практике применяются, как правило, линейные симметричные электрические вибраторы, у которых длина плеча  $l \le 0.7 \ \lambda$ . Для них:

$$F(\theta) = |[\cos(kl\cos\theta) - \cos kl]/(1 - \cos kl)\sin\theta|. \tag{1.15}$$

Из выражения (1.15) видно, что линейный симметричный электрический вибратор обладает направленными свойствами только в меридиональной плоскости (E – плоскости). Напряженность электрического поля этого вибратора в его экваториальной плоскости (H – плоскости), когда  $\theta = 90^{\circ}$ , не зависит от угла  $\varphi$ . Поэтому амплитудная диаграмма направленности симметричного вибра-

тора в его экваториальной плоскости, как и в случае элементарного электрического излучателя, представляет в полярной системе координат окружность.

Серия расчетных нормированных амплитудных диаграмм направленности в E – плоскости для различных отношений  $l/\lambda$  приведена на рис. 1.6.

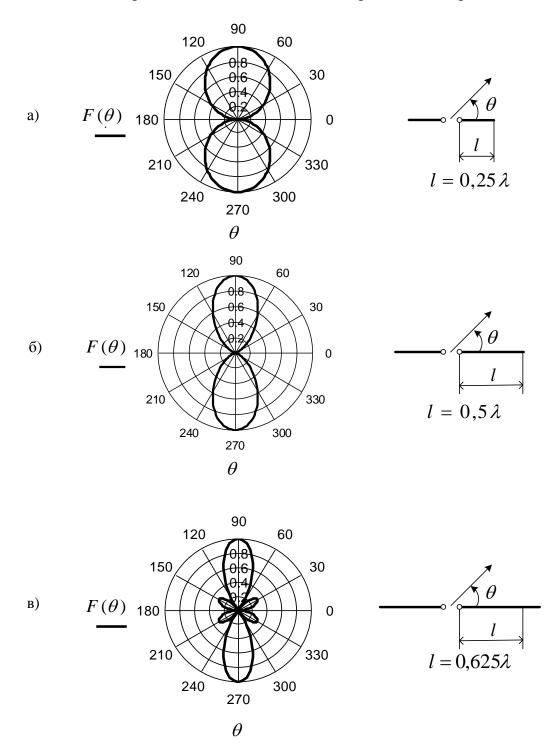


Рис. 1.6

Анализ формулы (1.15) и рассмотрение этих кривых показывает, что при любом значении отношения  $l/\lambda$  симметричный вибратор не излучает вдоль своей оси. Амплитудная диаграмма направленности при  $l/\lambda \le 0$ ,5 состоит из

двух лепестков, каждый из которых является главным (рис. 1.6а, б). Увеличение длины плеча вибратора до  $l=0.5\lambda$  сопровождается ростом концентрации излучения в направлении, перпендикулярном оси вибратора (главное направление излучения), за счет уменьшения излучения в других направлениях. При этом главные лепестки амплитудной диаграммы направленности становятся уже.

При увеличении длины плеча от  $l=0.5\lambda$  до  $l=0.625\lambda$  сужение главных лепестков продолжается, но появляются боковые лепестки (рис. 1.6в). Это объясняется тем, что при  $l/\lambda > 0.5$  на вибраторе появляются участки с противофазными токами (рис. 1.3в), длина которых растет по мере увеличения  $l/\lambda$ . При  $l/\lambda = 1$  излучение в главном направлении (вдоль нормали к оси) отсутствует, так как противофазные участки вибратора имеют одинаковую длину.

Читателю предлагается самостоятельно рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности симметричного вибратора для  $l/\lambda=1$  и построить соответствующую ей диаграмму направленности.

### 1.4. Нормированная амплитудная характеристика направленности в случае произвольной ориентации вибратора

Функция  $F(\theta)$  описывает нормированную амплитудную характеристику направленности линейного симметричного электрического вибратора. Выше мы рассмотрели ориентацию вибратора вдоль оси Z (рис. 1.5a) и получили функцию  $F(\theta)$  в виде формулы (1.15). Однако выражения для нормированных амплитудных характеристик направленности в случае ориентации вибратора вдоль осей X или Y будут другими:

$$F(\theta, \varphi) =$$

при ориентации вдоль оси X

 $\left|\left[\cos(kl\cos\varphi\sin\theta)-\cos kl\right]/(1-\cos kl)\sqrt{1-(\cos\varphi)^2(\sin\theta)^2}\right|;$  (1.16) при ориентации вдоль оси Y

$$F(\theta, \varphi) =$$

$$\left| \left[ \cos(kl\sin\varphi\sin\theta) - \cos kl \right] / (1 - \cos kl) \sqrt{1 - (\sin\varphi)^2 (\sin\theta)^2} \right|. \tag{1.17}$$

Сравнение нормированных амплитудных характеристик направленности, (1.15) - (1.17), позволяет установить определенную закономерность, которая освободит нас от необходимости повторяться. Суть закономерности состоит в том, что при любой ориентации линейного симметричного электрического вибратора нормированная амплитудная характеристика направленности имеет вид:

$$F(\psi) = |[\cos(kl\cos\psi) - \cos kl]/(1 - \cos kl)\sin\psi|,$$
 (1.18) где  $\psi$  — пространственный угол, составленный осью вибратора и направлением распространения волны, определяемый через углы  $\theta$  и  $\varphi$ . При ориентации вибратора вдоль координатных осей  $Z, X, Y$  имеем соответственно:

$$\cos \psi = \cos \theta, \tag{1.19}$$

$$\cos \psi = \cos \varphi \sin \theta, \tag{1.20}$$

$$\cos \psi = \sin \varphi \sin \theta. \tag{1.21}$$

#### 1.5. Коэффициент направленного действия

В [5] подробно рассматривался вопрос о КНД элементарных излучателей: электрического, щелевого, в виде рамки, элемента Гюйгенса. Было показано, что элементарный электрический излучатель, элементарная излучающая щель, элементарная электрическая рамка имеют КНД, максимальное значение которого равно 1,5. Максимальное значение КНД элемента Гюйгенса равно 3,0.

Для расчета КНД линейного симметричного электрического вибратора можно применить ту же формулу, которая использовалась и при анализе элемента Гюйгенса:

$$D_0 = D_{\text{max}} = 4\pi / \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F^2(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi, \qquad (1.22)$$

где  $F(\theta, \varphi)$  — нормированная амплитудная характеристика направленности линейного симметричного электрического вибратора (1.15). Координаты  $\theta, \varphi$  и направления их отсчета соответствуют приведенным на рис. 1.5.

Читателю предлагается самостоятельно рассчитать значение КНД для полуволнового вибратора, у которого отношение длины плеча к длине волны  $(l/\lambda)$  равно 0,25. Для вычисления КНД по формуле (1.22) можно применить персональный компьютер и специальный программный продукт, например, Mathcad 14, разработанный для студентов и инженеров (русская версия – [6]).

На рис. 1.7 показана зависимость КНД в направлении нормали к оси вибратора от длины плеча.

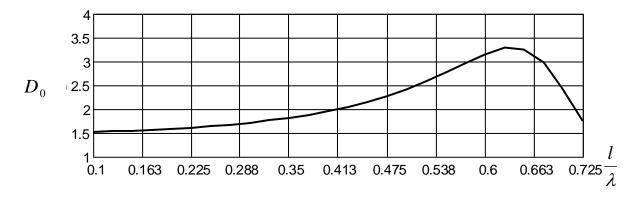


Рис. 1.7

Из рисунка вино, что при малых значениях  $l/\lambda$  (от 0,1 до 0,225) КНД близок к 1,5. Это объясняется тем, что при малых значениях  $l/\lambda$  нормированная амплитудная диаграмма направленности по форме мало отличается от диаграммы элементарного электрического излучателя — правильной «восьмерки» [5]. Даже при  $l/\lambda = 0.25$  (рис. 1.5a) это отличие незначительно. Заметим, что для этого случая, КНД равен 1,64.

Максимум КНД, равный 3,28, имеет место при  $l/\lambda=0,625$ . При больших значениях  $l/\lambda$  КНД падает, поскольку, как уже отмечалось, уменьшается интенсивность излучения в направлении  $\theta=90^\circ$  и возрастает уровень боковых лепестков.

#### 1.6. Мощность излучения и сопротивление излучения

Пусть линейный симметричный электрический вибратор окружен сферой, радиус которой  $r \gg \lambda$  (рис. 1.8), вследствие чего поверхность сферы находится в дальней зоне поля симметричного вибратора.

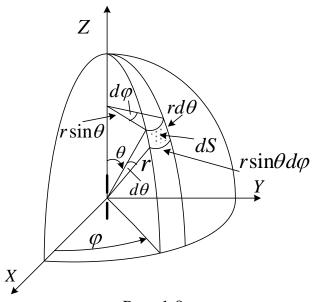


Рис. 1.8.

Если на поверхности сферы выделить бесконечно малый элемент dS, то его площадь в сферической системе координат определяется известной формулой  $dS = r^2 \sin\theta d\theta d\phi$ . При этом излучаемая вибратором мощность, приходящаяся на данный элемент поверхности:

$$dP_{\Sigma} = \left(\left|\dot{E}_{\theta m}\right|^{2}/2W_{0}\right)dS. \tag{1.23}$$

Здесь  $|\dot{E}_{\theta m}|$  — модуль комплексной амплитуды напряженности электрического поля в любой точке элемента dS, определяемый из выражения (1.12):

$$|\dot{E}_{\theta m}| = (60/r)|\dot{I}_{\Pi}[\cos(kl\cos\theta) - \cos kl]/\sin\theta|. \tag{1.24}$$

Вся излучаемая вибратором мощность может быть найдена, если проинтегрировать выражение (1.23) по всей поверхности сферы:

$$P_{\Sigma} = \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} \left( \left| \dot{E}_{\theta m} \right|^2 / 2W_0 \right) r^2 \sin\theta \, d\theta d\varphi. \tag{1.25}$$

После подстановки (1.24), интегрирования по  $\varphi$  и сокращения подобных членов получаем:

$$P_{\Sigma} = 30 |\dot{I}_{\Pi}|^{2} \int_{0}^{\pi} \{ [\cos(kl\cos\theta) - \cos kl]^{2} / \sin\theta \} d\theta.$$
 (1.26)

По аналогии с обычным выражением для мощности, расходуемой в среднем за период в электрической схеме на активном сопротивлении R,

 $P_{\Pi} = 1/2 \left( \left| \dot{I}_m \right|^2 R \right)$  — (закон Джоуля-Ленца), формулу (1.26) можно представить в виде:

$$P_{\Sigma} = (1/2) \left| \dot{I}_{\Pi} \right|^{2} R_{\Sigma}. \tag{1.27}$$

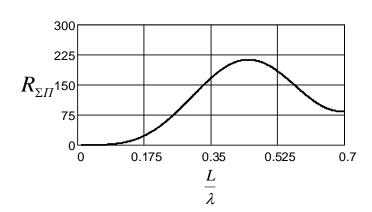
Таким образом, сопротивление излучения  $R_{\Sigma}$  — это коэффициент пропорциональности между мощностью излучения  $P_{\Sigma}$  и половиной квадрата тока в пучности. Используя (1.26), получаем:

$$R_{\Sigma} = 60 \int_0^{\pi} \{ [\cos(kl\cos\theta) - \cos kl]^2 / \sin\theta \} d\theta.$$
 (1.28)

В (1.27) сопротивление излучения отнесено к модулю тока в пучности. Чтобы отразить этот факт в левой части (1.28) вместо  $R_{\Sigma}$  часто пишут  $R_{\Sigma\Pi}$ .

Следует иметь в виду, что другому значению тока, не равному току в пучности, будет соответствовать свое значение сопротивления излучения. Однако значение излученной мощности, конечно, не зависит от того, через какой ток она выражается.

В учебной литературе по антеннам, можно без труда найти график зависимости сопротивления излучения, отнесенного к току в пучности, в зависимо-



сти от  $l/\lambda$  [2], [3]. На рис. 1.9 приведен фрагмент такого графика. Использовать рис. 1.9 для нахождения значений  $R_{\Sigma\Pi}$ , не совсем удобно. Более современный подход к вычислению  $R_{\Sigma\Pi}$  — это численное интегрирование в (1.28) с использованием специального программного продукта, например, [6].

