

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра радиофизики

Беликов О.В., Федотов М.Г., Чупыра А.Г.

Контрольные материалы (задачи семестрового задания)
учебного курса "Основы электротехники и радиоэлектроники"

Учебно-методическое пособие

Новосибирск
2012

Беликов О.В., Федотов М.Г., Чупыра А.Г. Контрольные материалы (задачи семестрового задания) учебного курса "Основы электротехники и радиоэлектроники" /Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2012. 26 с.

Учебно-методическое пособие «Контрольные материалы (задачи семестрового задания) учебного курса "Основы электротехники и радиоэлектроники"» предназначено для помощи студентам физического факультета в освоении материала, предлагаемого в рамках лекционного курса и более подробно изучаемого на семинарских занятиях по радиоэлектронике. В пособии большее внимание уделяется методам расчета электрических цепей и их практическому применению при решении конкретных задач. Данное учебное пособие содержит введение и 3 главы. Темами глав являются: методы расчета линейных электрических цепей, резонансные процессы в электрических цепях, переходные процессы в электрических цепях. В начале каждой главы приводятся краткое изложение методов решения задач по соответствующей теме и примеры решения конкретных задач. Далее идут задачи, предназначенные для самостоятельного решения.

Рецензент: канд.техн.наук, ст.науч.сотр. ИЯФ СО РАН *Е.В.Козырев*

Учебно-методическое пособие подготовлено в рамках реализации Программы развития НИУ-НГУ на 2009-2018 гг.

© Новосибирский государственный университет, 2012

Введение

Задачи, предлагаемые в учебно-методическом пособии, охватывают рассмотрение процессов в линейных электрических цепях с сосредоточенными параметрами.

Электрической цепью называют совокупность соединенных друг с другом источников электрической энергии и нагрузок, по которым может протекать электрический ток. В рассматриваемых цепях предполагается линейная (пропорциональная) связь между электродвижущими силами и электрическими токами, которая может быть описана линейными алгебраическими или дифференциальными уравнениями. В цепях с сосредоточенными параметрами такие элементы как индуктивность, емкость, сопротивление, являются конструктивно обособленными элементами.

Изображение электрической цепи с помощью условных знаков называют электрической схемой. На схемах, изображающих цепи с сосредоточенными параметрами, источники электрической энергии, индуктивности, емкости, сопротивления представляются в виде идеальных элементов с двумя выводами (двухполюсников). Соединяя между собой соответствующим образом эти идеальные элементы, получают схему электрической цепи, которая приближенно отражает электромагнитные процессы в каком-либо устройстве. Основными понятиями, характеризующими геометрию электрической цепи, можно назвать:

- ветвь – участок цепи, имеющий два вывода;
- узел – точку, где сходятся более двух ветвей;
- контур – замкнутый путь, проходящий через ряд ветвей и узлов.

Практически все задачи допускают решение несколькими различными методами. Однако предпочтительными являются решения, основанные на свойствах цепи и протекающих в ней процессов, поскольку такие решения являются наиболее компактными и показывают понимание студентом материала.

1. Методы расчета линейных электрических цепей.

Эквивалентные схемы источника ЭДС и источника тока.

Электрическую цепь условно можно разделить на две части: внутреннюю, принадлежащую источнику электрической энергии E , и внешнюю цепь, называемую нагрузкой источника R_n (рис. 1.1).

Реальный источник ЭДС всегда обладает собственным внутренним сопротивлением $r_{и}$, и, таким образом, схему источника можно представить комбинацией двух символов: электродвижущей силы E и внутреннего сопротивления $r_{и}$. Такая схема называется эквивалентной схемой источника ЭДС

Ток в цепи (рис. 1.1) определится условием

$$E = (r_{и} + R_n) \cdot I.$$

Величину $R_n \cdot I$ принято называть напряжением (падением напряжения) на нагрузке. Напряжение на нагрузке всегда меньше величины ЭДС источника вследствие падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника:

$$U = E - I \cdot r_{и}$$

Часто, если $r_{и} \ll R_n$, величиной $r_{и}$ пренебрегают, вводя понятие идеального источника ЭДС (генератора ЭДС). Выходное напряжение (напряжение на клеммах АВ) такого источника не зависит от тока, протекающего в цепи.

Бывает и наоборот, когда $r_{и} \gg R_n$. В таком случае говорят, что имеет место режим генератора тока. Идеализированный источник с внутренним сопротивлением $r_{и} \rightarrow \infty$ принято называть источником тока J (или генератором тока).

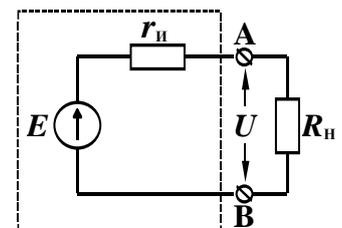


Рис. 1.1

Источник тока позволяет иметь ток в цепи, независимый от величины сопротивления нагрузки.

Нужно отметить, что современная электроника позволяет реализовать устройства, по своим свойствам очень близкие к идеальным источникам ЭДС и тока. В параграфе 6 рассматриваются подобные устройства на основе операционных усилителей.

Реальный источник на схеме всегда может быть представлен комбинацией идеального источника (ЭДС или тока) с сопротивлением $r_{и}$, отражающим его внутреннее сопротивление; таким образом возможны два варианта схемного представления источника:

1) комбинация идеального источника ЭДС с внутренним сопротивлением, подключенным к нему последовательно (рис. 1.1).

2) комбинация идеального источника тока с внутренним сопротивлением $r_{и}$, подключенным к нему параллельно (рис. 1.2).

