

Тема 1. Электромагнитные волны

Лекция 5. Излучение электромагнитных волн элементарным электрическим вибратором.

УЧЕБНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие об излучении электромагнитных волн
2. Решение задачи излучения электромагнитных волн элементарным электрическим вибратором
3. Анализ электромагнитного поля элементарного вибратора и его свойства

1. Понятие об излучении электромагнитных волн

Излучение электромагнитных волн широко применяется в радиолокации, радиосвязи, телевидении и других областях радиотехники, где передается электромагнитная энергия без проводов. Под излучением понимается перенос энергии электромагнитными волнами из области, где расположены источники, в окружающее пространство. При этом мощность излучения определяется средним за период колебания значением вектора Умова-Пойнтинга.

Излучение электромагнитной энергии возможно только при наличии в пространстве переменных токов проводимости, или смещения. Однако и при этом излученная энергия не всегда будет иметь практически ощутимую величину. Например, в обычном колебательном контуре с сосредоточенными параметрами (рис. 1, а), геометрические размеры которого малы по сравнению с длиной волны, электрическое поле сосредоточено в конденсаторе. Токи смещения замыкаются самым коротким путем между его обкладками. Магнитное поле сосредоточено, в основном, в катушке. За счет такой сосредоточенности полей от конденсатора и катушки в удаленные области окружающего пространства передается сравнительно небольшая энергия.

Если в конденсаторе увеличивать расстояние между пластинами (рис. 1, б), то на их краях возрастают токи смещения, которые ответвляются в окружающее пространство, удаляясь на значительное расстояние от своих источников - зарядов на пластинах конденсатора.

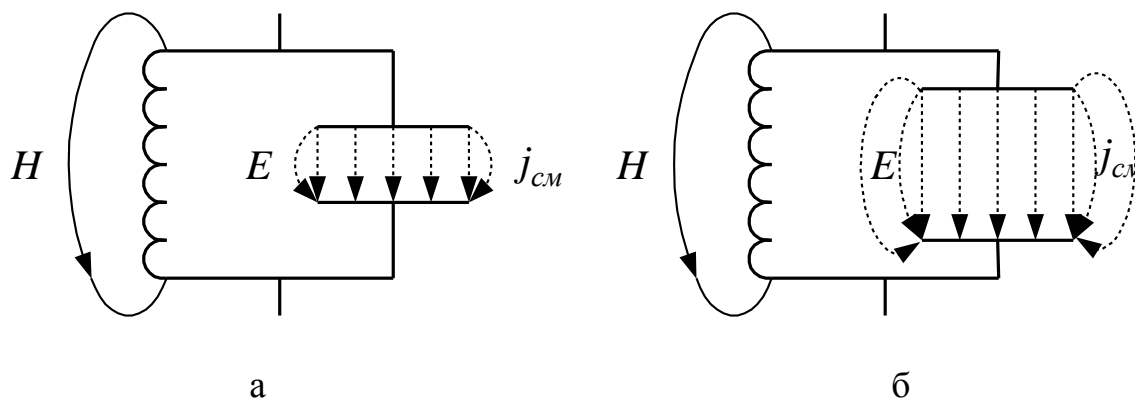


Рис. 1

Переменное электромагнитное поле, распространяясь в пространстве, теряет связь с источником, его создавшим (рис. 2). При этом изменяющееся электрическое поле порождает магнитное и, наоборот, в соответствии с первым и вторым уравнениями Максвелла. Токи смещения и силовые линии электрического поля становятся замкнутыми сами на себя. В пространстве возникает распространяющаяся "цепочка" взаимных превращений электрического и магнитного полей (рис. 2). Это и есть электромагнитная волна.

