

Группа 26. Физика

Дата: 01.02.2022

Уроки № 23, 24

Тип урока: комбинированный спаренный урок

Темы уроков:

Ёмкость в цепи переменного тока. Индуктивность в цепи переменного тока.

Резонанс в электрической цепи.

Практическая работа №1: Решение задач по темам «Переменный ток» и «Колебательный контур».

Цели урока:

Предметные:

- знакомство с характеристиками цепей переменного тока;
- знакомство с явлением резонанса в электрической цепи;
- закрепление навыков решения задач.

Развивающая:

- развитие логического мышления, смекалки; формирование интереса к физическому эксперименту;
- активизация творческого мышления учащихся; умение анализировать, делать выводы.

Воспитывающая:

- воспитать интерес к физике для познаваемости мира и объективности наших знаний о нем.

Деятельностная:

- формирование у студентов способностей к самостоятельному построению новых способов действия на основе метода рефлексивной самоорганизации.

Образовательная:

- расширение понятийной базы по учебному предмету за счет включения в нее новых элементов.

Задание:

Ознакомиться с текстом по теме урока. Написать в тетради краткий конспект. Познакомиться с решением примерных задач. Ответить на контрольные вопросы. Решить задачи для самостоятельного решения.

План конспекта:

1. Конденсатор в цепи переменного тока
2. Схема цепи с конденсатором
3. Емкостное сопротивление
4. Катушка индуктивности в цепи переменного тока
5. Схема цепи с катушкой индуктивности

6. Индуктивное сопротивление
7. Резонанс в электрической цепи
8. Условие возникновения резонанса
9. Амплитуда силы тока при резонансе
10. Использование резонанса в радиосвязи
11. Решение задач

Конденсатор в цепи переменного тока

Постоянный ток не может идти по цепи, содержащей конденсатор. Ведь фактически при этом цепь оказывается разомкнутой, так как обкладки конденсатора разделены диэлектриком. Переменный же ток может идти по цепи, содержащей конденсатор. В этом можно убедиться с помощью простого опыта.

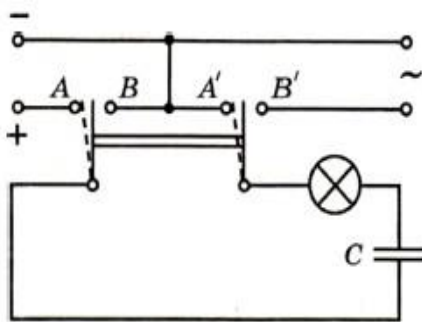


Рис. 4.13

Пусть у нас имеются источники постоянного и переменного напряжений, причем постоянное напряжение на зажимах источника равно действующему значению переменного напряжения. Цепь состоит из конденсатора и лампы накаливания (рис. 4.13), соединенных последовательно. При включении постоянного напряжения (переключатель повернут влево, цепь подключена к точкам AA') лампа не светится. Но при включении переменного напряжения (переключатель повернут вправо, цепь подключена к точкам BB') лампа

загорается, если емкость конденсатора достаточно велика.

Как же переменный ток может идти по цепи, если она фактически разомкнута (между пластинами конденсатора заряды перемещаться не могут)? Все дело в том, что происходит периодическая зарядка и разрядка конденсатора под действием переменного напряжения. Ток, идущий в цепи при перезарядке конденсатора, нагревает нить лампы.

Установим, как меняется со временем сила тока в цепи, содержащей только конденсатор, если сопротивлением проводов и обкладок конденсатора можно пренебречь (рис. 4.14).