По отношению к внешней цепи эти эквивалентные схемы равнозначны, и можно пользоваться любой из них. По отношению к внутренней (источнику) они неравнозначны. При необходимости отобразить внутреннее устройство источника выбор эквивалентной схемы должен быть однозначным.

В эксперименте эквивалентная схема источника может быть определена посредством измерений в так называемых предельных режимах: режиме ХХ – холостого хода ($R_{н} \rightarrow \infty$) и режиме КЗ – короткого замыкания ($R_{н} \rightarrow 0$). Для схемы на рис. 1.1 в режиме ХХ измеряется ЭДС источника $E = U_{xx} = U_{AB}$, в режиме КЗ измеряется ток короткого замыкания $I_{кз}$ и далее вычисляется внутреннее сопротивление $r_{и}$ по формуле $r = E / I_{кз}$. Для схемы на рис. 1.2 в режиме КЗ измеряется ток источника $J = I_{кз}$, в режиме ХХ измеряется U_{xx} и далее находится внутреннее сопротивление источника:

$$r = U_{xx} / I_{кз}. \quad (1.1)$$

Равнозначность эквивалентных схем на рис. 1.1 и рис. 1.2 для внешней цепи можно показать на примере, осуществляя переход от одной эквивалентной схемы к другой. Такой переход бывает иногда полезен, позволяя упростить расчет цепи.

Метод эквивалентного генератора

Если в каком-либо элементе цепи требуется найти ток, этот элемент определяется в качестве нагрузки. Остальная часть цепи, какой бы сложной она ни была, по отношению к нагрузке может быть представлена в виде эквивалентного источника ЭДС или тока, т. е. любая сложная цепь может быть представлена рисунками 1.1 или 1.2 с некоторыми эквивалентными параметрами источника. Параметры эквивалентного источника находятся путем рассмотрения режимов ХХ и КЗ.

Принцип наложения и метод наложения

Принцип наложения формулируется следующим образом: ток в какой-либо ветви равен алгебраической сумме токов, вызываемых каждой из ЭДС, имеющихся в цепи. Этот принцип справедлив для всех линейных электрических цепей. Принцип наложения лежит в основе метода расчета, получившего название метода наложения.

Метод, основанный на использовании первого и второго законов Кирхгофа

Законы Кирхгофа позволяют найти ток и напряжение в любой ветви цепи, если все элементы цепи известны.

Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, притекающих к узлу цепи, равна нулю:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N = 0.$$

Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма электродвижущих сил и падений напряжений вдоль любого замкнутого контура равна нулю:

$$E_1 + E_2 + \dots + E_n + U_1 + U_2 + \dots + U_m = 0.$$

Решение задач сводится к составлению и решению системы уравнений Кирхгофа. Для составления систем уравнений существуют правила, позволяющие составить систему из минимально необходимого числа уравнений, равного числу неизвестных величин.

Первое правило: по первому закону Кирхгофа составляется $N-1$ уравнений, где N – число узлов в цепи.

Перед составлением уравнений произвольно указываются направления токов в ветвях цепи. Предпочтительно, однако, чтобы направления токов совпадали с направлениями ЭДС. Условно присваиваются знаки величинам токов. Например, если ток входит в узел, то считаем его положительным, если выходит из узла, то отрицательным.

Второе правило: по второму закону Кирхгофа составляется $M - (N - 1)$ уравнений, где M – число ветвей цепи.

Замечание. Можно также пользоваться правилом: число уравнений по второму закону Кирхгофа равно числу независимых контуров цепи (независимый контур – контур, включающий в себя хотя бы одну ветвь, не входящую в предыдущие контуры). Для составления уравнений выбирается направление обхода контуров, определяющее знаки членов уравнений. Удобно придерживаться определенных правил присвоения знаков членам уравнений. Например:

1) если направление ЭДС совпадает с направлением обхода контура, присваиваем ему знак «плюс», если нет – знак «минус»;

2) если направление тока в резисторе совпадает с направлением обхода, присваиваем падению напряжения знак «плюс», если нет – знак «минус»;

3) все ЭДС располагаем по одну сторону знака равенства, все падения напряжения – по другую.

Число уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа, должно быть равно числу неизвестных токов ветвей.

Метод контурных токов

Метод контурных токов может рассматриваться как дальнейшее развитие метода, использующего законы Кирхгофа. В качестве неизвестных величин в методе используются так называемые контурные токи, т. е. полагают, что в каждом независимом контуре цепи течет свой контурный ток. Это дает возможность ограничиться составлением уравнений только по второму закону Кирхгофа и, таким образом, иногда существенно уменьшить число уравнений системы. Реальные токи ветвей находятся суммированием контурных токов. Как будет показано ниже, этот метод имеет еще и то преимущество, что в наибольшей степени возможна математическая формализация решения системы уравнений.

Метод узловых потенциалов

Систему уравнений для сложной цепи можно построить, взяв в качестве неизвестных величин потенциалы узлов. Уравнения составляются по первому закону Кирхгофа. Число уравнений в системе равно $N - 1$, где N – число узлов цепи. Найдя узловые потенциалы, далее находят токи ветвей, используя закон Ома.

Пример 1. Электрический мост на рис. 1.3 (мост Уинстона) состоит из резисторов $R_1 = R_3 = 10$ Ом, $R_2 = R_4 = 15$ Ом. К диагонали CD моста подключен идеальный источник ЭДС $E = 30$ В, к диагонали АВ – нагрузка $R_n = 8$ Ом. Найдите U_n и I_n .

