

нить томсонов колебательный контур прибором, который, подчиняясь ритму колебаний тока в контуре, автоматически, при каждом колебании сообщал бы контуру импульсы тока. Чтобы возбудить в таком генераторе колебания большой частоты (в соответствии с малыми значениями индуктивности и емкости контура), устойчивый прибор, доставляющий в контур электрическую энергию, должен действовать безынерционно. В наше время общеизвестно, что такой прибор был создан и получил название *электронной генераторной лампы* (§ 92).

§ 89. Электромагнитные волны. Вектор Умова — Пойнтинга

Электрическая и магнитная энергия не сосредоточена в тех местах пространства, которые заняты электрическими зарядами и магнитами, но распределена по всем участкам поля. Количество ее, содержащееся в единице объема, всегда пропорционально квадрату электрической или магнитной напряженности поля. Отсюда ясно, что численное изменение векторов электрической и магнитной напряженности, обусловленное движением электрических зарядов и изменением силы токов, протекающих по проводникам, должно вызывать перемещение электрической и магнитной энергии из одних участков поля к другим. Если бы скорость распространения электрических воздействий была бесконечно велика, то смещение электрических зарядов в новое положение мгновенно вызвало бы изменение поля во всем окружающем пространстве. В действительности скорость распространения электрических сил хотя и велика, но конечна; поэтому в изменении картины поля должно наблюдаться *запаздывание*, тем более значительное, чем большее расстояние отделяет рассматриваемый участок поля от перемещающихся электрических зарядов.

Колебательное движение электрических зарядов (равно как и периодическое изменение токов, протекающих по проводникам) должно сопровождаться, очевидно, перемещением электрической и магнитной энергии в окружающей среде то в одном, то в противоположном направлении; в связи с конечной скоростью распространения электрических и магнитных воздействий эти пульсации энергии приобретают характер *волнового процесса*: когда в одних участках среды они протекают в прямом направлении, в других, более удаленных участках, до которых их импульс нового изменения поля еще не дошел и где картина поля отражает то распределение электрических масс, которое имело место в предыдущий момент времени, они будут протекать в обратном направлении. Чем чаще следуют друг за другом периодические изменения картины поля, тем меньше, очевидно, будет расстояние между участками среды, в которых пульсации энергии совпадают по фазе, т. е. тем короче будет длина волны.

Чтобы решить вопрос, что дадут в среднем эти пульсации энергии,— утечку энергии из проводника, по которому протекает переменный ток, или, наоборот, приток энергии к нему,— необходимо, очевидно, обратиться к расчету. Он может быть выполнен с помощью уравнений Максвелла и впервые был сделан Герцем. Расчет этот показывает, что работа, затрачиваемая на осуществление колебательного движения зарядов, не целиком преобразуется в теплоту, но часть ее всегда уносится в отдаленные участки пространства. Далее, расчет этот показывает, что при прочих равных условиях (в частности, при соразмерных скоростях зарядов или при одинаковых амплитудах токов) количество энергии, излучаемой линейным проводом, пропорционально *квадрату частоты колебаний*. При обычной в технике сильных токов частоте колебаний (50 в секунду) провода излучают незначительное количество энергии. В случае быстропеременных токов с частотой от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов в секунду количество излучаемой энергии становится весьма значительным.

Излучение энергии током является фактом, который обнаруживается даже в самых примитивных школьных опытах. Например, когда мы замыкаем ток в кольцевом проводнике, близ которого расположена свободно подвешенная магнитная стрелка, то магнитная стрелка, занимавшая до включения тока в кольце положение с севера на юг, после включения тока поворачивается и занимает новое положение. Этот простейший опыт весьма поучителен. Ведь для того, чтобы вывести стрелку из ее положения равновесия и повернуть на оси, необходимо совершить определенную, хотя и небольшую работу. За счет чего совершается эта работа? Очевидно, за счет энергии тока в кольце. В момент установления тока в кольце (в момент возникновения магнитного поля) определенное количество энергии передается от кольца к стрелке и расходуется на преодоление сопротивлений, препятствующих стрелке поворачиваться; следовательно, в момент возникновения тока кольцо излучает энергию.

Излучение энергии происходит только в момент изменения тока в кольце, т. е. в момент *у с к о р е н н о г о* движения электрических зарядов в проводнике. Чем больше ускорение, сообщаемое электрическим зарядом, тем интенсивнее излучение энергии. Установившееся движение зарядов, т. е. постоянный ток, не сопровождается излучением энергии.

Поле, создаваемое ускоренно (или замедленно) движущимися зарядами, представляет собой неразделимое сочетание электрического и магнитного полей — *электромагнитное поле*.