Рис. 1.9

#### 1.7. Входное сопротивление

Линейный симметричный электрический вибратор представляет для генератора некоторую нагрузку; для количественной характеристики этой нагрузки необходимо знать входное сопротивление вибратора. Под входным сопротивлением антенны понимается отношение напряжения  $\dot{U}_{\rm BX}$ , приложенного к входным точкам вибратора, к току  $\dot{I}_{\rm BX}$  на входе:

$$Z_{\rm BX} = \dot{U}_{\rm BX}/\dot{I}_{\rm BX}.\tag{1.29}$$

В теории антенн разработаны как строгие, так и приближенные методы расчета входного сопротивления линейных симметричных электрических вибраторов. Строгие методы базируются на использовании интегральных уравнений и соответствующих методов их решения. Разработаны компьютерные программы, позволяющие быстро и точно рассчитать входное сопротивление проволочных антенн, к которым относится линейный симметричный электрический вибратор. Среди ряда программ, позволяющих осуществлять расчет проволочных антенн, особо следует отметить программу ММАNA [7,8], которая выделяется дружественным русским интерфейсом, эффективностью и, что

немаловажно, доступностью. Программу MMANA можно найти на сайте журнала «Радио» www.radio.ru и на сайте автора книги [7] www.gst.net/dl2kg.

В настоящем разделе рассматривается приближенный метод, основанный на аналогии тонкого линейного симметричного электрического вибратора и разомкнутой двухпроводной линией с потерями [2]. Из теории длинных линий следует, что входное сопротивление линии с потерями, эквивалентной вибратору, равно:

$$Z_{\rm BX} = \tilde{Z}_{\rm B} cth \gamma l,$$
 (1.30) где  $\tilde{Z}_{\rm B}$  — комплексное волновое сопротивление линии;  $\gamma = \alpha + j \beta$  — комплексная постоянная распространения,  $\alpha$  — коэффициент затухания в линии,  $\beta$  — коэффициент фазы;  $l$  — длина эквивалентной линии, равная длине плеча вибратора.

Комплексное волновое сопротивление длинной линии с потерями при диаметре проводников, равном 2a, определяется по формуле [4]:

$$\tilde{Z}_{\rm B} = 120[ln(l/a) - 1][1 - j\,\alpha/\beta].$$
 (1.31)

Коэффициент затухания  $\alpha$  рассчитывается из условия равенства мощности тепловых потерь в эквивалентной линии мощности излучения линейного симметричного электрического вибратора  $P_{\Sigma}$  (1.26). В [2] показано, что

$$\alpha = R_{\Sigma\Pi} / \{120l[ln(l/a) - 1][1 - \sin 2kl/2kl]\}. \tag{1.32}$$

Коэффициент фазы  $\beta$  в формуле (1.32) несколько отличается от коэффициента фазы в свободном пространстве k, так как фазовая скорость  $\nu$  в эквивалентной линии с потерями, а следовательно, и в вибраторе несколько меньше скорости света c. Связь между  $\beta$  и k определяется соотношением:

$$\beta = k(c/v). \tag{1.33}$$

Чем больше диаметр плеча вибратора d=2a (чем толще вибратор) тем меньше фазовая скорость (рис. 1.10). Графики, приведенные на рис. 1.10, являются результатами экспериментальных исследований и заимствованы из [9].

Для повышения точности расчета по формуле (1.32) в ней также следует осуществить замену ве-

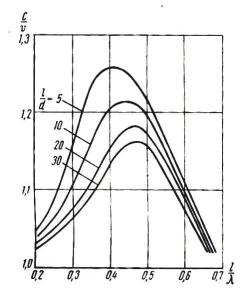
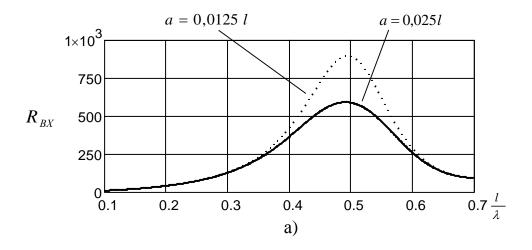


Рис. 1.10

личены k на  $\beta$ . Значение  $R_{\Sigma\Pi}$  вычисляется по формуле (1.28) без поправок.

На рис. 1.11 приведены графики активной ( $R_{\rm BX}$ ) и реактивной ( $X_{\rm BX}$ ) составляющих входного сопротивления линейного симметричного электрического вибратора. Расчеты выполнены по формуле (1.30) для различных значений радиуса вибратора a. Пунктирные кривые соответствуют варианту, когда a=0,0125l, сплошные — a=0,025l. Коэффициент фазы  $\beta$  в формуле (1.31) принят равным коэффициенту фазы в свободном пространстве k. Это означает, что скорость  $\nu$  в эквивалентной линии с потерями, а следовательно, и в вибраторе принята равной скорости света c.



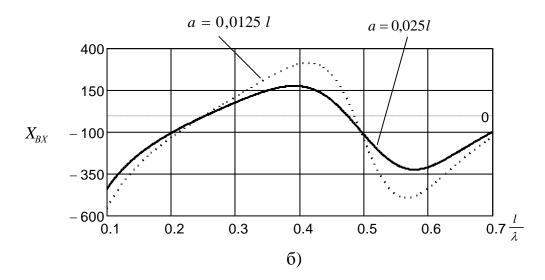


Рис. 1.11

Кривые на рис. 1.11, построенные в зависимости от соотношения  $l/\lambda$ , можно при фиксированной длине волны (частоте) рассматривать как зависимость  $R_{\rm Bx}$  и  $X_{\rm Bx}$  от длины плеча l. При фиксированном значении l эти же кривые характеризуют волновые (частотные) свойства вибраторов по входному сопротивлению. Анализ графиков позволяет сделать очень важный вывод: чем больше радиус вибратора, тем медленнее меняются кривые зависимости  $R_{\rm Bx}$  и  $X_{\rm Bx}$  от длины волны (частоты). Такие вибраторы могут без перестройки работать в более широкой полосе рабочих длин волн (рабочих частот).

Представляется интересным сравнение результатов расчета входного сопротивления рассмотренным приближенным методом [2] и строгим — [8]. Сравнение проведено на примере двух вибраторов. Первый вибратор: длина плеча  $l=0,25\lambda$ , радиус плеча a=0,025l, длина волны  $\lambda=1$  м. Второй вибратор: длина плеча  $l=0,5\lambda$ , радиус плеча a=0,025l, длина волны  $\lambda=1$  м. Результаты расчетов сведены в таблицу 1.1.

Табл. 1.1

Первый вибратор: $l/\lambda = 0.25$ ; $a = 0.025l$ ; $\lambda = 1$ м					
$Z_{_{\mathrm{BX}}}= ilde{Z}_{\mathrm{B}}cth\gamma l$	$Z_{_{\mathrm{BX}}}= ilde{Z}_{_{\mathrm{B}}}cth\gamma l$	MMANA [8]			
при $\beta = k$	при $\beta = 1,05k$				
$Z_{\text{BX}} = (71.9 - j10.37) \text{ Om}$	$Z_{\text{BX}} = (72,3 + j15,16) \text{ Om}$	$Z_{\text{BX}} = (100,2 + j39,9)0_{\text{M}}$			
Второй вибратор: $l/\lambda = 0.5$ ; $a = 0.025l$ ; $\lambda = 1$ м					
$Z_{_{\mathrm{BX}}}= ilde{Z}_{\mathrm{B}}cth\gamma l$	$Z_{ ext{BX}} =  ilde{Z}_{ ext{B}} cth \gamma l$	MMANA [8]			
при $\beta = k$	при $\beta = 1,175k$				
$Z_{\text{BX}} = 587,7 - j115,4 \text{ Om}$	$Z_{\text{BX}} = 330,0 - j237,6 \text{ Om}$	$Z_{\rm BX} = 119,6 - j282,8~{ m OM}$			

Сравнение результатов расчета позволяет сделать вывод о том, что применение приближенного метода, даже с учетом поправочного коэффициента для вычисления коэффициента фазы  $\beta$  (рис. 1.10), дает очень большую погрешность в сравнении со строгим методом.

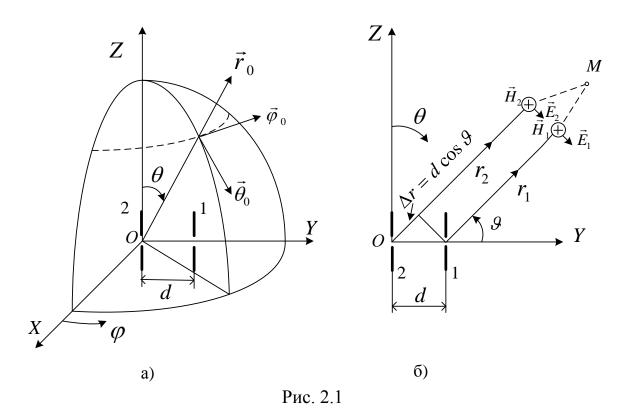
Заканчивая этот раздел, заметим, что на входное сопротивление линейного симметричного электрического вибратора существенное влияние оказывает конструктивное выполнение точек питания, никак не учитываемое в расчетных методах. То же самое относится и к большинству антенн других типов. Поэтому в практических разработках антенных устройств расчеты входного сопротивления считаются ориентировочными и обязательно дополняются экспериментальными исследованием на опытном образце.

### 2. ИЗЛУЧЕНИЕ ДВУХ ЛИНЕЙНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВИБРАТОРОВ

### **2.1.** Направленные свойства системы из двух связанных вибраторов в E – плоскости

Одиночные вибраторы применяют только тогда, когда требуется ненаправленное или почти ненаправленное излучение. В тех же случаях, когда необходима направленность, обеспечивающая в определенном или определенных направлениях более эффективное излучение или прием радиоволн, чем в других, применяют многовибраторные антенны. В таких антеннах вибраторы располагаются на небольшом расстоянии d друг от друга ( $d < \lambda$ ). Такие вибраторы заметно влияют друг на друга и поэтому в теории антенн их называют связанными. Чтобы выяснить характерные особенности происходящих при этом явлений, вначале целесообразно рассмотреть наиболее простой случай совместного излучения двух одинаковых линейных симметричных электрических вибраторов, расположенных в свободном пространстве.

Пусть вибраторы имеют одинаковые размеры и расположены в плоскости ZOY параллельно оси OZ на расстоянии d друг от друга (рис. 2.1a).



Подведем к первому вибратору напряжение  $U_1$  частоты  $\omega$ , а ко второму вибратору — напряжение  $U_2$  той же частоты. Тогда в вибраторах возникнут электрические токи, комплексные амплитуды которых в точках питания перво-

го вибратора обозначим через  $\dot{I}_{\rm BX~1}$ , а в точках питания второго вибратора — через  $\dot{I}_{\rm BX~2}$ .

Обозначим:

$$\dot{I}_{\rm BX\,2}/\dot{I}_{\rm BX\,1} = qe^{j\psi},$$
 (2.1)

где:

q — отношение модулей токов;

 $\psi$  – сдвиг фазы тока  $\dot{I}_{\rm BX~2}$  по отношению к току  $\dot{I}_{\rm BX~1}$ .

Что касается функций распределения тока вдоль вибраторов, то при малом радиусе проводов плеч (a) и не слишком близком расстоянии  $(d\gg a)$  можно полагать в первом приближении справедливым синусоидальный закон:

$$\dot{I}(z_1) = (\dot{I}_{BX1}/\sin kl)\sin k(l - |z_1|), \tag{2.2}$$

$$\dot{I}(z_2) = (\dot{I}_{BX2}/\sin kl)\sin k(l - |z_2|). \tag{2.3}$$

Рассмотрим поле в дальней зоне в общей меридиональной плоскости вибраторов ZOY (E-плоскости). При расчете этого поля применим общую методику, изложенную в подразделе 1.3.

Поскольку расстояние до точки наблюдения очень велико по сравнению с длиной вибраторов, то направления  $r_1$  и  $r_2$  на точку M можно считать параллельными, как это показано на рис. 2.1б. Разность расстояний от центров вибраторов до точки наблюдения (разность хода лучей) равна  $\Delta r = r_2 - r_1 = d\cos\theta$ , где  $\theta$  — угол между нормалью к оси вибратора и направлением на точку наблюдения.

