2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Содержание теоретического материала

Свободные электромагнитные колебания. Колебательный контур. Превращение энергии при электромагнитных колебаниях. Период собственных колебаний колебательного контура (формула Томсона). Вынужденные электрические колебания. Резонанс в электрической цепи.

Переменный электрический ток. Генератор переменного тока. Эффективные значения напряжения и тока. Трансформатор.

Электромагнитное поле. Электромагнитные волны, скорость их распространения.

Контрольные вопросы

2.1. Какие колебания называются электромагнитными?

2.2. Что собой представляет электрический колебательный контур (идеальный и реальный)?

2.3. При каких условиях возникают в колебательном контуре электромагнитные колебания?

2.4. Какие электромагнитные колебания называются свободными?

2.5. Назовите и дайте определение основным характеристикам электромагнитных колебаний: периоду, частоте, амплитуде.

2.6. Каков механизм возникновения электромагнитных колебаний в контуре? Какие превращения энергии в нем происходят?

2.7. Как получается дифференциальное уравнение для описания процессов в колебательном контуре? Напишите решение этого уравнения.

2.8. Проведите аналогию между периодическими процессами в колебательном контуре и механическими колебаниями.

2.9. Какими формулами определяются период и частота свободных колебаний в контуре?

2.10. Являются ли свободные колебания в реальном колебательном контуре гармоническими?

2.11. Каким образом можно в реальном контуре создать незатухающие электромагнитные колебания?

2.12. Какой ток называется переменным?

2.13. Каков принцип получения переменного тока?

2.14. Каковы особенности цепи переменного тока, содержащей электрическое сопротивление — резистор?

2.15. Каковы особенности цепи переменного тока, содержащей конденсатор?

2.16. Каковы особенности цепи переменного тока, содержащей катушку индуктивности?

2.17. В одном ящике находится резистор, в другом конденсатор, в третьем — катушка индуктивности. Выводы подключены к внешним зажимам. Как, не открывая ящиков, узнать, что находится в каждом из них? Имеются источники постоянного и переменного тока одинакового напряжения и лампочка, рассчитанная на это напряжение.

2.18. Как изменится накал лампы (рис. VII.37), если: а) увеличить емкость конденсатора? б) параллельно конденсатору включить еще один конденсатор? в) второй конденсатор подключить последовательно? г) увеличить частоту переменного тока? Величину напряжения считать постоянной.

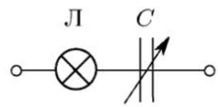


Рис. VII.37

2.19. Лампа накаливания включена последовательно с катушкой индуктивности (рис. VII.38). Как изменится накал лампы, если: а) внутрь катушки вдвигать ферромагнитный сердечник? б) уменьшить частоту переменного тока? Величину напряжения считать постоянной.

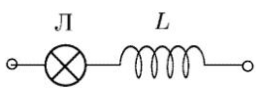


Рис. VII.38

2.20. Какой формулой определяется сопротивление переменному току цепи, содержащей последовательное соединение резистора, конденсатора и катушки индуктивности? Запишите закон Ома для такой цепи.

2.21. Какие электромагнитные колебания называют вынужденными?

2.22. При каком условии происходит резонанс в электрической цепи?

2.23. Объясните, как происходит явление резонанса в цепи с последовательным соединением резистора, конденсатора и катушки индуктивности?

2.24. Как определить мощность, выделяющуюся в цепи переменного тока?

2.25. Как определяются действующие (или эффективные) значения силы переменного тока или напряжения?

2.26. В чем назначение и каков принцип действия трансформатора?

2.27. Почему трансформатор при подключении к источнику постоянного тока может сгореть?

2.28. В чем заключаются основные положения теории Максвелла?

2.29. Что собой представляет электромагнитная волна и как она возникает?

Ответы

2.1. Периодические изменения силы тока и напряжения, связанные с колебательным движением свободных электронов в цепи, являются электрическими колебаниями. Так как колебательное движение зарядов вызывается периодическим изменением напряженности электрического поля в проводниках, а меняющийся электрический ток порождает переменное магнитное поле вокруг проводника, то совокупность этих явлений называется чаще электромагнитными колебаниями.

2.2. Реальный колебательный контур — это электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных катушки индуктивности, конденсатора и омического сопротивления. Последнее чаще всего равно сумме сопротивлений соединительных проводов и витков катушки

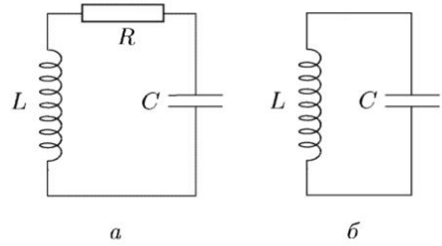


Рис. VII.39

(рис. VII.39 *а*). Если же сопротивление очень мало, то контур называют идеальным (рис. VII.39 *б*).

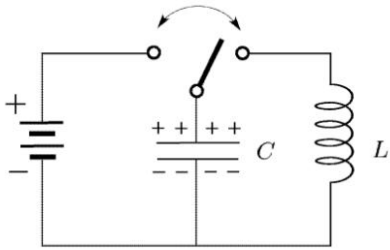


Рис. VII.40

2.3. Так же, как и при возбуждении механических колебаний, систему надо вывести из состояния равновесия, сообщив в колебательный контур энергию. Это можно сделать, зарядив конденсатор от внешнего источника напряжения (рис. VII.40). При этом между обкладками возникает электрическое поле, которое обладает энергией. Можно также в катушке возбудить ЭДС индукции, поместив ее в меняющееся магнитное поле.

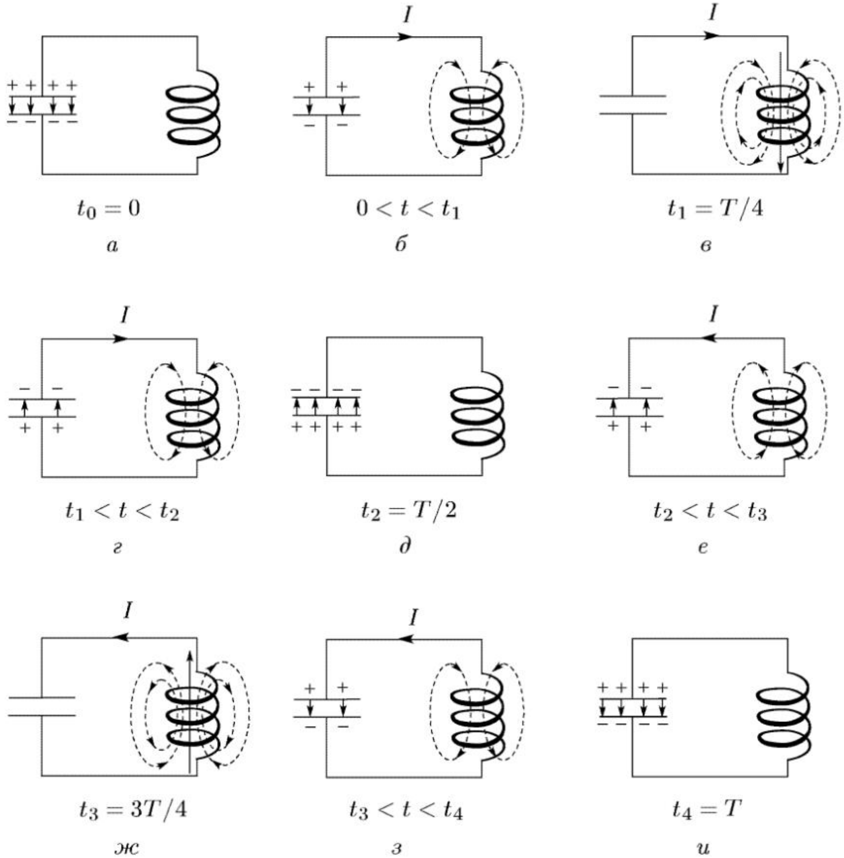
2.4. Электромагнитные колебания, происходящие в колебательном контуре за счет расходования однократно сообщенной этому контуру энергии, которая в дальнейшем не пополняется, называют свободными электромагнитными колебаниями.