Все явления электромагнитной индукции происходят благодаря электромагнитному излучению, которое вызывается изменением скорости движения зарядов (изменением величины или направления тока).

Электромагнитное поле распространяется от места возникновения с совершенно определенной постоянной скоростью, равной скорости света:

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек.}$$

Это совпадение не случайно; оно указывает на то, что свет также является электромагнитным явлением.

Если электромагнитное поле распространяется не в вакууме, а в среде с диэлектрической постоянной ϵ и магнитной проницаемостью μ , то существует весьма простое соотношение, связывающее скорость распространения поля u с этими константами, полученное Максвеллом:

$$u = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}. \quad (9)$$

Таким образом, скорость распространения электромагнитного поля в среде меньше, чем скорость в вакууме.

Так как электромагнитное поле, или, как говорят иначе, *электромагнитное возмущение*, распространяется из места возникновения с одинаковой скоростью по всем направлениям, то по истечении некоторого времени поле займет некоторый шаровой объем; радиус этого шара будет возрастать со скоростью u . В этом случае электромагнитное возмущение называют *шаровым*. Поверхность шара, ограничивающую в любой момент объем, занятый электромагнитным полем, называют *передней гранью* возмущения.

С прекращением ускоренного движения зарядов электромагнитное поле должно уничтожиться, однако это уничтожение поля также не распространяется мгновенно: возникает *задняя шаровая грань* возмущения, которая распространяется с той же скоростью u .

Таким образом, электромагнитное возмущение разделяет пространство на три части: 1) часть вне передней грани волны, еще не захваченная электромагнитным возмущением, 2) пространство между передней и задней гранями, занятое электромагнитным полем, и 3) пространство, уже пройденное задней гранью, в котором электромагнитного поля уже нет.

Толщина шарового слоя, в котором заключено электромагнитное поле, остается неизменной при увеличении радиуса возмущения, так как обе грани распространяются с одинаковой скоростью.

Вспомним, что плотность энергии для электрического и магнитного полей определяется выражениями

$$\frac{\epsilon E^2}{8\pi} \quad \text{и} \quad \frac{\mu H^2}{8\pi}.$$

Плотность энергии электромагнитного поля выражается суммой

$$\omega = \frac{\epsilon E^2}{8\pi} + \frac{\mu H^2}{8\pi}.$$

Из уравнений Максвелла можно вывести, что при распространении электромагнитного возмущения (в вакууме и в изотропной среде) векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} перпендикулярны друг к другу и лежат в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения поля, при этом

$$E\sqrt{\epsilon} = H\sqrt{\mu} \quad (10)$$

(здесь E выражено в электростатических, а H — в электромагнитных единицах).

Следовательно,

$$\frac{\epsilon E^2}{8\pi} = \frac{\mu H^2}{8\pi},$$

т. е. в электромагнитных волнах электрическая энергия равна магнитной. Поэтому общая плотность энергии $\omega = \frac{\epsilon E^2}{4\pi}$. Заменяя здесь $E\sqrt{\epsilon}$ через $H\sqrt{\mu}$ и учитывая, что по формуле (9) $\sqrt{\epsilon\mu} = \frac{c}{u}$, получаем для плотности энергии распространяющегося электромагнитного поля нижеследующую формулу:

$$\omega = \frac{c}{4\pi u} EH. \quad (11)$$

Для случая шарового возмущения энергия всего электромагнитного поля, заключенная в шаровом слое между передней и задней гранями, очевидно, остается неизменной. Но объем шарового слоя при постоянстве его толщины изменяется обратно пропорционально квадрату радиуса возмущения; следовательно, в шаровом возмущении плотность энергии изменяется обратно пропорционально квадрату радиуса возмущения.

Но если плотность энергии (пропорциональная квадратам напряженности полей) изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния, то очевидно, что в шаровом возмущении напряженности поля изменяются обратно пропорционально первой степени расстояния. Мы видим, что напряженности электрического и магнитного полей в электромагнитном возмущении убывают с увеличением расстояния гораздо медленнее, чем напряженности стационарных полей. Объясняется это тем, что энергия электромагнитного поля при его распространении остается сконцентрированной в определенном объеме.

Если грани, ограничивающие распространяющееся электромагнитное поле, представляют собой плоскости, то такое электромагнитное возмущение называют *плоским*. В этом случае объем, ограничивающий распространяющееся поле, остается неизменным, и, следовательно, в плоских электромагнитных волнах остаются неизменными плотность энергии и напряженность поля.

Мы увидим далее, что получение слабо рассеивающихся (близких к плоской форме) электромагнитных возмущений является вполне возможным.