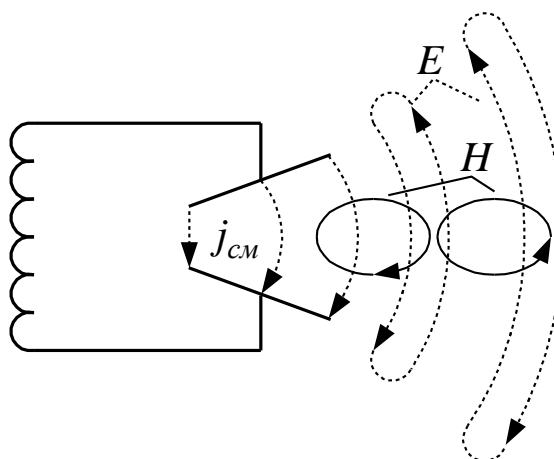


Рис. 2

Рассмотренная излучающая система неудобна для практического использования, так как большая часть токов смещения связана с конденсатором и не участвует в создании волны. Поэтому целесообразно применять такие конструкции, в которых электромагнитное поле охватывало бы большой объем пространства. Примером такой системы может служить линейный вибратор (рис. 3).

Возможность излучения электромагнитных волн экспериментально впервые была доказана Г. Герцем. Большое значение в использовании ЭМВ для практической деятельности человека и, следовательно, для становления современной радиотехники имело изобретение радио А. С. Поповым в 1895 году.

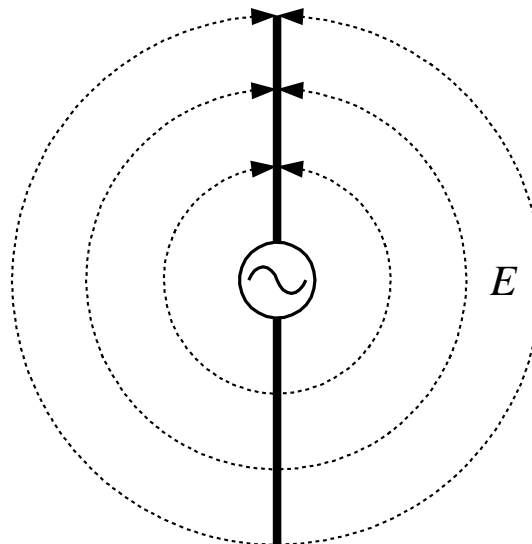


Рис. 3

В настоящее время для излучения электромагнитной энергии применяются специальные устройства, называемые передающими антеннами, которые преобразуют энергию тока высокой частоты в энергию электромагнитной волны (радиоволны). Обратная задача решается приемной антенной, преобразующей энергию свободных ЭМВ в энергию электрического тока.

Свойства различных антенных устройств изложены во втором разделе учебника. Для их изучения необходимо предварительно освоить принципы излучения электромагнитных волн и свойства простейших излучателей: элементарного электрического вибратора; элементарного магнитного вибратора (магнитной рамки) и элементарной площадки (элемента Гюйгенса).

Выводы:

- 1.) Колебательная система излучает электромагнитные волны, если электрическое и магнитное поля выходят за пределы реактивных элементов и замыкаются через окружающее пространство;
- 2.) Электрическое и магнитное поля взаимно обуславливают друг друга, обеспечивая распространение в пространстве.

2. Решение задачи излучения электромагнитных волн элементарным электрическим вибратором

Элементарным электрическим вибратором называется прямолинейный отрезок проводника с током, длина которого намного меньше длины волны, а амплитуда тока распределена вдоль вибратора равномерно.

Такой вибратор является идеальным излучателем, удобным для анализа, но создать реальный вибратор с постоянным по всей длине распределением тока практически невозможно. Весьма близок по своим свойствам к элементарному электрическому вибратору диполь Герца (рис. 4).

Благодаря имеющимся на его концах металлическим шарам, обладающим большой емкостью, амплитуда тока вдоль него мало изменяется.

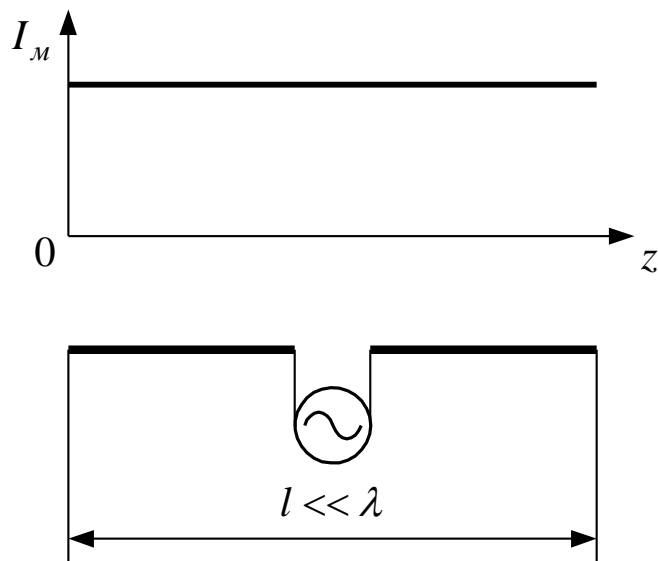


Рис. 4

Задача анализа поля элементарного электрического вибратора формулируется следующим образом.

