

§21. ЭДС ИНДУКЦИИ В ПРОВОДНИКЕ, ДВИЖУЩЕМСЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Взаимосвязь электрических и магнитных явлений впервые была доказана Эрстедом. Электрическое поле, вызывающее электрический ток, порождает магнитное поле. В свою очередь, как будет показано ниже,

магнитное поле может вызывать перераспределение электрических зарядов в движущемся проводнике, приводя к возникновению электрического поля ①.

При движении проводника со скоростью $\vec{v}$ вправо в плоскости чертежа в магнитном поле с индукцией $\vec{B}_\perp$, перпендикулярной этой плоскости, вместе с ним направленно перемещаются свободные положительные и отрицательные заряды, находящиеся в проводнике. Сила Лоренца действует на разноименные заряды в противоположные стороны. Это приводит к пространственному разделению положительных и отрицательных зарядов. Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки. В металлическом проводнике электроны под действием силы Лоренца смещаются вниз. При этом сверху возникает область с положительным зарядом. Напряженность электрического поля $\vec{E}$ направлена от плюса к минусу. Разделение зарядов заканчивается, когда кулоновская сила $F_K = qE$ притяжения разноименных зарядов становится равной силе Лоренца $F_L = qvB_\perp$: $qE = qvB_\perp$. Напряженности $E = vB_\perp$, на концах проводника соответствует разность потенциалов U , или ЭДС индукции $\mathcal{E}_i = U = El = vB_\perp l$.

Проводящая перемычка, движущаяся по двум параллельным проводам, замкнутым на лампу и помещенным в магнитное поле, является простейшим генератором постоянного тока ②. Вольтметр фиксирует разность потенциалов. Сила тока через лампу (согласно закону Ома для замкнутой цепи) равна:

$$I = vB_\perp l / (R + r).$$

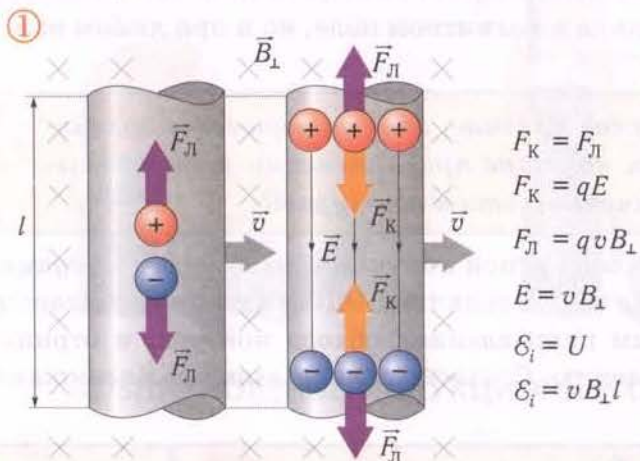
В проводнике, движущемся в магнитном поле, происходит преобразование механической энергии проводника в энергию электрического поля. Для большей компактности основным элементом *генератора переменного электрического тока* является проводящая рамка, вращающаяся в магнитном поле постоянного магнита ③. Во вращение рамку может приводить паровая машина, двигатель внутреннего сгорания, гидротурбина и т.д. Противоположные стороны рамки присоединены к кольцам, с которых с помощью гибких контактов (щеток) снимается индуцированный заряд. Возникающий ток I_i фиксируется осциллографом. Положения рамки показаны через каждую четверть периода T ее вращения. При $t = 0$ и $t = T/2$ заряды не разделяются, так как линейные скорости сторон параллельны вектору магнитной индукции $\vec{B}$ и $F_L = 0$. Когда $t = T/4$ и $t = 3T/4$, значения ЭДС индукции в сторонах рамки будут одинаковы, а их знак противоположен. В произвольный момент времени t ЭДС генератора изменяется по гармоническому закону:

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{i \max} \sin(2\pi t / T),$$

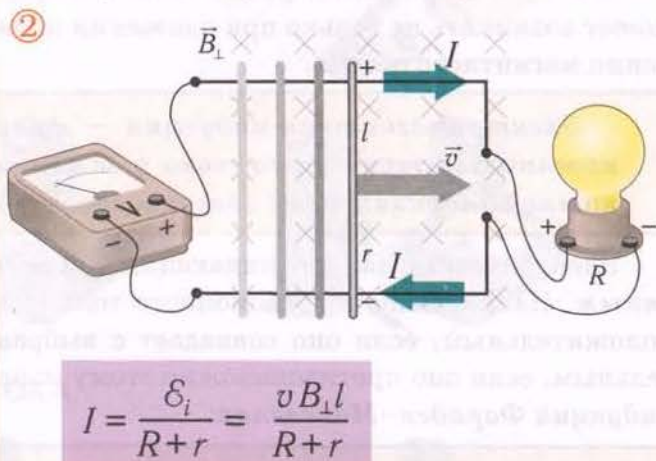
где $\mathcal{E}_{i \max} = 2\pi BS / T$ — максимальная ЭДС, индуцируемая в рамке площадью S .

Для увеличения генерируемой ЭДС вместо рамки используют катушку с большим числом витков, называемую *ротором*.

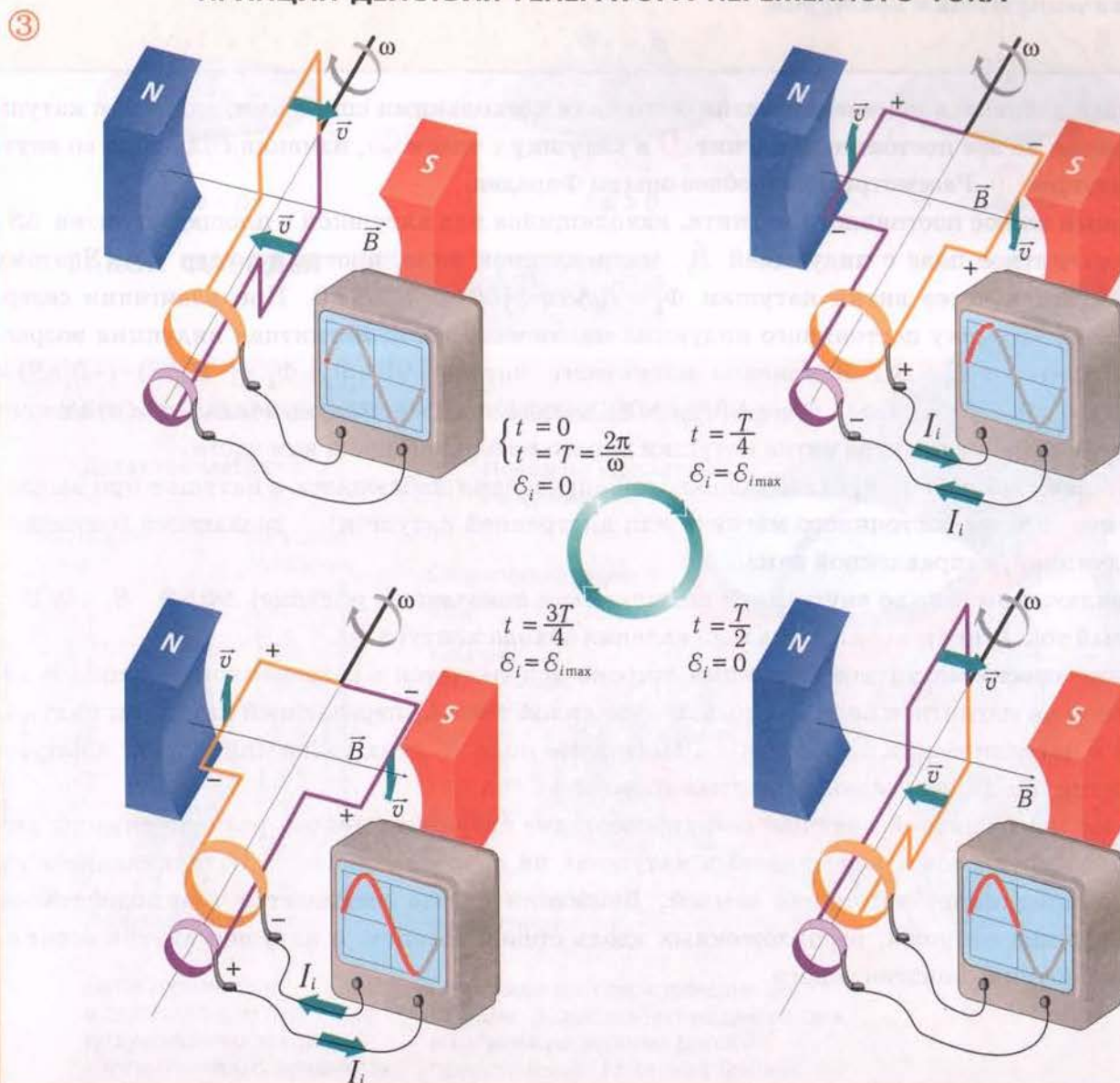
ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ЗАРЯДОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ



ЭДС ИНДУКЦИИ В ДВИЖУЩЕМСЯ ПРОВОДНИКЕ



ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



§22. ОПЫТЫ ФАРАДЕЯ С КАТУШКАМИ

В 1831 г. английский физик *Майкл Фарадей* установил, что электрический ток в контуре может возникать не только при движении проводника в магнитном поле, но и при любом изменении магнитного потока.

Электромагнитная индукция — физическое явление, заключающееся в возникновении электрического тока в замкнутом контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром.

Электрический ток, возникающий при электромагнитной индукции, называется *индукционным*. Направление индукционного тока (так же как и величина ЭДС индукции) считается положительным, если оно совпадает с выбранным направлением обхода контура, и отрицательным, если оно противоположно этому направлению. Согласно *закону электромагнитной индукции Фарадея–Максвелла*:

ЭДС электромагнитной индукции в замкнутом контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

$$\mathcal{E}_i = -\Phi'.$$

Фарадей добивался изменения магнитного поля несколькими способами: вдвигая в катушку и выдвигая из нее постоянный магнит ① и катушку с током ②, изменяя силу тока во внутренней катушке ③. Рассмотрим подробнее опыты Фарадея.

Северный полюс постоянного магнита, находящийся над катушкой с площадью витка ΔS , создавал магнитное поле с индукцией $\vec{B}_1$, направленной вниз, против вектора $\Delta \vec{S}$. Поэтому магнитный поток через витки катушки $\Phi_1 = B_1 \Delta S \cos 180^\circ = -B_1 \Delta S < 0$. При вдвигании северного полюса в катушку постоянная индукция магнитного поля, магнитная индукция возрастает по модулю ④: $B_2 > B_1$. Изменение магнитного потока $\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = (-B_2 \Delta S) - (-B_1 \Delta S) = -(B_2 - B_1) \Delta S < 0$, поэтому $\mathcal{E}_i = -\Phi' = -\Delta \Phi / \Delta t > 0$. Это означает, что индукционный ток протекает в направлении обхода контура витка катушки вправо по ближайшей к нам части.

Индукционный ток I_i противоположного направления наблюдался в катушке при выдвигании из нее того же постоянного магнита или внутренней катушки ⑤, создающей магнитное поле с индукцией, направленной вниз.

При включении тока во внутренней катушке (как показано на рисунке) $\Delta \Phi > 0$, $\mathcal{E}_i < 0$. Индукционный ток I_i протекает против направления обхода контура ⑥.

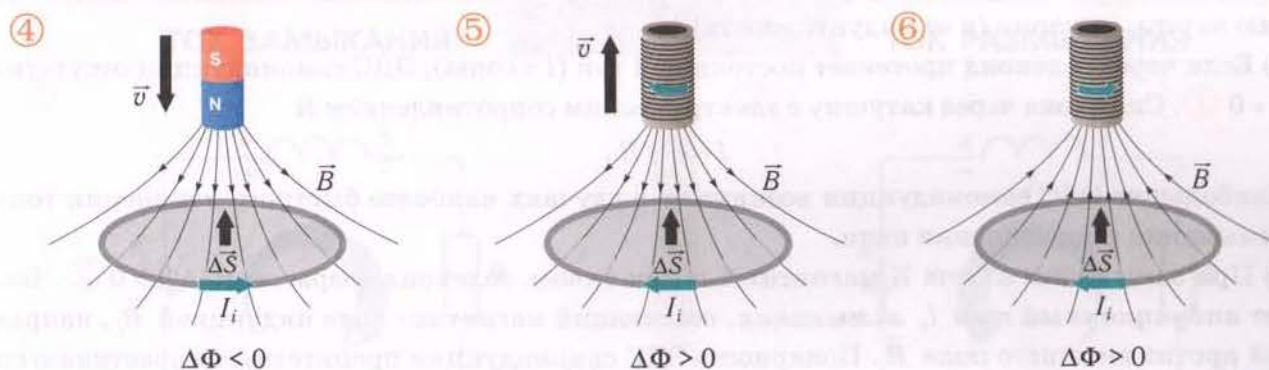
Явление электромагнитной индукции широко используется в современной технике. В детекторе металла магнитное поле $\vec{B}_0$, создаваемое силой тока I_0 передающей катушки, индуцирует токи в металлических предметах ⑦. Магнитное поле $\vec{B}'$ этих токов индуцирует в катушке-приемнике ток I' , запускающий сигнал тревоги.

В поезде на магнитной подушке сверхпроводящие катушки с током, размещенные на дне вагона, индуцируют ток в алюминиевых катушках на полотне дороги ⑧. Отталкивание этих катушек приподнимает вагон над землей. Движение поезда вызывается взаимодействием сверхпроводящих катушек, расположенных вдоль стенок вагонов, и катушек внутри ограничительных бортиков полотна дороги.

СПОСОБЫ ИНДУЦИРОВАНИЯ ТОКА В КАТУШКЕ



ВОЗНИКНОВЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО ТОКА



ЗАКОН ФАРАДЕЯ

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\Phi'$$

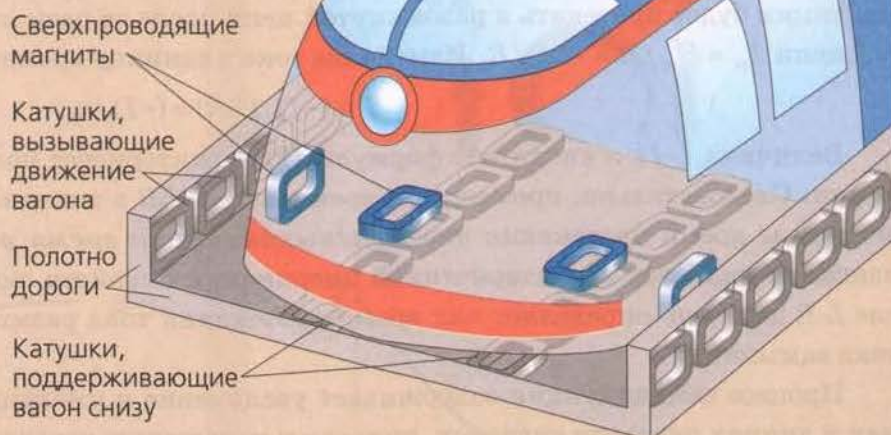
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

7 Детектор металла



Детектор металла в аэропорте фиксирует поля индукционных токов в металлических предметах

8 Поезд на магнитной подушке



Отталкивание сверхпроводящих катушек, размещенных на дне вагона, и катушек на полотне дороги приподнимает вагон над землей

§23. ОПЫТЫ ГЕНРИ

В опытах Фарадея индукционный ток в катушке возникал вследствие изменения индукции внешнего магнитного поля. Американский ученый *Джозеф Генри* в 1832 г. впервые наблюдал возникновение индукционного тока при изменении тока, протекающего в самой катушке.

Самоиндукция — возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем силы тока.

Собственный ток вызывает изменение магнитного потока и возникновение ЭДС самоиндукции:

$$\mathcal{E}_{si} = -\Phi' = -LI', \quad (1)$$

так как $\Phi = LI$, где L — индуктивность катушки. В опытах с индукционными токами используют *соленоиды — катушки с ферромагнитным сердечником*, увеличивающим в μ раз индукцию внутри катушки (и ее индуктивность).

1) Если через соленоид протекает постоянный ток ($I = \text{const}$), ЭДС самоиндукции отсутствует $\mathcal{E}_{si} = 0$ ①. Сила тока через катушку с электрическим сопротивлением R

$$I = \mathcal{E} / R.$$

Наибольшие ЭДС самоиндукции возникают в случаях наиболее быстрого изменения тока: при замыкании и размыкании цепи.

2) При замыкании ключа K магнитный поток сквозь соленоид возрастает: $\Delta\Phi > 0$ ②. Возникает *индукционный ток I_i замыкания*, создающий магнитное поле индукцией $\vec{B}_i$, направленной против внешнего поля $\vec{B}$. Полярность ЭДС самоиндукции препятствует нарастанию силы тока через катушку: положительные заряды оказываются в точке a , а отрицательные — в точке b . Электрическая лампа, соединенная последовательно с соленоидом, загорается с запаздыванием при включении тока. Реально ЭДС самоиндукции тормозит движение электронов в проводнике, из которого сделана катушка. С течением времени, когда магнитный поток перестает изменяться ($\Phi = 0$), ЭДС самоиндукции согласно формуле (1) становится равной нулю и устанавливается сила тока $I = \mathcal{E} / R$.