2.5. Период, частота и амплитуда для электромагнитных колебаний определяется точно так же, как и для механических колебаний.

Период (T) — время одного полного колебания. Изменяться по величине могут напряжение, сила тока, заряд на обкладках конденсатора, а также напряженность электрического поля внутри конденсатора, индукция магнитного поля катушки и вызванная изменением магнитного поля электродвижущая сила индукции; причем периоды у всех названных величин в колебательном контуре одинаковы; частота (ν) — число колебаний за 1 с; амплитуда — величина наибольшего отклонения той или иной величины от среднего значения (чаще всего среднее значение названных выше величин равно нулю).

2.6. При зарядке конденсатора между его обкладками возникает электрическое поле (рис. VII.41 *а*). Время начнем отсчитывать от момента подключения заряженного конденсатора к катушке. В начальный момент времени в контуре имеется запас энергии, равный энергии электрического поля конденсатора: $W_э = CU^2/2 = q^2/(2C)$ (рис. VII.41 *а*)[1]. На рис. VII.42 построены графики зависимости от времени напряжения и силы тока в

[1] Рассматривая процессы в контуре, одновременно будем следить, как ведут себя графики зависимости силы тока и напряжения от времени.



$t_0 = 0$ *а*; $0 < t < t_1$ *б*; $t_1 = T/4$ *в*; $t_1 < t < t_2$ *г*; $t_2 = T/2$ *д*; $t_2 < t < t_3$ *е*; $t_3 = 3T/4$ *ж*; $t_3 < t < t_4$ *з*; $t_4 = T$ *и*

Рис. VII.41

колебательном контуре. При $t = 0$ напряжение на конденсаторе максимально, а тока в контуре еще нет.

При замыкании заряженного конденсатора на катушку в контуре идет ток (рис. VII.41 *б* — по часовой стрелке). Согласно правилу Ленца в катушке возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая нарастанию тока, вызванного разрядом конденсатора. Поэтому сила тока увеличивается не мгновенно, а постепенно. В промежуток времени от 0 до t_1 происходит полный разряд конденсатора. При этом изменение заряда на нем $\Delta q = q_2 - q_1 < < 0$, поскольку $q_2 < q_1$ (при разряде). Так как величина силы тока $I = \Delta q / \Delta t$, то на указанном промежутке времени сила тока отрицательна ($I < 0$) (рис. VII.42).

При разряде конденсатора уменьшается напряженность электрического поля $\vec{E}$ (сохраняя прежнее направление) и напряжение U между его обкладками. Следовательно, уменьшается и энергия электрического поля в конденсаторе. При увеличении силы тока в катушке появляется магнитное поле (рис. VII.41 *б*), индукция которого $\vec{B}$ меняется пропорционально силе тока. Энергия магнитного поля внутри катушки определяется формулой $W_{\text{м}} = LI^2/2$. Поэтому при увеличении значений силы тока в промежутке времени от 0 до t_1 возрастает от нуля энергия магнитного поля. Следовательно, происходит превращение электрической энергии в магнитную, то есть энергия переходит из конденсатора в катушку индуктивности.

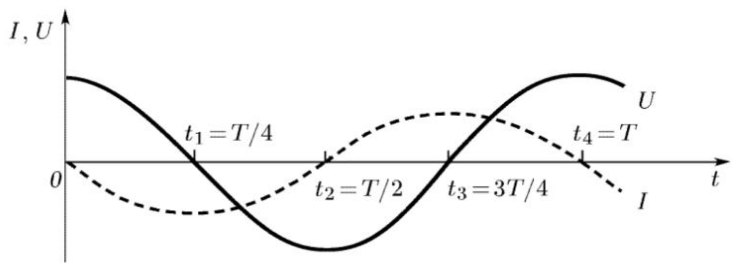


Рис. VII.42

К моменту времени t_1 конденсатор полностью разряжается ($U = 0$), и электрическое поле в нем отсутствует ($E = 0$) (рис. VII.41 *в*). К этому времени сила тока в контуре и индукция магнитного поля $\vec{B}$ в катушке достигают максимальных значений. Следовательно, $W_{\text{эл}} = 0$ и $W_{\text{м}} = W_{\max}$, т.е. вся энергия контура в этот момент связана с магнитным полем катушки. На графике, изображенном на рис. VII.42, этому моменту также соответствует время t_1.

При отсутствии напряжения на конденсаторе ток в цепи должен был бы исчезнуть. Однако при уменьшении тока в катушке возникает ЭДС самоиндукции, препятствующая исчезновению тока. Поэтому в контуре идет ток прежнего направления, уменьшаясь по величине (рис. VII.41 *г*). Это приводит к перезарядке конденсатора: на его пластинах возникают заряды, противоположные исходным (сравните рис. VII.41 *а* и рис. VII.41 *д*). Вектор напряженности электрического поля в момент времени t_2 направлен противоположно тому, который был вначале (при $t = 0$). Таким образом, в промежуток времени от t_1 до t_2 сила тока убывает до нуля, а напряжение противоположного знака возрастает до максимального значения (рис. VII.42). В соответствии с этим энергия магнитного поля катушки убывает и полностью превращается в энергию электрического поля внутри конденсатора к моменту времени t_2.

Дальше конденсатор вновь начинает разряжаться (рис. VII.41 *е*), через контур идет ток, направленный уже против часовой стрелки. Меняется также направление вектора индукции магнитного поля, создаваемого током. Ток не может сразу достигнуть максимального значения, так как возникшая в катушке ЭДС самоиндукции препятствует быстрому нарастанию тока (промежуток времени t_2–t_3 на рис. VII.42). В этот промежуток времени напряжение уменьшается, сила тока возрастает. Следовательно, энергия электрического поля опять переходит в энергию магнитного поля. К моменту времени t_3 конденсатор полностью разрядился ($U = 0$), а сила тока достигает максимального значения. То есть вся энергия электрического поля контура превратилась в энергию магнитного поля.

Далее, в интервале времени от t_3 до t_4 возникшая в контуре ЭДС самоиндукции поддерживает убывающий ток, который перезаряжает конденсатор. Причем полярность пластин теперь будет такая же, как в момент времени t_0.

К моменту времени t_4 ток в контуре прекращается. При этом магнитное поле исчезает, а напряжение на обкладках конденсатора и, соответственно, напряженность электрического поля внутри него максимальны. Следовательно, к моменту времени t_4 вся энергия колебательного контура сосредоточена в конденсаторе, произошло опять превращение энергии магнитного поля в энергию электрического поля. Из сравнения рис. VII.41 *а* и рис. VII.41 *б* видно, что колебательный контур пришел в исходное состояние.

В моменты времени, соответствующие рис. VII.41 *б*, *г*, *е*, *з*, энергия в контуре есть и электрическая — между пластинами конденсатора, и магнитная — в катушке. Но сумма их остается неизменной, если контур можно считать идеальным, т.е.

$$W = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2} = \mathrm{const}.$$

Таким образом, в колебательном контуре происходит периодическая перекачка энергии из электрического поля конденсатора в магнитное поле катушки и наоборот.