Обозначим напряженность электрического поля, создаваемого в точке наблюдения первым вибратором, через  $\vec{E}_1$ . Комплексная амплитуда этого вектора определяется выражением (1.12), которое можно записать в виде:

$$\dot{\vec{E}}_{1m} = \vec{\theta}_0 j \{ (60 \dot{l}_{\Pi 1} / r_1) [\cos(k l \cos \theta) - \cos k l] / \sin \theta \} e^{-jkr_1}. \tag{2.4}$$

Комплексная амплитуда напряженность электрического поля второго вибратора:

$$\dot{\vec{E}}_{2m} = \vec{\theta}_0 j \{ (60 \dot{I}_{\Pi 2} / r_2) [\cos(kl \cos \theta) - \cos kl] / \sin \theta \} e^{-jkr_2}.$$
Напомним, что  $\dot{I}_{\Pi 1} = \dot{I}_{\text{BX}1} / \sin kl$ ,  $\dot{I}_{\Pi 2} = \dot{I}_{\text{BX}2} / \sin kl$ . (2.5)

Так как точка наблюдения M находится в дальней зоне, то значение  $\Delta r$  мало по сравнению с  $r_1$  и  $r_2$ , т.е. расстояния  $r_1$  и  $r_2$  незначительно отличаются друг от друга. Это дает основание заменить в знаменателе амплитудного множителя (2.5)  $r_2$  на  $r_1$ :

$$\dot{\vec{E}}_{2m} = \vec{\theta}_0 j \{ (60 \dot{I}_{\Pi 2} / r_1) [\cos(kl \cos \theta) - \cos kl] / \sin \theta \} e^{-jkr_2}$$
 (2.6)

Однако пренебрегать разностью хода в фазовых множителях (2.4) и (2.5) ни в коем случае нельзя, так как пространственный сдвиг фаз между полями вибраторов определяется отношением разности хода лучей к длине волны:

$$kr_2 - kr_1 = (2\pi/\lambda)d\cos\theta = 2\pi(d\cos\theta/\lambda).$$

Комплексная амплитуда суммарного поля вибраторов в точке наблюдения M:

$$\dot{\vec{E}}_m = \dot{\vec{E}}_{1m} + \dot{\vec{E}}_{2m} = \vec{\theta}_0 \dot{E}_{1m} + \vec{\theta}_0 \dot{E}_{2m}. \tag{2.7}$$

Запишем (2.7) в ином виде:

$$\dot{\vec{E}}_{m} = \dot{\vec{E}}_{1m} + \dot{\vec{E}}_{2m} = \vec{\theta}_{0}\dot{E}_{1m}(1 + \dot{E}_{2m}/\dot{E}_{1m}).$$
 (2.8) С учетом (2.1), (2.4) и (2.5) формулу (2.8) можно привести к виду:

$$\dot{\vec{E}}_{m} = \vec{\theta}_{0} \{ (60|\dot{I}_{\Pi 1}|/r_{1}) [\cos(kl\cos\theta) - \cos kl] / \sin\theta \} j e^{-jkr_{1}} \times \\
\times [1 + qe^{j\psi} (e^{-jkr_{2}}/e^{-jkr_{1}})].$$
(2.9)

Преобразуем множитель второй строки формулы (2.9):

$$1 + qe^{j\psi} \left( e^{-jkr_2} / e^{-jkr_1} \right) = 1 + qe^{j\psi} e^{-jkr_2} e^{jkr_1} =$$

$$= 1 + qe^{j\psi} e^{-jk(r_2 - r_1)} = 1 + qe^{j\psi} e^{-jk\Delta r} = 1 + qe^{j\psi} e^{-jkd\cos\vartheta} =$$

$$= 1 + qe^{j(\psi - kd\cos\vartheta)}.$$
(2.10)

Из рис. 2.16 следует, что  $\theta = 90^{\circ} - \theta$ . С учетом этого выражение в фигурных скобках формулы (2.9) можно свести к виду:

$$(60|\dot{I}_{\Pi 1}|/r_1)[\cos(kl\cos\theta) - \cos kl]/\sin\theta =$$

$$= (60|\dot{I}_{\Pi 1}|/r_1)[\cos(kl\sin\theta) - \cos kl]/\cos\theta. \tag{2.11}$$

Подстановка (2.10) и (2.11) в (2.9) позволяет записать:

$$\dot{\vec{E}}_{m} = \vec{\theta}_{0} \{ (60 |\dot{I}_{\Pi 1}|/r_{1}) [\cos(kl\sin\theta) - \cos kl]/\cos\theta \} j e^{-jkr_{1}} \times (1 + qe^{j(\psi - kd\cos\theta)}).$$
(2.12)

Обычно интересуются значением модуля напряженности суммарной напряженности поля, а не её фазой. Поэтому, переходя к модулю выражения (2.12), получаем:

$$\left| \dot{\vec{E}}_m \right| = \left| \frac{\{(60I_{\Pi 1}/r_1) \left[ \cos(kl\sin\theta) - \cos kl \right]/\cos\theta \}}{\times \sqrt{1 + q^2 + 2q\cos(\psi - kd\cos\theta)}} \right|. \tag{2.13}$$

По аналогии с анализом направленных свойств одиночного линейного симметричного электрического вибратора в формуле (2.13) можно выделить три характерных множителя. Множитель  $A = 60I_{\Pi 1}/r_1$ , не зависящий от направления на точку наблюдения, определяемого углами  $\vartheta$  и  $\varphi$ . Множитель  $f_1(\theta) = |[\cos(kl\sin\theta) - \cos kl]/\cos\theta|$ , который представляет собой ненормированную амплитудную характеристику направленности одиночного линейного симметричного электрического вибратора, находящегося в свободном пространстве. Множитель  $f_c(\theta) = \sqrt{1 + q^2 + 2q\cos(\psi - kd\cos\theta)}$  учитывает наличие второго вибратора; он зависит не только от угла  $\theta$ , но и от расстояния dмежду вибраторами, от отношения амплитуд токов в вибраторах q, от сдвига фаз токов в вибраторах  $\psi$ . Этот множитель называют множителем системы (в литературе встречаются также наименования «множитель комбинирования», «интерференционный множитель», «множитель решетки»).

Произведение множителей:

$$f(\theta) = Af_1(\theta)f_c(\theta) \tag{2.14}$$

при фиксированном расстоянии г определяет зависимость значений напряженности поля от угловой координаты  $\theta$ , то есть является ненормированной амплитудной характеристикой направленности системы двух связанных линейных симметричных электрических вибраторов в меридиональной плоскости (Е - плоскости).

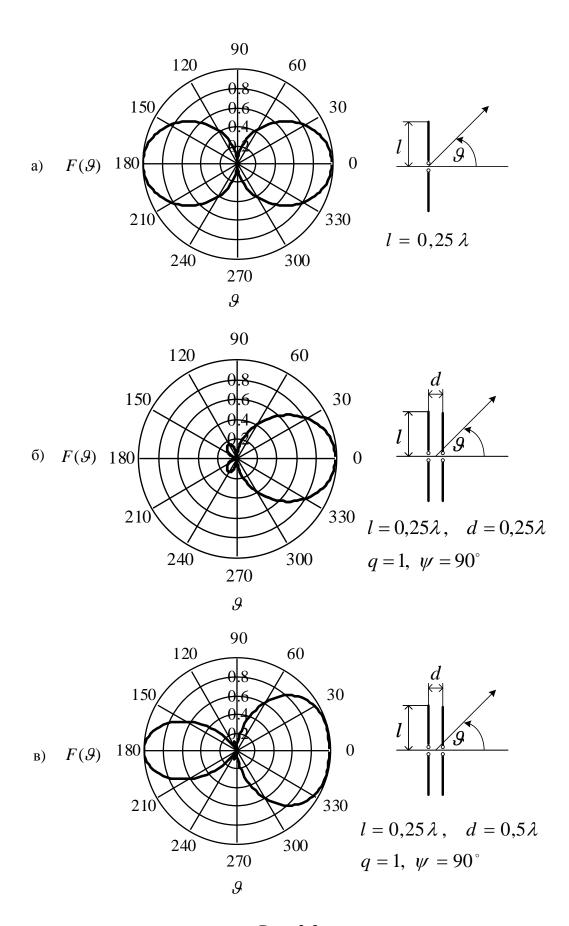


Рис. 2.2

На рис. 2.2. приведена серия нормированных амплитудных диаграмм направленности. График функции на рис. 2.2а — это нормированная амплитудная диаграмма направленности одиночного линейного симметричного электрического вибратора, находящегося в свободном пространстве. Графики функций на рис. 2.26 и рис. 2.2в соответствуют нормированным амплитудным диаграммам направленности связанных линейных симметричных электрических вибраторов в E — плоскости. Сравнение графиков функций показывает насколько существенно трансформируется амплитудная диаграмма направленности одиночного линейного симметричного электрического вибратора, находящегося в свободном пространстве, если рядом расположен аналогичный вибратор. Трансформация амплитудной диаграммы определяется множителем системы  $f_{\rm c}(\vartheta)$ , который существенным образом зависит от расстояния d между вибраторами, от отношения амплитуд токов в вибраторах q, от сдвига фаз токов в вибраторах  $\psi$ .

### **2.2.** Направленные свойства системы из двух связанных вибраторов в H – плоскости

Экваториальная плоскость XOY (рис. 2.1a) является для системы связанных вибраторов общей H — плоскостью. Как известно, одиночный линейный симметричный электрический вибратор, находящийся в свободном пространстве, в H — плоскости не обладает направленностью. Наличие второго вибратора в корне меняет ситуацию. На рис. 2.3 изображена плоскость XOY и показано положение вибраторов, соответствующее рис. 2.1a.

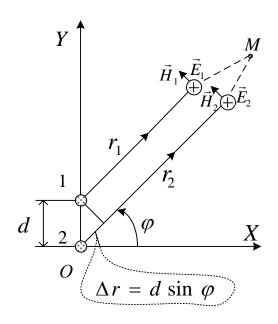


Рис. 2.3

Примем, по-прежнему, что отношение амплитуд токов в вибраторах q, а сдвиг фаз  $\psi$ . Амплитудная характеристика направленности системы связанных вибраторов в H – плоскости должна быть некоторой функцией  $f(\varphi)$  азимутального угла  $\varphi$ , отсчитываемого от оси OX.

Из рис. 2.3 следует, что разность хода лучей:

$$\Delta r = r_2 - r_1 = d\sin\varphi. \tag{2.15}$$

Можно показать, что значение модуля напряженности суммарной напряженности поля будет определяться выражением:

$$\left| \dot{\vec{E}}_m(\varphi) \right| = A(1 - \cos kl) \sqrt{1 + q^2 + 2q \cos(\psi - kd \sin \varphi)}. \tag{2.16}$$

По аналогии с анализом направленных свойств системы связанных вибраторов в E – плоскости можно выделить три характерных множителя. Множители  $A = 60I_{\Pi 1}/r_1$  и  $(1-\cos kl)$ , не зависящие от направления на точку наблюдения, а также множитель  $f_{\rm c}(\varphi) = \sqrt{1+q^2+2q\cos(\psi-kd\sin\varphi)}$ . Функция  $f_{\rm c}(\varphi)$  является множителем системы. Он учитывает наличие второго вибратора и зависит не только от угла  $\varphi$ , но и от расстояния d между вибраторами, отношения амплитуд токов в вибраторах q, сдвига фаз токов  $\psi$ .

Произведение множителей:

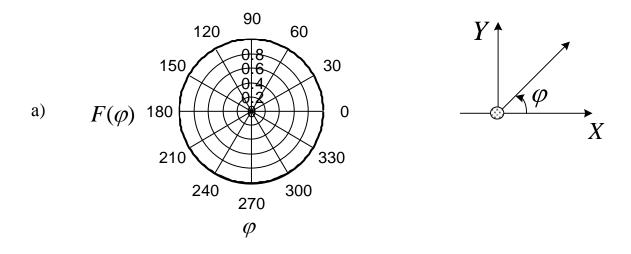
$$f(\varphi) = A(1 - \cos kl)f_c(\varphi) \tag{2.17}$$

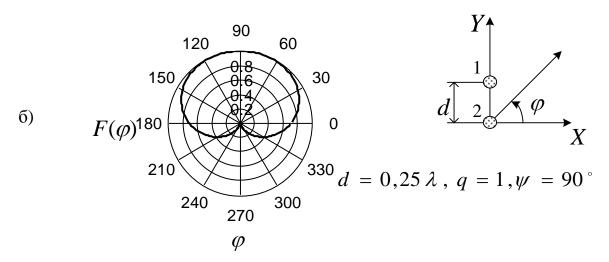
при фиксированном расстоянии r определяет зависимость значений напряженности поля от угловой координаты  $\varphi$ , т.е. является ненормированной амплитудной характеристикой направленности системы двух связанных линейных симметричных электрических вибраторов в общей экваториальной плоскости (H- плоскости).