3) При размыкании ключа K ток самоиндукции протекает в ту же сторону, что и до размыкания ③. Его поддерживает ЭДС самоиндукции: отрицательные заряды оказываются в точке a , а положительные — в точке b . Оценим промежуток времени, в течение которого ток самоиндукции будет протекать в разомкнутой цепи после ее размыкания. Согласно закону Ома для L - R цепи $I_{si} = \mathcal{E}_{si} / R = -LI' / R$. Изменение тока в единицу времени

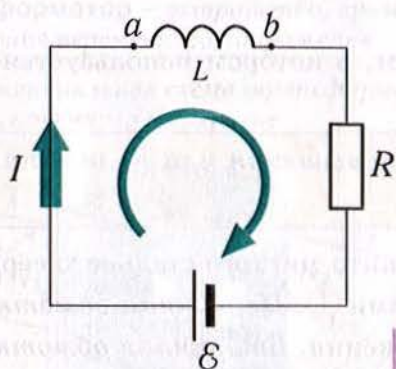
$$I' = (-I) / (LR) = (-I) / \tau_L. \quad (2)$$

Величина $(-I)$ в числителе формулы (2) характеризует полное изменение тока при размыкании. Следовательно, промежуток времени $\tau_L = LR$ в знаменателе (1) определяет по порядку величины время протекания *тока размыкания*, или *время релаксации L - R цепи*. Время релаксации является характеристикой инерционных свойств любой электрической цепи. В случае L - R цепи оно определяет как время протекания тока размыкания, так и время нарастания тока замыкания.

Процесс самоиндукции задерживает увеличение и уменьшение тока в электрических схемах и линиях передачи сигналов, приводя к искажению передаваемой информации.

①

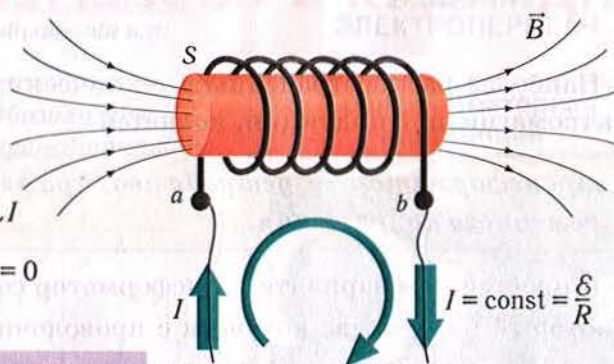
ПОСТОЯННЫЙ ТОК В L-R ЦЕПИ



$$\Phi = BSN = LI$$

$$\Phi = \text{const}$$

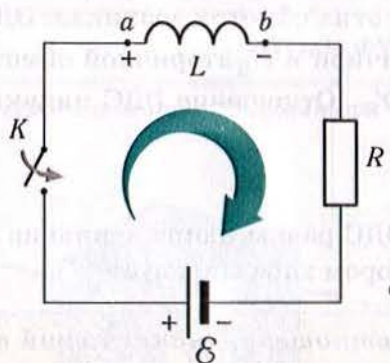
$$U_{ab} = \Phi_a - \Phi_b = 0$$



$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

ТОК ЗАМЫКАНИЯ

②

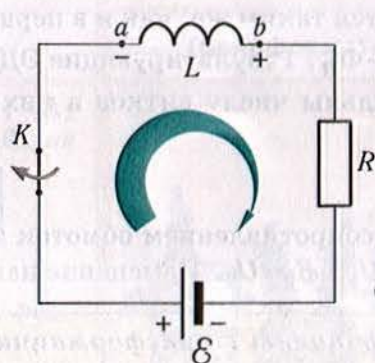


$$U_{ab} > 0$$

$$\Phi_a > \Phi_b$$

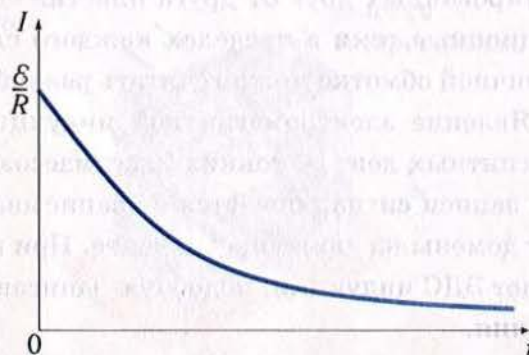
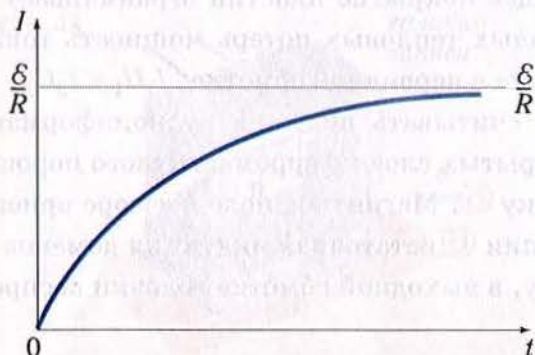
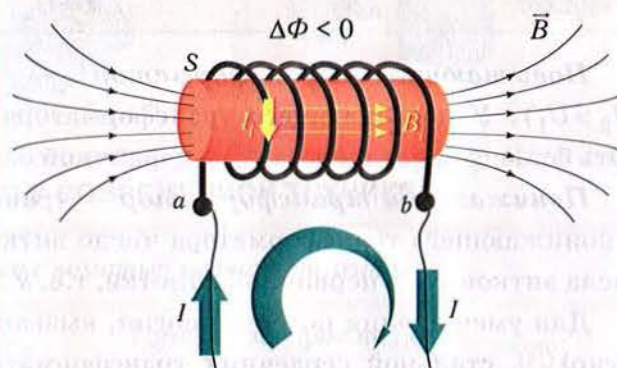
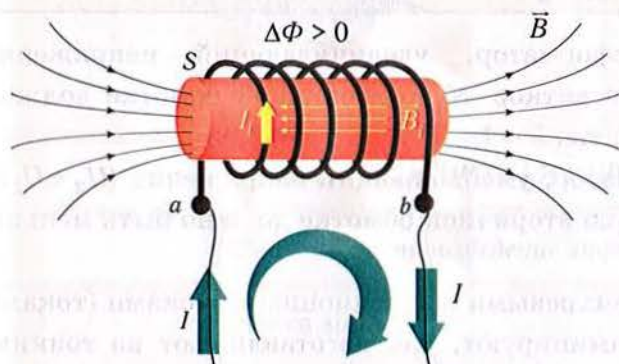
ТОК РАЗМЫКАНИЯ

③



$$U_{ab} < 0$$

$$\Phi_a < \Phi_b$$



§24. ТРАНСФОРМАТОР. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКЕ

Наиболее распространенным техническим устройством, в котором используется явление электромагнитной индукции, является

трансформатор — устройство, применяемое для повышения или понижения переменного напряжения.

В простейшем варианте трансформатор состоит из магнито-мягкого стального сердечника, на который надеты две катушки с проволочными обмотками ①. **Первичная обмотка** (число витков N_1) подключается к источнику переменного напряжения. **Вторичная обмотка** (число витков N_2) подключается к нагрузке (сопротивлению R_n). Явление электромагнитной индукции следующим образом используется при работе трансформатора. Переменный ток I_1 , протекающий в первичной обмотке, создает в сердечнике переменное магнитное поле $B(t)$, концентрирующееся внутри сердечника. Поэтому магнитный поток Φ_B во вторичной обмотке оказывается таким же, как и в первичной. В каждом витке этих обмоток возникает ЭДС индукции $\mathcal{E}_i = -\dot{\Phi}_B$. Результирующие ЭДС индукции $\mathcal{E}_1$ в первичной и $\mathcal{E}_2$ вторичной обмотках пропорциональны числу витков в них: $\mathcal{E}_1 = -N_1 \dot{\Phi}_B$; $\mathcal{E}_2 = -N_2 \dot{\Phi}_B$. Отношение ЭДС индукции в обмотках

$$\mathcal{E}_1 / \mathcal{E}_2 = N_1 / N_2.$$

Если сопротивлением обмоток можно пренебречь, то ЭДС равны напряжению на их зажимах: $\mathcal{E}_1 \approx U_1$; $\mathcal{E}_2 \approx U_2$. Изменение напряжения трансформатором характеризует

коэффициент трансформации — величина, равная отношению напряжений в первичной и вторичной обмотках трансформатора ②.

$$k = U_1 / U_2 = N_1 / N_2.$$

Повышающий трансформатор — трансформатор, увеличивающий напряжение ($U_2 > U_1$). У повышающего трансформатора число витков N_2 во вторичной обмотке должно быть больше числа витков N_1 в первичной обмотке, т.е. $k < 1$.

Понижающий трансформатор — трансформатор, уменьшающий напряжение ($U_2 < U_1$). У понижающего трансформатора число витков N_2 во вторичной обмотке должно быть меньше числа витков N_1 в первичной обмотке, т.е. $k > 1$.

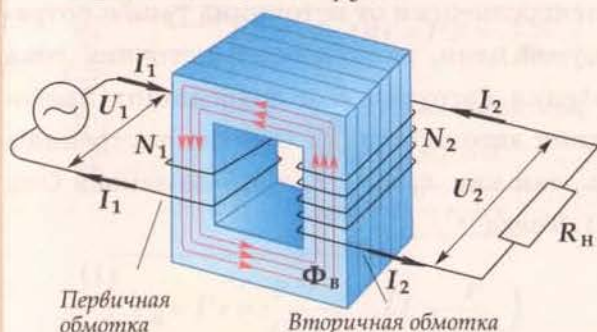
Для уменьшения потерь энергии, вызванных вихревыми индукционными токами (токами Фуко) ③, стальной сердечник трансформатора ламинируют, т.е. изготавливают из тонких, изолированных друг от друга пластин ④. Изолирующее покрытие пластин ограничивает индукционные токи в пределах каждого слоя. Из-за малых тепловых потерь мощность тока во вторичной обмотке можно считать равной мощности тока в первичной обмотке: $I_1 U_1 = I_2 U_2$.

Явление электромагнитной индукции позволяет считывать видео- и аудиоинформацию с магнитных лент — тонких пластмассовых лент, покрытых слоем ферромагнитного порошка. При записи сигнал подается на записывающую головку ⑤. Магнитное поле в зазоре ориентирует домены на движущейся ленте. При воспроизведении ⑥ остаточная индукция доменов вызывает ЭДС индукции, подобную записанному сигналу, в выходной обмотке головки воспроизведения.

ТРАНСФОРМАТОР

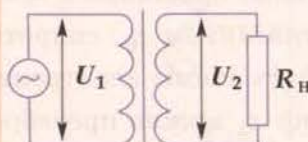
Трансформатор – устройство, применяемое для повышения или понижения переменного напряжения

① Принципиальная схема трансформатора, подключенного к нагрузке



$$I_1 U_1 = I_2 U_2$$

② Обозначение трансформатора на схемах



Коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

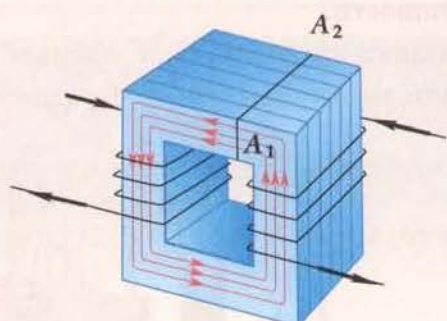
ТРАНСФОРМАТОРЫ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Трансформаторная подстанция

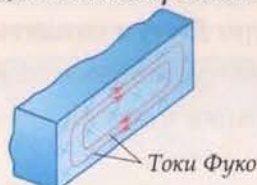


ТОКИ ФУКО

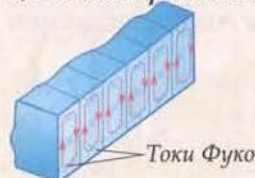
③ В сердечнике трансформатора



④ В сечении A1 – A2
а) без ламинирования



б) с ламинированием



Трансформаторы



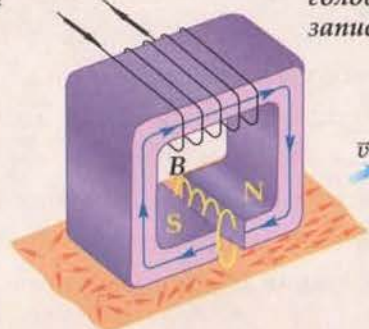
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКЕ

Запись и воспроизведение информации с помощью магнитной ленты

⑤ Головка записи

Записываемый сигнал

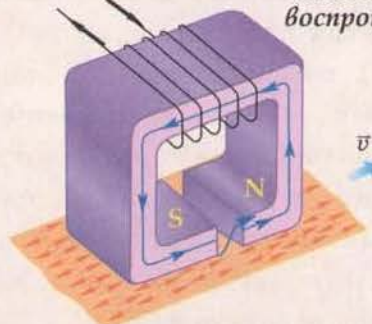
Обмотка головки записи



⑥ Головка воспроизведения

Выходной сигнал

Обмотка головки воспроизведения



§25. ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Электроэнергия производится вблизи источников топлива или гидроресурсов, в то время как ее потребители находятся повсеместно. Поэтому возникает необходимость в передаче электроэнергии на большие расстояния. Схему передачи электроэнергии от источника тока к потребителю можно представить в виде простейшей замкнутой цепи, включающей источник тока с ЭДС $\mathcal{E}$ и внутренним сопротивлением r_0 , сопротивления нагрузки R и подводящих проводов r ①. Такова, например, часть схемы электропитания автомобиля ②. Обычно внутренним сопротивлением источника тока r_0 можно пренебречь, так как $r_0 \ll r$, $r_0 \ll R$. Из закона Ома для замкнутой цепи следует, что сила тока $I = \mathcal{E} / (R + r)$. Тогда

$$\mathcal{E} = I(R + r). \quad (1)$$

Умножая обе части равенства (1) на I , получаем

$$\mathcal{E}I = I^2R + I^2r, \text{ или } P = P_{\text{н}} + P_{\text{п}}. \quad (2)$$

Мощность сторонних сил $P = \mathcal{E}I$, разделяющих разноименные заряды в источнике тока, частично передается потребителю (нагрузке) $P_{\text{н}} = I^2R$ — *полезная мощность*, частично идет на нагревание проводов $P_{\text{п}} = I^2r$ — *потери мощности*.

При передаче электроэнергии важно доставить потребителю максимальную полезную мощность (это удастся сделать при $R = r$) и снизить потери мощности.

Выясним, от чего зависят потери мощности $P_{\text{п}}$ в подводящих проводах. При заданной, известной мощности P источника тока в линии электропередачи сила тока $I = P / \mathcal{E}$. Передаваемое напряжение на полюсах источника тока

$$U_{ab} = \mathcal{E} - Ir_0.$$

Если пренебречь внутренним сопротивлением источника тока, то $\mathcal{E} = U_{ab}$, $I = P / U_{ab}$.

Тогда потери мощности

$$P_{\text{п}} = I^2r = \frac{P^2}{U_{ab}^2}r. \quad (3)$$

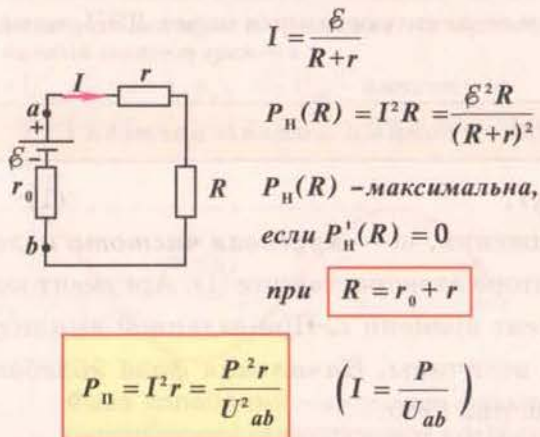
При большой длине линии электропередачи ее электрическое сопротивление r становится значительным. Ввиду того, что

потери мощности в линии обратно пропорциональны квадрату передаваемого напряжения U_{ab} .

их уменьшают за счет повышения этого напряжения. Обычно генераторы переменного тока на электростанциях вырабатывают напряжение, не превышающее 20 кВ, так как при больших напряжениях резко возрастает возможность электрического пробоя изоляции в катушке (обмотке) и других частях генератора ③. Для снижения потерь мощности напряжение в ЛЭП должно быть максимальным, поэтому на крупных электростанциях ставят повышающие трансформаторы. Однако напряжение в линии электропередачи ограничено: при слишком высоком напряжении между проводами возникают разряды, приводящие к потерям энергии. Для использования электроэнергии на промышленных предприятиях, местных электросетях, индивидуальными потребителями требуется значительное снижение напряжения, осуществляемое с помощью понижающих трансформаторов. В России и странах ЕС используется переменное напряжение с частотой 50 Гц.

