Задание:

- Изучить теорию;
- написать краткий конспект;
- Альтернативный материал (видео): https://www.youtube.com/watch?v=zhc6U_ntQFY, https://www.youtube.com/watch?v=RUVaUEMpLkA
- По вопросам обращаться 072-1098278 или hvastov@rambler.ru
- Фотоотчёт конспекта прислать в течении 3 дней со дня получения задания на **hvastov@rambler.ru**

Действующие значения силы тока и напряжения. Конденсатор и катушка в цепи переменного тока. Активное сопротивление. Электрический резонанс.

План

1. Активное сопротивление. Действующие значения силы тока и напряжения
2. Конденсатор в цепи переменного тока
3. Катушка индуктивности в цепи переменного тока
4. Резонанс в электрической цепи

Активное сопротивление. Действующие значения силы тока и напряжения

Перейдем к более детальному рассмотрению процессов, которые происходят в цепи, подключенной к источнику переменного напряжения.

Сила тока в цепи с резистором. Пусть цепь состоит из соединительных проводов и нагрузки с малой индуктивностью и большим сопротивлением R (рис. 4.10). Эту величину, которую мы до сих пор называли электрическим сопротивлением или просто сопротивлением, теперь будем называть **активным сопротивлением**.

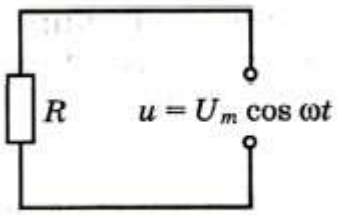

Рис. 4.10

Сопротивление R называется активным, потому что при наличии нагрузки, обладающей этим сопротивлением, цепь поглощает энергию, поступающую от генератора. Эта энергия превращается во внутреннюю энергию проводников — они нагреваются. Будем считать, что напряжение на зажимах цепи меняется по гармоническому закону:

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

Как и в случае постоянного тока, мгновенное значение силы тока прямо пропорционально мгновенному значению напряжения. Поэтому для нахождения мгновенного значения силы тока можно применить закон Ома:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \cos \omega t}{R} = I_m \cos \omega t. \qquad (4.16)$$

В проводнике с активным сопротивлением колебания силы тока совпадают по фазе с колебаниями напряжения (рис. 4.11), а амплитуда силы тока определяется равенством

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \qquad (4.17)$$

Мощность в цепи с резистором. В цепи переменного тока промышленной частоты (ν = 50 Гц) сила тока и напряжение изменяются сравнительно быстро. Поэтому при прохождении тока по проводнику, например по нити электрической лампочки, количество выделенной энергии также будет быстро меняться со временем. Но этих быстрых изменений мы не замечаем.

Как правило, нам нужно бывает знать *среднюю мощность* тока на участке цепи за большой промежуток времени, включающий много периодов. Для этого достаточно найти среднюю мощность за один период. Под средней за период мощностью переменного тока понимают отношение суммарной энергии, поступающей в цепь за период, к периоду.

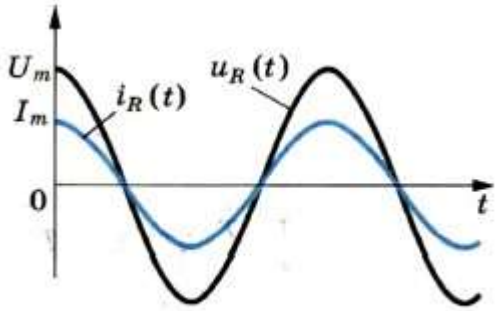

Рис. 4.11

Мощность в цепи постоянного тока на участке с сопротивлением R определяется формулой

$$P = I^2R. \qquad (4.18)$$

На протяжении очень малого интервала времени переменный ток можно считать практически постоянным. Поэтому мгновенная мощность в цепи переменного тока на участке, имеющем активное сопротивление R, определяется формулой

$$P = i^2R. \qquad (4.19)$$

Найдем среднее значение мощности за период. Для этого сначала преобразуем формулу (4.19), подставляя в нее выражение (4.16) для силы тока и используя известное из математики соотношение $\cos^2\alpha = \frac{1+\cos 2\alpha}{2}$:

$$P = \frac{I_m^2 R}{2}(1+\cos 2\omega t) = \frac{I_m^2 R}{2} + \frac{I_m^2 R}{2}\cos 2\omega t. \qquad (4.20)$$

График зависимости мгновенной мощности от времени изображен на рисунке 4.12, а. Согласно графику (рис. 4.12, б), на протяжении одной восьмой периода, когда cos 2ωt > 0, мощность в любой момент времени больше, чем $\frac{I_m^2 R}{2}$. Зато на протяжении следующей восьмой части периода, когда cos 2ωt < 0, мощность в любой момент времени меньше, чем $\frac{I_m^2 R}{2}$. Среднее за период значение cos 2ωt равно нулю, а значит равно нулю второе слагаемое в уравнении (4.20).