Таким образом, направленные свойства системы связанных вибраторов в H — плоскости полностью определяются множителем системы  $f_{\rm c}(\vartheta)$ , что является прямым следствием отсутствия направленности в этой плоскости каждого из вибраторов в отдельности.

На рис. 2.4 приведена серия нормированных амплитудных диаграмм направленности. График функции на рис. 2.4а — это нормированная амплитудная диаграмма направленности в H — плоскости одиночного линейного симметричного электрического вибратора, находящегося в свободном пространстве. Графики функций на рис. 2.4б и рис. 2.4в соответствуют нормированным амплитудным диаграммам направленности связанных линейных симметричных электрических вибраторов в H — плоскости.

Если сравнить нормированные амплитудные диаграммы направленности на рис. 2.26 и рис. 2.46, то можно убедиться в их определенном отличии. Оно обусловлено тем, что диаграмма направленности на рис. 2.26 учитывает наличие собственных направленных свойств вибратора в E — плоскости (рис. 2.2a). Аналогичный вывод можно сделать для нормированных амплитудных диаграмм направленности, приведенных на рис. 2.2a и рис. 2.4a.





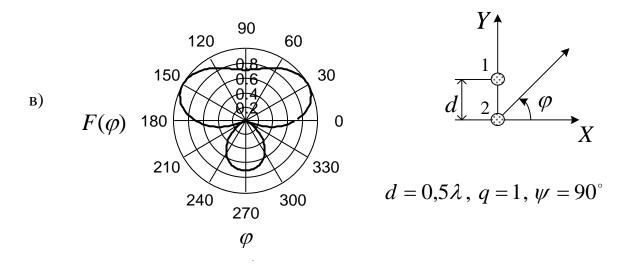
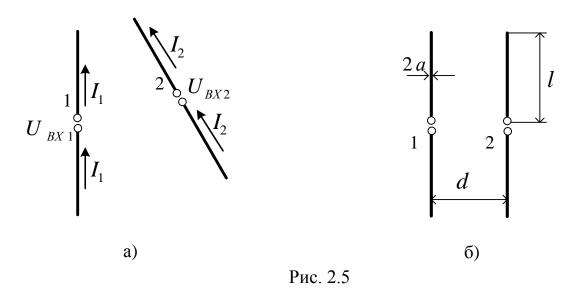


Рис. 2.4

#### 2.3. Входное сопротивление связанных вибраторов

В разделе 1.7 обсуждался вопрос о входном сопротивлении одиночного вибратора, находящегося в свободном пространстве. Рассмотрим два связанных произвольно ориентированных относительно друг друга линейных симметричных электрических вибратора (рис. 2.5а). Пусть к первому вибратору подведено напряжение  $U_{\rm Bx\,1}$  частоты  $\omega$ , а ко второму вибратору — напряжение  $U_{\rm Bx\,2}$  той же частоты. Вычисление входного сопротивления каждого из связанных вибраторов — более сложная процедура по сравнению с той, что рассматривалась в разделе 1.7. Долгое время (начиная с 20-х годов прошлого века) расчет сопротивления излучения и входного сопротивления связанных вибраторов базировался на методе наведенных электродвижущих сил (ЭДС) [2,9].



Поясним методику расчета входного сопротивления на примере системы из двух одинаковых линейных симметричных электрических вибраторов. Поскольку рассматриваемая система линейна, для комплексных амплитуд токов и напряжений на входах каждого вибратора ( $\dot{I}_{\rm BX1}$ ,  $\dot{I}_{\rm BX2}$  и  $\dot{U}_{\rm BX1}$ ,  $\dot{U}_{\rm BX2}$  соответственно) можно записать систему линейных уравнений типа уравнений Кирхгофа [2]:

$$\dot{U}_{\text{BX1}} = Z_{11}\dot{I}_{\text{BX1}} + Z_{12}\dot{I}_{\text{BX2}}, 
\dot{U}_{\text{BX2}} = Z_{21}\dot{I}_{\text{BX1}} + Z_{22}\dot{I}_{\text{BX2}}.$$
(2.18)

Коэффициенты  $Z_{11}$  и  $Z_{22}$  носят название собственных сопротивлений, а  $Z_{12}$  и  $Z_{21}$  – взаимных сопротивлений и имеют следующий смысл. Пусть второй вибратор разомкнут в точках входа, т.е.  $\dot{I}_{\rm BX2}=0$ . Тогда из первого уравнения (2.18) имеем  $Z_{11}=\dot{U}_{\rm BX1}/\dot{I}_{\rm BX1}$ . При разомкнутом первом вибраторе  $Z_{22}=\dot{U}_{\rm BX2}/\dot{I}_{\rm BX2}$ . Таким образом, каждое из собственных сопротивлений равно входному сопротивлению соответствующего вибратора в режиме, когда другой вибратор разомкнут. В первом приближении обычно считают, что влияние разомкнутых вибраторов невелико (это справедливо, если длина плеч вибратора отлична от резонансной длины), и отождествляют собственное сопротивление с входным сопротивлением каждого вибратора в свободном пространстве.

В рабочем режиме, когда оба вибратора возбуждаются соответствующим напряжением, из (2.18), поделив первое уравнение на  $\dot{I}_{\rm Bx1}$ , а второе на  $\dot{I}_{\rm Bx2}$ , получим значения входных сопротивлений вибраторов в составе системы:

$$Z_{\text{BX1}} = \dot{U}_{\text{BX1}} / \dot{I}_{\text{BX1}} = Z_{11} + Z_{12} \, \dot{I}_{\text{BX2}} / \dot{I}_{\text{BX1}} = Z_{11} + Z_{12 \text{ HaB}},$$
 (2.19)

$$Z_{\text{BX2}} = \dot{U}_{\text{BX2}} / \dot{I}_{\text{BX2}} = Z_{22} + Z_{21} \dot{I}_{\text{BX1}} / \dot{I}_{\text{BX2}} = Z_{22} + Z_{21 \text{ HaB}},$$
 (2.20)

где добавочные сопротивления, дополняющие собственные сопротивления, носят название наведенных сопротивлений, причем:

$$Z_{12 \text{ HaB}} = Z_{12} \dot{I}_{\text{BX2}} / \dot{I}_{\text{BX1}}, Z_{21 \text{ HaB}} = Z_{21} \dot{I}_{\text{BX1}} / \dot{I}_{\text{BX2}}. \tag{2.21}$$

Как видно из (2.21), при равных токах, то есть  $\dot{I}_{\rm Bx1}=\dot{I}_{\rm Bx2}$ , наведенные сопротивления равны взаимным. Отметим, что с помощью принципа взаимности [10] можно показать, что  $Z_{12}=Z_{21}$ , причем это равенство сохраняется при разных длинах вибраторов, образующих связанную систему, и произвольном их расположении в пространстве. Для наведенных сопротивлений подобное равенство, как следует из (2.21), несправедливо, однако наведенные сопротивления могут быть найдены через взаимные, если известны токи на входах излучателей.

Рассмотрим расчет входного сопротивления на примере двух идентичных параллельных вибраторов, имеющих общую экваториальную плоскость (рис. 2.5б) и питаемых одинаковыми токами  $\dot{I}_{\rm BX1} = \dot{I}_{\rm BX2}$  (синфазный режим). Пусть  $\lambda = 1000$  мм, a = 7 мм,  $l = 0.25\lambda$ ,  $d = 0.25\lambda$ .

На основании (2.19) и (2.20) с учетом исходных данных имеем:

$$Z_{\rm BX1} = Z_{11} + Z_{12},\tag{2.22}$$

$$Z_{\rm BX2} = Z_{22} + Z_{21}. (2.23)$$

Так как  $Z_{12} = Z_{21}$ , то справедливо:

$$Z_{\text{BX1}} = Z_{\text{BX2}} = Z_{11} + Z_{12}. (2.24)$$

Расчет собственных сопротивлений излучения по формуле (1.30) дает результат:

$$Z_{11} = Z_{22} = (72,225 + j13,658) \text{ Om.}$$
 (2.25)

Взаимное сопротивление по методу наведенных ЭДС [9]:

$$Z_{12} = (40.8 - j28.3) \text{ Om.}$$
 (2.26)

Подставив (2.25) и (2.26) в (2.24) получаем искомый результат:

$$Z_{\text{BX1}} = Z_{\text{BX2}} = 72,225 + j13,658 + 40,8 - j28,3 =$$
  
=  $(113,03 - j14,64)$  Om. (2.27)

Изменим условие возбуждения вибраторов, приняв  $\dot{I}_{\rm Bx1} = -\dot{I}_{\rm Bx2}$  (противофазный режим). В этом случае легко получить:

$$Z_{\text{BX1}} = Z_{\text{BX2}} = Z_{11} - Z_{12} = (31.4 + j42.0) \text{ Om.}$$
 (2.28).

Значения  $Z_{12}$ , необходимые при использовании метода наведенных ЭДС, обычно рекомендуется брать из графиков или таблиц, что не совсем удобно при решении задач в тех случаях, когда вибраторы имеют разную длину плеч, а их точки питания смещены друг относительно друга (рис. 2.6).

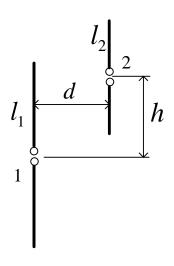


Рис. 2.6

Современные вычислительные средства позволяют получить  $Z_{12}$  путем численного интегрирования [6]:

$$Z_{12} = R_{12} + jX_{12} = 30j \times \\ \left[ \int_{h-l_1}^{h} \left( e^{-jkr_1}/r_1 - 2\cos kl_2 \, e^{-jkr_0}/r_0 + e^{-jkr_2}/r_2 \right) \right] \sin[k(l_1 + h + \xi)] d\xi + \\ \left[ \int_{h}^{h+l_1} \left( e^{-jkr_1}/r_1 - 2\cos kl_2 \, e^{-jkr_0}/r_0 + e^{-jkr_2}/r_2 \right) \right] \sin[k(l_1 + h - \xi)] d\xi \right],$$
 (2.29)   
где:  $r_1 = \sqrt{(l_2 - \xi)^2 + d^2}, \quad r_0 = \sqrt{\xi^2 + d^2}, \quad r_2 = \sqrt{(l_2 + \xi)^2 + d^2}.$ 

Формула (2.29) заимствована из монографии [11]. При значениях d=0 и h=0 значения  $Z_{12}$  переходят в  $Z_{11}$ . Обратим внимание на то, что результаты вычисления  $Z_{12}$  и  $Z_{11}$  по формуле (2.29) соответствуют предельному случаю, когда радиус провода плеча  $a\to 0$ . Так, например, для рассмотренного выше примера ( $\lambda=1000$  мм, a=7 мм,  $l_1=l_2=0.25\lambda,\ d=0.25\lambda,\ h=0$ ) получается, что  $Z_{11}=Z_{22}=(73,13+j42.5)$  Ом, в то время как расчет по формуле (1.30) дает результат (2.25):  $Z_{11}=Z_{22}=(72.225+j13.658)$  Ом.

Следует иметь в виду, что взаимные сопротивления, полученные по формуле (2.29), отнесены к пучности тока; в предположении синусоидального распределения тока пересчет взаимных сопротивлений ко входным точкам осуществляется путем деления на  $(\sin kl)^2$ . Это замечание справедливо для большинства таблиц и графиков взаимных сопротивлений, приведенных в различных учебных и учебных пособиях по антеннам [9,11].

В настоящее время в связи с развитием строгих методов расчета распределения тока в связанных вибраторах, базирующихся на применении компьютеров, метод наведенных ЭДС может иметь лишь ограниченное применение. В частности, им целесообразно пользоваться при небольшом числе весьма тонких и коротких связанных вибраторов.