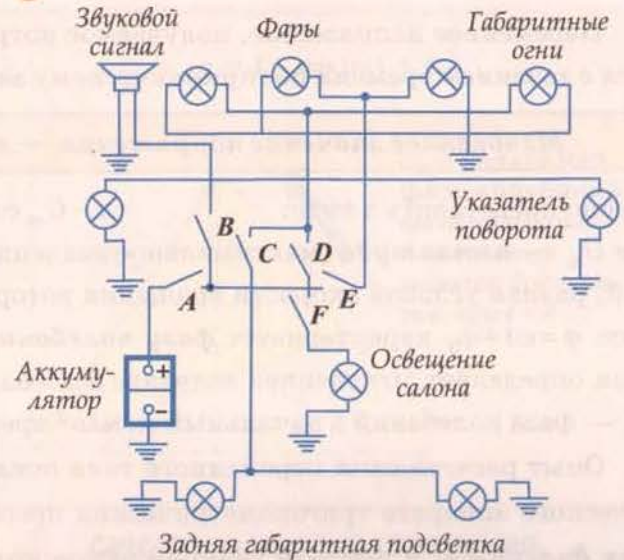
ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

① Потеря мощности в подводящих проводах

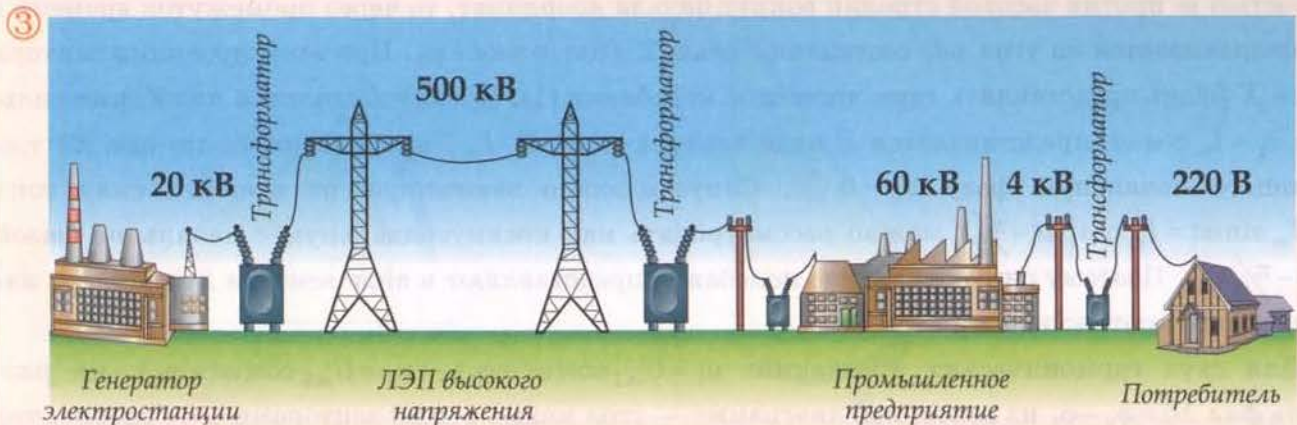


Потеря мощности в подводящих проводах обратно пропорциональна квадрату напряжения на источнике тока

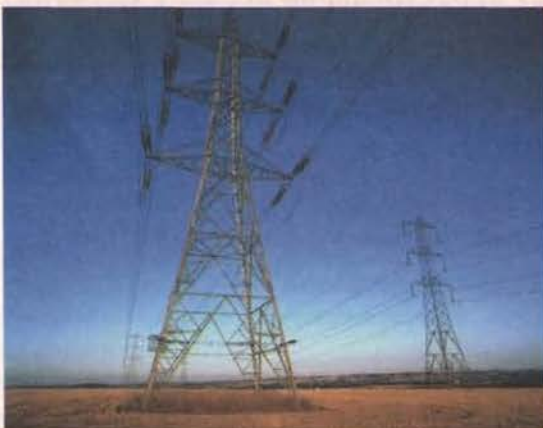
② Схема электропитания автомобиля



ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА РАССТОЯНИЕ И ЕЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ



ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ (ЛЭП)



ТРАНСФОРМАТОРНАЯ ПОДСТАНЦИЯ



§26. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Переменное напряжение, получаемое потребителем от электростанции через ЛЭП, изменяется с течением времени по гармоническому закону.

Мгновенное значение напряжения — напряжение в данный момент времени t

можно представить в виде:

$$u = U_m \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где U_m — **амплитуда** (максимальное значение) напряжения, ω — **круговая частота** колебаний, равная угловой скорости вращения ротора генератора электростанции ①. Аргумент косинуса $\varphi = \omega t + \varphi_0$ характеризует **фазу колебаний** в момент времени t . При заданной амплитуде фаза определяет мгновенное значение колеблющейся величины. **Начальная фаза колебаний** φ_0 — фаза колебаний в начальный момент времени, т.е. при $t = 0$.

Опыт расчета схем переменного тока показал, что вместо достаточно громоздкого математического аппарата тригонометрических преобразований удобно использовать **метод векторных диаграмм**, в котором гармоническое колебание (1) представляют в виде вектора ②. Модуль U_m этого вектора равен амплитуде колебаний, а угол, образуемый вектором с осью X , равен начальной фазе колебаний φ_0 . Если этот вектор вращается в плоскости XY с угловой скоростью ω против часовой стрелки вокруг начала координат, то через промежуток времени t он поворачивается на угол ωt , составляя с осью X угол $\varphi = \omega t + \varphi_0$. При этом проекция вектора на ось X будет представлять гармоническое колебание (1). Косинусоидальное колебание силы тока $i_1 = I_m \cos \omega t$ представляется в виде вектора длиной I_m , направленного по оси X , т.е. имеющего начальную фазу $\varphi_0 = 0$ ③. Синусоидально зависящую от времени силу тока $i_2 = I_m \sin \omega t = I_m \cos(\omega t - \pi/2)$ можно рассматривать как косинусоидальную с начальной фазой $\varphi_0 = -\pi/2$ ④. Поэтому синусоидальное колебание представляют в виде вектора длиной I_m , направленного противоположно оси Y .

Для двух гармонических колебаний: $u_1 = U_{m1} \cos(\omega t + \varphi_1)$, $u_2 = U_{m2} \cos(\omega t + \varphi_2)$, их **разность фаз** $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ на векторной диаграмме — угол между этими векторами ⑤. Говорят, что второе колебание опережает первое по фазе на $\Delta\varphi$, или что первое колебание отстает по фазе от второго на $\Delta\varphi$.

Сложение колебаний на векторной диаграмме происходит по правилу сложения векторов,

т.е. по правилу параллелограмма или треугольника ⑥. С помощью векторной диаграммы найдем результат сложения двух колебаний одинаковой амплитуды U_m .

$u_1 = U_m \cos \omega t$ — вектор, с модулем U_m , направленный по оси X .

$u_2 = U_m \sin \omega t$ — вектор, с модулем U_m , направленный противоположно оси Y .

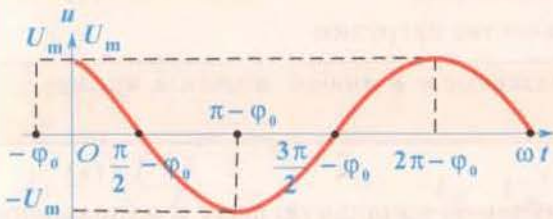
Сложение векторов дает вектор с модулем $U_m \sqrt{2}$ и начальной фазой $(-\pi/4)$.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

① ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Мгновенное значение напряжения – напряжение в данный момент времени t

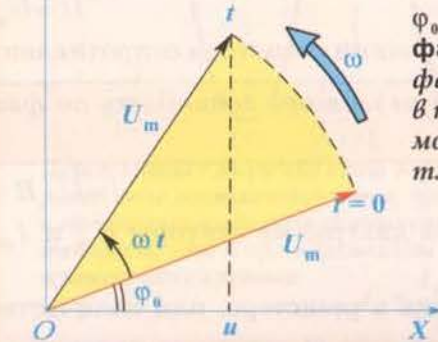
$u = U_m \cos(\omega t + \varphi_0)$, где U_m – амплитуда напряжения, $\varphi = \omega t + \varphi_0$ – фаза колебаний



Фаза колебаний – аргумент функции, описывающей гармонические колебания

② ВЕКТОРНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

$$u = U_m \cos(\omega t + \varphi_0)$$

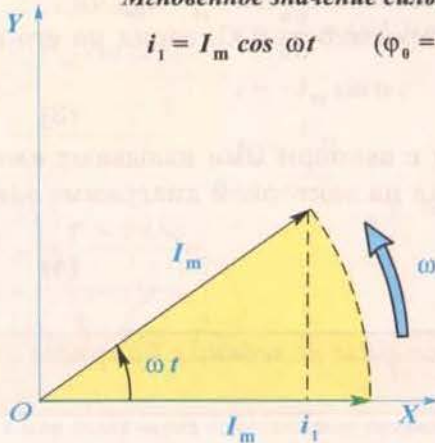


φ_0 – начальная фаза колебаний – фаза колебаний в начальный момент времени, т.е. при $t = 0$

③ КОСИНУСОИДАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Мгновенное значение силы тока

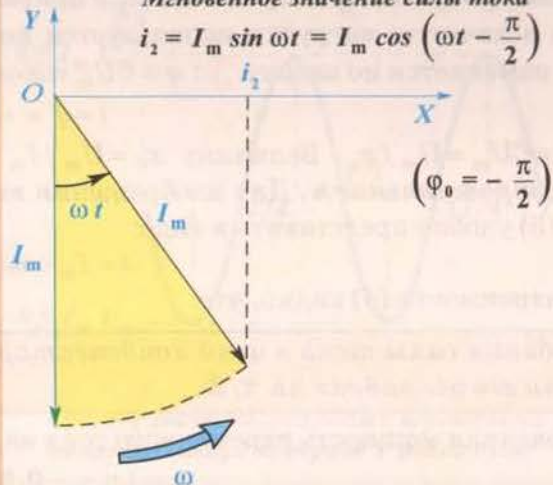
$$i_1 = I_m \cos \omega t \quad (\varphi_0 = 0)$$



④ СИНУСОИДАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Мгновенное значение силы тока

$$i_2 = I_m \sin \omega t = I_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$



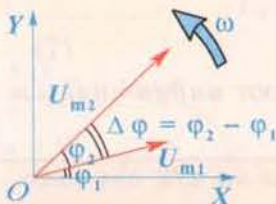
$$\left(\varphi_0 = -\frac{\pi}{2}\right)$$

⑤ РАЗНОСТЬ ФАЗ ДВУХ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Мгновенные значения напряжений

$$u_1 = U_{m1} \cos(\omega t + \varphi_1);$$

$$u_2 = U_{m2} \cos(\omega t + \varphi_2)$$



$\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$
– разность фаз двух колебаний

Второе колебание опережает первое по фазе на $\Delta \varphi$

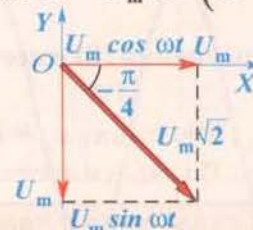
Первое колебание отстает по фазе от второго на $\Delta \varphi$

⑥ СЛОЖЕНИЕ ДВУХ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Мгновенные значения напряжений

$$u_1 = U_m \cos \omega t;$$

$$u_2 = U_m \sin \omega t = U_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$



$$u_1 + u_2 = U_m \left(\cos \omega t + \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right) = 2 U_m \cos \frac{\pi}{4} \cdot \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{4} \right)$$

$$u_1 + u_2 = U_m \sqrt{2} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{4} \right)$$

§27. РЕЗИСТОР, КОНДЕНСАТОР, КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основными элементами цепи переменного тока являются резистор, конденсатор и катушка индуктивности. Рассмотрим сначала подключение каждого из этих элементов к генератору в отдельности, а затем вместе, считая, что напряжение на генераторе изменяется по гармоническому закону:

$$U = U_m \cos \omega t. \quad (1)$$

При использовании резистора сопротивлением R в качестве нагрузки

сила тока в резисторе совпадает по фазе с напряжением в любой момент времени ①:

$$i = U / R = I_m \cos \omega t. \quad (2)$$

На векторной диаграмме векторы U_m и I_m имеют нулевую начальную фазу и направлены по оси X .

Мощность тока в резисторе, или количество теплоты, выделяющееся в резисторе в единицу времени, изменяется со временем по закону ②: $P_{\sim} = I_m^2 \cos^2 \omega t$. Количество теплоты, выделяющееся в резисторе за период переменным током, $\bar{P}_{\sim} = 0,5 I_m^2 R$. Такое же количество теплоты выделяется в резисторе за период при протекании постоянного тока I_d : $P_{\sim} = I_d^2 R$. Действующее значение переменного тока I_d получается, если приравнять эти количества теплоты: $I_d = I_m / \sqrt{2}$.

Если в качестве нагрузки используется конденсатор электроемкостью C , заряд на его обкладках изменяется по закону ③: $q = CU_m \cos \omega t$, а сила тока

$$i = q' = -I_m \sin \omega t, \quad (3)$$

где $I_m = \omega CU_m = U_m / x_C$. Величину $x_C = U_m / I_m$ в соответствии с законом Ома называют **емкостным сопротивлением**. Для изображения вектора силы тока на векторной диаграмме зависимость (3) удобно представить в виде:

$$i = I_m \cos(\omega t + \pi/2). \quad (4)$$

Из зависимости (4) видно, что

колебания силы тока в цепи конденсатора опережают по фазе колебания напряжения на его обкладках на $\pi/2$.

Мгновенная мощность переменного тока на конденсаторе

$$p = i u = -0,5 I_m U_m \sin 2\omega t. \quad (5)$$

Из графика зависимости (5) от времени следует, что среднее значение мощности переменного тока на конденсаторе за период равно нулю ④.

При использовании катушки индуктивностью L в качестве нагрузки генератора переменного тока ⑤ ЭДС самоиндукции ($-Li'$) равна по модулю и противоположна по знаку напряжению на концах катушки, созданному генератором:

$$Li' = U_m \cos \omega t. \quad (6)$$

Решение уравнения (6) имеет вид:

$$i = I_m \sin \omega t = I_m \cos(\omega t - \pi/2), \quad (7)$$

где $I_m = U_m / x_L$. Величину $x_L = \omega L$ в соответствии с законом Ома называют **индуктивным сопротивлением**. Из зависимости (7) видно, что

колебания силы тока в катушке индуктивности отстают по фазе на $\pi/2$ от колебаний напряжения на ней.

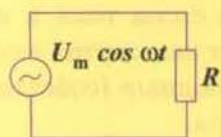
Мгновенная мощность переменного тока на катушке ⑥

$$p = i u = 0,5 I_m U_m \sin 2\omega t. \quad (8)$$

Среднее значение мощности переменного тока на катушке за период равно нулю.

① РЕЗИСТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Схема включения

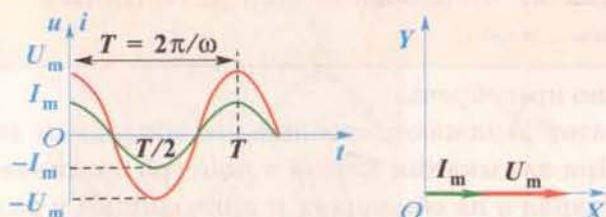


$$u = U_m \cos \omega t$$

$$i = \frac{u}{R} = I_m \cos \omega t$$

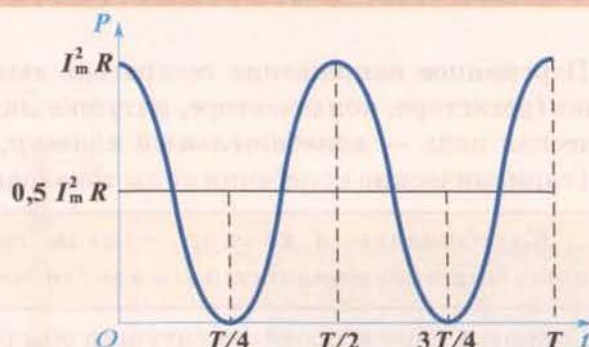
$$I_m = \frac{U_m}{R}$$

R – активное сопротивление



Напряжение и сила тока в резисторе совпадают по фазе в любой момент времени

② МОЩНОСТЬ ТОКА В РЕЗИСТОРЕ

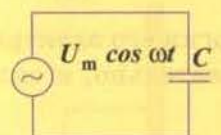


Действующее значение силы переменного тока равно силе постоянного тока, при котором в проводнике выделяется такое же количество теплоты, что и при переменном токе за тот же промежуток времени

$$I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

③ КОНДЕНСАТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Схема включения



$$u = U_m \cos \omega t$$

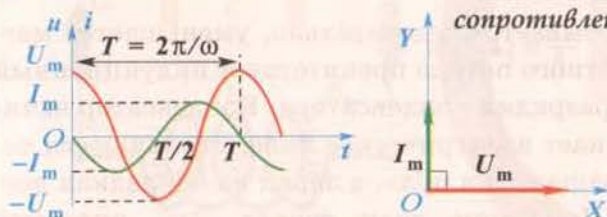
$$i = \frac{dq}{dt} = (CU)' = CU_m (\cos \omega t)'$$

$$i = -I_m \sin \omega t$$

$$I_m = \frac{U_m}{x_c}$$

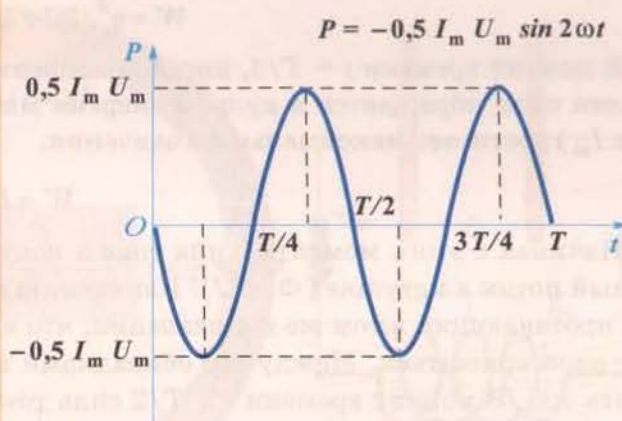
$$x_c = \frac{1}{\omega C}$$

емкостное сопротивление



Сила тока через конденсатор опережает напряжение на нем на $\pi/2$

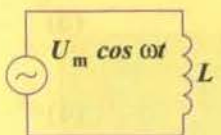
④ МОЩНОСТЬ ТОКА НА КОНДЕНСАТОРЕ



Среднее значение мощности переменного тока на конденсаторе за период T равно нулю