Решение. Используем метод эквивалентного генератора. Отключим R_n от диагонали АВ, обеспечив тем самым режим ХХ. Найдём $E_0 = U_{AB}$:

$$U_{AD} = E \frac{R_4}{R_1 + R_4} = 30 \frac{15}{10 + 15} = 18 \text{ В},$$

$$U_{BD} = E \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 30 \frac{10}{10 + 15} = 12 \text{ В},$$

$$U_{AB} = U_{AD} - U_{BD} = 18 - 12 = 6 \text{ В}.$$

Найдем величину эквивалентного сопротивления r_3 , заменив источник E перемычкой:

$$r_3 = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4} + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{10 \cdot 15}{10 + 15} + \frac{10 \cdot 15}{10 + 15} = 12 \text{ Ом}.$$

Подключим нагрузку к эквивалентному источнику:

$$I_H = E_3 / (r_3 + R_H) = 6 / (12 + 8) = 0,3 \text{ А};$$

$$U_H = I_H \cdot R_H = 0,3 \cdot 8 = 2,4 \text{ В}.$$

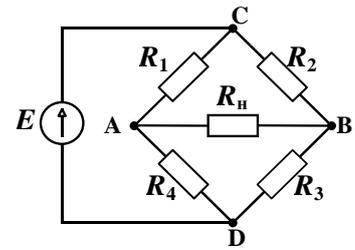
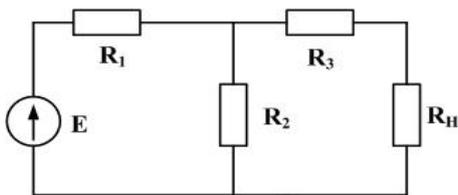


Рис. 1.3.

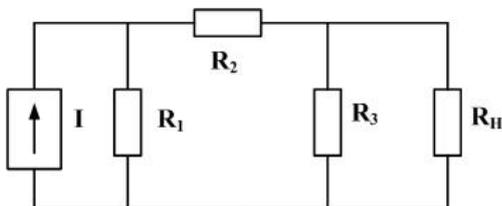
Задачи для самостоятельного решения.



Задача № 1.1

Дано: E, R_1, R_2, R_3 .

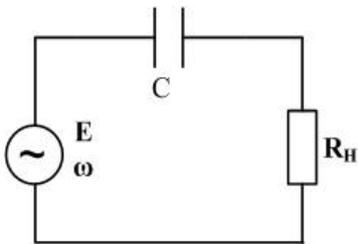
Найти: величину нагрузки R_H , при которой мощность P_H на этой нагрузке будет максимальной, и значение этой мощности.



Задача № 1.2

Дано: I, R_1, R_2, R_3 .

Найти: величину нагрузки R_H , при которой мощность P_H на этой нагрузке будет максимальной, и значение этой мощности.



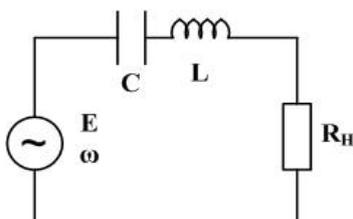
Задача № 1.3

Дано: E, ω, C .

Найти: $R_H, P_{R_H \text{ max}}$.

Условие: Определить, при каком сопротивлении активной нагрузки R_H мощность в нагрузке будет максимальной. Найти эту максимальную мощность.

Источник – генератор синусоидальной ЭДС с частотой ω и действующим значением E .



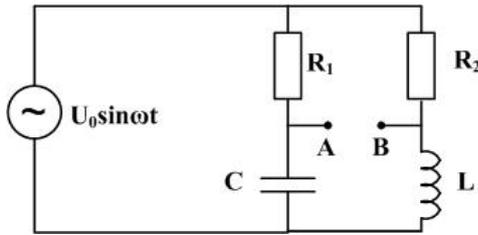
Задача № 1.4

Дано: E, ω, C, L .

Найти: $R_H, P_{R_H \text{ max}}$.

Условие: Определить, при каком сопротивлении активной нагрузки R_H мощность на нагрузке будет максимальной. Найти эту максимальную мощность. Источник – генератор синусоидальной ЭДС с частотой ω и действующим значением E .

Задача № 1.5

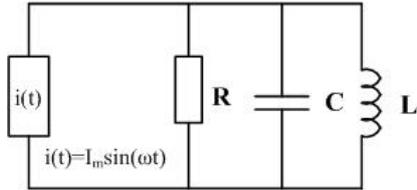


Дано: $U_0, \omega, C, L, R_1, R_2$.

Найти: U_{A-B} .

Условие: Определить амплитуду и фазу напряжения U_{AB} .

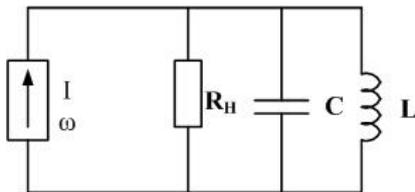
Задача № 1.6



Дано: I_m, ω, C, L, R .

Условие: Определить частоты $\omega = \omega_1$ и $\omega = \omega_2$, на которых амплитуды токов в индуктивности или в емкости достигают максимальных значений.

Задача № 1.7



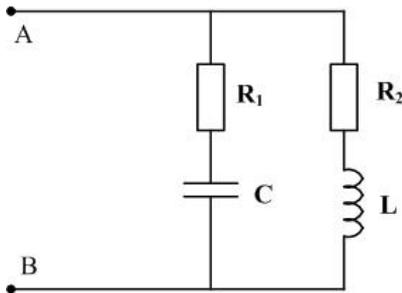
Дано: I, ω, C, L, R_n .

Найти: $R_n, P_{R_n \text{ max}}$.

Условие: Определить при каком сопротивлении активной нагрузки R_n мощность на нагрузке будет максимальной. Найти эту максимальную мощность. Источник – генератор синусоидального тока с действующим значением I и частотой ω .