Напряжение на конденсаторе

$$u = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{C}$$

равно напряжению на концах цепи. Следовательно,

$$\frac{q}{C} = U_m \cos \omega t. \quad (4.26)$$

Заряд конденсатора меняется по гармоническому закону:

$$q = CU_m \cos \omega t.$$

Сила тока, представляющая собой производную заряда по времени, равна:

$$i = q' = -U_m C \omega \sin \omega t = U_m C \omega \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (4.28)$$

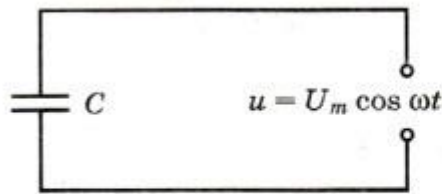


Рис. 4.14

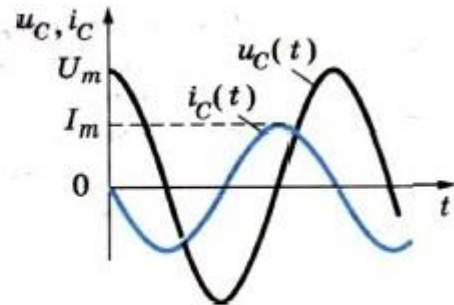


Рис. 4.15

Следовательно, колебания силы тока опережают по фазе колебания напряжения на конденсаторе на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 4.15).

Амплитуда силы тока равна:

$$I_m = U_m C \omega. \quad (4.29)$$

Если ввести обозначение

$$\frac{1}{\omega C} = X_C \quad (4.30)$$

и вместо амплитуд силы тока и напряжения использовать их действующие значения, то получим

$$I = \frac{U}{X_C}. \quad (4.31)$$

Величину X_C , обратную произведению ωC циклической частоты на электрическую емкость конденсатора, называют емкостным сопротивлением. Роль этой величины аналогична роли активного сопротивления R в законе Ома (см. формулу (4.17)). Действующее значение силы тока связано с действующим значением напряжения на конденсаторе точно так же, как связаны согласно закону Ома сила тока и напряжение для участка цепи постоянного тока. Это и позволяет рассматривать величину X_C как сопротивление конденсатора переменному току (емкостное сопротивление).

Чем больше емкость конденсатора, тем больше ток перезарядки. Это легко обнаружить по увеличению накала лампы при увеличении емкости конденсатора. В то время как сопротивление конденсатора постоянному току бесконечно велико, его сопротивление переменному току имеет конечное значение X_C . С увеличением емкости оно уменьшается. Уменьшается оно и с увеличением частоты ω .

В заключение отметим, что на протяжении четверти периода, когда конденсатор заряжается до максимального напряжения, энергия поступает в цепь и запасается в

конденсаторе в форме энергии электрического поля. В следующую четверть периода, при разрядке конденсатора, эта энергия возвращается в сеть.

Сопротивление цепи с конденсатором обратно пропорционально произведению циклической частоты на емкость. Колебания силы тока опережают по фазе колебания напряжения на $\frac{\pi}{2}$.

Катушка индуктивности в цепи переменного тока

Индуктивность в цепи влияет на силу переменного тока. Это можно доказать с помощью простого опыта.

Соберем цепь из катушки с большой индуктивностью и электрической лампы накаливания (рис. 4.16). С помощью переключателя можно подключить эту цепь либо к источнику постоянного напряжения, либо к источнику переменного напряжения. При этом постоянное напряжение и действующее значение переменного напряжения должны быть равны. Опыт показывает, что лампа светится ярче при постоянном напряжении. Следовательно, действующее значение силы переменного тока в рассматриваемой цепи меньше силы постоянного тока.

Объясняется это различие явлением самоиндукции. В § 15 главы 2 рассказывалось о том, что при подключении катушки к источнику постоянного напряжения сила тока в цепи нарастает постепенно. Возникающее при этом вихревое электрическое поле тормозит движение электронов. Лишь по прошествии некоторого времени сила тока достигает наибольшего (установившегося) значения, соответствующего данному постоянному напряжению.

Если напряжение быстро меняется, то сила тока не будет успевать достигнуть тех значений, которые она приобрела бы с течением времени при постоянном напряжении.

Следовательно, максимальное значение силы переменного тока (его амплитуда) ограничивается индуктивностью цепи и будет тем меньше, чем больше индуктивность и чем больше частота приложенного напряжения.