На рис. VII.42 изображены графики зависимости от времени силы тока и напряжения в колебательном контуре. В соответствии с определением периода видно, что нами был рассмотрен промежуток времени (от 0 до t_4), равный периоду — T. Поэтому можно обозначить $t_4 = T$, и соответственно долями периода считать отрезки времени: $t_1 = T/4$, $t_2 = T/2$, $t_3 = 3T/4$.

2.7. Для описания процессов в идеальном колебательном контуре надо применить второй закон Кирхгофа:

$$\sum_{i=1}^{n} U_i = \sum_{i=1}^{k} \mathscr{E}_i,$$

n — число участков цепи, на которых создается падение напряжения, k — число источников ЭДС в замкнутом контуре.

Падение напряжения в любой момент времени равно напряжению на конденсаторе:

$$U = \frac{q}{C}.$$

Единственная ЭДС в контуре при свободных колебаниях — это ЭДС самоиндукции

$$\mathscr{E} = -L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}.$$

Поэтому в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать, что в любой момент времени разность потенциалов на обкладках конденсатора равна ЭДС самоиндукции:

$$\frac{q}{C} = -L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} \qquad (a),$$

q — заряд на каждой из пластин конденсатора в некоторый момент времени, I — сила тока в цепи в тот же момент. Сила тока при разряде конденсатора определяется формулой

$$I = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}.$$

С учетом этого уравнение (а) можно преобразовать следующим образом:

$$\frac{q}{C} + L\frac{\mathrm{d}^2 q}{\mathrm{d}t^2} = 0;$$

$$\frac{\mathrm{d}^2 q}{\mathrm{d}t^2} + \frac{1}{LC}q = 0. \qquad (б)$$

Это уравнение представляет собой дифференциальное уравнение для заряда на конденсаторе колебательного контура; коэффициент $(1/(LC))$ определяется свойствами колебательного контура — емкостью его конденсатора и коэффициентом самоиндукции катушки.

Полученное уравнение имеет тот же вид, что и в случае механических гармонических колебаний (формула (1.3)):

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} + \omega^2 x = 0,$$

где $\omega^2 = k/m$ — величина, зависящая от свойств колебательной системы.

Из сравнения ясно, что коэффициенту ω^2 соответствует $(1/(LC))$:

$$\omega^2 = \frac{1}{LC}, \qquad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Поэтому уравнение (*б*) можно записать следующим образом:

$$\frac{\mathrm{d}^2q}{\mathrm{d}t^2} + \omega^2 q = 0 \qquad (\text{или } q'' + \omega^2 q = 0).$$

Это уравнение по форме абсолютно идентично уравнению для механических колебаний, кроме названий переменных: в первом случае это x — смещение точки от положения равновесия, а во втором случае — заряд q на обкладках конденсатора. Очевидно, что решение для заряда также будет подобным тому, что записано для механических колебаний: $q = q_{\text{м}} \sin(\omega t + \varphi_0)$ или $q = q_{\text{м}} \cos(\omega t + \varphi_0)$, $q_{\text{м}}$ — максимальный заряд на обкладках, ω — также как и в случае механических колебаний называется круговой частотой свободных колебаний (или собственной частотой); аргумент тригонометрической функции $(\omega t + \varphi_0)$ определяет значение заряда в данный момент времени и называется фазой колебания; φ_0 — начальная фаза колебаний (то есть значение фазы при $t = 0$).

Дифференциальное уравнение для собственных колебаний в контуре может быть получено также из закона сохранения энергии в идеальном колебательном контуре.

2.8. В ответе на вопрос 1.9 были сформулированы четыре условия, при которых возникают и существуют механические колебания. В таблице 1 эти условия записаны для двух колебательных систем в сравнении.

Таблица 1

Условие	Механический маятник	Колебательный контур
1. Наличие начального запаса энергии	а) Отклонить груз от равновесного положения — сообщить потенциальную энергию; б) толкнуть груз, придав начальную скорость — сообщить кинетическую энергию.	а) Зарядить конденсатор — создать в нем электрическое поле, которое обладает энергией; б) ток в катушке создает переменное магнитное поле, которое также обладает энергией.
2. Наличие возвращающей силы	Упругая и квазиупругая сила, которая пропорциональна смещению x.	Действие на заряды силы со стороны электрического поля, создаваемого заряженным конденсатором $\vec{F} = q\vec{E}$.
3. Инерционные явления	Инертность тела массой m, связанного с маятником, препятствующая изменению скорости тела.	Явление самоиндукции, которое препятствует изменению тока.
4. Отсутствие потерь энергии	Трение и сопротивление среды пренебрежимо малы.	Электрическое сопротивление подводящих проводов и витков катушки пренебрежимо мало.

В таблице 2 сопоставляются характеристики колебаний колебательных систем — механических маятников и колебательного контура.

2.9. Круговая частота связана с периодом и частотой собственных электромагнитных колебаний контура теми же формулами, что и для механических колебаний:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad \nu = \frac{1}{T}; \quad \nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Последняя формула называется формулой Томсона.

2.10. Нет. В реальном колебательном контуре провода катушки обладают сопротивлением, поэтому сообщенная в контур энергия расходуется на нагревание проводов, а также на излучение. Поэтому амплитуда силы тока (и, соответственно, напряжения) постепенно уменьшается. Следовательно, свободные

Таблица 2

Механические колебания	Электромагнитные колебания
Меняется координата тела x, связанная с маятником [1]. Скорость изменения координаты $\mathrm{d}x/\mathrm{d}t$ — это скорость v движения тела, связанного с маятником.	Меняется заряд q на обкладках конденсатора. Скорость изменения заряда $\mathrm{d}q/\mathrm{d}t$ — это величина силы тока в цепи.
Инертность тела определяет его масса m (препятствует изменению скорости тела).	Ток самоиндукции, возникающий в катушке, препятствует изменению тока в контуре и зависит от коэффициента самоиндукции L.
Коэффициент упругой (или квазиупругой) силы: для пружинного маятника это жесткость пружины k, для математического — величина (mg/l).	Сравним формулы для круговой частоты ω для пружинного маятника и колебательного контура: $\omega^2 = k/m$; $\omega^2 = 1/(LC)$. Так как коэффициент самоиндукции соответствует массе m, то аналогом коэффициента жесткости будет отношение $(1/C)$.
Потенциальная энергия пружинного маятника $W_{\text{п}} = kx^2/2$, математического — $W_{\text{п}} = mgh$. Кинетическая энергия тела, связанного с маятником, $W_{\text{к}} = mv^2/2$.	Энергия электрического поля конденсатора $W_{\text{эл}} = q^2/(2C) = CU^2/2$. Энергия магнитного поля катушки $W_{\text{м}} = LI^2/2$.

колебания в реальном контуре являются затухающими (рис. VII.43).

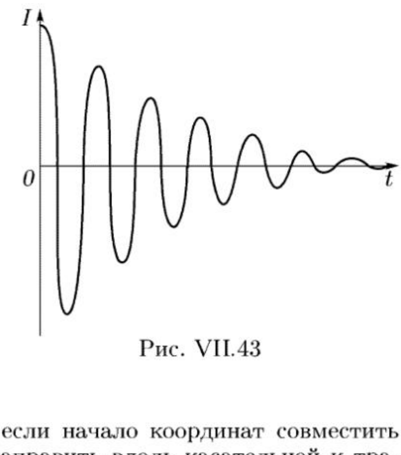


Рис. VII.43

2.11. Так же, как и при механических колебаниях, в колебательный контур необходимо периодически и в нужной фазе вводить энергию. Энергия в контур поступает в виде энергии электрического поля при сообщении дополнительного заряда на

[1] Как отмечалось выше, в случае, если начало координат совместить с точкой равновесия, а ось координат направить вдоль касательной к траектории маятника в этой точке, то при небольших амплитудах колебания смещение маятника численно равно значению координаты.

