

## Урок №17 (12.11.2019) Электромагнитные волны

### 1. Открытый колебательный контур.

Попробуем создать электрическую волну, взяв за основу колебательный контур: в конденсаторе электрическое поле «совершает колебания», т.е. его амплитуда изменяется по гармоническому закону. (Аналогично магнитное поле «совершает колебания» в катушке индуктивности.)

Раскроем конденсатор и превратим катушку индуктивности в кусок провода. При этом, естественно, и  $L$ , и  $C$  уменьшатся. Соответственно возрастёт частота:  $\omega = 1/\sqrt{LC}$ . При этом частота возрастает настолько, что становится сравнимой со временем распространения тока с одного конца контура на другой; в результате процесс перестаёт быть квазистационарным (сила тока в разных частях провода различна). На концах провода (антенны) сила тока равна нулю, а в центре достигает максимума, в итоге вокруг проводника образуется кольцо переменного магнитного поля. Через четверть периода сила тока становится равной нулю, зато на концах проводника скапливаются разноимённые заряды, порождающие электрическое поле, силовые линии которого расположены вдоль проводника.

Возникающие электромагнитные колебания имеют механический аналог: если рассматривать механическую систему с *распределёнными параметрами*, т.е. попросту массивную пружину без дополнительного груза. В этом случае и упругие, и инерционные явления сосредоточены в самой пружине, распределены по длине пружины... Точно также в случае открытого электромагнитного вибратора у нас каждый элемент обладает одновременно и ёмкостью и индуктивностью.

Заметим теперь, что в случае обычного колебательного контура электрическое поле было сосредоточено в конденсаторе, а магнитное – в катушке. Поля не взаимодействовали между собой, а энергия переносилась исключительно током – типичный случай системы с *сосредоточенными параметрами*. В открытом контуре поля пересекаются вне контура.

Вспомним основные положения взаимодействия электрических и магнитных полей:

- на движущийся заряд (ток) в магнитном поле действует сила Лоренца (Ампера);
- движущиеся заряды (ток) порождают вокруг себя (проводника) вихревое магнитное поле (законы Био-Савара и Ампера);
- изменяющееся магнитное поле, проходящее через проводящий контур, порождает в нём ЭДС (закон Фарадея), направление ЭДС определяется правилом Ленца.

Из этих законов следует, что переменные электрическое и магнитное поле могут взаимодействовать друг с другом даже в вакууме (в этом случае нет реальных проводников, проводящих контуров и зарядов, но в вакууме существуют виртуальные заряженные частицы).

В итоге получается, что изменяющееся магнитное поле вызывает вихревое электрическое поле, а изменяющееся электрическое – магнитное. Итак, поля самостоятельно, без посредства ёмкости, индуктивности и зарядов, перетекают друг в друга. Такие два поля могут распространяться в пространстве самостоятельно, без участия породивших их зарядов.

## Опыты Герца (1888г.)

Основная идея в опытах Герца: возникновение высокочастотных колебаний в излучателе пока существует искра между разрядниками. Для того чтобы быстропеременные токи существовали только в вибраторе и не замыкались через источник питания использовались дроссели  $D$ .

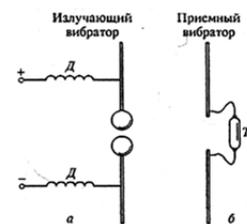


Рис. 178. Вибратор Герца

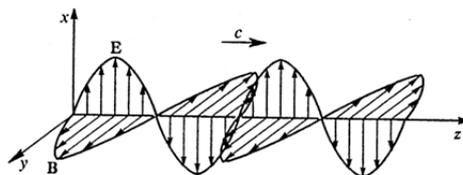
В качестве приёмника использовался точно такой же вибратор. Наличие возникающего переменного тока определялось либо по проскакивающей искре, либо по свечению маленькой люминесцентной лампы.

## 2. Излучение движущегося заряда

*Общее утверждение: заряд, движущийся ускоренно, — излучает электромагнитное поле.*

Если заряд движется вокруг положения равновесия по гармоническому закону, то он в любой момент движется ускоренно и, следовательно, в любой момент излучает.

Как видно из рисунка, электрическое поле, получившееся в результате движения заряда с ускорением, перпендикулярно направлению распространения волны. Но, с другой стороны, изменяющееся электрическое поле вызывает появление магнитного поля, силовые линии которого перпендикулярны линиям электрического поля. Обратное тоже верно: изменяющееся магнитное поле вызывает появление перпендикулярного ему электрического поля. В итоге, картинка распространяющегося электромагнитного поля выглядит так, как показано на рисунке.



## 3. Поляризация электромагнитных волн

- Что такое поляризация вообще.
- Эксперименты по наблюдению поляризации.
- Применение поляроидов.
- Линейная поляризация. Круговая поляризация.

## 4. Давление света

Электромагнитная волна переносит энергию и импульс. Механизм переноса импульса примерно следующий: 1) электрическая компонента волны, падая на поверхность, порождает движение зарядов внутри преграды; 2) движущиеся заряды оказываются внутри магнитной составляющей волны; 3) на движущиеся заряды со стороны магнитного поля начинает действовать сила Лоренца. Если аккуратно всё расписать, получится, что эта сила будет направлена по ходу распространения волны, т.е. волна как бы «давит» на преграду.

П.Н.Лебедев в 1899 году экспериментально измерил и изучил давление света.

*Забавно, что известная игрушка — чёрно-зеркальный пропеллер, накрытый колпаком и вращающийся под включённой настольной лампой, работает вовсе не под давлением света, а из-за возникновения теплового испарения частиц от нагревающейся поверхности. Эта игрушка была построена, когда Лебедеву было 3 года.*

## 5. Радиоволны

Большие антенны, типа Шуховской радиобашни, используются для излучения волн в метровом радиодиапазоне (ДВ:  $\lambda = 10^4 \div 10^3$  м, СВ:  $\lambda = 10^3 \div 10^2$  м). Телевидение передаётся в УКВ диапазоне  $\lambda = 10 \div 10^{-3}$  м. Телевизионные антенны делаются высокими и ставятся на возвышенностях, чтобы находиться в прямой видимости приёмников. Аналогично работают коротковолновые передатчики, КВ:  $\lambda = 10^2 \div 10$  м.

*Если будет время, можно обсудить принцип радиосвязи, амплитудную и частотную модуляцию. Но на данный момент эта тема уже не актуальна, идёт переход на «цифру». Реальные радиоприёмники остались только в автомобилях, да и то их на длинных и средних волнах практически никто не слушает. А FM-диапазон кодируется другим способом с протоколом исправления ошибок.*

## 6. Свет как электромагнитная волна

Максвелл получил, что электромагнитные волны движутся со скоростью света... Правда, сами электромагнитные волны были открыты Генрихом Герцем в 1887 г. через восемь лет после смерти Максвелла. опыты Герца подтвердили, что электромагнитные волны ведут себя точно так же, как свет (отражение, преломление и т.д.).



Интервал от 0,40 до 0,76 мкм – видимый свет;  $10^{-5} \div 10^{-7}$  м – область, рассматриваемая классической оптикой.

Отличие между радиоволнами и оптическим диапазоном: способ излучения. Радиоволна излучается передатчиком длительное время, поэтому её можно с очень высокой точностью считать монохроматической (т.е. со строго определённой длиной волны). Световая волна излучается огромным количеством атомов. Каждый возбуждённый атом излучает *волновой цуг* независимо от других.

Когерентность:

- временная
- пространственная.