⑤ КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Схема включения



$$u = U_m \cos \omega t$$

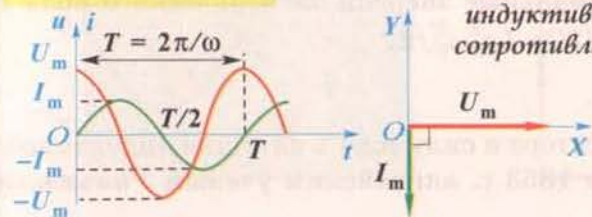
$$Li' = U_m \cos \omega t$$

$$i = I_m \sin \omega t$$

$$I_m = \frac{U_m}{x_L}$$

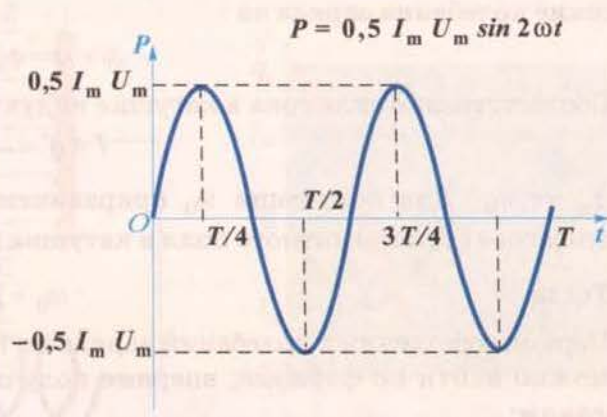
$$x_L = \omega L$$

индуктивное сопротивление



Колебания силы тока в катушке индуктивности отстают по фазе на $\pi/2$ от колебаний напряжения на ней

⑥ МОЩНОСТЬ ТОКА В КАТУШКЕ



Среднее значение мощности переменного тока в катушке индуктивности за период T равно нулю

§28. СВОБОДНЫЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Переменное напряжение генератора вызывает вынужденные колебания силы тока в нагрузке (резисторе, конденсаторе, катушке индуктивности). Однако существует замкнутая электрическая цепь — **колебательный контур**, в которой могут возникать свободные (собственные) гармонические колебания силы тока (заряда) даже в отсутствие генератора.

Колебательный контур — цепь, состоящая из последовательно включенных катушки индуктивности L и конденсатора емкостью C .

Сопротивлением проводов катушки обычно можно пренебречь.

Для возбуждения колебаний в контуре конденсатор заряжают, сообщая его обкладкам заряды $\pm q_0$ и энергию электрического поля $q_0^2/2C$. При замыкании ключа в контуре возникает возрастающий со временем ток I , нейтрализующий заряд q на обкладках и приводящий к разрядке конденсатора. В результате

полная энергия электромагнитного поля W в любой момент времени сохраняется,

оставаясь равной энергии электрического поля конденсатора в начальный момент времени:

$$W = q^2/2C + LI^2/2 = q_0^2/2C. \quad (1)$$

В момент времени $t = T/4$, когда конденсатор полностью разрядится, энергия его электрического поля обращается в нуль, а энергия магнитного поля катушки (следовательно, и сила тока I_m) достигает максимального значения.

$$W = LI_m^2/2 \quad (2)$$

Начиная с этого момента, сила тока в контуре убывает. Следовательно, уменьшается магнитный поток в катушке ($\Phi = LI$). Изменению магнитного потока препятствует индукционный ток, протекающий в том же направлении, что и ток разрядки конденсатора. Конденсатор начинает перезаряжаться. Между его обкладками возникает электрическое поле, стремящееся ослабить ток. В момент времени $t = T/2$ сила тока обращается в нуль, а заряд на обкладках достигнет первоначального по модулю значения. При этом знак заряда $\mp q_0$ окажется противоположным первоначальному. Далее те же процессы начнут протекать в обратном направлении и через такой же промежуток времени $T/2$, т.е. в момент времени $t = T$, система вернется в первоначальное состояние. После этого начнется самопроизвольное повторение рассмотренного цикла. В отсутствие потерь на нагревание проводов в контуре совершаются гармонические колебания заряда на

$$q = q_0 \cos \omega_0 t \quad (3)$$

Соответственно сила тока в катушке индуктивности изменяется по закону:

$$I = q' = -I_m \sin \omega_0 t, \quad (4)$$

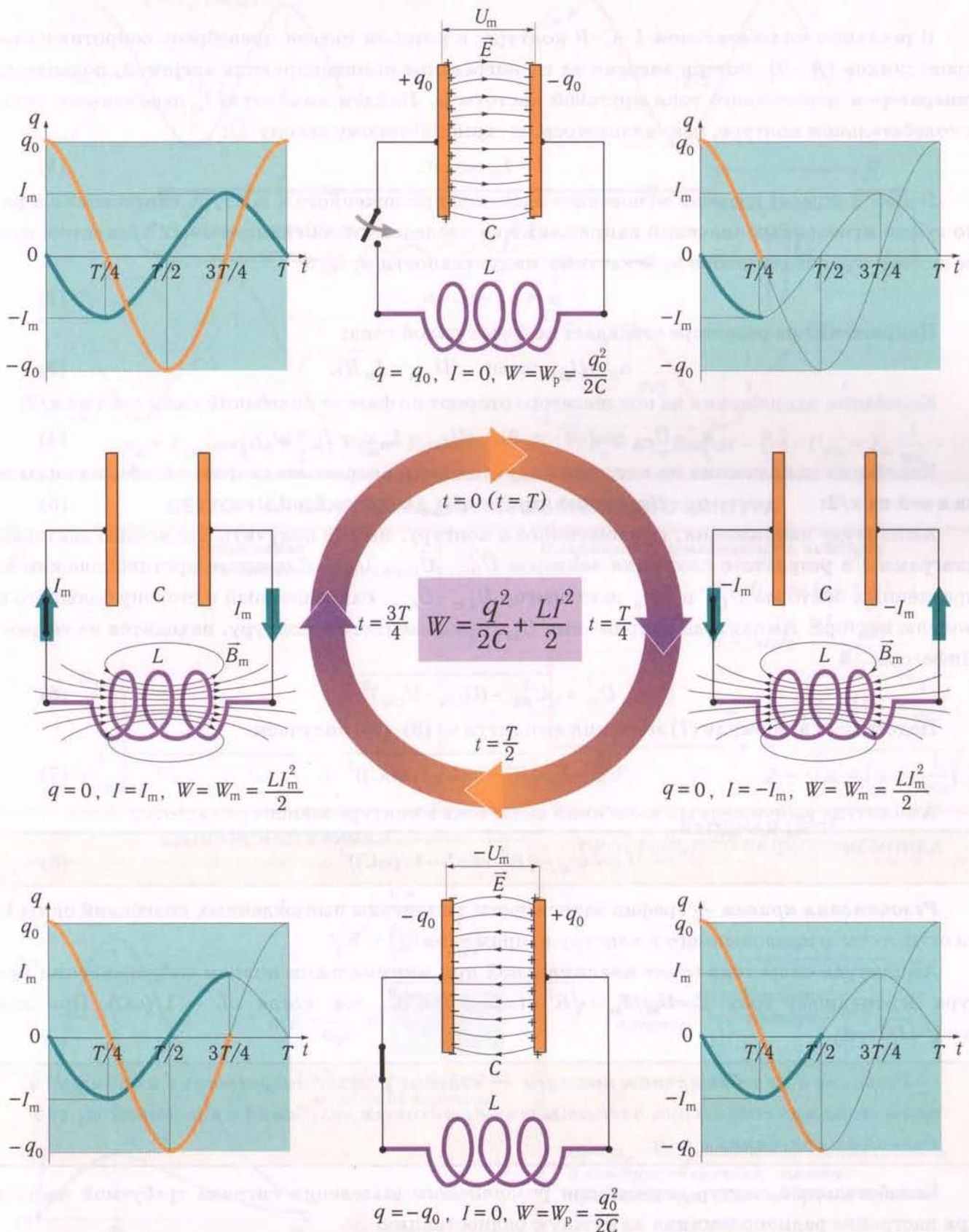
где $I_m = q_0 \omega_0$. Для получения ω_0 приравняем максимальные энергии электрического поля в конденсаторе (1) и магнитного поля в катушке (2): $q_0^2/2C = LI_m^2 \omega_0^2/2$.

Тогда
$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}.$$

Период собственных колебаний заряда на конденсаторе и силу тока в катушке индуктивности можно найти по формуле, впервые полученной в 1853 г. английским ученым **Уильямом Томсоном**:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

ЭНЕРГООБМЕН МЕЖДУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ И МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ



§29. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В реальном колебательном L – C – R контуре, в котором нельзя пренебречь сопротивлением проводников ($R \neq 0$), потери энергии на их нагревание компенсируются энергией, подводимой генератором переменного тока круговой частоты ω . Найдем амплитуду I_m переменного тока i в колебательном контуре, изменяющегося по гармоническому закону ①:

$$i = I_m \cos \omega t. \quad (1)$$

В любой момент времени мгновенное значение приложенного к контуру напряжения u равно сумме мгновенных значений напряжений на последовательно включенных элементах цепи: резисторе u_R , конденсаторе u_C и катушке индуктивности u_L ②:

$$u = u_R + u_C + u_L. \quad (2)$$

Напряжение на резисторе совпадает по фазе с силой тока:

$$u_R = U_{Rm} \cos \omega t, \quad (U_{Rm} = I_m R). \quad (3)$$

Колебания напряжения на конденсаторе отстают по фазе от колебаний силы тока на $\pi/2$:

$$u_C = U_{Cm} \cos(\omega t - \pi/2), \quad (U_{Cm} = I_m x_C = I_m / \omega C). \quad (4)$$

Колебания напряжения на катушке индуктивности опережают по фазе колебания силы тока в ней на $\pi/2$:

$$u_L = U_{Lm} \cos(\omega t + \pi/2), \quad (U_{Lm} = I_m x_L = I_m \omega L). \quad (5)$$

Амплитуду напряжения, приложенного к контуру, можно получить с помощью векторной диаграммы в результате сложения векторов $\vec{U}_{Rm}$, $\vec{U}_{Cm}$, $\vec{U}_{Lm}$. Сложение противоположно направленных векторов $\vec{U}_{Lm}$ и $\vec{U}_{Cm}$ дает вектор $\vec{U}_{Lm} - \vec{U}_{Cm}$, направленный в сторону большего по модулю вектора. Амплитуда напряжения U_m , приложенного к контуру, находится из теоремы Пифагора ③:

$$U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2}. \quad (6)$$

Подставляя в формулу (7) значения амплитуд из (3)–(5), получаем:

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/(\omega C))^2} \quad (7)$$

Амплитуда вынужденных колебаний силы тока в контуре зависит от частоты:

$$I_m = U_m / \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/(\omega C))^2}. \quad (8)$$

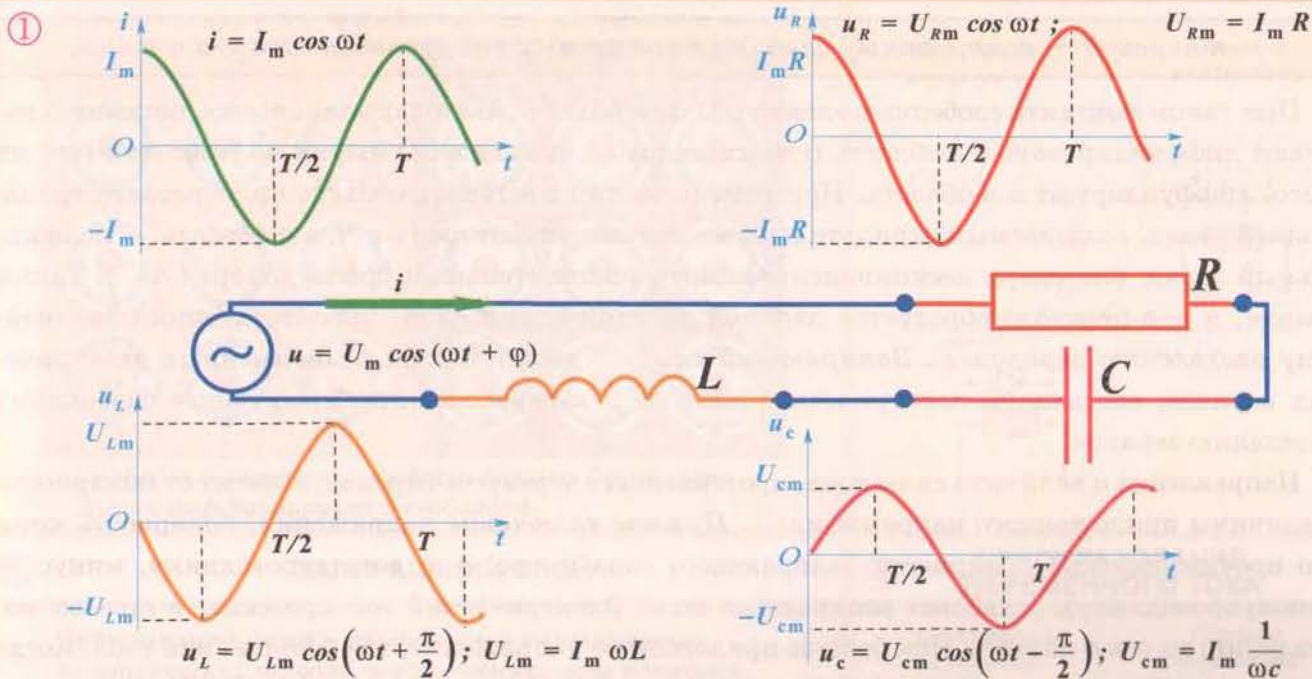
Резонансная кривая — график зависимости амплитуды вынужденных колебаний силы тока от частоты ω приложенного к контуру напряжения ④.

Амплитуда силы тока будет максимальной при минимальном полном сопротивлении контура переменному току $Z = U_m / I_m = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/(\omega C))^2}$, т.е. когда $\omega L = 1/(\omega C)$. При этом $\omega = 1/\sqrt{LC} = \omega_0$.

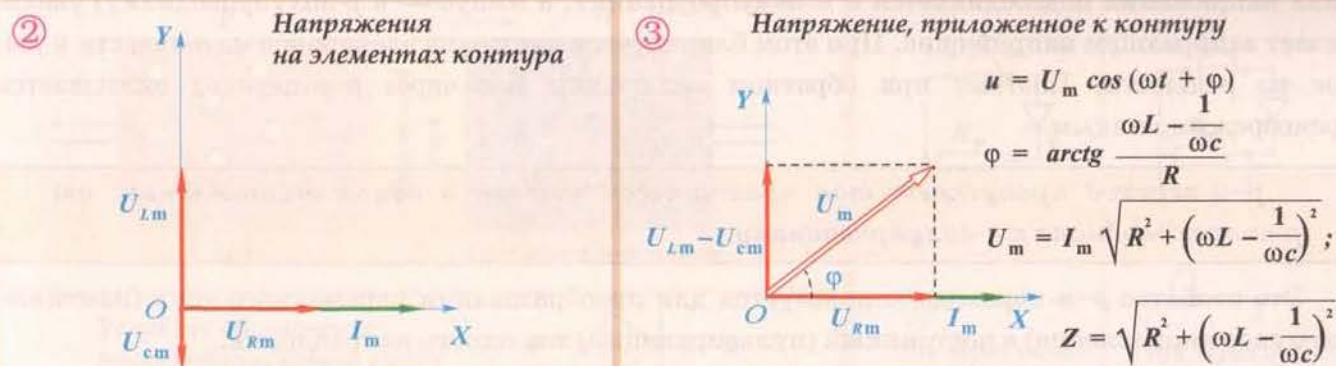
Резонанс в колебательном контуре — явление резкого возрастания амплитуды силы тока при совпадении частоты ω вынужденных колебаний с частотой ω_0 собственных колебаний в нем.

Колебательный контур служит для резонансного выделения сигнала требуемой частоты при настройке радиоприемника на нужную радиостанцию ⑤.