Дан элементарный электрический вибратор, вдоль которого протекает гармонически изменяющийся во времени ток с амплитудой I . Он расположен в безграничной изотропной идеальной ($\sigma = 0$) среде, характеризуемой параметрами ϵ_a , μ_a . Других источников электромагнитного поля в пространстве, окружающем вибратор, нет. Требуется определить векторы \vec{E} и \vec{H} в любой точке пространства.

С целью упрощения решения задачи вводятся следующие допущения.

1. Длина вибратора во много раз меньше длины волны электромагнитного поля ($l \ll \lambda$), и распределение тока вдоль вибратора равномерное (рис. 5).

2. Диаметр вибратора значительно меньше его длины ($d \ll l$).

3. Расстояние от вибратора до точки наблюдения во много раз больше длины вибратора ($r \gg l$).

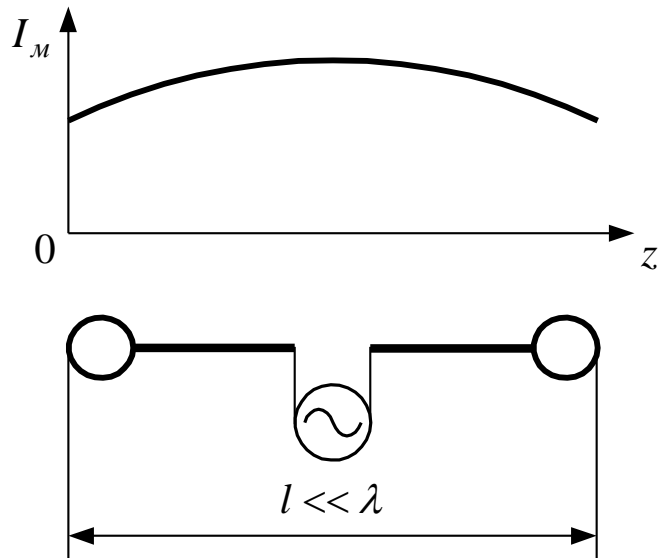


Рис. 5

Решение задачи

Учитывая, что ток в вибраторе изменяется по гармоническому закону, будем решать задачу методом комплексных амплитуд.

1. Расположим вибратор в центре двух совмещенных систем координат (рис. 6): прямоугольной (X, Y, Z) и сферической (r, θ, φ).

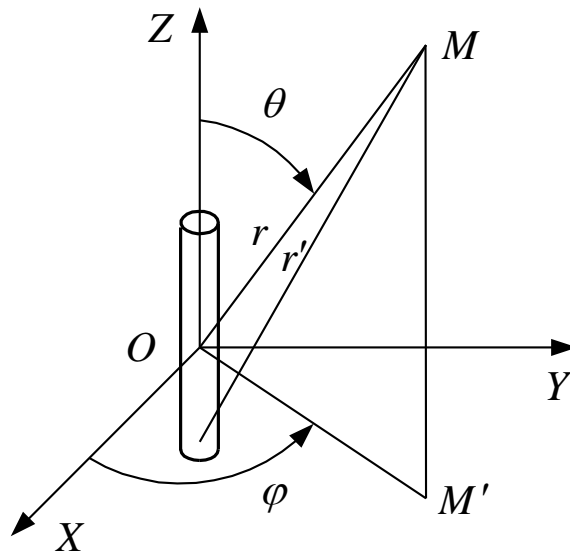


Рис. 6

2. Выберем волновое уравнение для электрического вектора Герца

$$\nabla^2 \dot{\vec{P}}^e + k^2 \dot{\vec{P}}^e = -\frac{1}{i\omega\epsilon_a} \dot{\vec{j}}^{cm}.$$