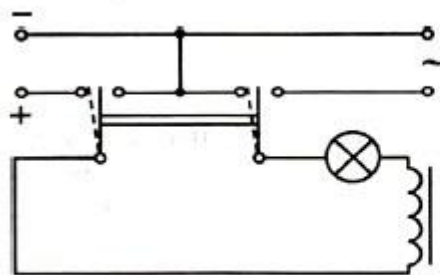


Рис. 4.16

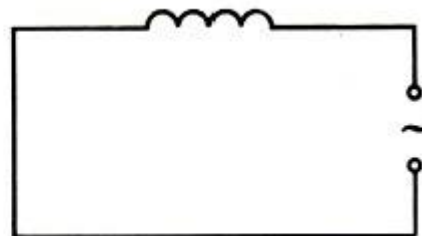


Рис. 4.17

Определим силу тока в цепи, содержащей катушку, активным сопротивлением которой можно пренебречь (рис. 4.17). Для этого предварительно найдем связь между напряжением на катушке и ЭДС самоиндукции в ней.

Если сопротивление катушки равно нулю, то и напряженность электрического поля внутри проводника в любой момент времени должна быть равна нулю. Иначе сила тока, согласно закону Ома, была бы бесконечно большой. Равенство нулю напряженности поля оказывается возможным потому, что напряженность вихревого электрического поля $\vec{E}_i$, порождаемого переменным магнитным полем, в каждой точке равна по модулю и противоположна по направлению напряженности кулоновского поля $\vec{E}_k$, создаваемого в проводнике зарядами, расположенными на зажимах источника и в проводах цепи.

Из равенства $\vec{E}_i = -\vec{E}_k$ следует, что удельная работа вихревого поля (т. е. ЭДС самоиндукции e_i) равна по модулю и противоположна по знаку удельной работе кулоновского поля. Учитывая, что удельная работа кулоновского поля равна напряжению на концах катушки, можно записать: $e_i = -u$.

При изменении силы тока по гармоническому закону

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

ЭДС самоиндукции равна:

$$e_i = -Li' = -L\omega I_m \cos \omega t. \quad (4.32)$$

Так как $u = -e_i$ напряжение на концах катушки оказывается равным

$$u = L\omega I_m \cos \omega t = L\omega I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

где $U_m = L\omega I_m$ — амплитуда напряжения.

Следовательно, колебания напряжения на катушке опережают по фазе колебания силы тока на $\frac{\pi}{2}$, или, что то же самое, колебания силы тока отстают по фазе от колебаний напряжения на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 4.18).



Амплитуда силы тока в катушке равна:

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}. \quad (4.33)$$

Если ввести обозначение

$$\omega L = X_L \quad (4.34)$$

и вместо амплитуд силы тока и напряжения использовать их действующие значения, то получим:

$$I = \frac{U}{X_L}. \quad (4.35)$$

Величину X_L , равную произведению циклической частоты на индуктивность, называют индуктивным сопротивлением.

Согласно формуле (4.35) действующее значение силы тока связано с действующим значением напряжения и индуктивным сопротивлением соотношением, подобным закону Ома для цепи постоянного тока.

Индуктивное сопротивление зависит от частоты ω . Постоянный ток вообще «не замечает» индуктивности катушки. При $\omega = 0$ индуктивное сопротивление равно нулю ($X_L = 0$).

Чем быстрее меняется напряжение, тем больше ЭДС самоиндукции и тем меньше амплитуда силы тока.

Катушка индуктивности оказывает сопротивление переменному току. Это сопротивление, называемое индуктивным, равно произведению циклической частоты на индуктивность. Колебания силы тока в цепи с индуктивностью отстают по фазе от колебаний напряжения на $\frac{\pi}{2}$.

Резонанс в электрической цепи

При изучении вынужденных механических колебаний мы ознакомились с явлением резонанса. Резонанс наблюдается в том случае, когда собственная частота колебаний системы совпадает с частотой изменения внешней силы. Если трение мало, то амплитуда установившихся вынужденных колебаний при резонансе резко увеличивается. Совпадение вида уравнений для описания механических и электромагнитных колебаний позволяет сделать заключение о возможности резонанса также и в электрической цепи, если эта цепь представляет собой колебательный контур, обладающий определенной собственной частотой колебаний.