обкладки конденсатора либо за счет увеличения магнитного поля катушки внешним магнитным полем (обычно посредством явления взаимной индукции).

Эти процессы осуществляются в электронных схемах, которые называются генераторами электромагнитных колебаний. В подобных схемах происходит дозированная подача энергии в колебательный контур, и, кроме того, подача ее в той фазе, при которой энергия контура будет увеличиваться, а не уменьшаться. Пополнение энергии происходит за счет источника постоянного тока, который имеется в схеме. Особенностью подобных схем является то, что поступление энергии в колебательный контур регулируется работой самого контура посредством специального устройства, обеспечивающего так называемую обратную связь. Колебательные системы, которые сами регулируют поступление энергии от источника энергии, называются автоколебательными.

2.12. Электрический ток называется переменным, если периодически меняется сила тока и его направление в цепи. Переменный ток возникает при колебательных движениях свободных электронов в проводниках под действием периодически изменяющегося электрического поля.

2.13. Принцип промышленного получения переменного тока можно понять на следующем примере.

Возьмем проволочную рамку и расположим ее в сильном однородном магнитном поле, индукция которого $\vec{B}$ (рис. VII.44). Концы рамки приварены к двум кольцам *1*; которые вращаются вместе с рамкой. К кольцам плотно прижаты два контакта (*2*) — щетки. Благодаря кольцам и щеткам рамка, несмотря на вращение, имеет постоянный электрический контакт с внешней цепью, состоящей из гальванометра Г и потребителя электрической энергии R.

Если рамку равномерно вращать в магнитном поле (вокруг оси OO'), то магнитное поле внутри рамки все время меняется в соответствии с формулой $\Phi = BS\cos\alpha$, S — площадь рамки, α — угол между нормалью $\vec{n}$ к плоскости рамки и вектором $\vec{B}$. Если рамка вращается равномерно с угловой скоростью ω, то $\alpha = \omega t$. Если начальный момент времени выбран так, что при $t = 0$, $\alpha = 0$ (соответствует рис. VII.44), то $\Phi = BS\cos\omega t$.

Вследствие изменения магнитного потока через плоскость рамки, в ней образуется ЭДС индукции, создающая в цепи индукционный ток. ЭДС, в соответствии с основным законом электромагнитной индукции, равна

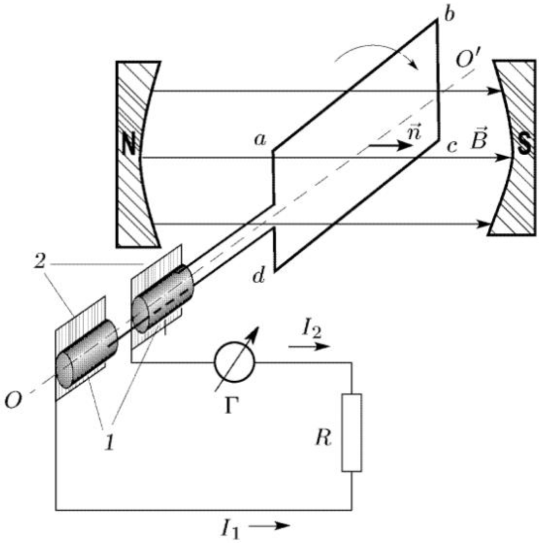


Рис. VII.44

$$\mathscr{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\Phi'.$$

или $\mathscr{E} = -BS\omega(-\sin\omega t) = BS\omega\sin\omega t$.

Из полученной формулы видно, что величина ЭДС меняется по гармоническому закону. Максимальному (или амплитудному) значению ЭДС ($\mathscr{E}_{\mathrm{m}}$) соответствует множитель перед тригонометрической функцией:

$$\mathscr{E}_{\mathrm{m}} = BS\omega;$$

$$[\mathscr{E}_{\mathrm{m}}] = \text{Вб}\cdot\text{м}^2(1/\text{с}) = \frac{\text{Н}}{\text{А}\cdot\text{м}}\cdot\frac{\text{м}^2}{\text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}.$$

Поэтому можно записать формулу для возникающей в рамке ЭДС индукции в виде

$$\mathscr{E} = \mathscr{E}_{\mathrm{m}}\sin\omega t.$$

В соответствии с полученной формулой с течением времени меняется не только величина ЭДС, но и ее знак, что соответствует изменению направления индукционного тока. Действительно, при вращении рамки по часовой стрелке (рис. VII.44), вначале ее сторона ab движется вниз, а сторона cd — вверх, пересекая линии магнитной индукции. Свободные электроны проводника движутся вместе с рамкой в магнитном поле, поэтому на них действует сила Лоренца, вызывая движение электронов в определенном направлении. Применяя правило левой руки, можно определить направление тока: ток идет от точки a к b, в стороне cd — от c к d: через гальванометр и нагрузку пойдет ток I_1[1]. Стороны bc и ad рамки движутся в плоскости, параллельной линиям индукции, и потому ЭДС индукции в них не возникает. Через половину периода, рамка повернется на 180°: сторона ab будет двигаться вверх, bc — вниз; при этом в рамке и во внешней цепи пойдет ток противоположного направления — I_2.

Колебательное движение электронов в проводнике, происходящее при вращении рамки в постоянном магнитном поле, представляет собой переменный электрический ток. Изменение направления движения электронов является следствием того, что возникающая в проводнике ЭДС индукции меняет величину и направление.

Таким образом, при вращении рамки в магнитном поле происходит превращение механической энергии в энергию переменного тока.

Машины, превращающие механическую энергию в энергию переменного электрического тока с использованием явления электромагнитной индукции, называют генераторами переменного тока. Приведенный выше пример поясняет устройство и принцип работы одного из типов генераторов переменного тока — с неподвижной магнитной системой (индуктором) и вращающейся обмоткой (якорем), в которой индуцируется ЭДС. Якорь такого генератора состоит из большого числа витков, что необходимо для получения большой величины ЭДС. Однако такой тип генератора маломощен, так как с помощью подвижных контактов (колец и щеток) практически невозможно отводить от генератора ток под высоким напряжением из-за сильного искрения в них. Поэтому в мощных генераторах переменного тока обмотку (якорь), в которой возбуждается ЭДС индукции, устанавливают неподвижно, а вращаться заставляют магнитную систему — индуктор.

2.14. При прохождении тока (постоянного или переменного) по проводнику, обладающему электрическим сопротивлением, он нагревается. Это объясняется тем, что электроны, ускоряясь электрическим полем внутри проводника, передают часть своей

[1] Необходимо вспомнить, что ток направлен противоположно направлению движения электронов.

энергии ионам кристаллической решетки. Внутренняя энергия проводника возрастает — он нагревается, а при большей температуре может излучать свет. При этом тепловая и световая энергии с поверхности проводника рассеиваются в окружающем пространстве. Проводники, в которых происходит полное и необратимое превращение электрической энергии в другие виды энергии, называются активными.