В соответствии с алгоритмом, использованным нами при решении задач распространения радиоволн, это уравнение необходимо преобразовать и упростить. Воспользуемся для этого интегралом Кирхгофа

$$\dot{P}_z^e = \frac{1}{4\pi} \int_v g(M) \psi(M) dv, \quad (1)$$

где

$$\psi(M) = \frac{e^{-ikr}}{r}, \quad g(M) = -\frac{1}{i\omega\epsilon_a} \dot{j}^{cm}. \quad (2)$$

Учитывая, что сторонние токи имеют только одну составляющую, не равную нулю,

$$\dot{j}^{cm} = \dot{j}_z^{cm}, \quad \dot{j}_x^{cm} = \dot{j}_y^{cm} = 0,$$

можно считать, что и вектор Герца также будет иметь лишь одну составляющую

$$\dot{\Pi}_x^e = \dot{\Pi}_y^e = 0, \quad \dot{\Pi}^e = \dot{\Pi}_z^e \vec{z}_0$$

Правая часть волнового уравнения при сделанном допущении примет вид

$$g(M) = -\frac{1}{i\omega\epsilon_a} \dot{j}_z^{cm}. \quad (3)$$

Подставляя выражения (2) и (3) в интеграл Кирхгофа (1), получим

$$\begin{aligned} \dot{\Pi}_z^e &= \frac{1}{4\pi} \int_{v_g} \frac{1}{i\omega\epsilon_a} \dot{j}_z^{cm} \frac{e^{-ikr'}}{r'} dv, \\ \dot{\Pi}_z^e &= \frac{1}{4\pi i\omega\epsilon_a} \int_{v_g} \dot{j}_z^{cm} \frac{e^{-ikr'}}{r'} dv, \end{aligned} \quad (4)$$

где v_g - объем, занимаемый токами в вибраторе.

3. Перейдем к решению интеграла (4). Для этого воспользуемся допущениями, оговоренными выше. Будем считать, что точка наблюдения M находится в дальней зоне по отношению к вибратору ($r \gg l$, $r' = r$). Тогда можно считать, что $r = const$, поскольку длина вибратора намного меньше λ . Интеграл (4) в этом случае приводится к виду

$$\dot{\Pi}_z^e = \frac{1}{4\pi i\omega\epsilon_a} \frac{e^{-ikr}}{r} \int_{v_g} \dot{j}_z^{cm} dv. \quad (5)$$

Преобразуем подынтегральное выражение таким образом, чтобы сторонние токи вычислялись через величины, известные в задаче: I и l . Для этого рассмотрим элемент объема dv , занимаемого вибратором (рис. 7). Обозначив площадь поперечного сечения элемента ds_{\perp} , можно вычислить его объем

$$dv = ds_{\perp} dz.$$

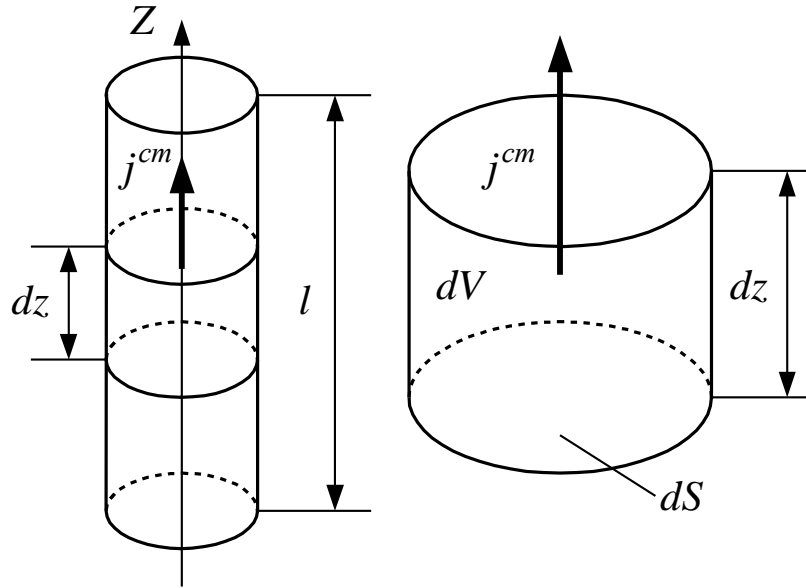


Рис. 7

Теперь решим интеграл

$$\int_{v_6} j_z^{cm} dv = \int_{v_6} j_z^{cm} ds_{\perp} dz = \int_s j_z^{cm} ds_{\perp} \int_{-l/2}^{l/2} dz = Il.$$