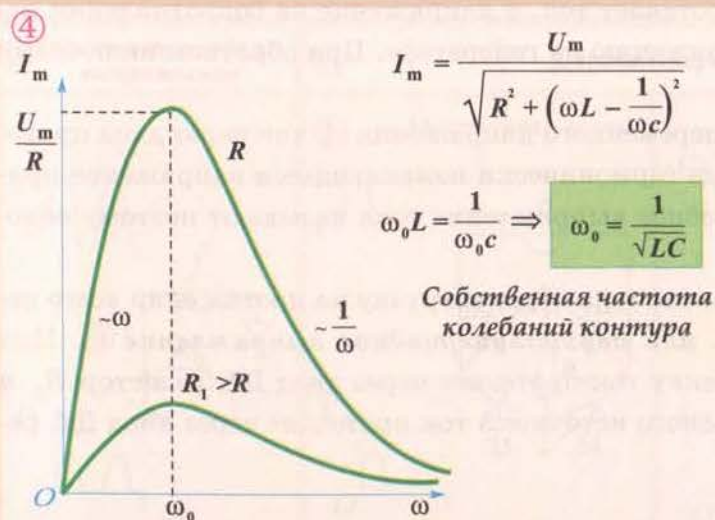
ГРАФИКИ ИЗМЕНЕНИЯ СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ



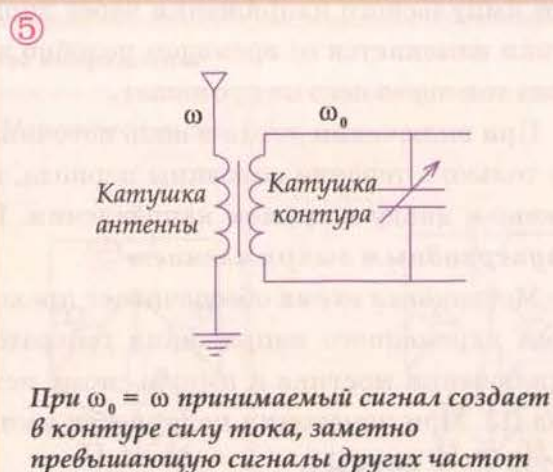
ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА ДЛЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА



РЕЗОНАНСНАЯ КРИВАЯ



ВХОДНАЯ ЦЕПЬ ПРОСТЕЙШЕГО РАДИОПРИЕМНИКА



§30. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД

p - n -переход — контактный слой двух примесных полупроводников p - и n -типа.

При таком контакте свободные электроны из n -области благодаря тепловому движению начинают диффундировать в p -область (где их мало) ①. Аналогично дырки из p -области (где их много) диффундируют в n -область. При обмене частиц местами p -область приобретает отрицательный заряд, создаваемый отрицательными ионами акцептора (Ga^-), а n -область — положительный заряд, благодаря нескомпенсированным положительным ионам донора (As^+). Таким образом, в p - n -переходе образуется двойной электрический слой, препятствующий дальнейшему разделению зарядов ②. **Запирающий слой** — двойной слой разноименных электрических зарядов, создающий электрическое поле на p - n -переходе, препятствующее свободному разделению зарядов.

Направление и величина силы тока, протекающего через p - n -переход, зависит от полярности и величины приложенного напряжения ③. **Прямое включение** напряжения, полярность которого противоположна полярности запирающего слоя (плюс — к p -полупроводнику, минус — к n -полупроводнику), ослабляет запирающее поле. Электрический ток протекает в прямом направлении: из p - в n -область. Чем больше приложенное напряжение, тем больше сила тока. Когда приложенное напряжение U превосходит напряжение U_z на запирающем слое ($U > U_z$), сила тока через p - n -переход резко возрастает. **Обратное включение p - n -перехода** (плюс внешнего источника напряжения подсоединяется к n -полупроводнику, а минус — к p -полупроводнику) увеличивает запирающее напряжение. При этом блокируется движение электронов из n -области и дырок из p -области. Поэтому при обратном включении ток через p - n -переход оказывается пренебрежимо малым.

p - n -переход пропускает ток практически только в одном направлении: от p -полупроводника к n -полупроводнику.

Это свойство p - n -перехода используется для преобразования переменного тока (изменяющего свое направление) в постоянный (пульсирующий) ток одного направления.

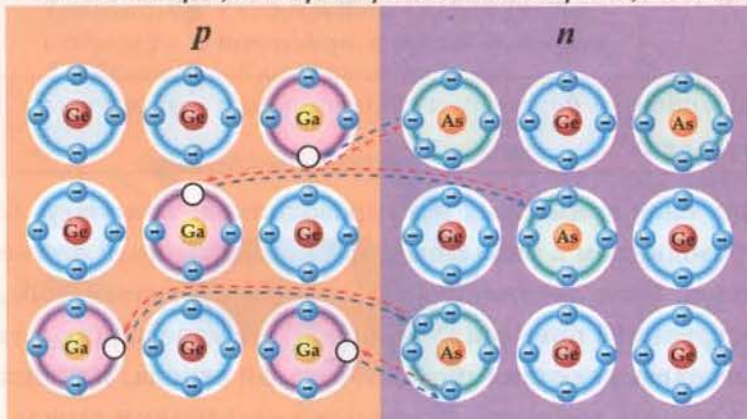
Полупроводниковый диод — элемент электрической схемы, содержащий p - n -переход и два вывода для включения в электрическую цепь. При прямом подключении к диоду переменного импульсного напряжения через диод протекает ток, а напряжение на сопротивлении нагрузки изменяется со временем подобно напряжению на генераторе. При обратном включении диода ток через него не протекает.

При включении диода в цепь источника переменного напряжения ④ ток через диод проходит только в течение половины периода, когда гармонически изменяющееся напряжение приложено к диоду в прямом направлении. Подобное выпрямление тока называют поэтому **однополупериодным выпрямлением** ⑤.

Мостиковая схема обеспечивает прохождение тока через нагрузку на протяжении всего периода переменного напряжения генератора, или **двухполупериодное выпрямление** ⑥. При подключении мостика к импульсному источнику ток протекает через диод Д1, резистор R_n и диод Д3. При изменении полярности импульсного источника ток протекает через диод Д2, резистор R_n и диод Д4.

① $p - n$ ПЕРЕХОД

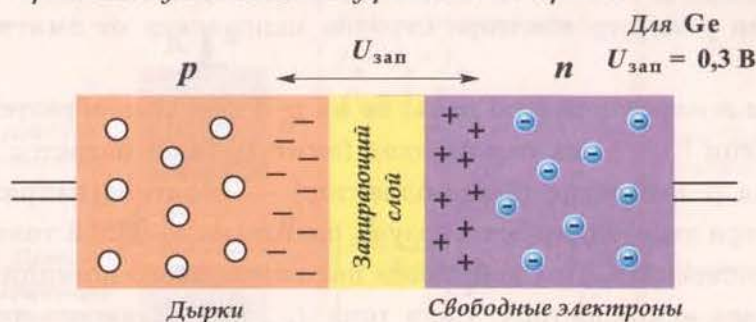
Физические процессы при образовании запирающего слоя



Свободные электроны диффундируют в p -область
Дырки диффундируют в n -область

② ЗАПИРАЮЩИЙ СЛОЙ

Запирающий слой – двойной слой разноименных электрических зарядов, электрическое поле которого препятствует свободному разделению зарядов



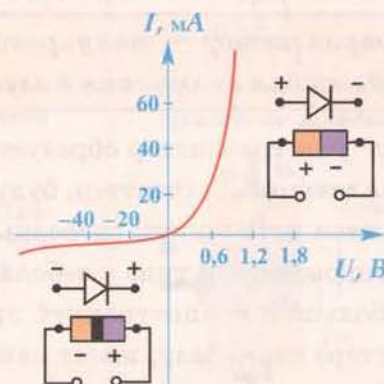
Условное обозначение
полупроводникового диода



③ Вольт-амперная характеристика $p - n$ перехода

Обратное включение

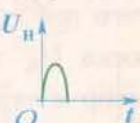
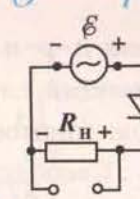
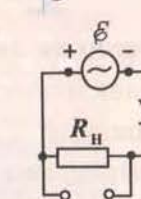
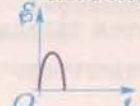
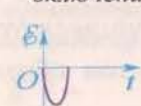
Прямое включение



④ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Обратное включение

Прямое включение

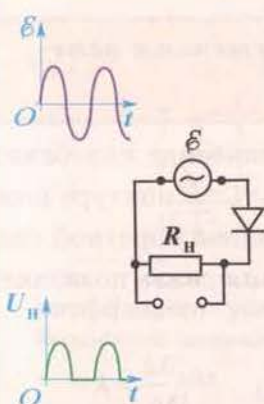


Ток через диод не протекает

Ток через диод протекает

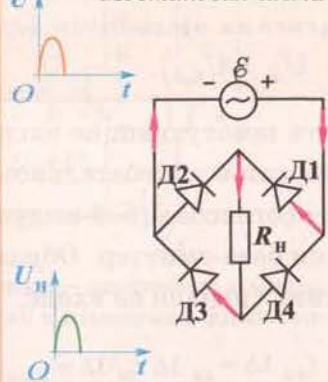
ВЫПРЯМЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

⑤ Однополупериодное выпрямление

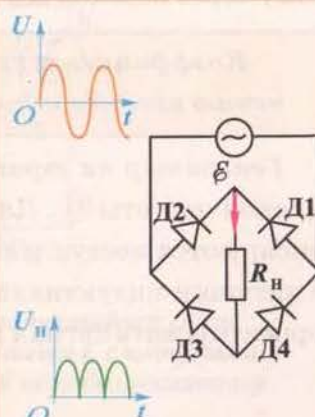
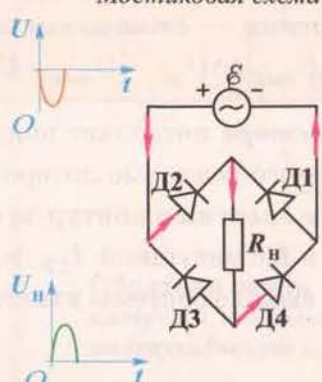


⑥ Двухполупериодное выпрямление

Мостиковая схема



Мостиковая схема



§31. ТРАНЗИСТОР

Для генерирования, преобразования и усиления переменного тока в электрических схемах используют

транзистор — полупроводниковый прибор с двумя p - n -переходами и тремя выводами для включения в электрическую цепь ①.

n - p - n -транзистор образует три тонких слоя примесных полупроводников: **эмиттер**, **базу** и **коллектор** ②. Эмиттер, будучи полупроводником n -типа с высокой концентрацией примеси, является источником свободных электронов. База, регулирующая силу тока в транзисторе, — полупроводник p -типа с небольшой концентрацией примеси. Коллектор (полупроводник n -типа с небольшой концентрацией примеси), перехватывающий поток носителей заряда, идущих от эмиттера через базу, имеет наибольшую площадь контакта. Основными носителями заряда являются свободные электроны, движущиеся от эмиттера к коллектору. Соответственно ток, за направление которого принимается направленное движение положительных зарядов, протекает от коллектора к эмиттеру. Поэтому на условном обозначении n - p - n -транзистора стрелка направлена от базы к эмиттеру.

Аналогично устройство и p - n - p -транзистора, в котором основными носителями заряда являются дырки, движущиеся от эмиттера к коллектору. В этом же направлении протекает ток через эмиттер: в условном обозначении p - n - p -транзистора стрелка направлена от эмиттера к базе.

Если n - p - n -транзистор не включен в электрическую цепь, то на p - n -переходе образуется запирающий слой. В электрической цепи ③, ④ на n - p -переход (эмиттер-база) подается небольшое прямое напряжение U_B , а на p - n -переход (база-коллектор) — обратное напряжение U_K . Свободные электроны из эмиттера диффундируют в базу и, благодаря ее малой толщине, почти все достигают коллекторного перехода. Под действием положительного потенциала источника U_K электроны притягиваются к коллектору. Сила тока I_K , протекающего через коллектор и через сопротивление нагрузки, значительно превышает силу тока I_B через базу. Небольшая сила тока через базу вызывает значительную силу тока в нагрузке, поэтому транзистор может быть использован для усиления электрических сигналов.

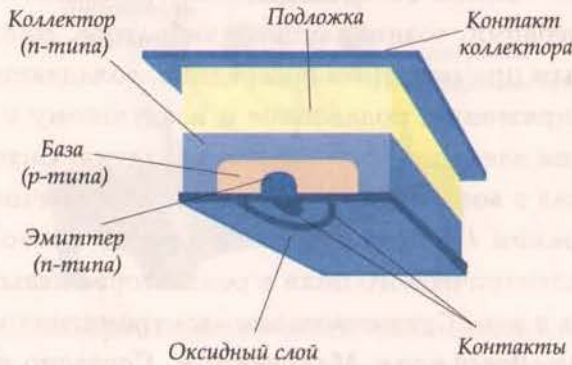
Одной из схем **усилителя на транзисторе** является схема с общим эмиттером, в которой в цепь база-эмиттер включен источник слабого переменного напряжения: $u_c = U_{c0} \sin \omega t$ ⑤. Разность потенциалов между базой и эмиттером $u_{БЭ} = U_B + u_c$ всегда положительна ($U_{c0} \ll U_B$), поэтому через переход все время протекает ток.

Коэффициент усиления — отношение изменения выходного напряжения к изменению входного: $k = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$ ($U_{\text{вых}} = U_H$; $U_{\text{вх}} = U_{БЭ}$).

Генератор на транзисторе позволяет получать незатухающие электрические колебания высокой частоты ⑥. Для этого тепловые потери энергии в колебательном L - C - R контуре компенсируются поступлением энергии в контур за счет согласованной индуктивной обратной связи катушки индуктивности L с катушкой L_{CB} в цепи база-эмиттер. **Обратная связь** позволяет корректировать сигнал на выходе системы изменением сигнала на входе.

УСТРОЙСТВО ТРАНЗИСТОРА

- ① Транзистор – полупроводниковый прибор с двумя $p-n$ переходами и тремя выводами для включения в электрическую цепь

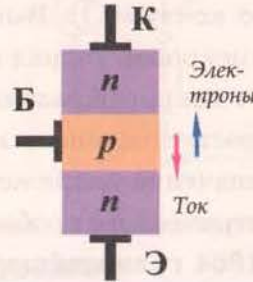


$n-p-n$ ТРАНЗИСТОР

- ② Обозначение

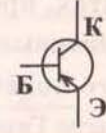


Движение зарядов



$p-n-p$ ТРАНЗИСТОР

- Обозначение

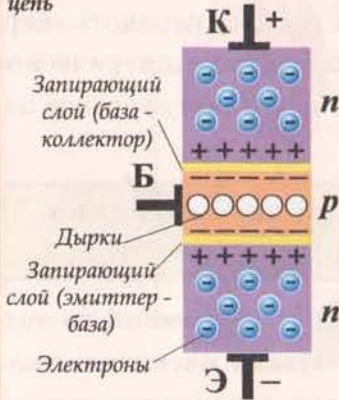


Движение зарядов

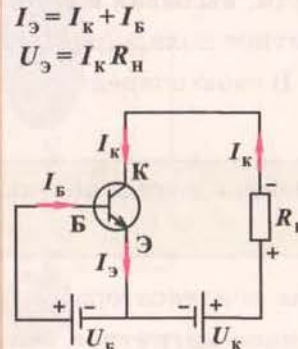


③ $n-p-n$ ТРАНЗИСТОР В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Распределение электрических зарядов в $n-p-n$ транзисторе, не включенном в электрическую цепь

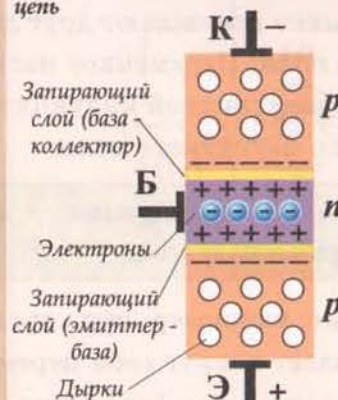


Направление токов в $n-p-n$ транзисторе, включенном в электрическую цепь

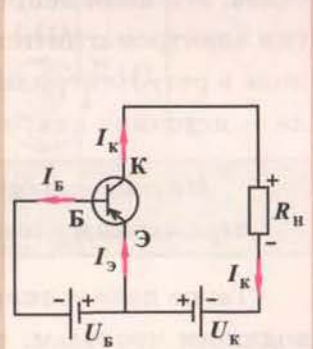


④ $p-n-p$ ТРАНЗИСТОР В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Распределение электрических зарядов в $p-n-p$ транзисторе, не включенном в электрическую цепь



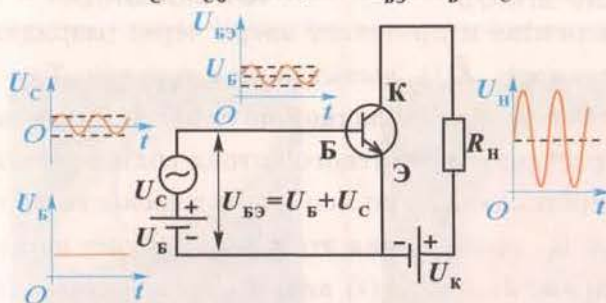
Направление токов в $p-n-p$ транзисторе, включенном в электрическую цепь



⑤ УСИЛИТЕЛЬ НА ТРАНЗИСТОРЕ

Схема с общим эмиттером

$$U_c = U_{c0} \sin \omega t; \quad U_{БЭ} = U_B + U_c$$

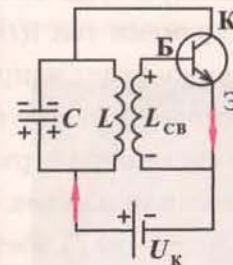


Коэффициент усиления – отношение изменения выходного напряжения к изменению входного:

$$k = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta U_{ВХ}} \quad (\Delta U_{ВЫХ} = \Delta U_{Н}; \quad \Delta U_{ВХ} = \Delta U_{БЭ})$$

⑥ ГЕНЕРАТОР НА ТРАНЗИСТОРЕ

Генерация автоколебаний



Обратная связь – индуктивная связь катушки индуктивности L с катушкой индуктивности $L_{св}$ в цепи база-эмиттер

§32. ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

В опытах, проведенных в 1887 г. в Берлинском университете немецким физиком *Генрихом Герцем*, впервые наблюдалось распространение в пространстве переменного электрического и магнитного полей, или электромагнитного поля. Источником возмущения электромагнитного поля в опыте Герца являлись электромагнитные колебания, возникающие в вибраторе. **Вибратор Герца** — прямолинейный проводник с воздушным промежутком посередине, обладающий свойствами колебательного контура ①. Высокое напряжение, подаваемое к воздушному промежутку, вызывало в нем искровой разряд вследствие электрического пробоя воздуха. Спустя промежуток времени $t = l/c$ искровой разряд возникал в воздушном промежутке аналогичного вибратора (**резонатора**), расположенного на расстоянии l и замкнутого накоротко проволокой ②. Это означало, что значение напряженности электрического поля в резонаторе оказывалось достаточным для электрического пробоя воздуха в нем. Существование электромагнитных волн было предсказано в 1864 г. английским ученым *Джеймсом Максвеллом*. Согласно теории Максвелла,

электромагнитная волна — переменное электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве.