Представляется интересным сравнение результатов расчета входного сопротивления методом наведенных ЭДС — результаты (2.27) и (2.28) и строгим (с использованием программы MMANA [8]). Результаты сравнения приведены в таблице 2.1. Имеющееся различие результатов расчетов объяснятся тем, что программный комплекс MMANA вычисляет ток по длине вибратора (в том

числе и в точках питания) строго, а в методе наведенных ЭДС заведомо исходят из синусоидального распределения тока.

Табл. 2.1

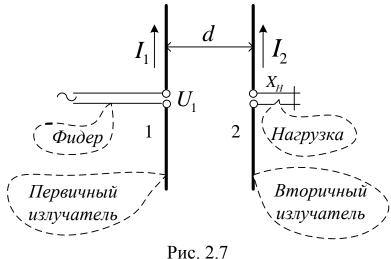
Рис. 2.5б ( $\lambda = 1000$ мм, $a = 7$ мм, $l = 0.25\lambda$ , $d = 0.25\lambda$ )			
Метод наведенных ЭДС	Программа MMANA		
$\dot{I}_{\text{вх1}} = \dot{I}_{\text{вх2}}$ (синфазный режим)	$\dot{U}_{\text{вх1}} = \dot{U}_{\text{вх2}} = 1$ (синфазный режим)		
$Z_{\text{BX1}} = (113,03 - j14,64) \text{ Om.}$	$Z_{\text{BX1}} = (129,0 - j17,15) \text{ Om}$		
$\dot{I}_{\text{BX}1} = -\dot{I}_{\text{BX}2}$	$\dot{U}_{\rm BX1} = 1, \ \dot{U}_{\rm BX2} = -1$		
(противофазный режим)	(противофазный режим)		
$Z_{\text{BX1}} = (31,4 + j42,0) \text{ Om}$	$Z_{\text{BX1}} = (55,24 + j98,46) \text{ Om}$		

Применяя программу MMANA, следует обратить внимание на то, что в ней качестве источников задаются амплитуды и фазы напряжений, а не токов. Если источник один, то фаза безразлична. Но если исследуется система с несколькими (даже с двумя) источниками, то в каждом нужно задать не только амплитуду, но и фазу напряжения.

В рассмотренном примере (рис. 2.5б, табл. 2.1), когда амплитуды токов равны, а фазовый сдвиг токов равен нулю (синфазный режим)  $\dot{I}_{\rm BX1}=\dot{I}_{\rm BX2}$ , имеем  $Z_{\rm BX1}=Z_{\rm BX2}=Z_{11}+Z_{12}$ . Понятно, что  $\dot{I}_{\rm BX1}Z_{\rm BX1}=\dot{I}_{\rm BX2}Z_{\rm BX2}$ , т.е.  $\dot{U}_{\rm BX1}=\dot{U}_{\rm BX2}$ . Для противофазного режима  $\dot{I}_{\rm BX1}=-\dot{I}_{\rm BX2}$ . При этом  $Z_{\rm BX1}=Z_{\rm BX2}=Z_{11}-Z_{12}$ . Напряжения связаны соотношениями  $\dot{I}_{\rm BX1}Z_{\rm BX1}=-\dot{I}_{\rm BX2}Z_{\rm BX2}$ , что равносильно  $\dot{U}_{\rm BX1}=-\dot{U}_{\rm BX2}$ .

#### 2.4. Система из первичного и вторичного излучателей

Согласно [1], первичным излучателем антенны называется излучающий элемент антенны, связанный с фидером. Вторичный излучатель антенны — это излучающий элемент антенны, не связанный с фидером и возбуждаемый электромагнитным полем первичного излучателя. В настоящем разделе под элементами антенны будем понимать линейные электрические симметричные вибраторы (рис. 2.7). Традиционно во всех учебниках и учебных пособиях по антеннам излучатель, подключенный к фидеру, назывался активным (излучающим), а излучатель, не связанный с фидером — пассивным. В соответствии с [1], применение терминов: активный, излучающий и пассивный для системы излучателей (рис. 2.7), считается недопустимым. Будем следовать требованиям [1].



На рис. 2.7 вибратор 2 будет вторичным, т.е. питание от генератора к нему не подводится ( $U_2 = 0$ ) и он возбуждается полем первичного вибратора 1. Регулирование тока во вторичном вибраторе достигается включением на его входные зажимы специального настроечного сопротивления, которое обычно выбирается чисто реактивным.

Система линейных уравнений типа уравнений Кирхгофа при этом запишется в следующем виде:

$$\dot{U}_{\text{BX1}} = Z_{11}\dot{I}_{\text{BX1}} + Z_{12}\dot{I}_{\text{BX2}}, 
0 = Z_{21}\dot{I}_{\text{BX1}} + (Z_{22} + jX_{\text{H}})\dot{I}_{\text{BX2}}.$$
(2.30)

Из второго уравнения (2.30) сразу же определяется отношение токов в системе первичный и вторичный излучатели:

$$\dot{I}_{\text{BX 2}}/\dot{I}_{\text{BX 1}} = -Z_{21}/(Z_{22} + jX_{\text{H}}) = qe^{j\psi},$$
 (2.31)

где:

$$q = \sqrt{(R_{12}^2 + X_{12}^2)/(R_{22}^2 + (X_{22} + X_H))^2},$$
  

$$\psi = \pi + \operatorname{arctg}(X_{12}/R_{12}) - \operatorname{arctg}((X_{22} + X_H)/R_{22})).$$
(2.32)

Входящие в формулы (2.31) и (2.32) сопротивления должны быть отнесены ко входным клеммам, что осуществляется путем деления их значений на  $(\sin kl)^2$ .

При настройке вторичного излучателя в резонанс, когда  $X_{22} + X_{\rm H} = 0$ , ток в нем достигает максимального значения при любых расстояниях d. Настройка может достигаться как регулировкой  $X_{\rm H}$  при неизменной полуволновой длине излучателя, так и регулировкой длины плеч излучателя при  $X_{\rm H}=0$ , т.е. при коротком замыкании. На практике наибольшее значение имеют два режима настройки вторичного излучателя: режим рефлектора и режим директора. В режиме рефлектора подбором расстояния d и настройки  $X_{\rm H}$  во вторичном излучателе создается такой ток (по амплитуде и фазе), что в направлении первичного излучателя создается максимальное поле, а в направлении вторичного излучателя поле минимально.

В режиме директора подбор расстояния d и настройка  $X_{\rm H}$  осуществляются так, что в направлении вторичного излучателя создается максимальное поле, а минимум излучения — в направлении первичного излучателя.

Следует обратить внимание на то, что q и  $\psi$  взаимосвязаны. При изменении  $X_{\rm H}$  меняются одновременно обе эти величины. Поэтому добиться одновременно нужных значений q и  $\psi$  для вторичного излучателя невозможно.

В качестве примера ниже приведены результаты расчета нормированных амплитудных диаграмм направленности в H – плоскости двух связанных линейных полуволновых симметричных электрических вибраторов (рис. 2.3). Первичным выбран излучатель 1, вторичным — 2. Значения  $X_{\rm H}$  указаны в табл. 2.2 и табл. 2.3. Для радиуса проводов плеч вибраторов принято условие  $a \to 0$ . Собственные и наведенные сопротивления рассчитывались методом наведенных ЭДС по формуле (2.29). Для расчета амплитудных диаграмм направленности использовался множитель системы, входящий в (2.16) —  $f_{\rm c}(\varphi) = \sqrt{1+q^2+2q\cos(\psi-kd\sin\varphi)}$ . Строгая оптимизация рефлекторных и директорных свойств вторичного излучателя не проводилась.

Результаты расчетов представлены в табл. 2.2, табл. 2.3 и на рис. 2.8.

Табл. 2.2

Первичный излучатель	Вторичный излучатель в режиме			
	рефлектора			
Исходные данные				
$l/\lambda = 0.25; a \rightarrow 0$	$l/\lambda = 0.25; a \to 0; X_{\rm H} = 0$			
Результаты расчетов				
$Z_{11} = (73.1 + j42.5) \text{ Om}$	$Z_{22} = Z_{11}$			
$Z_{12} = (40.8 - j28.3) \text{ Om}$	$Z_{21} = Z_{12}$			
$q=0$ ,587; $\psi=2$ ,01 ( $\psi=115^{\circ}$ ); $F(arphi)$ — см. рис. 2.8a				

Табл. 2.3

Первичный излучатель	Вторичный излучатель в режиме			
	директора			
Исходные данные				
$l/\lambda = 0.25; a \rightarrow 0$	$l/\lambda = 0.25; a \to 0; X_{\rm H} = -140  {\rm OM}$			
Результаты расчетов				
$Z_{11} = (73.1 + j42.5) \text{ Om}$	$Z_{22} = Z_{11}$			
$Z_{12} = (40.8 - j28.3) \text{ Om}$	$Z_{21} = Z_{12}$			
$q=0$ ,408; $\psi=3$ ,461 ( $\psi=198$ ,4 $^{\circ}$ ), $F(arphi)$ — см. рис. 2.8б				

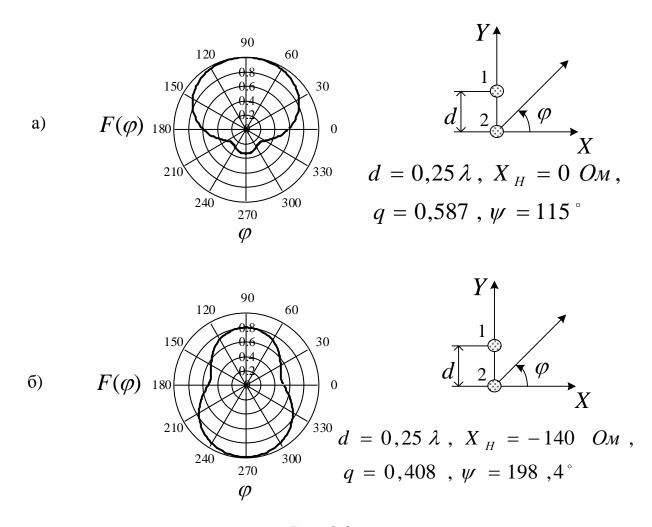


Рис. 2.8

Напомним, что в расчетных примерах в качестве первичного выбран излучатель 1, а в качестве вторичного — излучатель 2. Диаграмма на рис. 2.8а иллюстрирует рефлекторные свойства вторичного излучателя, потому что в направлении первичного излучателя создается более интенсивное поле, а в направлении вторичного излучателя формируется поле существенно меньшей интенсивности. Диаграмма на рис. 2.8б свидетельствует о директорных свойствах вторичного излучателя, потому что в направлении вторичного излучателя создается более интенсивное поле, а поле меньшей интенсивности формируется в направлении первичного излучателя.

#### 3. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

#### 3.1. Задачи

- 1. Рассчитать и изобразить графически распределение модуля тока вдоль тонкого линейного симметричного электрического вибратора, имеющего длину плеча  $l=1,0\lambda$ . Рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности в E плоскости и построить в прямоугольной системе координат с логарифмическим масштабом соответствующую ей амплитудную диаграмму направленности.
- 2. Определить ширину главного лепестка нормированной амплитудной диаграммы направленности в E плоскости по уровню нулевого излучения  $2\theta_0$  и по уровню половинной мощности  $2\theta_{0,5}$  для линейного симметричного электрического вибратора с длиной плеча 0,5 м, если вибратор излучает на частоте 375 МГц. (*Ответ*:  $2\theta_0 = 74^\circ$ ,  $2\theta_{0,5} = 34^\circ$ ).
- 3. Линейный симметричный электрический вибратор имеет длину плеча 1,0 м и излучает на частоте 187,5 МГц. Определить число боковых лепестков в нормированной амплитудной диаграмме направленности и их уровни в децибелах. (*Ответ*: n=4,  $\delta=-10$ ,5 дБ).
- 4. Определить ширину главного лепестка нормированной амплитудной диаграммы направленности в E плоскости по уровню нулевого излучения  $2\theta_0$  и по уровню половинной мощности  $2\theta_{0,5}$  для линейного симметричного электрического вибратора с длиной плеча 0,5 м, если вибратор излучает на частоте 420 МГц. (*Ответ*:  $2\theta_0 = 50^\circ$ ,  $2\theta_{0,5} = 18^\circ$ ).
- 5. Линейный симметричный электрический вибратор имеет длину плеча 1,0 м и излучает на частоте 210 МГц. Определить число боковых лепестков в диаграмме направленности и их уровни в децибелах. (*Ответ*: n=4,  $\delta=-2$ ,0 дБ).
- 6. Рассчитать и изобразить графически распределение модуля комплексного значения тока вдоль линейного симметричного электрического вибратора, имеющего длину плеча 0,5 м, диаметр провода плеча 0,025 м и излучающего на частоте 300 МГц. Сравнить полученное распределение с распределением модуля тока, рассчитанным в предположении, что диаметр плеча вибратора стремится к нулю.
- 7. Определить значение максимального коэффициента направленного действия линейного симметричного электрического вибратора, имеющего длину плеча 0,5 м и излучающего на частоте 375 МГц. Определить значение коэффициента направленного действия этого же вибратора в направлении, составляющем угол  $80^{\circ}$  с осью вибратора. (*Ответ*:  $D_{max} = 3,28$ ; D = 2,56).
- 8. Определить значение максимального коэффициента направленного действия линейного симметричного электрического вибратора, имеющего длину плеча 0,25 м и излучающего на частоте 750 МГц. Определить значение коэффициента направленного действия этого же вибратора в направлении, со-

ставляющем угол  $10^{\circ}$  с нормалью к оси вибратора. (*Ответ*:  $D_{max} = 3,28; D = 2,56$ ).