Подставляя найденное значение в (5), определим значение вектора Герца.

$$\dot{I}^e_z = \frac{Il}{4\pi i\omega\epsilon_a} \frac{e^{-ikr}}{r}. \quad (6)$$

4. Основываясь на полученном решении волнового уравнения, найдем напряженности поля $\vec{E}(M)$ и $\vec{H}(M)$. Это можно сделать с помощью уравнений связи. Однако в данном случае можно воспользоваться тем, что выражение (6) для элементарного электрического вибратора совпадает с аналогичным уравнением для сферической волны, если считать в нем постоянную интегрирования равной

$$C_2 = \frac{Il}{4\pi i\omega\epsilon_a}. \quad (7)$$

На основании сравнения можно сделать вывод о том, что элементарный электрический вибратор излучает сферическую волну, а составляющие поля, созданного им, определяются выражениями для такой волны, выведенными ранее. В частности, для точки наблюдения, находящейся в дальней зоне, в выражения для сферической волны следует подставить значение из (7), в результате получим окончательные формулы для \vec{E} и \vec{H}

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{\theta} &= \frac{Il\omega\mu_a}{4\pi} \frac{e^{-ikr}}{r} \sin\theta, \\ \dot{H}_{\varphi} &= \frac{Il\omega\sqrt{\epsilon_a\mu_a}}{4\pi} \frac{e^{-ikr}}{r} \sin\theta. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Выражение (8) учитывая что, $\omega\sqrt{\epsilon_a\mu_a} = 2\pi/\lambda$ принимает вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_\theta &= \frac{Il}{2\lambda} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \frac{e^{-ikr}}{r} \sin\theta, \\ \dot{H}_\varphi &= \frac{Il}{2\lambda} \frac{e^{-ikr}}{r} \sin\theta. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Эти уравнения позволят выявить основные свойства элементарного электрического вибратора как излучателя.

Выводы:

- 1.) Элементарный электрический вибратор излучает волну типа Е. В выражениях (8) и (9) пропущена составляющая поля E_r , которая в дальней зоне равна нулю $E_r \approx 0$;
- 2.) Составляющие электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны в дальней зоне.

3. Анализ электромагнитного поля элементарного вибратора и его свойства

Проанализируем полученные уравнения (8), (9) и сформулируем основные свойства элементарного электрического вибратора.

В каждом из уравнений имеется множитель $1/r$, который указывает на то, что излучаемая вибратором волна сферическая. Ее амплитуда убывает обратно пропорционально пройденному расстоянию. Фазовый центр волны совпадает с центром вибратора.

Кроме того, электромагнитной волне, излученной вибратором, присущи все остальные свойства сферической волны. Характерно, что вектор напряженности поля \vec{E} перпендикулярен направлению распространения и лежит в той же плоскости, что и вибратор.

Наличие в числителях выражений (8) произведения Il позволяет считать, что амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей возрастают с увеличением амплитуды тока или длины вибратора. Однако следует помнить о недопустимости безграничного увеличения длины вибратора, она должна быть много меньше длины волны. В противном случае выражения (8) окажутся неверными.

Особое внимание нужно обратить на такую величину, как частота. С ее увеличением напряженность поля возрастает. Из этого следует, что вибратор эффективно излучает электромагнитные волны только на высоких частотах. По этой причине в радиолокации и связи используются высокочастотные (ВЧ) и сверхвысокочастотные (СВЧ) колебания.

В формулах (8) присутствует функция $\sin\theta$, которую называют характеристикой направленности. Угол θ отсчитывается от оси вибратора (рис. 6). Отсюда следует, что вдоль оси (при $\theta = 0^\circ$) вибратор не излучает. Максимум излучения лежит в плоскости, перпендикулярной оси вибратора и проходящей через его середину ($\theta = 90^\circ$). В выражениях (8) отсутствует

другая угловая координата - угол φ , что позволяет сделать вывод об отсутствии зависимости интенсивности излучения от φ , т. е. в горизонтальной плоскости излучение происходит одинаково во всех направлениях.