Средняя мощность $\overline{P}$ равна, таким образом, первому члену в формуле (4.20):

$$\overline{P} = \overline{i}^2 R = \frac{I_m^2 R}{2}. \qquad (4.21)$$

Действующие значения силы тока и напряжения. Из формулы (4.21) видно, что величина $\frac{I_m^2}{2}$ есть среднее за период значение квадрата силы тока:

$$i^2 = \frac{I_m^2}{2}. \qquad (4.22)$$

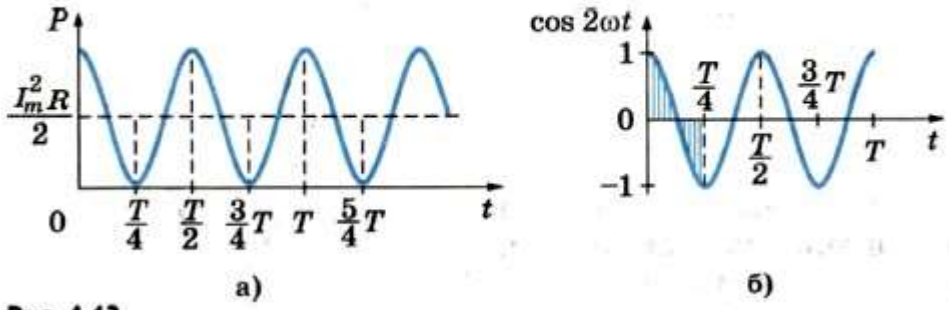

Рис. 4.12

Величина, равная квадратному корню из среднего значения квадрата силы тока, называется **действующим значением силы переменного тока**. Действующее значение силы переменного тока обозначается через I:

$$I = \sqrt{\overline{i^2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \qquad (4.23)$$

Действующее значение силы переменного тока равно силе такого постоянного тока, при котором в проводнике выделяется то же количество теплоты, что и при переменном токе за то же время.

Действующее значение переменного напряжения определяется аналогично действующему значению силы тока:

$$U = \sqrt{\overline{u^2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \qquad (4.24)$$

Заменяя в формуле (4.17) амплитудные значения силы тока и напряжения на их действующие значения, получаем

$$I = \frac{U}{R}. \qquad (4.25)$$

Это закон Ома для участка цепи переменного тока с резистором.

Как и при механических колебаниях, в случае электрических колебаний обычно нас не интересуют значения силы тока, напряжения и других величин в каждый момент времени. Важны общие характеристики колебаний, такие, как амплитуда, период, частота, действующие значения силы тока и напряжения, средняя мощность. Именно действующие значения силы тока и напряжения регистрируют амперметры и вольтметры переменного тока.

Кроме того, действующие значения удобнее мгновенных значений еще и потому, что именно они непосредственно определяют среднее значение мощности P переменного тока:

$$p = I^2R = UI.$$

Колебания силы тока в цепи с резистором совпадают по фазе с колебаниями напряжения, а мощность определяется действующими значениями силы тока и напряжения.

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.

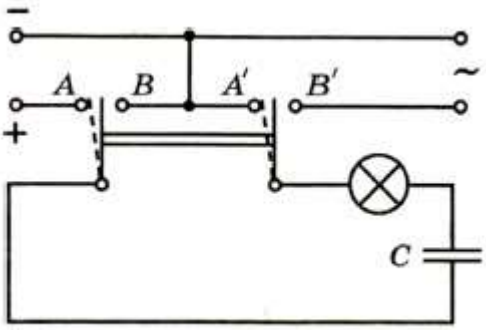

Рис. 4.13

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,

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

Заряд конденсатора меняется по гармоническому закону:

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

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

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

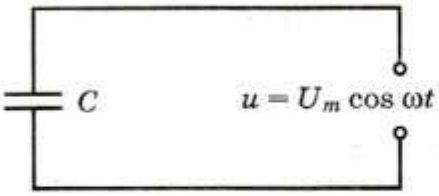

Рис. 4.14

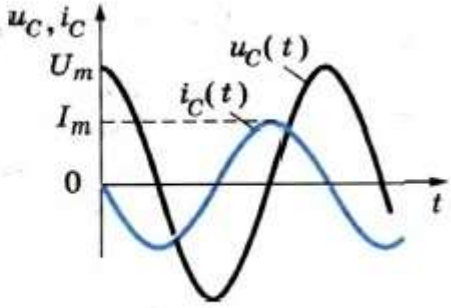

Рис. 4.15

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

Амплитуда силы тока равна:

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

Если ввести обозначение

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

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

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

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 электроемкость. 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.