9. Определить значение входного сопротивления линейного симметричного электрического вибратора, излучающего на частоте 300 МГц, имеющего длину плеча 0,5 м, а диаметр провода плеча 0,025 м. Фазовую скорость волны тока вдоль вибратора принять равной скорости света.

$$(Omsem: Z = (587,7 - j115,4) \text{ Om}).$$

10. Определить значение входного сопротивления линейного симметричного электрического вибратора, излучающего на частоте 180 МГц, имеющего длину плеча 0,5 м, а диаметр провода плеча 0,025 м. Фазовую скорость волны тока вдоль вибратора принять равной скорости света.

$$(Omsem: Z = (125,7 + j75,1) \text{ Om}).$$

11. Определить значение входного сопротивления линейного симметричного электрического вибратора, излучающего на частоте 420 МГц, имеющего длину плеча 0,5 м, а диаметр провода плеча 0,025 м. Фазовую скорость волны тока вдоль вибратора принять равной скорости света.

$$(Omsem: Z = (90,9 - j102,4) \text{ Om}).$$

12. Полуволновый линейный симметричный электрический вибратор ориентирован своей осью вдоль оси Y (рис. 3.1a). Значение модуля тока в пучности его распределения равно 1 А. Определить значение амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей в точке пространства, находящейся в дальней зоне и характеризуемой пространственным углом  $\psi = 80^{\circ}$  (угол  $\psi$  образован осью вибратора и направлением на точку наблюдения) и расстоянием r = 2000 м от точек питания (центра) вибратора.

(*Omsem*: 
$$E = 0.029 \,\text{B/m}$$
;  $H = 7.7 \times 10^{-5} \,\text{A/m}$ ).

13. Полуволновый линейный симметричный электрический вибратор ориентирован своей осью вдоль оси X (рис. 3.1б). Значение модуля тока в пучности его распределения равно 1 А. Определить значение амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей в точке пространства, находящейся в дальней зоне и характеризуемой пространственным углом  $\psi = 40^{\circ}$  (угол  $\psi$  образован осью вибратора и направлением на точку наблюдения) и расстоянием r = 2000 м от точек питания (центра) вибратора.

(*Omsem*: E = 0.017 B/m;  $H = 4.5 \times 10^{-5} \text{A/m}$ ).

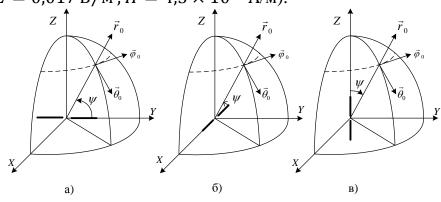
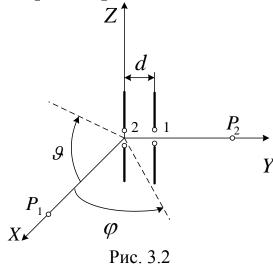


Рис. 3.1

14. Полуволновый линейный симметричный электрический вибратор ориентирован своей осью вдоль оси Z (рис. 3.16). Значение модуля тока в пучности его распределения равно 1 А. Определить значение амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей в точке пространства, находящейся в дальней зоне и характеризуемой пространственным углом  $\psi = 60^{\circ}$  (угол  $\psi$  образован осью вибратора и направлением на точку наблюдения) и расстоянием r = 2000 м от точек питания (центра) вибратора.

(*Omsem*: E = 0.024 B/m;  $H = 6.4 \times 10^{-5} \text{A/m}$ ).

- 15. Два одинаковых линейных симметричных вибратора с длиной плеча  $l=0.4\lambda$  расположены параллельно друг другу на расстоянии  $d=0.25\lambda$  (рис. 3.2). Вибраторы возбуждаются синфазными токами, амплитуды которых на входных зажимах одинаковы и равны 1 А. Определить амплитуды напряженностей суммарного электрического поля излучения вибраторов в точках  $P_1$  и  $P_2$ , расположенных соответственно на осях OX и OY на расстоянии  $r=1000\,$  м от начала координат. ( $Omsem: E_1=0.369\,$  В/м ,  $E_2=0.261\,$  В/м ).
- 16. Два одинаковых линейных симметричных вибратора с длиной плеча  $l=0.4\lambda$  расположены параллельно друг другу на расстоянии  $d=0.25\lambda$  (рис. 3.2). Вибраторы возбуждаются противофазными токами, амплитуды которых на входных зажимах одинаковы и равны 1 А. Определить амплитуды напряженностей суммарного электрического поля излучения вибраторов в точке  $P_1$  и  $P_2$ , расположенных соответственно на осях OX и OY на расстоянии r=1000 м от начала координат. ( $Omsem: E_1=0, E_2=0.261\,\mathrm{B/m}$ ).



17. Два одинаковых линейных симметричных электрических вибратора с длиной плеча  $l=0,4\lambda$  расположены параллельно друг другу на расстоянии  $d=0,25\lambda$  (рис. 3.2). Вибраторы возбуждаются токами, значения амплитуд которых на входных зажимах одинаковы и равны 1 A, а отношение комплексных значений токов определяется соотношением  $\dot{I}_2/\dot{I}_1=e^{j\pi/2}$  (ток  $\dot{I}_1$  отстает по фазе от тока  $\dot{I}_2$ ). Определить амплитуды напряженностей суммарного электрического поля излучения вибраторов в точках  $P_1$  и  $P_2$ , расположенных соответ-

ственно на осях OX и OY на расстоянии  $r=1000\,$  м от начала координат. ( $Om-веm: E_1=0,261\,\mathrm{B/m}$  ,  $E_2=0,369\,$  B/м).

- 18. Два одинаковых линейных симметричных электрических вибратора с длиной плеча  $l=0,4\lambda$  расположены параллельно друг другу на расстоянии  $d=0,25\lambda$  (рис. 3.2). Вибраторы возбуждаются токами, значения амплитуд которых на входных зажимах одинаковы и равны 1 A, а отношение комплексных значений токов определяется соотношением  $\dot{I}_2/\dot{I}_1=e^{-j\pi/2}$  (ток  $\dot{I}_1$  опережает по фазе от тока  $\dot{I}_2$ ). Определить амплитуды напряженностей суммарного электрического поля излучения вибраторов в точках  $P_1$  и  $P_2$ , расположенных соответственно на осях OX и OY на расстоянии r=1000 м от начала координат. (Omegem:  $E_1=0,261\,\mathrm{B/m},\,E_2=0$ ).
- 19. Задана система двух линейных симметричных электрических вибраторов с длиной плеча  $l=0.4\lambda$ , показанных на рис. 3.2. Расстояние  $d=0.25\lambda$ , отношение амплитуд токов q=1.0, разность фаз  $\psi=\varphi_2-\varphi_1=0$ . Рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить её нормированную амплитудную диаграмму направленности в плоскости YOZ в полярной системе координат.
- 20. Задана система двух линейных симметричных электрических вибраторов с длиной плеча  $l=0,4\lambda$ , показанных на рис. 3.2. Расстояние  $d=0,25\lambda$ , отношение амплитуд токов q=1,0, разность фаз  $\psi=\varphi_2-\varphi_1=90^\circ$ . Рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить её нормированную амплитудную диаграмму направленности в плоскости YOZ в полярной системе координат.
- 21. Задана система двух линейных симметричных электрических вибраторов с длиной плеча  $l=0.4\lambda$ , показанных на рис. 3.2. Расстояние  $d=0.25\lambda$ , отношение амплитуд токов q=1.0 разность фаз  $\psi=\varphi_2-\varphi_1=180^\circ$ . Рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить нормированную амплитудную диаграмму направленности в плоскости YOZ в полярной системе координат.
- 22. Задана система двух линейных симметричных электрических вибраторов с длиной плеча  $l=0.4\lambda$ , показанных на рис. 3.2. Расстояние  $d=0.5\lambda$ , отношение амплитуд токов q=1.0, разность фаз  $\psi=\varphi_2-\varphi_1=0^\circ$ . Рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить нормированную амплитудную диаграмму направленности в плоскости YOZ в полярной системе координат.
- 23. Задана система двух линейных симметричных электрических вибраторов с длиной плеча  $l=0.4\lambda$ , показанных на рис. 3.2. Расстояние  $d=0.5\lambda$ , отношение амплитуд токов q=1.0, разность фаз  $\psi=\varphi_2-\varphi_1=90^\circ$ . Рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить её нормированную амплитудную диаграмму направленности в плоскости YOZ в полярной системе координат.
- 24. Задана система двух линейных симметричных электрических вибраторов с длиной плеча  $l=0.4\lambda$ , показанных на рис. 3.2. Расстояние  $d=0.5\lambda$ ,

- отношение амплитуд токов q=1,0, разность фаз  $\psi=\varphi_2-\varphi_1=180^\circ$ . Рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить нормированную амплитудную диаграмму направленности в плоскости YOZ в полярной системе координат.
- 25. Задана система двух линейных симметричных электрических вибраторов с длиной плеча  $l=0.4\lambda$ , показанных на рис. 3.2. Расстояние  $d=1.0\lambda$ , отношение амплитуд токов q=1.0, разность фаз  $\psi=\varphi_2-\varphi_1=0^\circ$ . Рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить нормированную амплитудную диаграмму направленности в плоскости YOZ в полярной системе координат.
- 26. Задана система двух линейных симметричных электрических вибраторов с длиной плеча  $l=0.4\lambda$ , показанных на рис. 3.2. Расстояние  $d=1.0\lambda$ , отношение амплитуд токов q=1.0, разность фаз  $\psi=\varphi_2-\varphi_1=90^\circ$ . Рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить нормированную амплитудную диаграмму направленности в плоскости YOZ в полярной системе координат.
- 27. Задана система двух линейных симметричных электрических вибраторов с длиной плеча  $l=0.4\lambda$ , показанных на рис. 3.2. Расстояние  $d=0.5\lambda$ , отношение амплитуд токов q=1.0, разность фаз  $\psi=\varphi_2-\varphi_1=180^\circ$ . Рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить нормированную амплитудную диаграмму направленности в плоскости YOZ в полярной системе координат.
- 28. Два бесконечно тонких связанных полуволновых линейных симметричных электрических вибратора (первичный излучатель 1 и вторичный излучатель 2) расположены в пространстве так, как показано на рис. 3.2. Расстояние между вибраторами  $d=0.15\lambda$ . К входным зажимам вторичного излучателя 2 подключена положительная реактивная нагрузка 60 Ом. Определить входное сопротивление первичного излучателя. Для излучающей системы рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить её нормированную диаграмму направленности в плоскости XOY в полярной системе координат. (Ответ:  $Z_1 = (62.05 + j69.7)$  Ом).
- 29. Два бесконечно тонких связанных полуволновых линейных симметричных электрических вибратора (первичный излучатель 1 и вторичный излучатель 2) расположены в пространстве так, как показано на рис. 3.2. Расстояние между вибраторами  $d=0.15\lambda$ . К входным зажимам вторичного излучателя 2 подключена отрицательная реактивная нагрузка 60 Ом. Определить входное сопротивление первичного излучателя. Для излучающей системы рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить амплитудную нормированную диаграмму направленности в плоскости XOY в полярной системе координат. (Omsem:  $Z_1=(23.9+j42.4)$ 0м).
- 30. Два бесконечно тонких связанных полуволновых линейных симметричных электрических вибратора (первичный излучатель -1 и вторичный излучатель -2) расположены в пространстве так, как показано на рис. 3.2. Рас-