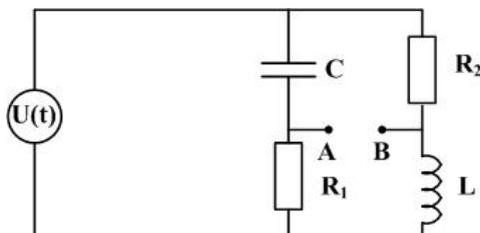
значением I и частотой ω .

Задача № 1.8



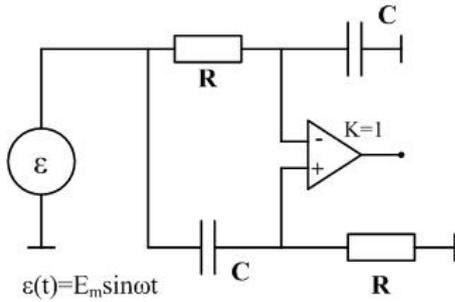
Условие: Определить соотношение между C, L, R_1, R_2 , если реактивная составляющая сопротивления между клеммами A и B равна нулю на всех частотах.

Задача № 1.9



Условие: При каком соотношении C, L, R_1, R_2 напряжение между точками A и B не зависит от вида $U(t)$.

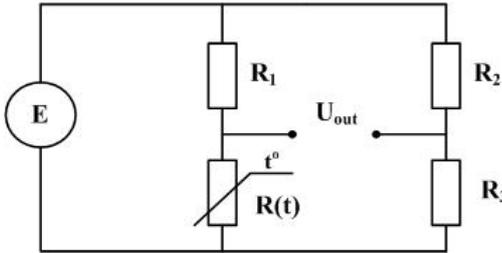
Задача № 1.10



Дано: $E_m, \omega, C, R, K=1$

Условие: Показать, что амплитуда напряжения на выходе дифференциального усилителя не зависит от частоты ω . Определить амплитуду и фазу этого напряжения.

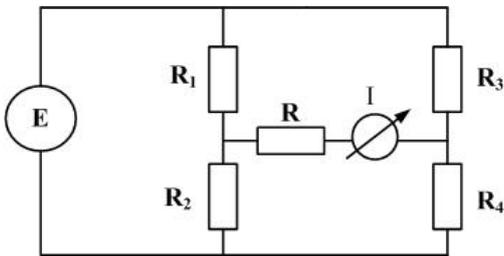
Задача № 1.11



Условие: Платиновые терморезисторы отличаются высокой линейностью и стабильностью. Их сопротивление растет как $R(t^\circ) = R_0 \cdot (1 + \alpha t^\circ)$, где R_0 - сопротивление при 0°C , t° - температура ($^\circ\text{C}$), $\alpha = 0,0039 \text{ grad}^{-1}$. Если такой терморезистор используется в составе сбалансированного при $t=0^\circ\text{C}$ условия мостика Уинстона с $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$, то:

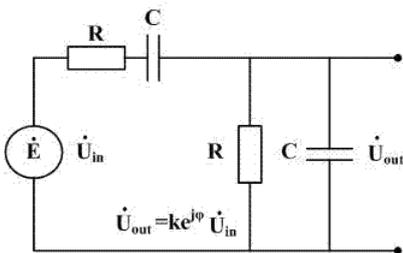
- А) При каком значении ЭДС E изменению t° на 1°C будет соответствовать изменение U_{out} на 10 мВ;
- Б) В каком диапазоне температур ошибка измерения $< 0,1^\circ\text{C}$.

Задача № 1.12



Условие: На примере мостика Уинстона расчетом подтвердить свойство обратимости (взаимности) пассивных линейных электрических цепей.

Задача № 1.13

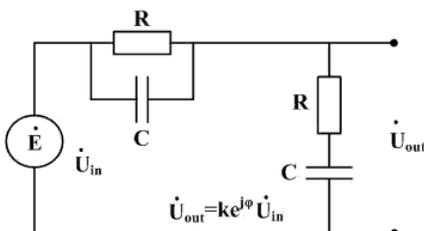


Дано: C, R .

Найти: $k(\omega), \varphi(\omega)$.

Условие: Найти амплитудно-частотную $k(\omega)$ и фазо-частотную $\varphi(\omega)$ зависимости коэффициента передачи моста Вина.

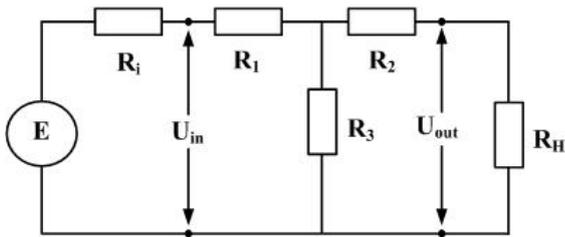
Задача № 1.14



Дано: C, R .

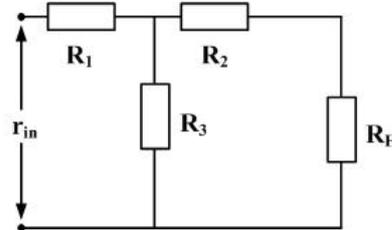
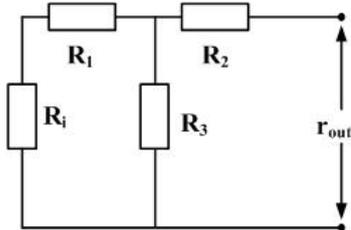
Найти: $k(\omega), \varphi(\omega)$.

Условие: Построить амплитудно-частотную $k(\omega)$ и фазо-частотную $\varphi(\omega)$ характеристики RC-фильтра, “обратного” мосту Вина.