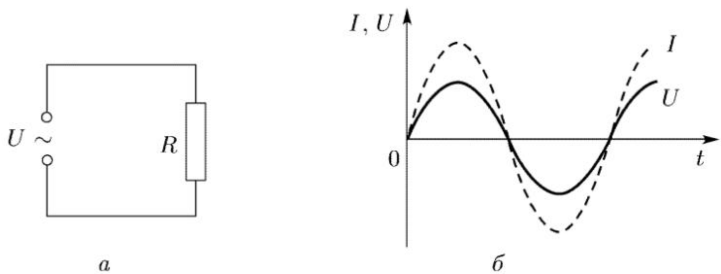


Рис. VII.45

Пусть на активное сопротивление подано переменное напряжение (рис. VII.45 *а*), меняющееся по закону

$$U = U_m \sin \omega t. \qquad (a)$$

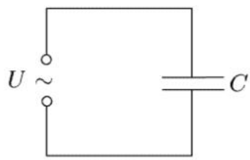
Используя закон Ома, можно получить формулу для мгновенных значений силы тока:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_\text{m}\sin(\omega t)}{R}; \qquad I_\text{m} = \frac{U_\text{m}}{R};$$

$$I = I_\text{m} \sin \omega t, \qquad (б)$$

I_m — максимальное (амплитудное) значение силы переменного тока. Сравнив формулы (*а*) и (*б*), можно сказать, что напряжение и сила переменного тока в цепи с активным сопротивлением изменяются в одной фазе (рис. VII.45 *б*).

2.15. Конденсатор — это система из двух проводников (их называют обкладками), разделенных диэлектриком. Постоянный ток в цепи с конденсатором не идет, так как диэлектрик между обкладками разрывает электрическую цепь, и поэтому сопротивление конденсатора постоянному току бесконечно большое. Если же конденсатор включить в цепь с источником переменного тока, то электроны совершают колебательное движение от одной обкладки к другой по внешней цепи. Это компенсирует наличие разрыва в цепи (рис. VII.46 *а*).



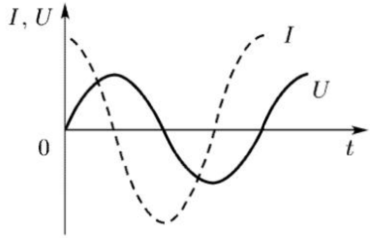


Рис. VII.46

Задавая гармонический закон изменения напряжения $U = U_m \sin \omega t$, получаем закон изменения силы тока. Мгновенные значения заряда и силы тока определяются формулами

$$I = q', \qquad q = CU = CU_{\rm m} \sin \omega t.$$

Взяв производную, получим: $I = CU_{\rm m}\omega \cos \omega t$. Множитель перед тригонометрической функцией соответствует амплитудному значению силы тока:

$$I_{\rm m} = CU_{\rm m}\omega;$$

$$[I_{\rm m}] = \text{Ф} \cdot \text{В} \cdot (1/\text{с}) = \frac{\text{Кл}}{\text{В}}\text{В} \cdot (1/\text{с}) = \frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А}.$$

Следовательно, если $U = U_{\rm m} \sin \omega t$, то $I = I_{\rm m} \cos \omega t = I_{\rm m} \sin(\omega t + \pi/2)$. Получили, что сила переменного тока в цепи с конденсатором опережает напряжение на нем по фазе на $\pi/2$ (рис. VII.46 *б*). Перепишем формулу для I_m в виде, соответствующем закону Ома:

$$I_{\rm m} = \frac{U_{\rm m}}{1/\omega C} = \frac{U_{\rm m}}{X_C}.$$

Отсюда видно, что роль сопротивления играет величина $X_C = 1/(\omega C)$, которую называют емкостным сопротивлением конденсатора переменному току:

$$[X_C] = \frac{1}{\text{Ф}/\text{с}} = \frac{\text{с} \cdot \text{В}}{\text{Кл}} = \frac{\text{с} \cdot \text{В}}{\text{А} \cdot \text{с}} = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}.$$

Емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте переменного тока и емкости конденсатора. Это можно объяснить из физических соображений. Чем больше емкость конденсатора C, тем больший заряд накапливается в нем при каждой зарядке и больший ток проходит в цепи при его перезарядке ($I = \mathrm{d}q/\mathrm{d}t$, $\mathrm{d}q$ при большей емкости будет больше).

Чем больше частота приложенного напряжения, тем быстрее заряд перетекает от обкладки к обкладке (меньше время $\mathrm{d}t$ протекания заряда). Поэтому сила тока увеличивается. Увеличение силы тока при постоянном напряжении может происходить только при уменьшении сопротивления цепи.

Конденсатор при зарядке потребляет энергию электрического тока, которая превращается в энергию электрического поля; при разрядке конденсатора наоборот: энергия электрического поля превращается в энергию тока. Такие элементы цепи называются реактивными, в целом за период они не потребляют энергию: происходит периодическая перекачка энергии от источника тока в конденсатор и от конденсатора к источнику.

2.16. Если катушку включить в цепь постоянного тока, то ее сопротивление будет определяться только электрическим сопротивлением проводника $R = \rho l/S$, (активное сопротивление). В цепи переменного тока в катушке возникает ЭДС самоиндукции, которая препятствует любому изменению тока и поэтому создает дополнительное сопротивление, называемое индуктивным. Таким образом, если от внешнего источника на катушку подана электродвижущая сила $\mathscr{E}$ и кроме нее действует ЭДС индукции $\mathscr{E}_{\text{и}}$, то можно записать II закон Кирхгофа:

$$\mathscr{E} + \mathscr{E}_{\text{и}} = IR,$$

R — величина электрического сопротивления соединительных проводов и проводов катушки. Рассмотрим идеальный случай, когда $R \approx 0$ и сопротивление источника тока тоже мало. В таком случае можно считать, что $\mathscr{E} = U$, U — напряжение на зажимах источника тока или напряжение на катушке. Поэтому можно записать, что

$$U + \mathscr{E}_{\text{и}} = 0; \qquad U = -\mathscr{E}_{\text{и}} = L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} \qquad (\text{или } LI').$$

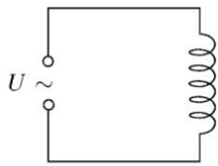
Пусть сила тока в цепи меняется по закону $I = I_{\mathrm{m}} \sin\omega t$; взяв производную, найдем закон изменения напряжения:

$$U = LI_{\mathrm{m}}\omega\cos(\omega t) = U_{\mathrm{m}}\sin(\omega t + \pi/2),$$

U_{m} — амплитудное значение напряжения на катушке:

$$U_{\mathrm{m}} = LI_{\mathrm{m}}\omega.$$

Из полученной формулы видно, что напряжение на катушке опережает силу тока на $\pi/2$ (рис. 47). Последнюю формулу можно привести к форме, соответствующей закону Ома:



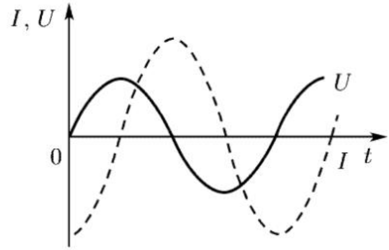


Рис. VII.47

$$I_{\mathrm{m}} = \frac{U_{\mathrm{m}}}{\omega L} = \frac{U_{\mathrm{m}}}{X_L},$$

$X_L = \omega L$ — индуктивное сопротивление катушки.

Катушка индуктивности, так же, как и конденсатор, является реактивным сопротивлением, то есть потребляемая ею энергия от источника тока за период изменения напряжения равна нулю. При подаче напряжения на катушку возникает ток самоиндукции, препятствующий, в соответствии с правилом Ленца, возрастанию тока в цепи; в катушке возникает магнитное поле, обладающее энергией. Далее, при убывании тока в цепи, энергия магнитного поля уменьшается, возникает ток самоиндукции, который поддерживает ток в цепи, препятствует его убыванию: энергия магнитного поля превращается в энергию электрического тока.

2.17. Резистор, если накал лампочки при подключении источника постоянного и переменного тока одинаков; катушка, если накал на переменном токе меньше; конденсатор, если лампочка при постоянном токе не горит.

2.18. Накал лампы меняется следующим образом: а), б) увеличится; в) уменьшится; г) увеличится.

2.19. Накал лампы меняется следующим образом: а) уменьшится; б) увеличится.