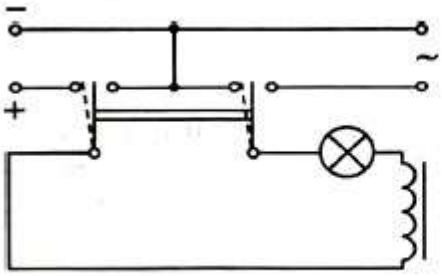

Рис. 4.16

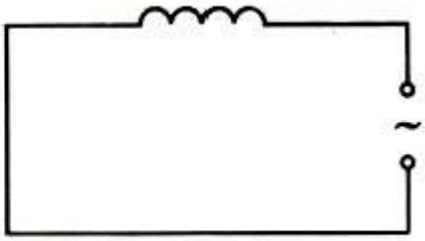

Рис. 4.17

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 $\vec{E}_к$, создаваемого в проводнике зарядами, расположенными на зажимах источника и в проводах цепи.

Из равенства $\vec{E}_i = -\vec{E}_к$ следует, что удельная работа вихревого поля (т. е. ЭДС самоиндукции ег) 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:

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

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).

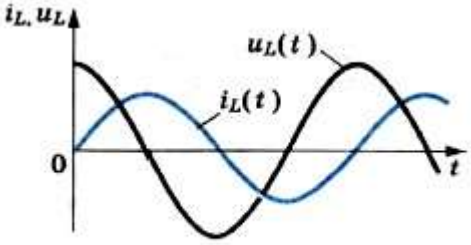

Рис. 4.18

Амплитуда силы тока в катушке равна:

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

Если ввести обозначение

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

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

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

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 ω = 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:

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

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:

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

Упростив это уравнение, можно записать:

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

Отсюда амплитуда установившихся колебаний силы тока при резонансе определяется уравнением

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

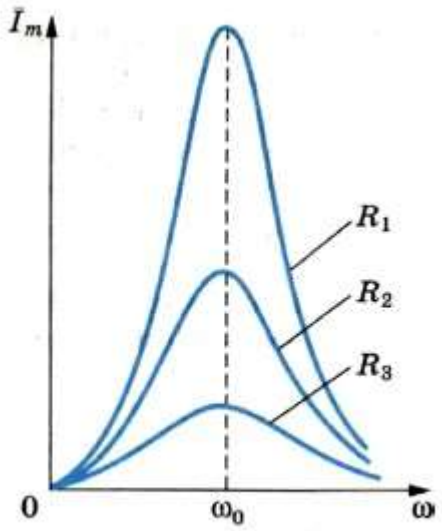

Рис. 4.19

При $R \to 0$ резонансное значение силы тока неограниченно возрастает: $(I_m)_{рез} \to \infty$. 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.

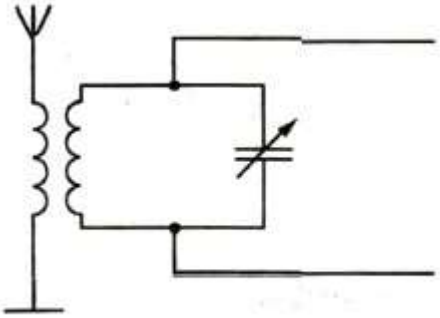

Рис. 4.20

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 пробою 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.

Контрольные вопросы

1. Чему равна амплитуда напряжения в осветительных сетях переменного тока, рассчитанных на напряжение 220 В?
2. Что называют действующими значениями силы тока и напряжения?
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?
1. Как связаны между собой действующие значения силы тока и напряжения на катушке индуктивности, активным сопротивлением которой можно пренебречь?
2. Почему ЭДС самоиндукции и напряжение на катушке имеют противоположные знаки?
1. 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?
2. Чему равна разность фаз между колебаниями силы тока и напряжения при резонансе?
3. При каком условии резонансные свойства контура выражены наиболее отчетливо?