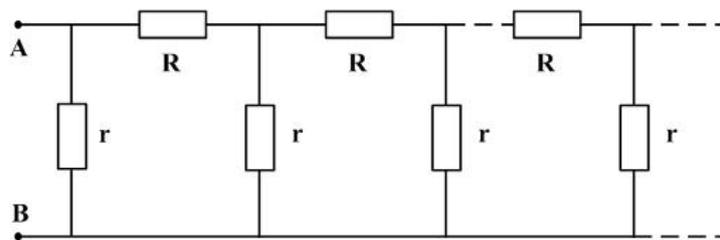
Задача № 1.15

Условие: Для работы на высоких частотах применяют Т-образный аттенуатор (ослабитель) – $R_1, R_2, R_3,$.

Определить элементов значения такого аттенуатора, если задан коэффициент такой передачи $k=U_{out}/U_{in}$ и он согласован по входу и выходу (т.е $r_{in}=R_i, r_{out}=R_H$).

**Задача № 1.16**

Условие: Определить сопротивление между клеммами А и В цепи, составленной из бесконечного числа одинаковых резистивных звеньев.

**2. Резонансные процессы в электрических цепях.**

То обстоятельство, что конденсатор и катушка индуктивности в цепи синусоидального переменного тока имеют разные знаки сопротивления (или проводимости), порождает явление, называемое резонансом. На частоте резонанса сопротивление (или проводимость) катушки индуктивности компенсируется емкостным сопротивлением (или проводимостью) конденсатора

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \text{ или } \frac{1}{\omega L} = \omega C, \quad (2.1)$$

и результирующее реактивное сопротивление (или проводимость) цепи оказывается равным нулю.

Ток в цепи источника энергии определяется только активной составляющей сопротивления цепи, складывающейся из потерь энергии в катушке, конденсаторе, внутреннем сопротивлении источника и т. д.

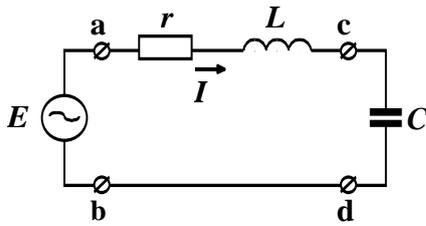


Рис. 2.1.

Цепи, состоящие из емкостных и индуктивных сопротивлений и работающие в области резонанса, называются резонансными цепями или колебательными контурами.

Колебательные контуры принято разделять на два типа в зависимости от способа включения в них источника электрической энергии. Источник ЭДС, имеющий малое внутреннее сопротивление, включается последовательно с элементами r , L и C (рис. 2.1).

Получающаяся цепь называется последовательным колебательным контуром, а процесс, в ней происходящий – резонансом напряжений:

$$|U_L| = |U_C|. \quad (2.2)$$

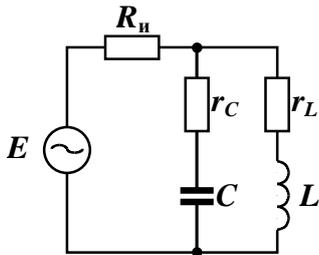


Рис. 2.2.

Если источник имеет большое внутреннее сопротивление, он может быть подключен к колебательному контуру параллельно. Такую цепь принято называть параллельным колебательным контуром, а процесс, в ней происходящий, – резонансом токов (рис. 2.2):

$$|I_L| = |I_C|. \quad (2.3)$$

Колебательные контуры обладают следующими основными свойствами, определяющими их применение:

1. Частотной избирательностью, благодаря чему можно из широкого спектра частот сигнала выделить сигнал определенной частоты;
2. Трансформирования сопротивления, что позволяет оптимально согласовать внутренние сопротивления источника и нагрузки;
3. Трансформирования напряжений и токов; это свойство используется в системах электропитания.

Для решения задач с колебательными контурами также используется символический метод расчета электрических цепей. Однако для отражения специфики колебательного контура используются специфические понятия, называемые радиотехническими и использующиеся преимущественно в радиотехнике:

Резонансная частота контура ω_p – частота, при которой наблюдаются условия резонанса (2.2) или (2.3).

Собственная частота контура $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, вытекающая из условий (2.1), отражающая резонансную частоту идеального контура (т. е. при отсутствии потерь в контуре).

Характеристическое (волновое) сопротивление контура – сопротивление катушки или конденсатора на собственной частоте контура:

$$\rho = \omega_0 L = 1/\omega_0 C = \sqrt{L/C}. \quad (2.4)$$

Последовательное сопротивление – сопротивление потерь контура, эквивалентно представленное сопротивлением r_n , включенным последовательно с элементами L и C .

Параллельное сопротивление – сопротивление потерь контура, эквивалентно представленное сопротивлением R_n , включенным параллельно с элементами L и C .

Добротность контура – отношение характеристического сопротивления ρ к последовательному сопротивлению r_n :

$$Q = \omega L / r_n = 1/\omega C r_n = \rho / r_n, \quad (2.5)$$

или отношение параллельного сопротивления R_n к характеристическому сопротивлению ρ :

$$Q = R_n / \rho. \quad (2.6)$$

Методы расчета, использующие эти понятия, называются радиотехническими.

Все вышеперечисленные параметры, характеризующие свойства колебательного контура, могут быть найдены из уравнения его полного сопротивления (или проводимости).

Пример. Определить частоты, на которых напряжения на реактивных элементах последовательного колебательного контура (рис. 2) достигают максимумов.