2.20. Если в колебательный контур включить источник переменной ЭДС, то в цепи пойдет переменный ток (рис. VII.48). Цепь последовательная, поэтому мгновенные значения силы тока в каждой точке цепи одинаковы. Что касается напряжений, они изменяются по-разному на всех элементах цепи: изменения напряжения на резисторе совпадают по фазе с изменениями силы тока, изменения напряжения на конденсаторе отстают на $\pi/2$ от колебаний силы тока, а на катушке индуктивности — опережают на $\pi/2$. Поэтому, если складывать величины напряжений без учета сдвига по фазе, то сумма напряжений U_R, U_C, U_L не будет равна величине приложенного напряжения U (как это выполняется в цепи с последовательным соединением резисторов).

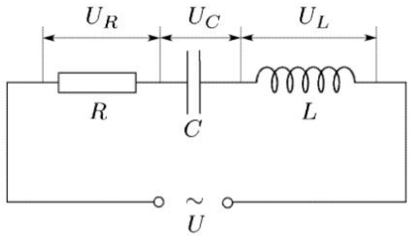


Рис. VII.48

Аналитически или с помощью векторной диаграммы можно получить формулу, определяющую полное сопротивление Z (или импеданс) цепи, изображенной на рис. VII.48:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Закон Ома для мгновенных значений силы переменного тока такой цепи запишется так:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}},$$

U — мгновенное значение напряжения.

Наличие в цепи переменного тока омического, индуктивного и емкостного сопротивлений приводит к тому, что в этой цепи возникает сдвиг фазы φ между силой тока и напряжением, величину которого можно определить по формулам

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_L - X_C}{R}, \qquad \varphi = \operatorname{arctg}\frac{X_L - X_C}{R};$$

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z}, \qquad \varphi = \arccos\frac{R}{Z}.$$

2.21. Как и в случае механических колебаний, электромагнитные колебания, возбужденные в колебательном контуре, со временем затухают. Если в колебательный контур периодически подавать энергию (например, от внешнего источника переменного тока), колебания уже будут не свободными, а вынужденными. Частота вынужденных колебаний в контуре всегда равна частоте изменения переменной ЭДС, включенной в контур.

2.22. Резонанс в электрической цепи происходит при равенстве частоты напряжения (или ЭДС) внешнего генератора собственной частоте колебательного контура, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$.

Если возвести обе части этого равенства в квадрат и произвести небольшие преобразования, то можно получить соотношения:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}; \qquad \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}; \qquad X_L = X_C.$$

Получили, что при резонансе индуктивное сопротивление контура становится равным его емкостному сопротивлению.

2.23. К цепи, состоящей из последовательно соединенных резистора, конденсатора и катушки индуктивности, подключен источник переменного напряжения (рис. VII.48). При отсутствии резонанса полное сопротивление цепи $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ и амплитуда силы тока определяется в соответствии с законом Ома:

$$I_\mathrm{m} = \frac{U_\mathrm{m}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}.$$

Так как при резонансе $X_L = X_C$, то полное сопротивление цепи Z становится равным его активному сопротивлению, то есть $Z = R$. При этом амплитуда силы тока увеличивается и становится равной

$$I_{\mathrm{m(рез)}} = \frac{U_\mathrm{m}}{R}.$$

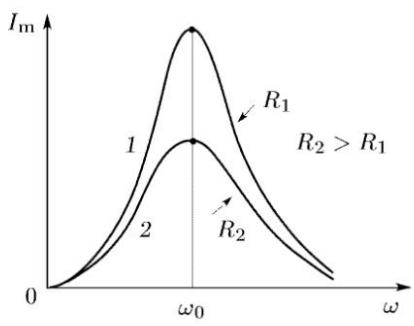


Рис. VII.49

На рис. VII.49 приведен график резонансной кривой, показывающей характер изменения амплитуды силы тока при изменении частоты питающего напряжения. Чем меньше активное сопротивление цепи R, тем острее резонанс. График *1* на рис. VII.49 соответствует меньшему сопротивлению, чем график *2* ($R_1 < R_2$).

Резонанс при последовательном соединении R, X_L и X_C называют резонансом напряжений, так как при этом значение каждого из напряжений U_L и U_C может значительно превышать приложенное напряжение U (поскольку сильно возрастает сила тока). При резонансе значения этих напряжений одинаковы и равны

$$U_{L\mathrm{m}} = I_\mathrm{m} X_L = I_\mathrm{m}\omega_0 L = I_\mathrm{m}\sqrt{\frac{L}{C}};$$

$$U_{C\mathrm{m}} = I_\mathrm{m} X_C = I_\mathrm{m}\frac{1}{\omega_0 C} = I_\mathrm{m}\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Напряжение U_R меняется в одной фазе с силой тока, а U_L и U_C имеют каждое разность фаз с током I, равную $\pi/2$, но противоположную по знаку: U_L опережает I, а U_C — отстает. Следовательно, сдвиг по фазе U_L и U_C равен π, то есть их изменения происходят в противофазе и сумма их мгновенных значений в любой момент времени равна нулю.

Учитывая равенство значений напряжений U_L и U_C при резонансе, получим следующее:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = U_R \text{ [1]}.$$

Следовательно, при резонансе источник создает падение напряжения целиком на активном сопротивлении R. Сумма напряжений U_L и U_C равна нулю (хотя их значения могут быть достаточно велики).

2.24. Пусть в некоторой цепи мгновенные значения напряжения и силы переменного тока меняются в соответствии с формулами:

$$U = U_\mathrm{m}\cos\omega t, \qquad I = I_\mathrm{m}\cos(\omega t - \varphi),$$

φ — величина сдвига по фазе между силой тока и напряжением. Мгновенные значения мощности определяются произведением

$$P = UI = U_\mathrm{m} I_\mathrm{m}\cos\omega t\cos(\omega t - \varphi).$$

Используя формулу тригонометрии[2], можно получить следующее:

$$P = \frac{U_\mathrm{m} I_\mathrm{m}\cos(2\omega t - \varphi)}{2} + \frac{U_\mathrm{m} I_\mathrm{m}\cos\varphi}{2}.$$

Первое слагаемое зависит от времени и меняет знак в соответствии с законом косинуса. Поэтому половину периода мощность положительна (в этом случае энергия от источника тока поступает в нагрузку), а вторую — отрицательна (нагрузка отдает

[1] Приведенное соотношение следует из закона Ома для цепи, переменного тока: $U = I\cdot Z = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{I^2R^2 + I^2(X_L - X_C)^2} = \sqrt{I^2R^2 + (IX_L - IX_C)^2} = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$.

[2] $\cos\alpha\cos\beta = \frac{\cos(\alpha+\beta)+\cos(\alpha-\beta)}{2}$.

запасенную энергию в цепь). В силу этого средняя за период мощность, определяемая первым слагаемым, равна нулю. Второе слагаемое от времени не зависит, поэтому среднее значение мощности переменного тока определяется формулой

$$P = \frac{1}{2} U_{\mathrm{m}} I_{\mathrm{m}} \cos\varphi. \qquad (a)$$

Из этой формулы видно, что мощность в цепи переменного тока зависит от сдвига фазы между силой тока и напряжением, то есть от $\cos\varphi$.

Рассмотрим частные случаи.

1). В цепи имеется только активное сопротивление. При этом $\varphi = 0$, и

$$P = \frac{U_{\mathrm{m}} I_{\mathrm{m}}}{2}.$$

2). Если в цепи только реактивное сопротивление, то $\varphi = \pm\pi/2$, $\cos\varphi = 0$ и $P = 0$. Средняя мощность, потребляемая цепью с реактивным сопротивлением за период, равна нулю. Это соответствует физическим процессам, рассмотренным выше в цепи с емкостью и катушкой индуктивности.