При механических колебаниях резонанс выражен отчетливо при малых значениях коэффициента трения μ . В электрической цепи роль коэффициента трения выполняет ее активное сопротивление R . Ведь именно наличие этого сопротивления в цепи приводит к превращению энергии тока во внутреннюю энергию проводника (проводник нагревается). Поэтому резонанс в электрическом колебательном контуре должен быть выражен отчетливо при малом активном сопротивлении R .

Мы с вами уже знаем, что если активное сопротивление мало, то собственная циклическая частота колебаний в контуре определяется формулой

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Сила тока при вынужденных колебаниях должна достигать максимальных значений, когда частота переменного напряжения, приложенного к контуру, равна собственной частоте колебательного контура:

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (4.36)$$

Это условие возникновения резонанса.

Резонансом в электрическом колебательном контуре называется явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний силы тока при совпадении частоты внешнего переменного напряжения с собственной частотой колебательного контура.

Амплитуда силы тока при резонансе

Как и в случае механического резонанса, при резонансе в колебательном контуре создаются оптимальные условия для поступления энергии от внешнего источника в контур. Мощность в контуре максимальна в том случае, когда сила тока совпадает по фазе с напряжением. Здесь наблюдается полная аналогия с механическими колебаниями: при резонансе в механической колебательной системе внешняя сила (аналог напряжения в цепи) совпадает по фазе со скоростью (аналог силы тока).

Не сразу после включения внешнего переменного напряжения в цепи устанавливается резонансное значение силы тока. Амплитуда колебаний силы тока нарастает постепенно — до тех пор, пока энергия, выделяющаяся за период на резисторе, не сравняется с энергией, поступающей в контур за это же время:

$$\frac{I_m^2 R}{2} = \frac{U_m I_m}{2}.$$

Резонанс в электрической цепи

Упростив это уравнение, можно записать:

$$I_m R = U_m \quad (4.37)$$

Отсюда амплитуда установившихся колебаний силы тока при резонансе определяется уравнением

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \quad (4.38)$$



При $R \rightarrow 0$ резонансное значение силы тока неограниченно возрастает: $(I_m)_{\text{рез}} \rightarrow \infty$. Наоборот, с увеличением R максимальное значение силы тока уменьшается, и при больших R говорить о резонансе уже не имеет смысла. Зависимость амплитуды силы тока от частоты при различных сопротивлениях ($R_1 < R_2 < R_3$) показана на рисунке 4.19.

Одновременно с увеличением силы тока при резонансе резко возрастают напряжения на конденсаторе и катушке индуктивности. Эти напряжения при малом активном сопротивлении во много раз превышают внешнее напряжение.

Использование резонанса в радиосвязи

Явление электрического резонанса широко используется при осуществлении радиосвязи. Радиоволны от различных передающих станций возбуждают в антенне радиоприемника

переменные токи различных частот, так как каждая передающая радиостанция работает на своей частоте. С антенной индуктивно связан колебательный контур (рис. 4.20). Вследствие электромагнитной индукции в контурной катушке возникают переменные ЭДС соответствующих частот и вынужденные колебания силы тока тех же частот. Но только при резонансе колебания силы тока в контуре и напряжения в нем будут значительными, т. е. из колебаний различных частот, возбуждаемых в антенне, контур выделяет только те, частота которых равна его собственной частоте. Настройка контура на нужную частоту ω_0 обычно осуществляется путем изменения емкости конденсатора. В этом обычно состоит настройка радиоприемника на определенную радиостанцию.

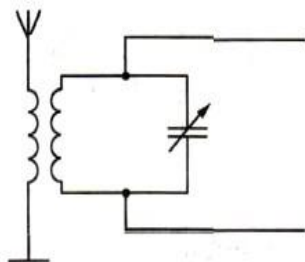


Рис. 4.20

Необходимость учета возможности резонанса в электрической цепи

В некоторых случаях резонанс в электрической цепи может принести большой вред. Если цепь не рассчитана на работу в условиях резонанса, то его возникновение может привести к аварии.

Чрезмерно большие токи могут перегреть провода. Большие напряжения приводят к пробоем изоляции.