Возможен следующий ход решения. Полное сопротивление RLC-контура на частоте ω есть

$$z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R \left[1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right],$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - резонансная частота, а $Q = \frac{\sqrt{L}}{R} \sqrt{C}$ - добротность контура. Соответственно, комплексный коэффициент передачи напряжения источника на емкость есть отношение комплексного сопротивления емкости к сопротивлению z :

$$K_c = \frac{-jx_c}{z} = \frac{1}{j\omega C R \left[1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right]} = \frac{-jQ}{\frac{\omega}{\omega_0} \left[1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right]}.$$

Максимуму напряжения на емкости будет соответствовать максимум модуля этого коэффициента передачи

$$|K_c| = \frac{Q}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + Q^2 \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1\right)^2}} = \frac{Q}{\sqrt{Q^2 \frac{\omega^4}{\omega_0^4} - (2Q^2 - 1) \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + Q^2}},$$

что для данной дроби может быть найдено как точка минимума подкоренного выражения знаменателя как функции отношения $\frac{\omega^2}{\omega_0^2}$, т.е. как экстремум соответствующего квадратного трехчлена. Это дает частоту

$$\omega_c = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}.$$

Или, при не слишком малой добротности контура

$$\omega_c \approx \left(1 - \frac{1}{4Q^2}\right) \omega_0.$$

Комплексный коэффициент передачи напряжения источника на индуктивность есть отношение ее комплексного сопротивления к z

$$K_L = \frac{jx_L}{z} = \frac{j\omega L}{R \left[1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right]} = \frac{jQ}{\frac{\omega_0}{\omega} \left[1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right]}.$$

Максимуму напряжения на индуктивности будет соответствовать максимум модуля коэффициента передачи

$$|K_L| = \frac{Q}{\sqrt{\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 + Q^2\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right)^2}} = \frac{Q}{\sqrt{Q^2 \frac{\omega_0^4}{\omega^4} - (2Q^2 - 1)\frac{\omega_0^2}{\omega^2} + Q^2}}$$

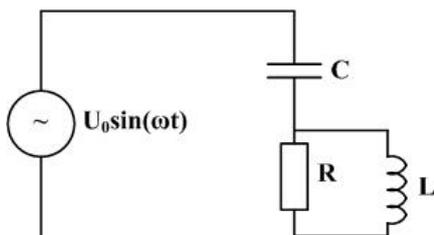
- что для данной дроби может быть найдено как точка минимума подкоренного выражения знаменателя как функции отношения $\frac{\omega_0^2}{\omega^2}$ - что снова сводится к экстремуму квадратного трехчлена и дает частоту

$$\omega_L = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}}$$

И, при не слишком малой добротности контура,

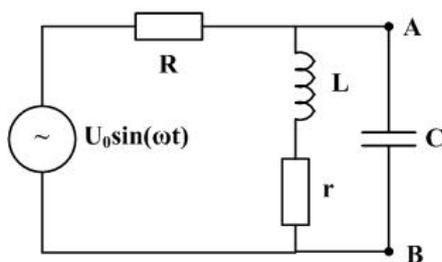
$$\omega_L \approx \left(1 + \frac{1}{4Q^2}\right)\omega_0.$$

Задачи для самостоятельного решения.



Задача № 2.1

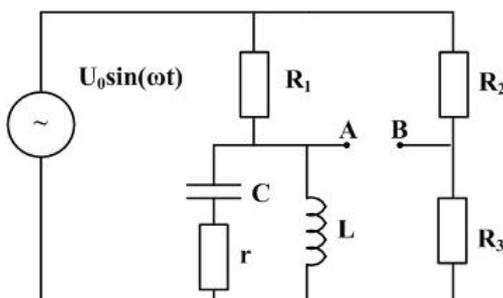
Условие: Определить среднюю мощность, выделяющуюся на резисторе R при резонансе. Полагать $R \gg \sqrt{\frac{L}{C}}$.



Задача № 2.2

Условие: Определить напряжение U_{AB} в момент резонанса.

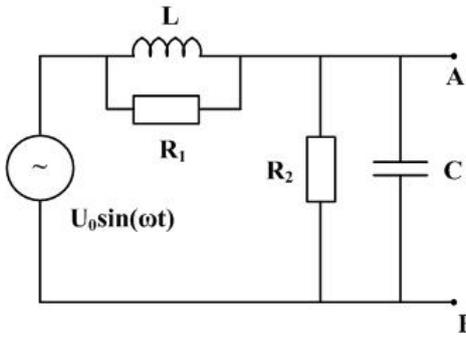
Полагать $r \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$.



Задача № 2.3

Условие: Определить напряжение между точками A и B в момент резонанса.

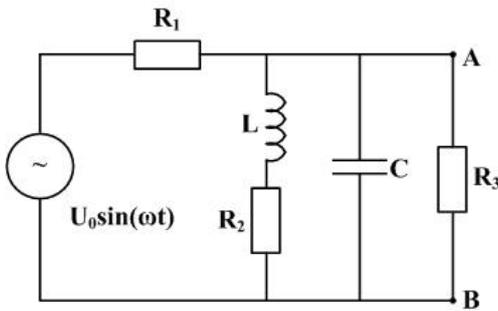
Полагать $r \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$.



Задача № 2.4

Условие: По теореме Тевинена определить параметры эквивалентного источника при условии:

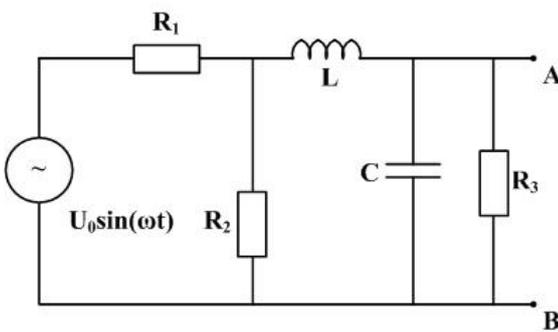
$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, R_1, R_2 \gg \sqrt{\frac{L}{C}}$$



Задача № 2.5

Условие: Определить напряжение между точками А и В при резонансе.