- стояние между вибраторами  $d=0.15\lambda$ . К входным зажимам вторичного излучателя 2 подключена положительная реактивная нагрузка 60 Ом. Определить входное сопротивление первичного излучателя. Для излучающей системы рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить амплитудную нормированную диаграмму направленности в плоскости YOZ в полярной системе координат. (*Ответ*:  $Z_1 = (62.05 + j69.7)$  Ом).
- 31. Два бесконечно тонких связанных полуволновых линейных симметричных электрических вибратора (первичный излучатель 1 и вторичный излучатель 2) расположены в пространстве так, как показано на рис. 3.2. Расстояние между вибраторами  $d = 0.15\lambda$ . К входным зажимам вторичного излучателя 2 подключена отрицательная реактивная нагрузка 60 Ом. Определить входное сопротивление первичного излучателя. Для излучающей системы рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить нормированную амплитудную диаграмму направленности в плоскости YOZ в полярной системе координат. (*Ответ*:  $Z_1 = (23.9 + j42.4)$  Ом).
- 32. Два бесконечно тонких связанных полуволновых линейных симметричных электрических вибратора (первичный излучатель 1 и вторичный излучатель 2) расположены в пространстве так, как показано на рис. 3.2. Расстояние между вибраторами  $d=0.15\lambda$ . К входным зажимам вторичного излучателя 2 подключена реактивная нагрузка  $X_{2H}$  так, что его ток опережает по фазе ток вибратора 1 на угол  $\psi=118.8^{\circ}$ . Определить значение реактивной нагрузки  $X_{2H}$ . Для излучающей системы рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить нормированную амплитудную диаграмму направленности в H плоскости в прямоугольной системе координат с логарифмическим масштабом. Определить ширину диаграммы направленности по уровню половинной мощности. ( $Omsem: 2\varphi_{0.5} = 172^{\circ}$ ).
- 33. Два бесконечно тонких связанных полуволновых линейных симметричных электрических вибратора (первичный излучатель 1 и вторичный излучатель 2) расположены в пространстве так, как показано на рис. 3.2. Расстояние между вибраторами  $d=0,15\lambda$ . К входным зажимам вторичного излучателя 2 подключена реактивная нагрузка  $X_{2H}$  так, что его ток отстает по фазе от тока вибратора 1 на угол  $\psi=173,2^{\circ}$ . Определить значение реактивной нагрузки  $X_{2H}$ . Для излучающей системы рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить нормированную амплитудную диаграмму направленности в E плоскости в прямоугольной системе координат с логарифмическим масштабом. Определить ширину диаграммы направленности по уровню половинной мощности. (Omsem:  $2\varphi_{0,5}=87^{\circ}$ ).
- 34. Определить сопротивление излучения линейного симметричного волнового вибратора (рис. 3.3а), отнесенное к его току в пучности, рассматривая этот вибратор как систему, состоящую из двух связанных полуволновых вибраторов (рис. 3.3 б). (*Ответ*:  $R_{\Sigma\Pi} = 199,0~\text{Ом}, X_{\Sigma\Pi} = 125,3~\text{Ом}.)$ ).

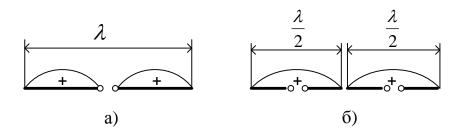


Рис. 3.3

## 3.2. Примеры решения задач

**Задача 1**. Определить ширину главного лепестка нормированной амплитудной диаграммы направленности в E – плоскости по уровню нулевого излучения  $2\theta_0$  и по уровню половинной мощности  $2\theta_{0,5}$  для линейного симметричного электрического вибратора с длиной плеча 0,7 м, если вибратор излучает на частоте 300 МГц.

Определить число боковых лепестков в нормированной амплитудной диаграмме направленности и их уровни в децибелах.

#### Решение задачи

Расположим линейный симметричный электрический вибратор вдоль оси Z (рис. 3.4a). Как известно, E – плоскость вибратора содержит его ось. Угол  $\theta$  будет аргументом амплитудной характеристики направленности в E – плоскости. Нормированная амплитудная диаграмма направленности вибратора описывается формулой (1.15), которая имеет вид:  $F(\theta) = |[\cos(kl\cos\theta) - \cos kl]/(1 - \cos kl)\sin\theta|$ .

Подставив в эту формулу  $l=0.7~\lambda,\,k=2\pi/\lambda,\,$  с учетом того, что частоте 300 МГц соответствует длина волны  $\lambda=1.0~$  м, получим расчетное выражение в форме:

$$F(\theta) = |[\cos(1.4\pi\cos\theta) - \cos 1.4\pi]/(1 - \cos 1.4\pi)\sin\theta|. \tag{3.1}$$

Результаты расчета, выполненные с применением пакета программ Mathcad 14 [6], приведены на рис. 3.4б. Диаграмма построена в полярной системе координат. По диаграмме определяем, что число боковых лепестков равно четырем.

На рис. 3.5 приведена та же диаграмма  $F(\theta)$ , но построенная в прямоугольной (декартовой) системе координат с логарифмическим масштабом по оси ординат. По этой диаграмме очень удобно определить уровень боковых лепестков в децибелах:  $\xi = -2.0$  дБ.

На рис. 3.6 приведена та же диаграмма  $F(\theta)$ , но построенная в прямоугольной (декартовой) системе координат с линейным масштабом по оси ординат. По этой диаграмме очень просто определить ширину диаграммы направленности по уровню нулевого излучения  $2\theta_0 = 50^\circ$  и по уровню половинной мощности  $2\theta_{0,5}=24^\circ$ . Напомним, что ширина диаграммы  $2\theta_0$  определяется по уровню нулевого (минимального) излучения в границах основного (главного) лепестка. Ширина диаграммы направленности  $2\theta_{0,5}$  определяется в границах главного лепестка на уровне  $F(\theta)=0,707$ .

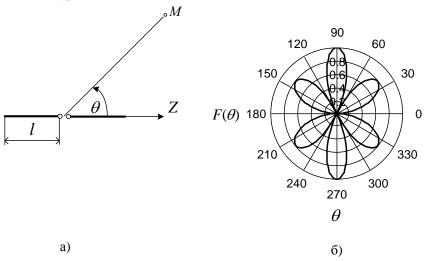
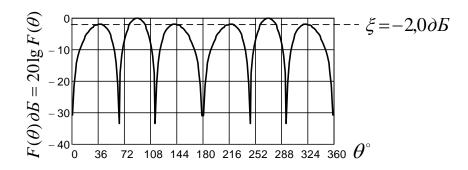
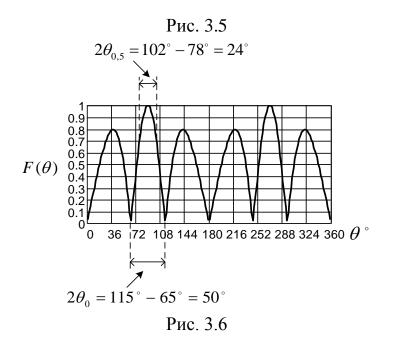


Рис. 3.4





**Задача 2.** Приближенным методом, основанном на аналогии тонкого вибратора и разомкнутой двухпроводной линии с потерями, определить значение входного сопротивления линейного симметричного электрического вибратора, излучающего на частоте 352,94 МГц, имеющего длину плеча l=0,25 м, радиус провода плеча a=0,00625 м. Сравнить полученный результат с результатом, полученным с применением программы ММАNA [7].

#### Решение задачи

Для расчета входного сопротивления применим формулу (1.30). Предварительно вычислим значения некоторых величин. Заданной частоте соответствует длина волны  $\lambda=0.85$  м. Отношение длины плеча к длине волны  $l/\lambda=0.2941$ . Отношение длины плеча к диаметру провода плеча l/d=20.

По рис.1.10 определим отношение скорости света к фазовой скорости в эквивалентной линии с потерями, а, следовательно, и в вибраторе c/v = 1,07. С учетом этого коэффициент фазы в эквивалентной линии  $\beta = 1,07$  k = 1,07  $(2\pi/\lambda) = 7,909$  1/м.

Коэффициент затухания определим по формуле (1.32) с учетом замены k на  $\beta$ , то есть  $\alpha = R_{\Sigma\Pi}/120l[ln(l/\alpha)-1][1-sin2\beta l/2\beta l]$ . Сопротивление излучения, отнесенное к пучности тока, рассчитаем по формуле (1.28)  $R_{\Sigma} = 60 \int_0^{\pi} \{[\cos(kl\cos\theta) - \cos kl]^2/\sin\theta\} d\theta = 114,1$  Ом. В результате значение коэффициента затухания  $\alpha = 1,195$  1/м.

Вычислим по формуле (1.32) комплексное волновое сопротивление эквивалентной линии с потерями:

$$\tilde{Z}_{\rm B} = 120[ln(l/a) - 1][1 - j\alpha/\beta] = (322.7 - j48.75) \text{ Om.}$$

Подставим исходные и полученные данные в формулу (1.30). Приняв во внимание, что комплексная постоянная распространения  $\gamma = \alpha + j\beta$ , получим

$$Z_{\rm BX} = (128,2 + j108,76)$$
 Ом.

Применение программы MMANA [7] дает результат:

$$Z_{\rm BX} = (224.8 + j129.4) \, {\rm Om}.$$

Задача 3. Два одинаковых линейных симметричных электрических вибратора с длиной плеча l=0,4 м расположены параллельно друг другу на расстоянии  $d=0,25\lambda$  (рис. 3.2). Вибраторы возбуждаются токами частоты 300 МГц. Значения амплитуд токов на входных зажимах одинаковы и равны 1 А. Отношение комплексных значений токов  $\dot{I}_2/\dot{I}_1=e^{-j\pi/2}$  (ток  $\dot{I}_1$  опережает по фазе ток  $\dot{I}_2$ ). Определить амплитуды напряженностей суммарного электрического поля излучения вибраторов в точках  $P_1$  и  $P_2$ , расположенных соответственно на осях OX и OY на расстоянии r=1000 м от начала координат.

#### Решение задачи

Точки  $P_1$  и  $P_2$  расположены в общей для обоих вибраторов экваториальной плоскости, которая является H — плоскостью. Заданной частоте соответствует длина волны  $\lambda=1$ . Произведение  $kr=2\pi\,r/\lambda=6280$ , то есть значительно больше единицы. Это позволяет считать, что точки  $P_1$  и  $P_2$  находятся в дальней зоне. Значение амплитуды напряженности электрического поля в произвольной точке дальней зоны в H — плоскости определяется формулой (2.16), которую приведем здесь:

$$E(\varphi) = (60I_{\Pi}/r)(1 - \cos kl)\sqrt{1 + q^2 + 2q\cos(\psi - kd\sin\varphi)}.$$
 (3.2)

Так как заданы токи на входных зажимах, то учитывая, что  $\dot{I}_{\Pi} = \dot{I}_{\rm BX}/\sin k l$ , можно записать:

$$E(\varphi) = (60I_{\text{BX}}/r\sin kl)(1 - \cos kl)\sqrt{1 + q^2 + 2q\cos(\psi - kd\sin\varphi)}.$$
 (3.3)

По исходным данным отношение амплитуд токов q=1, разность фаз токов  $\psi=-\pi/2$ . Для точки  $P_1$  угол  $\varphi=0^\circ$ , поэтому для неё из (3.3) следует:

$$E(P_1) = (60I_{BX}/r\sin kl)(1 - \cos kl)\sqrt{2}.$$
(3.4)

Для точки  $P_2$  угол  $\varphi = 90^\circ$ , поэтому из (3.3) можно получить:

$$E(P_2) = (60I_{BX}/r\sin kl)(1 - \cos kl)\sqrt{2 + 2\cos(-\pi/2 - kd)}.$$
 (3.5)

Подставим в (3.4) и (3.5) исходные данные:  $I_{\text{BX}} = 1$  А; r = 1000 м;

 $kl = 2\pi \, l/\lambda = 0$ ,8  $\pi$ ;  $kd = 2\pi \, d/\lambda = 0$ ,5  $\pi$ . В результате получим:

$$E(P_1) = (60/1000\sin(0.8\pi))(1-\cos(0.8\pi))\sqrt{2} = 0.261 \text{ B/m},$$

$$E(P_2) = (60/1000 \sin 0.8\pi)(1 - \cos 0.8\pi)\sqrt{2 + 2\cos(-\pi)} = 0$$

**Задача 4**. Задана система двух линейных симметричных электрических вибраторов с длиной плеча  $l=0,4\lambda$ , показанных на рис. 3.7. Расстояние  $d=1,0\lambda$ , Отношение комплексных значений токов  $\dot{l}_2/\dot{l}_1=e^{j\pi/2}$ . Рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить нормированную амплитудную диаграмму направленности в плоскости YOZ в полярной системе координат.