Такого рода аварии нередко случались еще сравнительно недавно, когда плохо представляли себе законы электрических колебаний и не умели правильно рассчитывать электрические цепи.

При вынужденных электромагнитных колебаниях возможен резонанс — резкое возрастание амплитуды колебаний силы тока и напряжения при совпадении частоты внешнего переменного напряжения с собственной частотой колебаний. На явлении резонанса основана вся радиосвязь.

Электромагнитные колебания: Примеры решения задач

1. Максимальный заряд на обкладках конденсатора колебательного контура $q_m = 10^{-6}$ Кл. Амплитудное значение силы тока в контуре $I_m = 10^{-3}$ А. Определите период колебаний. (Потерями на нагревание проводников можно пренебречь.)

Решение. Амплитудные значения силы тока и заряда связаны соотношением:

$$I_m = \omega_0 q_m,$$

откуда

$$\omega_0 = \frac{I_m}{q_m}.$$

Следовательно,

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \frac{q_m}{I_m} \approx 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ (с)}.$$

2. Рамка площадью $S = 3000 \text{ см}^2$ имеет $N = 200$ витков и вращается в однородном магнитном поле с индукцией $B = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$. Максимальная ЭДС в рамке $\mathcal{E}_m = 1,5 \text{ В}$. Определите время одного оборота.

Р е ш е н и е. Магнитный поток, пронизывающий рамку, равен:

$$\Phi = BSN \cos \omega t.$$

Согласно закону электромагнитной индукции:

$$e = -\Phi' = BSN\omega \sin \omega t.$$

Амплитуда ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_m = BSN\omega.$$

Отсюда

$$\omega = \frac{\mathcal{E}_m}{BSN}.$$

Время одного оборота рамки равно:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi BSN}{\mathcal{E}_m} \approx 3,8 \text{ (с)}.$$

3. В цепь переменного тока с частотой $\nu = 500 \text{ Гц}$ включена катушка индуктивностью $L = 10 \text{ мГн}$. Определите емкость конденсатора, который надо включить в эту цепь, чтобы наступил резонанс.

Р е ш е н и е. Электрическая цепь согласно условию задачи представляет собой колебательный контур. Резонанс в этой цепи наступит, когда частота переменного тока будет равна собственной частоте колебательного контура ($\nu = \nu_0$).

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Отсюда

$$C = \frac{1}{4\pi^2 L \nu^2} \approx 10^{-5} \text{ Ф} = 10 \text{ мкФ}.$$

Контрольные вопросы:

1. Как связаны между собой действующие значения силы тока и напряжения на конденсаторе в цепи переменного тока?
 2. Выделяется ли энергия в цепи, содержащей только конденсатор, если активным сопротивлением цепи можно пренебречь?
 3. Выключатель цепи представляет собой своего рода конденсатор. Почему же выключатель надежно размыкает цепь?
 4. Почему ЭДС самоиндукции и напряжение на катушке имеют противоположные знаки?
 5. Может ли амплитуда силы тока при резонансе превысить силу постоянного тока в цепи с таким же активным сопротивлением и постоянным напряжением, равным амплитуде переменного напряжения?
 6. Чему равна разность фаз между колебаниями силы тока и напряжения при резонансе?
-

Задачи для самостоятельного решения

1. После того как конденсатору колебательного контура был сообщен заряд $q = 10^{-5}$ Кл, в контуре возникли затухающие колебания. Какое количество теплоты выделится в контуре к тому времени, когда колебания в нем полностью затухнут? Емкость конденсатора $C = 0,01$ мкФ.
2. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L = 0,003$ Гн и плоского конденсатора емкостью $C = 13,4$ пФ. Определите период свободных колебаний в контуре.
3. В каких пределах должна изменяться индуктивность катушки колебательного контура, чтобы частота колебаний изменялась от 400 до 500 Гц? Емкость конденсатора 10 мкФ.

Литература:

Мякишев Г. Я. Физика 10 класс. Учебник для общеобразовательных учреждений. М., 2010. §33 упр. 1-3; §34 упр. 1-2; §35 упр. 1-2; Стр. 108-109