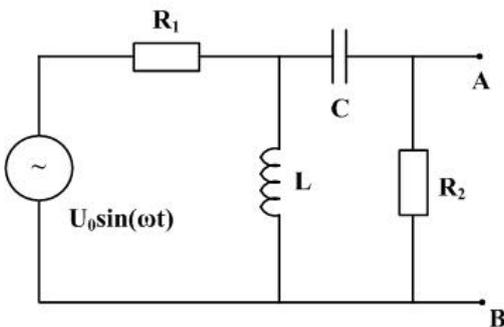
Полагать $R_2 \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$.



Задача № 2.6

Условие: Определить напряжение между точками А и В при резонансе.

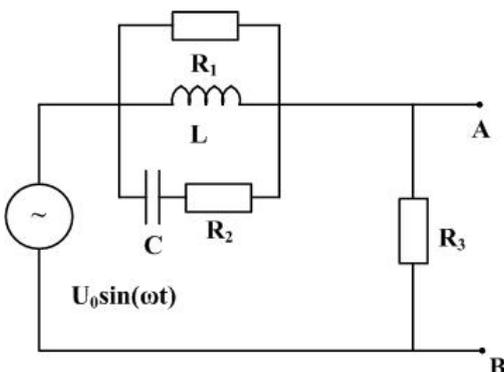
Полагать $R_1 // R_2 \ll \sqrt{\frac{L}{C}} \ll R_3$



Задача № 2.7

Условие: Определить напряжение между точками А и В при резонансе

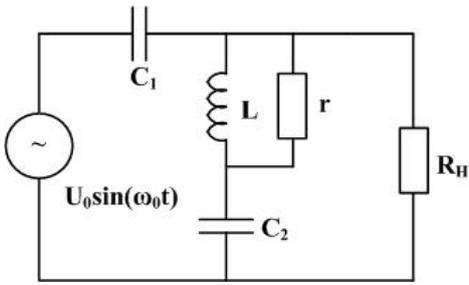
Полагать $R_2 \ll \sqrt{\frac{L}{C}} \ll R_1$



Задача № 2.8

Условие: Определить напряжение между точками А и В при резонансе

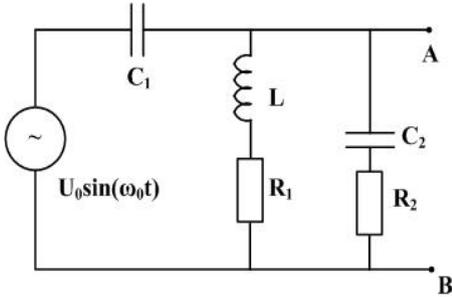
Полагать $R_2 \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$



Задача № 2.9

Условие: Определить действующее значение напряжения на нагрузке R_H .

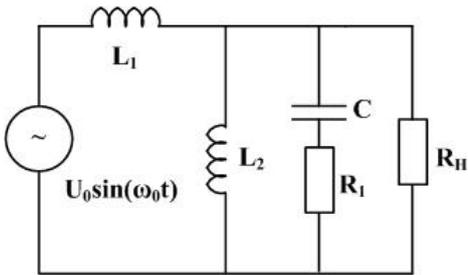
$$r \gg \sqrt{\frac{L}{C_2}}; \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_2}}$$



Задача № 2.10

Условие: Определить действующее значение напряжения между клеммами А и В.

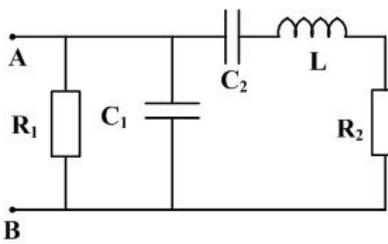
$$R_1 + R_2 \ll \sqrt{\frac{L}{C_2}}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_2}}$$



Задача № 2.11

Условие: Определить действующее значение напряжения на нагрузке R_H .

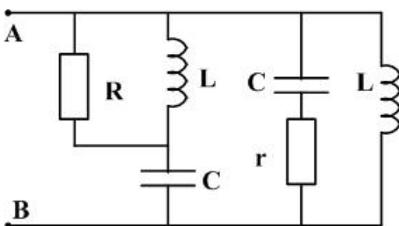
$$R_1 \ll \sqrt{\frac{L_2}{C}}; \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C}}$$



Задача № 2.12

Условие: Определить входное сопротивление контура со стороны зажимов А и В на резонансной частоте

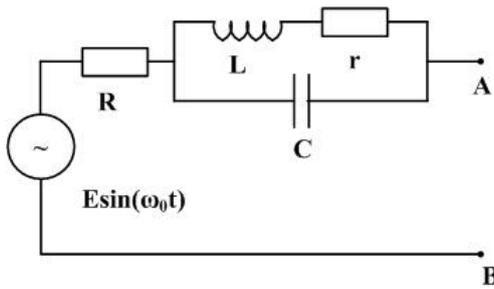
$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}, R_2 \ll \omega L;$$



Задача № 2.13

Условие: Определить входное сопротивление схемы со стороны зажимов А и В на резонансной частоте

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, R \gg \sqrt{\frac{L}{C}}; r \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$$

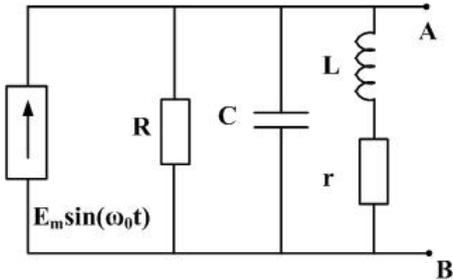


Задача № 2.14

Дано: r, R, C, L .