3). Для цепи, содержащей активное и реактивное сопротивления, $\varphi \neq 0$ и $\varphi \neq \pi/2$; значение φ определится по формулам, написанным в ответе 2.20. Затем можно вычислить мощность переменного тока по формуле (a).

2.25. Формулу для мощности переменного тока, выделяющейся на активном сопротивлении, можно записать несколько иначе:

$$P = \frac{U_{\mathrm{m}}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{\mathrm{m}}}{\sqrt{2}}.$$

Сравнивать величины переменного и постоянного токов удобно по производимому тепловому эффекту, так как тепловое действие тока не зависит от его направления (в отличие от химического и магнитного действия тока).

Напомним, что при прохождении постоянного тока на омическом сопротивлении выделяется тепловая энергия, равная

$$W = P \cdot t = I \cdot U \cdot t.$$

Если взять участок цепи постоянного тока, на котором при напряжении $U_{\mathrm{m}}/\sqrt{2}$ сила тока равна $I_{\mathrm{m}}/\sqrt{2}$, то на нем выделится количество теплоты такое же, как и при переменном токе, амплитуды напряжения и силы тока которого, соответственно, U_{m} и I_{m}.

За действующее (или эффективное) значение силы переменного тока принимается сила такого постоянного тока, который при прохождении через данное сопротивление за тот же промежуток времени выделяет такую же тепловую энергию, что и данный переменный ток.

Для синусоидального тока действующие значения связаны с амплитудными формулами:

$$I_{\text{д}} = \frac{I_{\text{m}}}{\sqrt{2}}, \qquad U_{\text{д}} = \frac{U_{\text{m}}}{\sqrt{2}}, \qquad \mathscr{E}_{\text{д}} = \frac{\mathscr{E}_{\text{m}}}{\sqrt{2}}.$$

Все электроизмерительные приборы для переменного тока проградуированы в действующих значениях. Поэтому везде далее, где указываются характеристики переменного тока — его сила I, напряжение U и ЭДС $\mathscr{E}$, речь идет о действующих (эффективных) значениях (если нет специальных указаний).

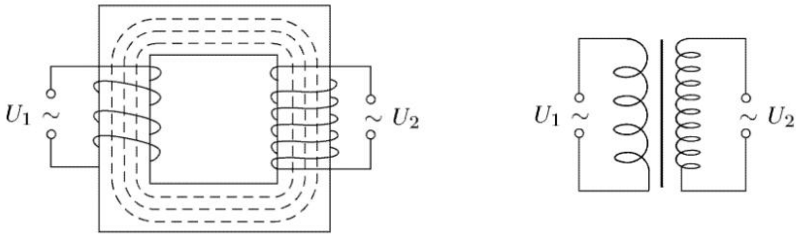
После введенного понятия действующих значений средняя мощность, выделяющаяся в цепях переменного тока, определяется формулой

$$P = I_{\text{д}} U_{\text{д}} \cos\varphi,$$

$\cos\varphi$ называется коэффициентом мощности.

2.26. При передаче электроэнергии на большое расстояние, а также в случаях, когда электроприбор рассчитан на напряжение, отличающееся от имеющегося, ток трансформируют: изменяют его напряжение. Электромагнитный прибор, предназначенный для преобразования тока одного напряжения в переменный ток той же частоты, но другого напряжения, называется трансформатором. Простейший трансформатор состоит из ферромагнитного замкнутого сердечника, на который надеты две или несколько обмоток, провода которых обязательно покрыты изоляцией (рис. VII.50 *а*). Сердечник состоит из листов специального трансформаторного железа, изолированных друг от друга. Это делается для того, чтобы в сердечнике не возникали вихревые токи, которые в однородном сердечнике вызвали бы его разогрев. Последнее связано с большими потерями электрической энергии.

Одна из обмоток трансформатора подключается к внешнему источнику переменного напряжения U_1 и называется первичной. К выводам другой обмотки подсоединяются потребители электрической энергии, она называется вторичной. Обмотки трансформатора обладают небольшим активным сопротивлением, но большим индуктивным. Условное обозначение трансформатора в схеме представлено на рис. VII.50 *б*.



а *б*

Рис. VII.50

При подаче переменного напряжения U_1 с генератора на первичную обмотку в ней протекает переменный ток I_1. При этом создается переменное магнитное поле, магнитный поток которого проходит почти без потерь внутри сердечника (силовые линии указаны на рис. VII.50 *а* штрихами). Так как обе обмотки находятся на общем сердечнике, то магнитный поток пронизывает не только первичную, но и вторичную обмотки. При этом в каждом витке согласно закону электромагнитной индукции возникает ЭДС индукции ($e = -\Delta\Phi/\Delta t$). Если n_1 — число витков в первичной обмотке, n_2 — во вторичной, то ЭДС самоиндукции в первичной обмотке $\mathscr{E}_1 = n_1 e$, а ЭДС взаимной индукции во вторичной — $\mathscr{E}_2 = n_2 e$. Когда к трансформатору не подключена нагрузка (режим холостого хода), напряжение на зажимах вторичной обмотки равно $\mathscr{E}_2$ ($U_2 = \mathscr{E}_2 = n_2 e$). Для цепи первичной обмотки можно записать второй закон Кирхгофа:

$$U_1 - \mathscr{E}_1 = I_1 r_1,$$

U_1 — напряжение, поданное с внешнего генератора, I_1, r_1 — сила тока и сопротивление витков первичной обмотки. Знак «$-$» перед $\mathscr{E}_1$ соответствует правилу Ленца: возникающая ЭДС индукции препятствует изменениям U_1. Так как индуктивное сопротивление обмотки много больше ее активного сопротивления r_1, то значение падения напряжения на r_1 мало, и им можно пренебречь. Поэтому запишем, что $U_1 \approx \mathscr{E}_1 = n_1 e$. Учитывая формулы для U_1 и U_2, получим отношение:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\mathscr{E}_1}{\mathscr{E}_2} = \frac{n_1}{n_2} = k.$$

Величина k называется коэффициентом трансформации. Если $n_2 > n_1$, то $U_2 > U_1$, $k < 1$, и трансформатор называется повышающим; если $n_2 < n_1$, то, соответственно, $U_2 < U_1$, $k > 1$ — трансформатор называется понижающим.

В режиме холостого хода энергия во вторичной цепи не расходуется, а потери в первичной цепи очень малы (потери электроэнергии на нагревание проводов и перемагничивание сердечника).

При подключении потребителя энергии к вторичной обмотке по ней пойдет переменный ток I_2 той же частоты, что и напряжение U_1. Ток I_2 создает свое магнитное поле и, соответственно, магнитный поток. Этот магнитный поток по правилу Ленца препятствует изменениям магнитного потока в сердечнике, созданного током первичной обмотки. Результирующий магнитный поток в сердечнике несколько уменьшается. Это приводит к уменьшению ЭДС индукции в первичной цепи. Как видно из формулы $U_1 - \mathscr{E}_1 = I_1 r_1$, уменьшение $\mathscr{E}_1$ приводит к увеличению силы тока I_1 в первичной цепи (при неизменности U_1). При этом мощность, потребляемая трансформатором из цепи, увеличивается.

Таким образом, в соответствии с законом сохранения энергии, за вычетом незначительных потерь, энергия генератора передается магнитным полем из первичной цепи во вторичную. Пренебрегая потерями мощности, можем записать, что

$$I_1 U_1 \approx I_2 U_2.$$

Из последней формулы видно, что для понижающего трансформатора ($U_2 < U_1$) значение силы тока I_2 может быть достаточно большим. При этом падением напряжения на вторичной обмотке пренебречь нельзя. Поэтому можно считать, что ЭДС индукции $\mathscr{E}_2$ равна сумме напряжений на нагрузке (U_2) и на вторичной обмотке ($I_2 r_2$):

$$\mathscr{E}_2 = U_2 + I_2 r_2,$$

r_2 — сопротивление вторичной обмотки.