Между переменными во времени электрическим и магнитным полем существует взаимосвязь: эти поля непрерывно порождают друг друга, вызывая волновой процесс переноса энергии электромагнитного поля. Переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле в результате электромагнитной индукции. В свою очередь переменное электрическое поле — источник вихревого магнитного поля.

Магнитоэлектрическая индукция — явление возникновения магнитного поля в переменном электрическом поле.

Такое поле возникает, например, при зарядке конденсатора ③. Ток, протекающий по подводящим проводам, создает вокруг себя переменное магнитное поле. Однако магнитное поле возникает и внутри конденсатора. Дело в том, что сила тока определяется изменением заряда: $i = q'$, величина которого связана с напряженностью E электрического поля в конденсаторе $E \sim q$. Поэтому сила **тока смещения** $I_{\text{см}}$ внутри конденсатора связана с изменением во времени напряженности электрического поля в этой области: $I_{\text{см}} \sim E'$.

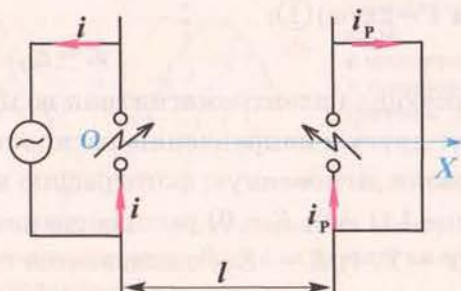
Результаты опыта Герца можно объяснить с помощью теории Максвелла ④. Если в начальный момент времени ток $i(t)$ возрастает по величине и протекает вверх через разрядный промежуток, то также будет направлена и напряженность $\vec{E}(t)$, вызывающая этот ток. Ток $i(t)$ создает в области точки 1 магнитное поле с индукцией $\vec{B}$, направленной по правилу буравчика перпендикулярно плоскости чертежа (от нас). Возрастанию магнитного потока вблизи точки 1 препятствует индукционный ток смещения $i_1(t)$, протекающий по контуру в плоскости чертежа против часовой стрелки. Собственная индукция $\vec{B}_1$, создаваемая этим током, будет направлена против $\vec{B}$. Подобно $i_1(t)$ будет направлена напряженность $\vec{E}_1(t)$ вихревого электрического поля, создающего этот ток. Далее распространение электромагнитной волны в направлении резонатора продолжается аналогично.

ОПЫТ ГЕРЦА

① ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

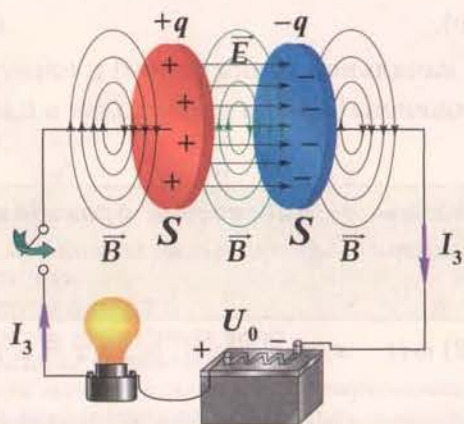


② ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА

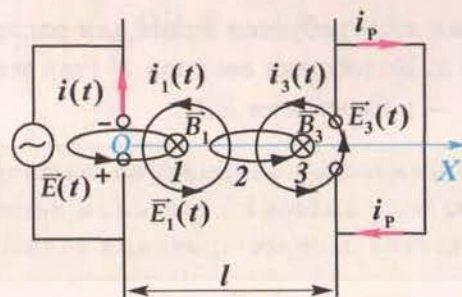


ТЕОРИЯ МАКСВЕЛЛА

③ ТОК СМЕЩЕНИЯ



④ ПРИНЦИП РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ



ИЗЛУЧАТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

РАДИОЛОКАТОР



СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР



УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ЛАМПА



§33. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Рассмотрим важнейшие характеристики электромагнитной волны на значительном расстоянии от вибратора Герца. Будем считать, что напряженность электрического поля и индукция магнитного поля изменяются в вибраторе по гармоническому закону с круговой частотой ω (периодом $T = 2\pi/\omega$) ①:

$$E = E_0 \sin \omega t; \quad B = B_0 \sin \omega t. \quad (1)$$

Возникающая электромагнитная волна является поперечной: векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ перпендикулярны друг другу и направлению распространения волны (ось X).

Изобразим мгновенную фотографию волны (зависимость $E(x)$) через время τ ②. Начальное возмущение 1 ($t = 0$; $E = 0$) распространяется со скоростью v на расстояние $v\tau$ по оси X . Возмущение 2 ($t = T/4$; $E = E_0$) оказывается ближе к вибратору на расстояние $vT/4$. Расстояние в пространстве между точками 1 и 5, колеблющимися в одинаковой фазе, оказывается равным vT и характеризует длину электромагнитной волны.

Длина волны — расстояние, на которое распространяется волна за период колебаний ее источника: $\lambda = vT$.

Уравнение бегущей гармонической волны напряженности электрического поля, распространяющейся в положительном направлении оси X , имеет вид:

$$E = E_0 \sin \omega (t - x/v). \quad (2)$$

Время x/v требуется волне для распространения из начальной точки ($x = 0$) в точку с координатой x . Колебания вектора $\vec{E}$ (так же как и $\vec{B}$) упорядочены ③: они происходят в плоскости XY (а $\vec{B}$ — в плоскости XZ).

Плоскость поляризации электромагнитной волны — плоскость, проходящая через направление колебаний вектора напряженности электрического поля и направление распространения волны.

(плоскость XY). В любой момент времени фаза волны (2) $\omega (t - x/v) = \text{const}$, если $x = \text{const}$, т.е. в плоскости YZ , называемой фронтом волны.

Фронт электромагнитной волны — поверхность постоянной фазы напряженности электрического поля и индукции магнитного поля.

Волна — плоская, если ее фронт волны — плоскость ④.

Перенос мощности $P_{\text{эм}}$ электромагнитного излучения сквозь единицу площади S поверхности, расположенной перпендикулярно направлению распространения волны, характеризует величина, усредненная по времени, — **интенсивность волны** ⑤:

$$I = \overline{P_{\text{эм}}} / S = \overline{w_{\text{эм}}} \cdot c \sim \overline{E^2}. \quad (3)$$

В отсутствие поглощения средняя мощность $P_{\text{и}}$ электромагнитного излучения источника проходит в пространстве сквозь сферическую поверхность радиусом r ($S = 4\pi r^2$) ⑥:

$$P_{\text{и}} = I 4\pi r^2. \quad (4)$$

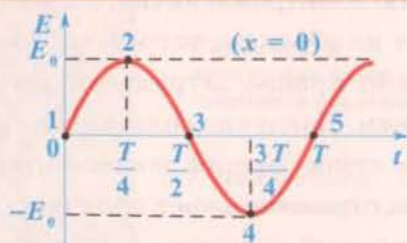
Из формулы (4) следует, что интенсивность I излучения источника на расстоянии r от него

$$I = P_{\text{и}} / 4\pi r^2. \quad (5)$$

Интенсивность излучения точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до источника.

БЕГУЩАЯ ГАРМОНИЧЕСКАЯ ВОЛНА

① Напряженность электрического поля в вибраторе Герца

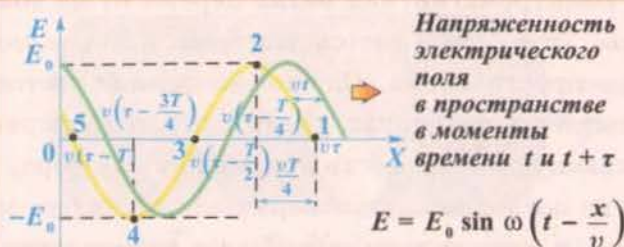


$$E = E_0 \sin \omega t$$

$$\text{Индукция магнитного поля}$$

$$B = B_0 \sin \omega t$$

② ДЛИНА ВОЛНЫ

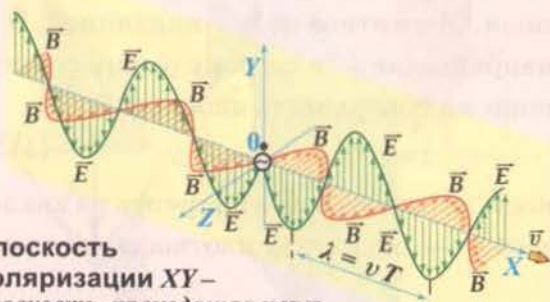


Длина волны – расстояние, на которое распространяется волна за период колебаний ее источника

$$\lambda = vT, \text{ где } T - \text{период колебаний вибратора, } v - \text{скорость распространения волны}$$

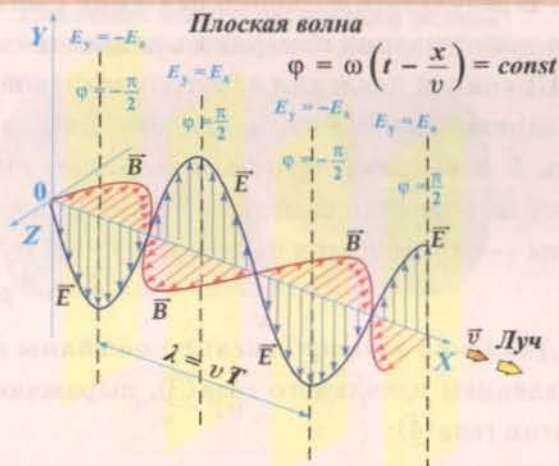
③ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ВОЛНЫ

Напряженность электрического поля и индукция магнитного поля излучающего гармонического вибратора в пространстве вблизи оси X



Плоскость поляризации XY – плоскость, проходящая через направление колебаний (ось OX) вектора напряженности $\vec{E}$ электрического поля и направление распространения волны (ось OX)

④ ФРОНТ ВОЛНЫ

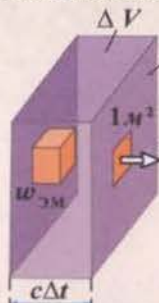


Фронт электромагнитной волны – поверхность постоянной фазы напряженности электрического поля и индукции магнитного поля

ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Связь интенсивности гармонической волны с напряженностью электрического поля

⑤ Интенсивность электромагнитной волны – среднее значение плотности потока энергии волны



Энергия электромагнитной волны внутри параллелепипеда

$$\Delta W = w_{\text{эм}} \cdot \Delta V = w_{\text{эм}} \cdot c \Delta t S$$

Мощность

$$P_{\text{эм}} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = w_{\text{эм}} \cdot c \cdot S$$

Плотность потока

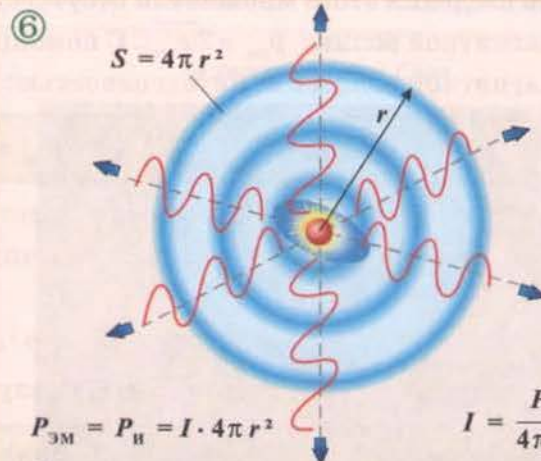
$$\frac{P_{\text{эм}}}{S} = w_{\text{эм}} \cdot c$$

Интенсивность электромагнитной волны

$$I = \frac{P_{\text{эм}}}{S} = \bar{w}_{\text{эм}} \cdot c = c \epsilon_0 \bar{E}^2$$

$$I = 0,5 c \epsilon_0 E_0^2$$

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ РАССТОЯНИЯ ДО ИСТОЧНИКА



$$P_{\text{эм}} = P_{\text{н}} = I \cdot 4\pi r^2$$

$$I = \frac{P_{\text{н}}}{4\pi r^2}$$

Интенсивность точечного источника обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника

§34. ИМПУЛЬС, ДАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Электромагнитная волна переносит не только энергию электромагнитного поля, но и импульс. Этим объясняется давление, которое она оказывает на объекты, встречающиеся на пути ее распространения. Однако измерение светового давления крайне затруднительно из-за его малости по сравнению, например, с атмосферным давлением. Давление солнечного света на отражающую поверхность примерно на 10 порядков меньше атмосферного давления, а его давление на поглощающую поверхность еще вдвое меньше. При отражении свет получает от поверхности (и соответственно сообщает поверхности) дополнительный импульс, за счет которого изменяет направление распространения на противоположное. Различие давления света на отражающую и поглощающую поверхности учитывал российский физик **Петр Николаевич Лебедев** при измерении давления света. В *опыте Лебедева* внутри откачанного стеклянного сосуда на тонкой стеклянной нити подвешивался стержень с крылышками, освещаемыми светом ①. Одна сторона крылышек была зачернена и поглощала свет, другая зеркальная — отражала свет. В результате большего давления света на зеркальную сторону нить закручивалась. По углу ее закручивания измерялось давление света.

Причиной давления электромагнитной волны является совместное действие на электрически заряженные частицы вещества электрического и магнитного полей волны ②. Напряженность $\vec{E}$ электрического поля вызывает ток I вдоль поля. Магнитное поле с индукцией $\vec{B}$ действует на возникающий ток с силой Ампера $\vec{F}_A$. Ее направление — в сторону распространения волны — определяется по правилу левой руки, а давление на поверхность площади S :

$$p_{\text{эм}} = F_A / S. \quad (1)$$

Давление электромагнитной волны на поверхность образца можно получить из аналогии с давлением идеального газа ③, выражающегося через w — объемную плотность внутренней энергии газа ④:

$$p_{\text{иг}} = 2w / 3. \quad (2)$$

Формула (1) получена в предположении, что частицы могут равновероятно двигаться по трем координатным осям, поэтому в направлении одной из осей движется лишь 1/3 частиц (отсюда появился множитель 1/3). Волна распространяется в одном направлении, и поэтому необходимость введения этого множителя отсутствует при получении выражения для давления $p_{\text{эм}}$ электромагнитной волны: $p_{\text{эм}} = 2\overline{w_{\text{эм}}}$. С помощью формулы (3) §33 можно найти связь давления электромагнитной волны с ее интенсивностью:

$$p_{\text{эм}} = 2I / c. \quad (3)$$

При абсолютно упругом отражении электромагнитной волны изменение ее импульса за промежуток времени Δt : $\Delta p = 2p$, где p — импульс падающей волны. Согласно второму закону Ньютона,

$$F_A = \Delta p / \Delta t = 2p / \Delta t. \quad (4)$$

Тогда из формулы (4) с учетом (3) и (1) получаем

взаимосвязь импульса электромагнитной волны с переносимой ею энергией W :

$$p = IS\Delta t / c = W / c.$$

①

ОПЫТ ЛЕБЕДЕВА



Давление света

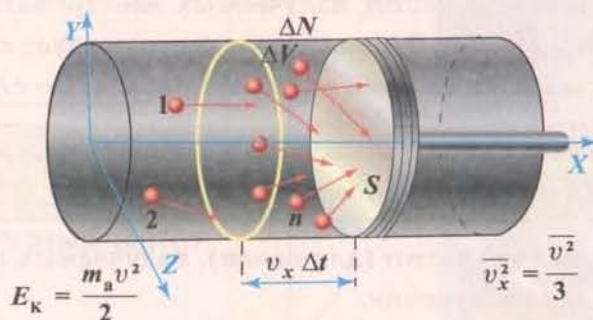
Радиометр – прибор для измерения светового давления

1. Откачанный стеклянный баллон
2. Нить подвеса
3. Зеркальное крылышко
4. Зачерненное крылышко
5. Подставка

②

АНАЛОГИЯ ДАВЛЕНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Давление идеального газа

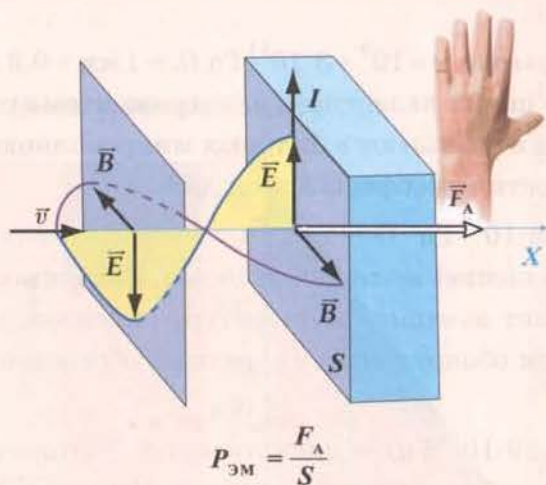


$$p = n m_a \overline{v_x^2} = \frac{1}{3} n m_a \overline{v^2}, \quad p = \frac{2}{3} n \overline{E_k} = \frac{2}{3} w,$$

где $w = n \overline{E_k}$ – объемная плотность энергии идеального газа

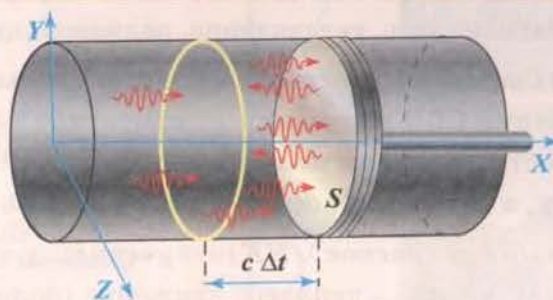
③

Действие силы Ампера на вещество



④

Давление электромагнитной волны



$$P_{эм} = 2 w_{эм} = \frac{2I}{c}$$

$$|\Delta \vec{p}| = 2p$$

РАДИАЦИОННОЕ ДАВЛЕНИЕ СОЛНЦА

на панели солнечных батарей космического аппарата



на хвост кометы Сван



§35. СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Диапазон частот излучаемых электромагнитных волн, фиксируемых в настоящее время: $\nu = 0 \div 3 \cdot 10^{22}$ Гц. Этот диапазон соответствует **спектру** (от лат. spectrum — видение, образ) **электромагнитных волн** с длиной волны λ ($\lambda = c/\nu$) от 10^{-14} м до бесконечности.