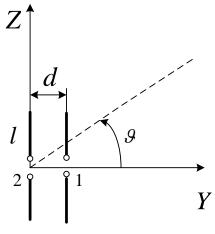


Рис. 3.7

#### Решение задачи

Плоскость YOZ для каждого вибратора является E – плоскостью. По условиям задачи отношение амплитуд токов q=1,0, разность фаз этих токов  $\psi=\varphi_2-\varphi_1=90^\circ$ .

Направленные свойства данной системы вибраторов в их общей E – плоскости определяются вторым и третьим множителями формулы (2.13). Первый множитель не зависит от угловых координат и поэтому не влияет на форму амплитудной диаграммы направленности. Таким образом, имеем:

$$f(\theta) = \{ [\cos(kl\sin\theta) - \cos kl] / \cos\theta \} \sqrt{1 + q^2 + 2q\cos(\psi - kd\cos\theta)}.$$
 (3.6)

Вычислим значения  $kl=(2\pi/\lambda)l=0.8\pi$  и  $kd=(2\pi/\lambda)d=2\pi$ . С учетом этого формула (3.6) примет вид, удобный для выполнения расчета характеристики направленности

$$f(\theta) = \{ [\cos(0.8\pi \sin \theta) - \cos 0.8\pi] / \cos \theta \} \sqrt{2 + 2\cos(\pi/2) - 2\pi \cos \theta}. \quad (3.7)$$

На рис. 3.8 приведена нормированная амплитудная диаграмма направленности в полярной системе координат, построенная по результатам расчетов с применением пакета программ Mathcad 14 [6]. Нормирование выполнено относительно максимального значения  $f(\vartheta)_{max}=2,587$ 

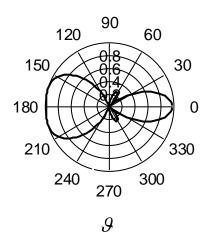


Рис. 3.8

Задача 5. Два бесконечно тонких связанных полуволновых линейных симметричных электрических вибратора (первичный излучатель — 1 и вторичный излучатель — 2) расположены в пространстве так, как показано на рис. 3.9. Расстояние между вибраторами  $d = 0.15\lambda$ . К входным зажимам вторичного излучателя 2 подключена положительная реактивная нагрузка 60 Ом. Определить входное сопротивление первичного излучателя 1. Для излучающей системы рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности и построить её нормированную диаграмму направленности в плоскости XOY в полярной системе координат.

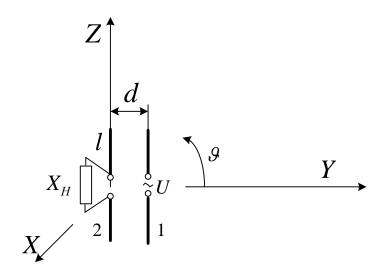


Рис. 3.9

#### Решение задачи

Применим систему уравнений (2.30)

$$\dot{U}_{\text{BX1}} = Z_{11}\dot{I}_{\text{BX1}} + Z_{12}\dot{I}_{\text{BX2}}, 
0 = Z_{21}\dot{I}_{\text{BX1}} + (Z_{22} + jX_{\text{H}})\dot{I}_{\text{BX2}}.$$
(3.8)

Поделив первое уравнение на  $\dot{I}_{\rm BX1}$ , получим:

$$Z_{\text{BX1}} = \dot{U}_{\text{BX1}} / \dot{I}_{\text{BX1}} = Z_{11} + Z_{12} \dot{I}_{\text{BX2}} / \dot{I}_{\text{BX1}} = Z_{11} + Z_{12 \text{ HaB}}.$$
 (3.9)

Определим значения величин, входящих в (3.9). Значение собственного сопротивления излучения  $Z_{11}$  вычисляется с помощью пакета программ Mathcad 14 [6] по формуле (2.29), если задать d=0 и h=0, то получим:

$$Z_{11} = R_{11} + jX_{11} = (73.1 + j42.5) \text{ Om.}$$
 (3.10)

Применение этой же формулы при условии, что  $d=0.15\lambda$  и h=0 позволяет получить:

$$Z_{12} = R_{12} + jX_{12} = (60.4 - j7.09) \text{ Om.}$$
 (3.11)

Далее необходимо вычислить отношение токов, входящее в (3.9). Для этого воспользуемся формулой (2.32) и найдем отношение амплитуд токов q и разность их фаз  $\psi = \varphi_2 - \varphi_1$ :

$$q = \sqrt{(R_{12}^2 + X_{12}^2)/(R_{22}^2 + (X_{22} + X_H))^2},$$

$$\psi = \pi + \operatorname{arctg}(X_{12}/R_{12}) - \operatorname{arctg}((X_{22} + X_H)/R_{22})).$$
(3.12)

Значение  $X_{22}=X_{11}=42,5$  Ом. По условиям задачи  $X_{\rm H}=60$  Ом. В результате получим  $q=0,483,\,\psi=2,073.$  Таким образом,

$$\dot{I}_{\rm BX2}/\dot{I}_{\rm BX1} = 0.483e^{j2.073}. (3.13)$$

Подставив в (3.9) найденные значения  $Z_{11}$ ,  $Z_{12}$ ,  $\dot{I}_{\rm Bx2}/\dot{I}_{\rm Bx1}$ , получим искомое значение входного сопротивления:  $Z_{\rm Bx1}=(62,05+j69,7)\,$  Ом.

Направленные свойства данной системы вибраторов в их общей H – плоскости (плоскости XOY) определяются третьим множителями формулы (2.16), так как первый и второй множители не зависят от угловых координат и поэтому

не влияют на форму амплитудной диаграммы направленности. Таким образом, имеем:

$$f(\varphi) = \sqrt{1 + q^2 + 2q\cos(\psi - kd\sin\varphi)}.$$
 (314)

Вычислим значения  $kd=(2\pi/\lambda)d=0$ ,3 $\pi$ . С учетом этого формула (3.14) примет вид:

$$f(\theta) = \sqrt{1 + q^2 + 2q\cos(\psi - 0.3\pi\sin\varphi)}.$$
 (3.15)

На рис. 3.10 приведена нормированная амплитудная диаграмма направленности в полярной системе координат, построенная по результатам расчетов с применением пакета программ Mathcad 14 [6]. Нормирование выполнено относительно максимального значения  $f(\varphi)_{max} = 1,282$ .

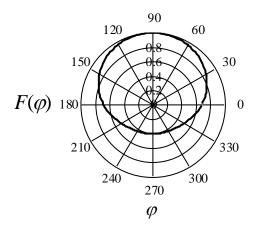


Рис. 3.10

## 5. ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

- 1. Как ориентированы в пространстве главные плоскости векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  (E плоскость и H– плоскость) линейного симметричного электрического вибратора?
- 2. Запишите функцию, определяющую распределение тока вдоль бесконечно тонкого линейного симметричного электрического вибратора.
- 3. Запишите функцию, связывающую ток на входе линейного симметричного электрического вибратора и ток в пучности.
- 4. Изобразите в полярной системе координат нормированную амплитудную диаграмму направленности полуволнового линейного симметричного электрического вибратора в дальней зоне в плоскости вектора  $\vec{H}$ .
- 5. Изобразите в полярной системе координат нормированную амплитудную диаграмму направленности полуволнового линейного симметричного электрического вибратора в дальней зоне в плоскости вектора  $\vec{E}$ .
- 6. Изобразите в прямоугольной (декартовой) системе координат нормированную амплитудную диаграмму направленности линейного симметричного электрического вибратора в дальней зоне в плоскости вектора  $\vec{E}$ .
- 7. Изобразите в прямоугольной (декартовой) системе координат нормированную амплитудную диаграмму направленности полуволнового линейного симметричного электрического вибратора в дальней зоне в плоскости вектора  $\vec{H}$ .
- 8. Чему равен КНД полуволнового линейного симметричного электрического вибратора в направлении максимального излучения?
- 9. В чем приближенность аналогии двухпроводной линии и линейного симметричного электрического вибратора?
- 10. Электромагнитные волны какого вида поляризации излучаются линейным симметричным электрическим вибратором в свободном пространстве в дальней зоне?
- 11. Как зависят от расстояния r значение амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей линейного симметричного электрического вибратора в дальней зоне?
- 12. Линейные симметричные электрические вибраторы какой длиной обычно применяются на практике?
- 13. Какова причина образования боковых лепестков амплитудной диаграммы направленности линейного симметричного электрического вибратора?
- 14. Почему входное сопротивление линейного симметричного электрического вибратора является исключительно важным его параметром?
- 15. В чем состоит принципиальная особенность изменения входного сопротивления линейного симметричного электрического вибратора в зависимости от радиуса провода его плеча?
- 16. Какие линейные симметричные электрические вибраторы называется связанными?

- 17. Чем определяется значение множителя системы связанных вибраторов?
- 18. При каком условии в системе двух связанных линейных симметричных электрических вибраторов взаимные сопротивления равны наведенным?
- 19. В чем принципиальная разница между первичным и вторичным линейным симметричным электрическим вибратором?
- 20. Чем отличаются направленные свойства системы двух связанных линейных симметричных электрических вибраторов, когда вторичный излучатель работает в режиме рефлектора или директора?

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. ГОСТ 24375 80. Радиосвязь. Термины и определения.
- 2. Ерохин Г.А., Чернышев О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский В.Г. Антеннофидерные устройства и распространение радиоволн. Учебник для вузов/ Под ред. Г.А. Ерохина. 2-е издание М.: Горячая линия Телеком, 2004. 491с.: ил.
- 3. *Неганов В.А.*, *Табаков Д.П.*, *Яровой Г.П*. Современная теория и практические применения антенн /Под. ред. *В.А. Неганова*. М.: Радиотехника, 2009. 720 с.: ил.
- 4. *Бакалов В.П.*, *Дмитриков В.Ф.*, *Крук Б.И*. Основы теории цепей. Учебник для вузов/ Под ред. *В.П. Бакалова*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 2000. 588 с.: ил.
- 5. *Кубанов В.П.* Элементарные излучатели электромагнитных волн. Учебное пособие для вузов. Самара, ПГУТИ, 2010. 40 с.: ил.
- 6. *Очков В.Ф.* Mathcad 14 для студентов и инженеров: русская версия. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.: ил.
- 7. Гончаренко И.В. Антенны КВ и УКВ. Часть І. Компьютерное моделирование. ММАNA. М.: ИП РадиоСофт. Журнал «Радио». 2004 128 с.: ил.
- 8. *Линдваль В.Р.* Основы теории и проектирования проволочных антенн систем связи с использованием программы MMANA: Учебное пособие. Издание второе, переработанное и дополненное. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. унта, 2007. 122 с.: ил.
- 9. *Кочержевский Г.Н.* Антенно-фидерные устройства. М., «Связь», 1972. 472 с.: ил.
- 10. Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Техническая электродинамика. Учебное пособие для вузов / Под ред. Ю.В. Пименова. М.: Радио и связь, 2000. 536 с.
- 11. Айзенберг Г.З., С.П. Белоусов, Э.М. Журбенко и др. Коротковолновые антенны /Под ред. Г.З. Айзенберга. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1985. 536 с.: ил.

# В.П. Кубанов

# ЛИНЕЙНЫЕ СИММЕТРИЧНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВИБРАТОРЫ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Подписано в печать: 8.02. 2011
Тираж: 100 экз. Усл. п.л. 2,87. Заказ 869.
Отпечатано в издательстве учебной и научной литературы
Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики 443090, г. Самара, Московское шоссе, 77.

Т. 846 228-00-44