Для вычисления потока энергии, переносимой волнами, Николаем Алексеевичем Умовым (для любых волн) и Пойнтингом (для электромагнитных волн) был введен в рассмотрение особый вектор \mathbf{S} — *вектор Умова — Пойнтинга*, направленный в сторону распространения волн и численно равный количеству энергии, ежесекундно переносимой сквозь мысленно выделенную площадку в единицу площади, ориентированную перпендикулярно к потоку энергии. Если упомянутая площадка, перпендикулярная к направлению распространения волн, имеет площадь Δs , то за время Δt сквозь нее пройдет, очевидно, вся та энергия, которая содержится в объеме призмы с основанием Δs и высотой $u\Delta t$ (где u — скорость распространения волнового поля), т. е. энергия

$$\Delta W = \omega u \Delta t \Delta s,$$

где ω — плотность энергии.

Стало быть, численное значение вектора Умова — Пойнтинга равно произведению плотности энергии на скорость распространения поля:

$$\mathbf{S} = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ \Delta s \rightarrow 0}} \left[\frac{\Delta W}{\Delta t \Delta s} \right] = \omega u.$$

Приняв во внимание формулу (11) и сказанное выше об ориентации векторов \mathbf{E} и \mathbf{H} , находим, что вектор Умова — Пойнтинга для электромагнитных возмущений выражается векторным произведением напряженностей электрического и магнитного полей (рис. 380):

$$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi} [\mathbf{E}\mathbf{H}]. \quad (12)$$

Мощность излучения определяется средней за период величиной потока вектора Умова — Пойнтинга через замкнутую поверхность, которая охватывает излучающую систему:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T dt \iint S_n ds.$$

Как уже было пояснено в начале параграфа, электромагнитное излучение вызывается ускоренным движением электрических зарядов. При гармоническом колебательном движении зарядов излучаются *синусоидальные электромагнитные волны*. За каждый период колебания зарядов излучается отдельная электромагнитная волна. Энергия волны определяется величиной движущихся в проводнике зарядов, их ускорением и размерами излучающего

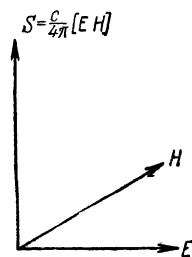


Рис. 380.
Вектор Умова —
Пойнтинга.

проводника. Амплитуда ускорения при синусоидальном колебательном движении пропорциональна квадрату частоты колебаний. В связи с этим напряженность индуцированного электрического поля (а также и связанного с ним по формуле (10) магнитного поля) будет пропорциональна квадрату частоты. Следовательно, вектор Умова — Пойнтинга и излучаемая мощность будут пропорциональны четвертой степени частоты.

Однако если сопоставлять излучение (как это обычно и делают) при одинаковых амплитудах тока, то E и H будут тем более велики, чем больше при синусоидальном изменении амплитуда $\frac{dI}{dt}$, т. е. E и H в этом случае пропорциональны первой степени частоты. Стало быть, излучаемая мощность для одинаковых излучающих систем при одинаковых амплитудах тока пропорциональна (как это уже было отмечено выше) квадрату частоты.

§ 90. Излучение электрического диполя. Волны в двухпроводной линии. Антенны

Воспользовавшись понятием о силовых линиях, можно построить довольно наглядную картину строения поля волн, излучаемых проводником, несущим переменный ток. Выделим мысленно из всей массы движущихся зарядов два равных по величине и противоположных по знаку заряда e_1 и e_2 и

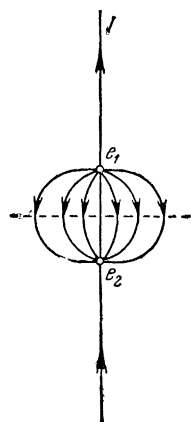


Рис. 381.

рассмотрим синусоидальное колебательное движение таких зарядов около положения равновесия. Это даст нам представление об излучении, производимом электрическим диполем Герца.

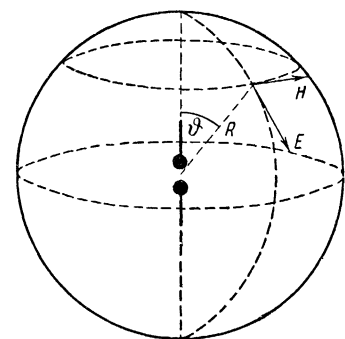


Рис. 382. В электромагнитной волне, излучаемой диполем, векторы E направлены по меридианам, а векторы H — по параллелям.

Легко видеть, что силовые линии электрического поля лежат в плоскостях, проходящих через ось проводника (рис. 381); силовые линии магнитного поля кольцами охватывают проводник. Эта взаимная перпендикулярность направлений электрического и магнитного полей сохраняется и в распространяющейся электромагнитной волне (рис. 382).

Расстояние между зарядами и их скорость меняются во времени синусоидально, поэтому и изменение напряженностей электриче-