Для наглядного представления о направленности излучения вибратора можно изобразить графически зависимости E от $\theta=0$ и φ , которые называются диаграммами направленности (рис. 8). Пространственная диаграмма направленности элементарного электрического вибратора образует поверхность тора (рис. 8). Она получается в результате вращения диаграммы $E(\theta)$ вокруг оси вибратора.

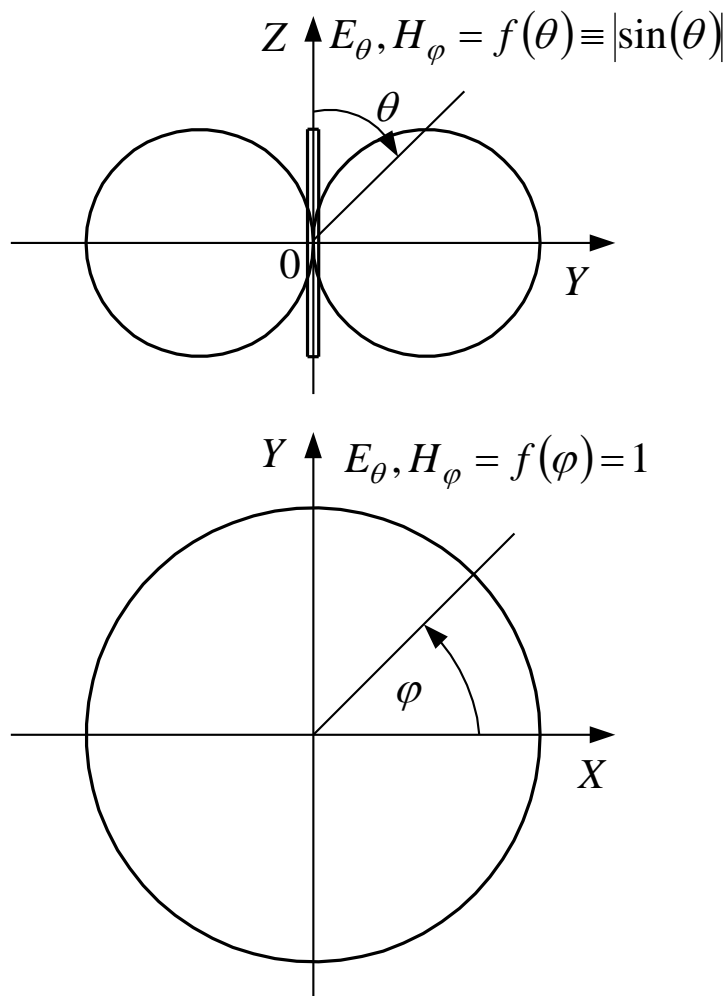


Рис. 8

Из анализа графиков следует, что элементарный электрический вибратор обладает направленными свойствами, хотя и недостаточно ярко выраженными.

Выводы:

- 1.) Элементарный электрический вибратор излучает волну типа E ($E_r \approx 0$);
- 2.) Составляющие электрического \dot{E}_{θ} и магнитного \dot{H}_{φ} полей пропорциональны I/λ ;

- 3.) $1/r$ - признак сферической волны;
- 4.) Выражение e^{-ikr} описывает волновой процесс вдоль координаты r ;
- 5.) Векторное произведение электрического и магнитного полей дает вектор Умова-Пойтинга, показывающий направление распространения электромагнитной волны $[\vec{E}_\theta \times \vec{H}_\varphi] = \vec{P}_r$;
- 6.) Выражение $\sin\theta$ описывает направленные свойства электрического вибратора;
- 7.) Отношение электрического и магнитного полей дает волновое сопротивление среды $E_\theta / H_\varphi = \sqrt{\mu_a / \varepsilon_a} = Z_c$;
- 8.) Электрическое и магнитное поля взаимно перпендикулярны $\vec{E}_\theta \perp \vec{H}_\varphi$.