По длине волны (или частоте) спектр электромагнитных волн условно делят на восемь диапазонов.

Отличие частот (длин волн), излучаемых в различных диапазонах, связано с различием источников излучения.

• **Электромагнитные волны звуковых частот:** $\nu = 0 \div 2 \cdot 10^4$ Гц ($\lambda = 1,5 \cdot 10^4$ м $\div \infty$). Источник волн звуковых частот — переменный ток соответствующей частоты. Излучение таких волн в пространство невелико из-за малости их частот.

• **Радиоволны:** $\nu = 2 \cdot 10^4 \div 10^9$ Гц ($\lambda = 0,3 \div 1,5 \cdot 10^4$ м). Источник радиоволн — переменный ток высокой частоты, вызывающий заметное излучение радиоволн в пространство. Это позволяет использовать их для передачи информации на значительное расстояние (радиовещание, мобильная связь, телевидение, радиолокация).

• **Сверхвысокочастотное, или микроволновое, излучение** $\nu = 10^9 \div 3 \cdot 10^{11}$ Гц ($\lambda = 1$ мм $\div 0,3$ м). Источник СВЧ-излучения — изменение направления спина валентного электрона атома или скорости вращения молекул вещества. СВЧ-излучение используют в бытовых микроволновых печах, а также для космической связи из-за прозрачности атмосферы в этом диапазоне.

• **Инфракрасное (ИК) излучение:** $\nu = 3 \cdot 10^{11} \div 3,85 \cdot 10^{14}$ Гц ($\lambda = 780$ нм $\div 1$ мм). Источник ИК-излучения — тепловое движение (колебание и вращение) молекул вещества. Зависимость интенсивности ИК-излучения от температуры позволяет измерять температуру объектов, что используется в биноклях ночного видения, а также при обнаружении инородных образований в медицине.

• **Видимый свет:** $\lambda = 380 \div 780$ нм ($\nu = 3,85 \cdot 10^{14} \div 7,89 \cdot 10^{14}$ Гц) — единственный, достаточно узкий диапазон электромагнитных волн, воспринимаемый человеческим глазом. Источник видимого света — электроны в атомах и молекулах, изменяющие свое положение в пространстве, а также свободные электроны, движущиеся ускоренно. Максимум чувствительности человеческого глаза приходится на длину волны $\lambda = 560$ нм, соответствующую максимальной интенсивности Солнца и максимальной прозрачности атмосферы Земли.

• **Ультрафиолетовое (УФ) излучение** $\nu = 7,89 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{16}$ Гц ($\lambda = 10 \div 380$ нм). Источник УФ излучения — валентные электроны атомов и молекул, а также заряды, движущиеся ускоренно. УФ излучение обладает бактерицидным действием.

• **Рентгеновское излучение:** $\nu = 3 \cdot 10^{16} \div 3 \cdot 10^{20}$ Гц ($\lambda = 10^{-12} \div 10^{-8}$ м). Источник излучения — изменение состояния электронов внутренних оболочек атомов (молекул) или ускоренно движущиеся электроны. Излучение обладает высокой проникающей способностью, широко используемой в рентгеновской диагностике.

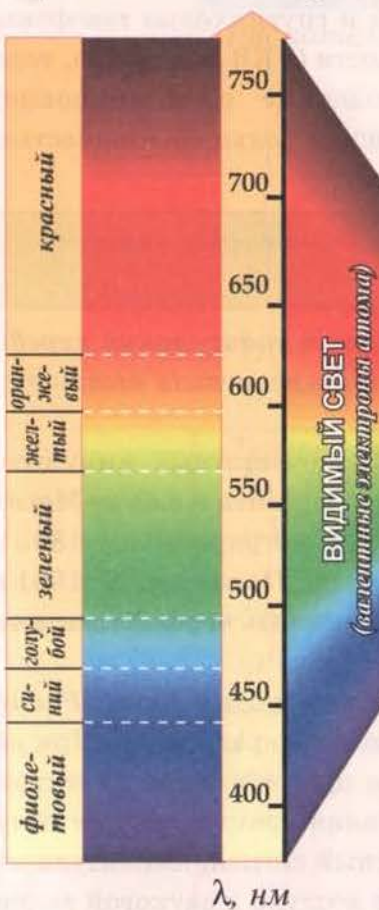
• **γ -излучение:** $\nu > 3 \cdot 10^{20}$ Гц ($\lambda < 10^{-12}$ м). Источник излучения — изменение энергетического состояния атомного ядра или ускорение заряженных частиц. Проникающая способность γ -излучения больше, чем рентгеновского.

Спектр электромагнитных волн

Солнечный ветер (шторм)



Цвета видимого спектра



ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

§36. ВИДЫ РАДИОСВЯЗИ

Передача информации на расстояние с помощью электромагнитных сигналов часто осуществляется по проводам (радиотрансляционная, телеграфная, телефонная связь). Это оказывается энергетически выгодным. Кроме того такой способ связи обеспечивает высокое качество передачи информации. Однако значительные затраты на прокладку линий связи (особенно под водой или в условиях сложного рельефа местности) заставляют отдавать предпочтение беспроводной связи. Такая связь оказывается единственно возможной при информационном обмене между космическими и военными объектами, самолетами, кораблями, альпинистами, спасателями и т.д.

Для передачи и приема информации с помощью электромагнитных волн, распространяющихся в пространстве, используют радиоволны.

Радиосвязь — передача и прием информации с помощью радиоволн, распространяющихся в пространстве без проводов.

Гармонический сигнал радиочастоты, излучаемый в окружающее пространство, не содержит полезной информации (кроме факта существования радиоизлучателя) ①. Поэтому передаваемая информация кодируется в радиосигнале. Для радиосвязи требуется **радиопередатчик**, излучающий радиоволны, переносящие необходимую кодированную информацию, и **радиоприемник**, улавливающий и декодирующий (расшифровывающий) сигнал, излучаемый передатчиком. В случае, если мощность передатчика невелика (сотовые и спутниковые телефоны) или если его излучение распространяется в пределах прямой видимости (УКВ-излучение, телевидение), дополнительно используют **ретрансляторы** (стационарные и спутниковые). Ретрансляторы принимают сигнал передатчика и переизлучают его с большей мощностью, обеспечивая передачу сигнала на большие расстояния.

Различают четыре вида радиосвязи: радиотелеграфная, радиотелефонная и радиовещание, телевидение, радиолокация ②.

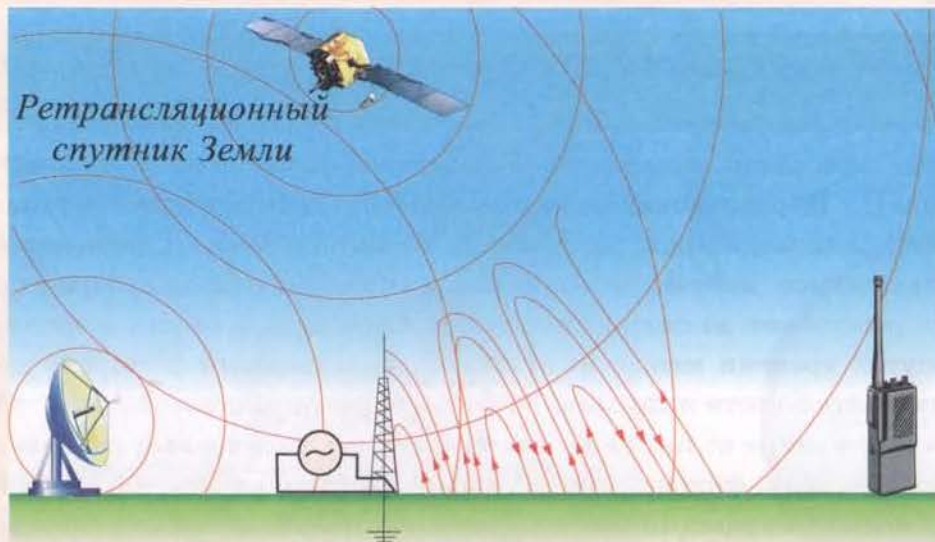
Виды связи отличаются величиной средней частоты, а также **типом кодирования передаваемого сигнала, или модуляцией**. Средняя частота передаваемого радиосигнала называется **несущей частотой**.

Радиотелеграфная связь осуществляется путем передачи высокочастотных импульсов разной длительности — сочетания точек и тире, кодирующего буквы алфавита в азбуке Морзе. Впервые радиотелеграфная связь на расстоянии 250 м была продемонстрирована в 1895 г. в Санкт-Петербурге российским ученым **Александром Степановичем Поповым**. В 1901 г. итальянский инженер **Гульельмо Маркони** впервые осуществил радиосвязь через Атлантический океан.

В настоящее время значительная доля информации передается в радиодиапазоне. **Радиовещание** — передача в эфир речи, музыки, звуковых эффектов с помощью радиоволн. При радиотелефонной связи колебания давления воздуха в звуковой волне превращаются в электрические колебания той же формы. Подобные низкочастотные колебания практически не излучаются. Для их передачи в эфир передатчик излучает высокочастотный сигнал, амплитуда которого изменяется со временем синхронно с колебаниями давления воздуха в звуковой волне. При **телевещании** формируется не только звуковой сигнал, но и сигнал изображения в метровом и дециметровом диапазоне длин волн.

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РАДИОСВЯЗИ

①



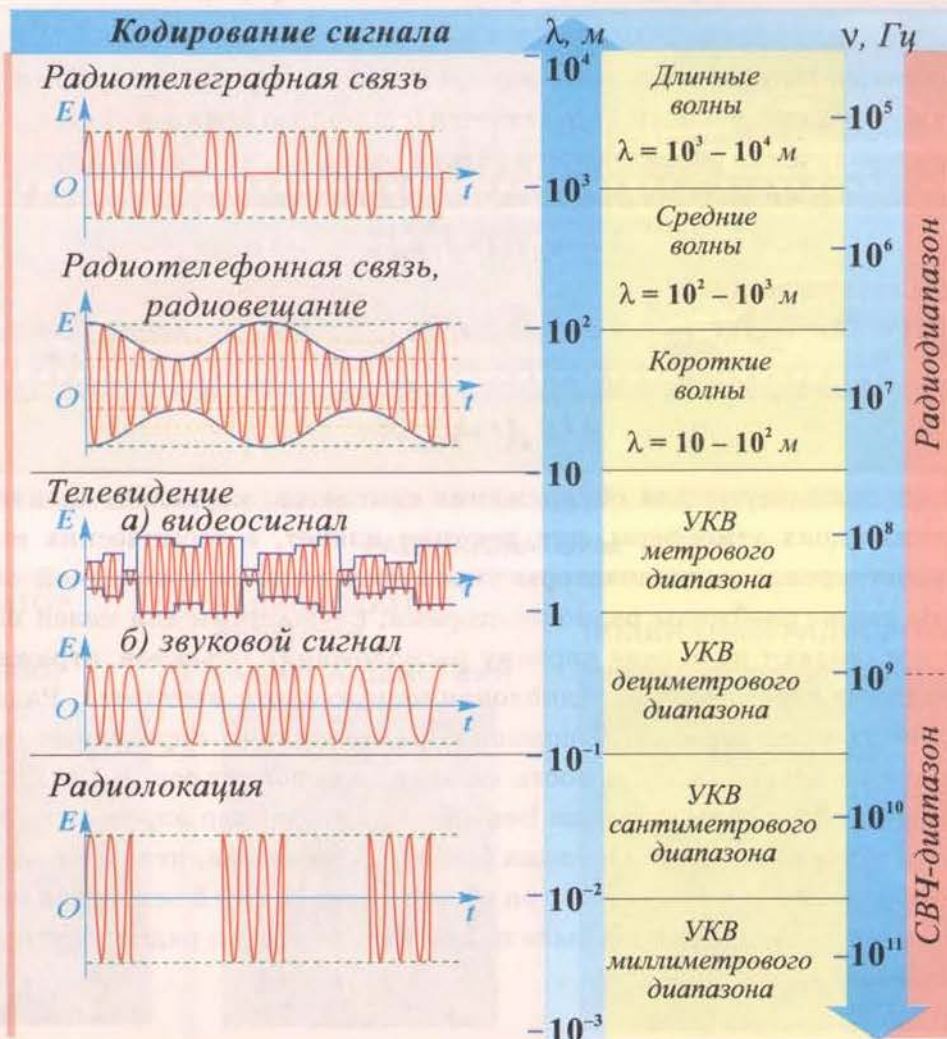
Радиопередатчик

Ретранслятор

Радиоприемник

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РАДИОСВЯЗИ

②



§37. РАДИОЛОКАЦИЯ

Радиолокация — обнаружение объектов и определение их координат с помощью радиоволн.

Радиолокатор, или радар, состоит из передатчика импульсов электромагнитного поля и их приемника ①. В радиолокации используются СВЧ-колебания в диапазоне частот $\nu = 10^8 - 10^{11}$ Гц. В радиолокаторах, работающих в сантиметровом и дециметровом диапазоне длин волн, направленное излучение создается и принимается параболической антенной. Для определения расстояния до цели используется импульсный режим излучения радиолокатора ②. Промежуток времени между импульсами, излучаемыми в сторону цели, примерно в 1000 раз больше длительности импульса. Во время пауз направленной антенной радиолокатора принимаются отраженные от цели импульсы. Импульс, излученный радиолокатором, и импульс, отраженный от цели, фиксируются на экране электронно-лучевой трубки. Промежуток времени τ между этими импульсами равен времени распространения импульса электромагнитного поля от радиолокатора к объекту и обратно, т.е. времени прохождения импульсом, распространяющимся со скоростью света c , двойного расстояния l от радиолокатора до объекта:

$$\tau = 2l / c.$$

Тогда расстояние объекта от радиолокатора находится по формуле:

$$l = c \tau / 2. \quad (1)$$

Радиолокационные методы позволяют измерять скорость движения объектов ③. Например, скорость движения автомобилей определяется с помощью эффекта Доплера. Если частота электромагнитного излучения милицейского радара равна ν_0 , то при отражении от автомобиля, движущегося со скоростью v , она изменяется и воспринимается радаром как

$$\nu = \nu_0 / (1 - v / v_{\text{зв}}), \quad (2)$$

где $v_{\text{зв}}$ — скорость звука в воздухе.

Известные значения частот ν_0 и ν позволяют из формулы (2) скорость движения автомобиля:

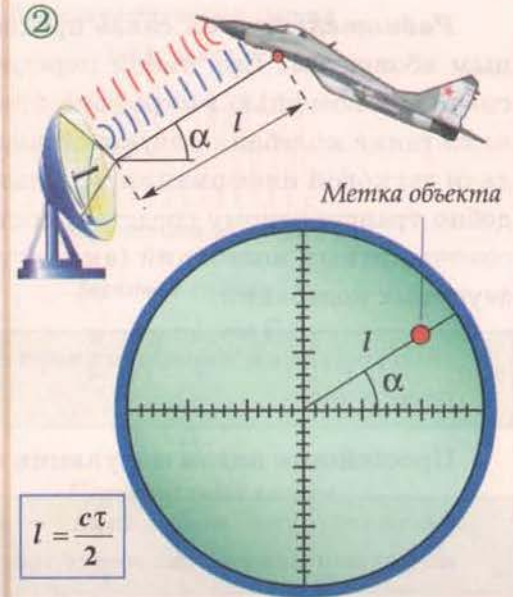
$$v = v_{\text{зв}} (1 - \nu_0 / \nu). \quad (3)$$

Радиолокаторы используют для обнаружения самолетов, кораблей, скопления облаков, метеоров в верхних слоях атмосферы, для локации планет, в космических исследованиях. В аэропортах диспетчерские радиолокаторы управляют взлетом и посадкой самолетов. Корабли и самолеты также снабжены радиолокаторами, служащими для целей навигации. Такие радиолокаторы создают на экране картину расположения объектов, отражающих радиоволны. Оператор имеет перед глазами радиолокационную карту местности. Радиолокаторами снабжены все космические корабли. С помощью радиолокации определяют скорости орбитального движения планет, а также скорости их вращения вокруг оси. В 1961 г. российскими учеными была произведена радиолокация Венеры, что позволило определить период вращения планеты вокруг своей оси. Радиолокация Меркурия показала, что он не обращен к Солнцу все время одной стороной, а совершает три оборота вокруг своей оси за два меркурианских года. Детальная карта рельефа Венеры была получена с помощью радиолокатора межпланетной станции «Магеллан».