КПД трансформаторов определяется отношением мощности, потребляемой нагрузкой в цепи вторичной обмотки, к мощности, которую потребляет первичная обмотка:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\,\% = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} \cdot 100\,\%.$$

Коэффициент полезного действия трансформаторов большой мощности обычно достигает 99 %.

2.27. При постоянном токе первичная обмотка обладает только активным сопротивлением, которое обычно невелико по сравнению с ее индуктивным сопротивлением на переменном токе. Поэтому сила постоянного тока может превысить допустимое значение, и обмотка может сгореть.

2.28. Английский ученый Джеймс Клерк Максвелл в шестидесятых годах XIX века создал единую теорию электрических и магнитных явлений. Его основные идеи состояли в следующем. Переменные электрические и магнитные поля не могут существовать отдельно друг от друга: 1) меняющееся магнитное поле создает вихревое[1] электрическое поле; 2) меняющееся электрическое поле создает вихревое магнитное поле. Первое положение подтверждается явлением электромагнитной индукции. Максвелл предположил следующее: пусть через некоторый произвольно очерченный контур в пространстве проходит переменный магнитный поток; при этом в каждой точке этого контура возникает электрическое поле, линии напряженности которого замкнуты, и их направление зависит как от направления наводящего магнитного поля, так и от знака скорости его изменения (здесь надо пользоваться правилом левого винта вместе с правилом Ленца — рис. VII.51). Если в плоскость контура поместить проводник, то

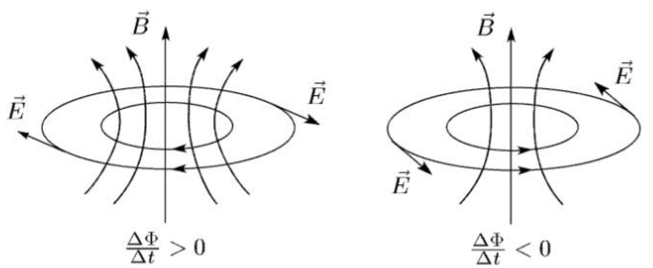


Рис. VII.51

вихревое электрическое поле, действуя на свободные электроны проводника, создает индукционный ток. Второе положение можно подтвердить следующим опытом. Во время зарядки и разрядки конденсатора через сопротивление R магнитное поле обнаруживается не только вокруг проводника, но и вокруг быстро меняющегося электрического поля конденсатора (рис. VII.52 *а*, *б*). Это можно обнаружить, если вблизи конденсатора поместить магнитную стрелку. Устанавливается она вдоль касательной к линиям индукции магнитного поля и ее направление будет меняться в соответствии с тем, увеличивается или уменьшается напряженность электрического поля внутри конденсатора и каково направление вектора напряженности. Таким образом, изменяющееся электрическое поле по своему магнитному действию подобно

[1] Напомним, что вихревым называет поле, силовые линии которого замкнуты.

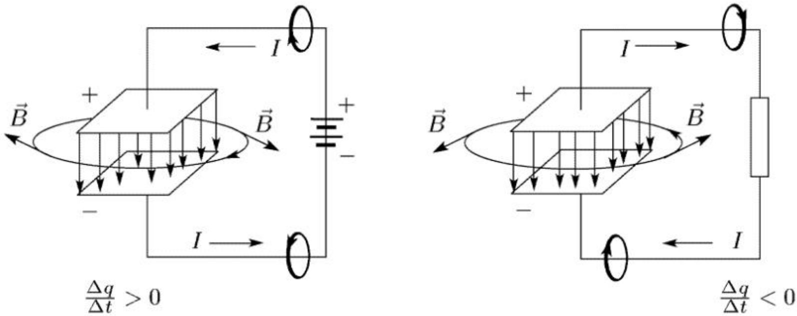


Рис. VII.52

электрическому току. Максвелл назвал изменяющееся электрическое поле током смещения. Магнитное поле, появляющееся при изменении электрического поля (как и любое другое магнитное поле) является вихревым (рис. VII.53). Направление линий индукции магнитного поля определяется правилом правого винта и правилом Ленца.

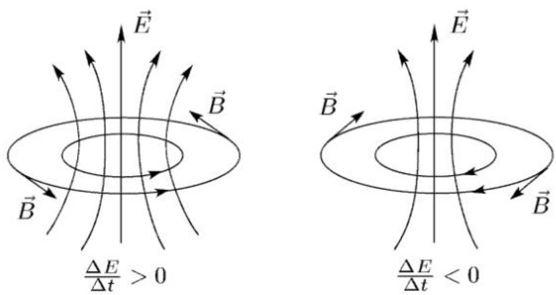


Рис. VII.53

2.29. Совокупность электрического и магнитного полей, органически связанных друг с другом и взаимно «порождающих» друг друга, называется электромагнитным полем. Если в какой-либо области пространства существует переменное электрическое поле, то оно вызывает появление в соседних областях пространства переменного магнитного поля, линии индукции которого охватывают линии напряженности этого электрического поля. В свою очередь, переменное магнитное поле вызывает появление в соседних областях пространства вихревого электрического поля, линии напряженности которого охватывают линии индукции данного магнитного поля и т.д. (рис. VII.54). Этот процесс распространяется в пространстве по всем направлениям. Процесс распространения электромагнитного поля в пространстве с течением времени называется электромагнитной волной. Максвелл

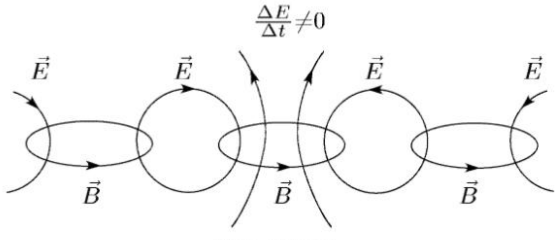


Рис. VII.54

показал в своей теории, что скорость распространения электромагнитной волны является конечной и в вакууме равна скорости света ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с). Кроме того, из теории Максвелла следует, что любой движущийся с ускорением или колеблющийся заряд должен излучать электромагнитные волны. Если заряд движется по гармоническому закону (например, внутри проводника под действием внешнего генератора), то индукция магнитного и напряженность электрического полей также будут меняться по гармоническому закону. На рис. VII.55 показана зависимость мгновенных значений векторов $\vec{E}$ и $\vec{B}$ от координаты x (скорость волны направлена вдоль оси Ox). Электромагнитные волны — поперечные.

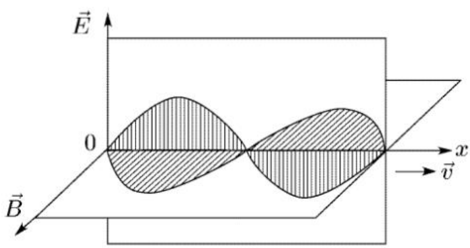


Рис. VII.55

Векторы $\vec{E}$ и $\vec{B}$ взаимно перпендикулярны и перпендикулярны направлению распространения волны. В электромагнитной волне происходят колебания полей, а не вещества, как в случае волн на воде или в натянутом шнуре.

Основные формулы

Дифференциальное уравнение для заряда в колебательном контуре:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \omega^2 q = 0 \qquad (\text{или} \quad q'' + \omega^2 q = 0), \tag{2.1}$$

q — заряд на обкладках конденсатора, ω — собственная круговая частота колебаний заряда:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \tag{2.2}$$