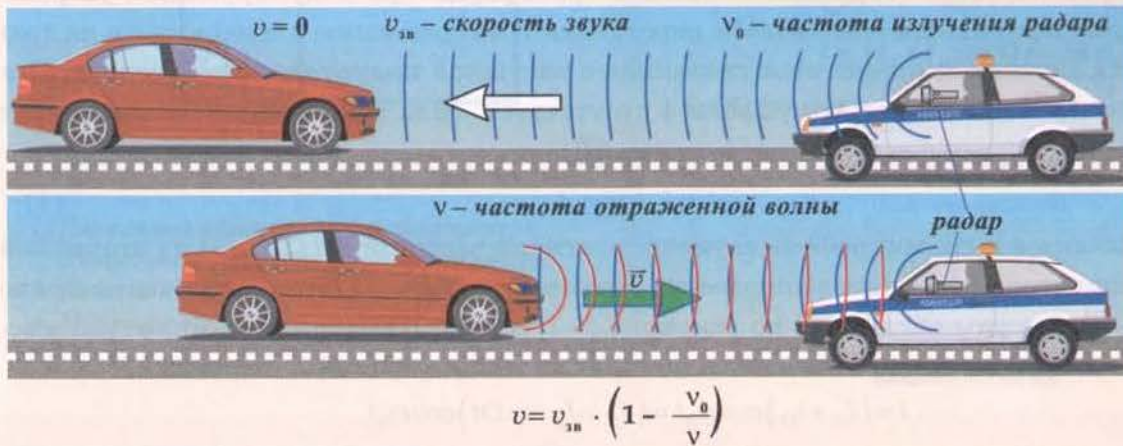
① ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА РАДИОЛОКАЦИИ



② ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА



③ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА



$$v = \frac{v_0}{1 - \frac{v}{v_{\text{зв}}}}$$

РАДИОЛОКАТОРЫ

РАДИОЛОКАТОР ДАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ



РАДИОЛОКАТОР СРЕДНЕГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ



ПОДВИЖНЫЙ РАДИОЛОКАТОР



§38. РАДИОПЕРЕДАЧА

Радиотелефонная связь предполагает передачу информации только для приема конкретным абонентом. При такой передаче сигнала колебания давления воздуха в звуковой волне сначала с помощью микрофона превращаются в электрические колебания той же формы. Однако такие колебания звуковой частоты излучаться практически не будут. Поэтому для передачи звуковой информации используется излучение высокочастотных колебаний, которые, подобно транспортному средству, доставляют ее потребителю. Для этого один из параметров высокочастотных колебаний (амплитуда, фаза) изменяется (модулируется) по закону изменения звуковых колебаний.

Модуляция передаваемого сигнала — кодированное изменение одного из его параметров.

Простейшим видом модуляции высокочастотного сигнала является

амплитудная модуляция — изменение амплитуды высокочастотных колебаний по закону изменения передаваемого звукового сигнала.

Для амплитудной модуляции звуковой сигнал подается на первичную обмотку 1 трансформатора T ①. В цепь эмиттера генератора на транзисторе последовательно с LC — колебательным контуром включается вторичная обмотка 2 трансформатора модулирующего устройства. Кроме того, дополнительным элементом в передатчике (по сравнению с генератором на транзисторе) является антенна 3, индуктивно связанная с катушкой индуктивности L колебательного контура. Если звуковой сигнал микрофона 4 отсутствует, сила тока в колебательном контуре изменяется гармонически с несущей частотой ω_0 ②:

$$i = I_0 \cos \omega_0 t. \quad (1)$$

При появлении в цепи микрофона звукового сигнала частотой Ω ($\Omega \ll \omega_0$) на вторичной обмотке трансформатора возникает напряжение звуковой частоты Ω . Это напряжение приводит к изменению амплитуды силы тока по закону: $i_\Omega = I_1 \cos \Omega t$. В результате амплитуда высокочастотных колебаний начинает изменяться по гармоническому закону с частотой Ω :

$$i = (I_0 + i_\Omega) \cos \omega_0 t = (I_0 + I_1 \cos \Omega t) \cos \omega_0 t.$$

Такой сигнал можно рассматривать как гармонические колебания с медленно изменяющейся амплитудой, так как $\Omega \ll \omega_0$. Раскрывая скобки в этом выражении и учитывая, что $\cos \Omega t \cos \omega_0 t = 1/2 [\cos(\omega_0 - \Omega)t + \cos(\omega_0 + \Omega)t]$, получаем:

$$i = I_0 \cos \omega_0 t + \frac{I_1}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t + \frac{I_1}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t. \quad (2)$$

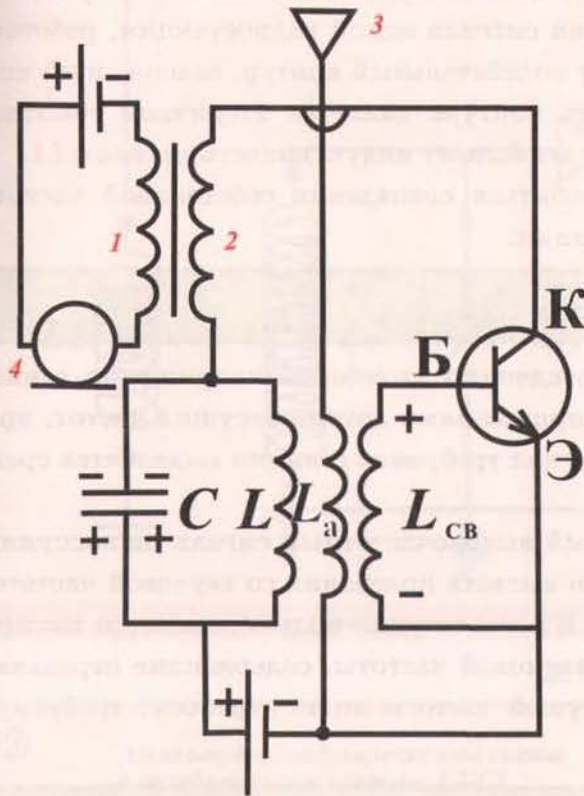
Последнее выражение показывает, что амплитудно-модулированный сигнал можно рассматривать как сумму трех гармонических колебаний с частотой ω_0 , $\omega_0 - \Omega$ и $\omega_0 + \Omega$. Структуру частот амплитудно-модулированного колебания можно представить в виде *спектрограммы сигнала*, в которой по горизонтальной оси — частота, а по вертикальной оси — амплитуда колебаний.

Частотная модуляция — изменение несущей частоты по закону изменения звукового сигнала: $\omega = \omega_0 + \Delta\omega \cdot \cos \Omega t$ ③.

Частотная модуляция используется при передаче звуковых сигналов телевидения и УКВ-радиостанций.

РАДИОПЕРЕДАТЧИК АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

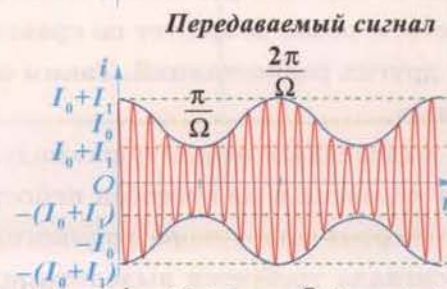
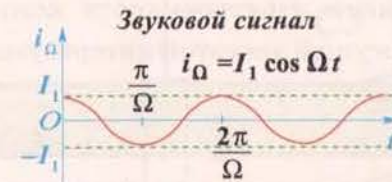
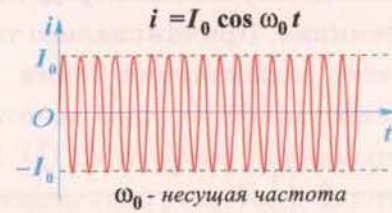
① Схема передатчика



1. Первичная обмотка трансформатора
2. Вторичная обмотка трансформатора
3. Антенна
4. Микрофон

ФОРМИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

② Высокочастотный сигнал



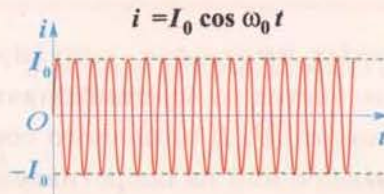
$$i = I_0 \cos \omega_0 t + \frac{I_1}{2} \cos (\omega_0 - \Omega) t + \frac{I_1}{2} \cos (\omega_0 + \Omega) t$$

Спектрограмма

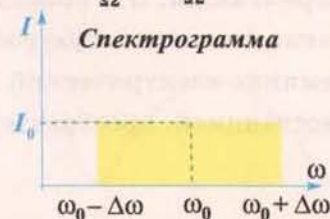
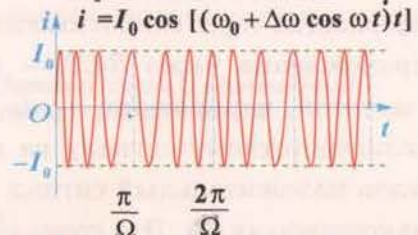


ЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ (ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕДАВАЕМОГО СИГНАЛА)

③ Высокочастотный сигнал



Передаваемый сигнал



§39. РАДИОПРИЕМ

Радиоволны, излучаемые передатчиком, вызывают вынужденные колебания электронов в антенне приемника. Принципиально такие высокочастотные колебания возникают в приемной антенне от всех радиостанций Земли. Для выделения сигнала одной радиостанции, работающей на фиксированной несущей частоте ω_0 , служит колебательный контур, содержащий конденсатор переменной емкости $C1$ ①. Индуктивность контура является вторичной обмоткой трансформатора, у которого роль первичной обмотки выполняет индуктивность антенны $L1$.

Изменением электроемкости контура можно добиться совпадения собственной частоты контура с несущей частотой интересующей радиостанции:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{L_2 C_1}.$$

При этом вследствие резонанса амплитуда вынужденных колебаний напряжения данной несущей частоты резко возрастет по сравнению с напряжениями других несущих частот, проходящих от других радиостанций. Таким образом, сигнал требуемой станции выделяется среди всех остальных.

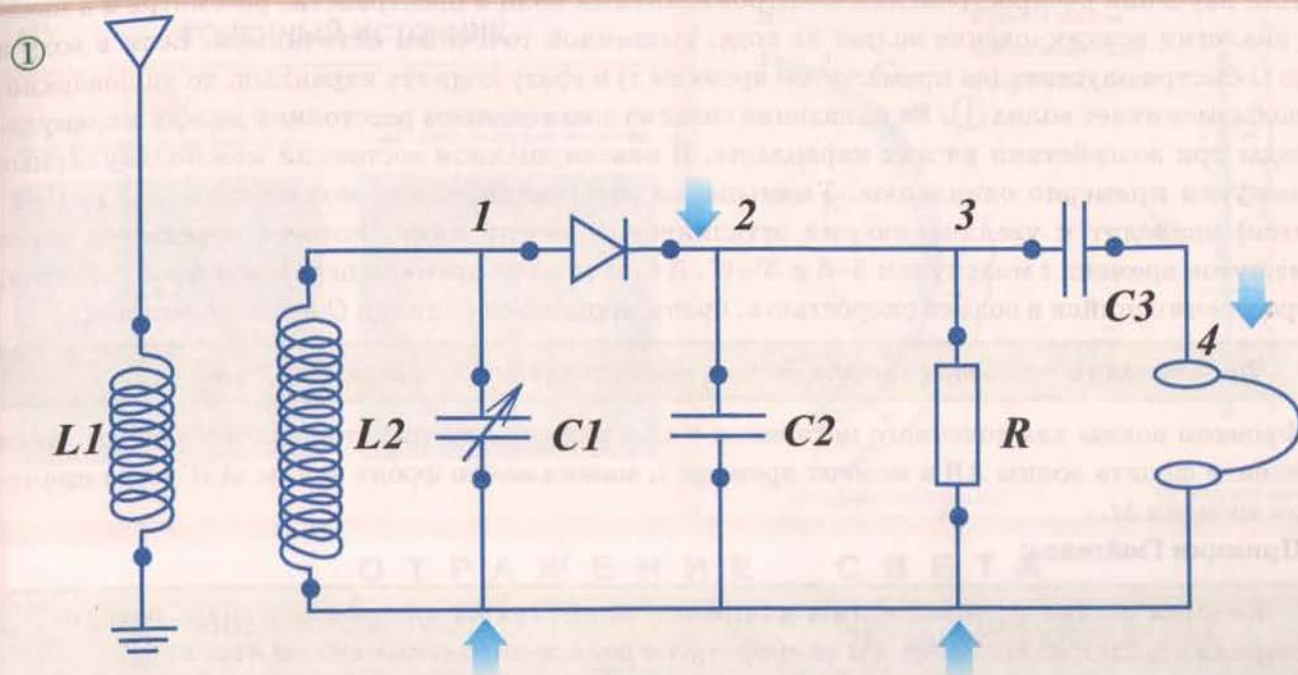
Однако выделенный амплитудно-модулированный высокочастотный сигнал не воспринимается ухом человека и не способен непосредственно вызвать колебания со звуковой частотой мембраны телефона или рупора громкоговорителя. Из амплитудно-модулированного высокочастотного сигнала требуется выделить колебания звуковой частоты, содержащие передаваемую информацию. Высокочастотные колебания несущей частоты лишь переносят требуемую информацию, но не содержат ее.

Детектирование (или демодуляция) — процесс выделения низкочастотных (звуковых) колебаний из модулированных колебаний высокой частоты.

В простейшем приемнике демодуляция осуществляется в два этапа: сначала колебания выпрямляются, а затем выделяется низкочастотная огибающая высокочастотных импульсов. Выпрямление амплитудно-модулированного сигнала u_1 несущей частоты, выделенного колебательным контуром во входной цепи, осуществляется полупроводниковым диодом ②. Высокочастотные импульсы напряжения u_2 подаются на параллельно соединенные конденсатор $C2$ и резистор R ③. В период действия отдельного импульса, когда диод открыт, конденсатор заряжается. При закрытом диоде импульсный сигнал не подается на конденсатор, который в этот период разряжается через сопротивление R .

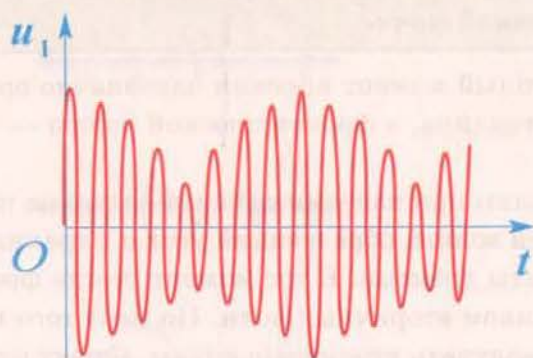
При прохождении через R - $C2$ — фильтр высокочастотных импульсов, модулированных звуковой частотой, напряжение u_3 на сопротивлении R изменяется со временем практически подобно низкочастотному сигналу на передающей радиостанции ④. Для полного совпадения этих сигналов положительный сигнал звуковой частоты, выделяемой на сопротивлении, надо сделать знакопеременным. Это совпадение сигналов осуществляется с помощью конденсатора $C3$, не пропускающего постоянную составляющую положительного тока ⑤. В результате демодуляции в приемнике электрический сигнал u_4 звуковой частоты, идентичный сигналу, передаваемому радиостанцией, преобразуется мембраной телефона в звуковые колебания.

СХЕМА РАДИОПЕРЕДАТЧИКА

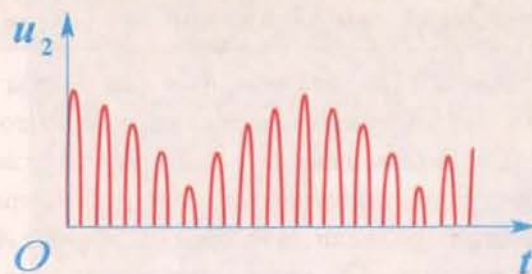


ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

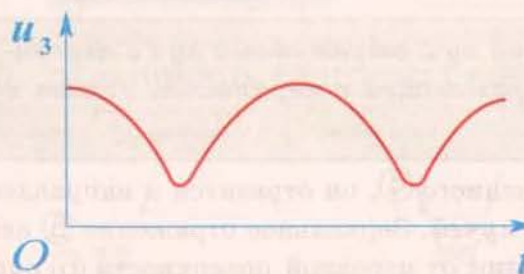
② Амплитудно-модулированный сигнал в колебательном контуре $L2-C1$



③ Выпрямление амплитудно-модулированного сигнала



④ Выделение низкочастотного сигнала в $RC2$ -цепочке



⑤ Звуковой сигнал, идентичный сигналу радиостанции