Условие: Определить параметры эквивалентного источника.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad r \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$$



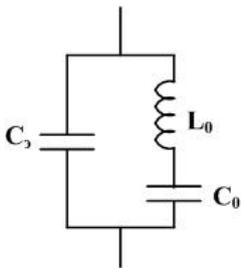
Задача № 2.15

Дано: r, C, L, R, I_m .

Условие: По теореме Тевинена определить параметры эквивалентного генератора напряжения.

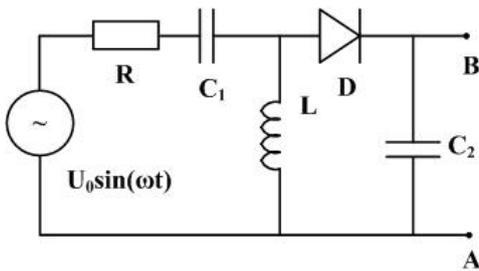
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad r \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Задача № 2.16



Условие: Кварцевые резонаторы, используемые в генераторах высокостабильных частот – это пластинки (брусочки) из кварца с напыленными металлическими электродами. Вблизи частоты механического резонанса (благодаря пьезоэффекту) такое устройство электрически эквивалентно сложному колебательному контуру с элементами C_0 и L_0 электромеханического резонанса и емкостью C_3 напыленных электродов. Определить значения C_0 и L_0 , если для

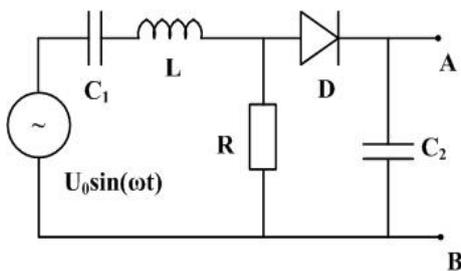
некоторого резонатора измерения дают $C_3=10$ пФ, частоту последовательного резонанса $f_1=1$ МГц и частоту параллельного резонанса $f_2=1,012$ МГц.



Задача № 2.17

Условие: Определить постоянное напряжение между клеммами А и В. Диод D – идеальный.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC_1}}$$



Задача № 2.18

Условие: Определить постоянное напряжение между клеммами А и В. Диод D – идеальный.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC_1}}$$

3. Переходные процессы в электрических цепях

Общий подход к анализу переходных процессов

Переходные процессы возникают при подключении цепей к источникам электрической энергии и отключении от них, при изменении структуры цепей путем их коммутации и во многих других случаях.

При переходном процессе электрическая цепь переходит из одного стационарного состояния в другое, что сопровождается изменением энергии, накопленной в реактивных элементах цепи. Переходный процесс не происходит мгновенно. Мгновенный переходный процесс означал бы, что источники энергии в цепи могут развивать бесконечно большие мощности, т. е. токи и напряжения в цепи могут достигать бесконечно больших величин, что, естественно, невозможно. Поэтому энергия, запасенная в цепи, изменяется плавно, т. е. представляет собой непрерывную функцию времени.

Однако и в реальных электрических цепях переходные процессы сопровождаются возникновением повышенных токов и напряжений. При включении, как правило, возникают большие пусковые токи, при выключении – большие коммутационные напряжения. Этим объясняется тот факт, что выход из строя электрических цепей происходит обычно при их включении и выключении. Все вышесказанное объясняет важность изучения переходных процессов в электрических цепях.

В общем случае все процессы в линейных электрических цепях (как стационарные, так и переходные) описываются линейными дифференциальными уравнениями. Для последовательного колебательного контура, приведенного на рис. 3.1, дифференциальное уравнение имеет вид

$$I \cdot r + L \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \int Idt = E. \quad (3.1)$$

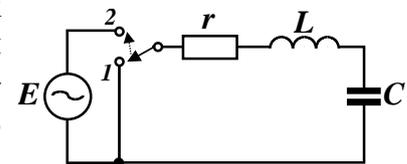


Рис. 3.1.

Задача анализа переходного процесса сводится к составлению и решению дифференциальных уравнений, т. е. нахождению токов и напряжений как функций времени при $t \geq 0$, т. е. после момента коммутации.

Решение дифференциального уравнения, как принято говорить в математике, есть сумма общего решения однородного дифференциального уравнения и какого-либо частного решения неоднородного уравнения.

В электротехнике принята иная терминология: общее решение называют свободной составляющей величины, частное решение – принужденной составляющей величины (т. е. тока или напряжения):

$$I(t) = I_{св}(t) + I_{пр}(t), \quad U(t) = U_{св}(t) + U_{пр}(t). \quad (3.2)$$

Для нахождения свободной составляющей величины необходимо правую часть равенства (4.1) приравнять к нулю и найти ее решение

$$I \cdot r + L \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \int Idt = 0. \quad (3.3)$$

Решение обычно представляется в виде экспоненциальных функций

$$A_{св} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots + A_N e^{p_N t}.$$

Количество членов решения определяется порядком дифференциального уравнения (числом реактивных элементов – накопителей энергии). Постоянные коэффициенты A_1, A_2, \dots, A_N определяются начальными условиями в цепи непосредственно перед переходным процессом. Постоянные коэффициенты p_1, p_2, \dots, p_N имеющие размерность, обратную времени, характеризуют скорость протекания переходного процесса.

Физический смысл принятых терминов состоит в том, что свободная составляющая величин (тока или напряжения) порождается изменением количества энергии, накопленной в реактивных элементах цепи при отсутствии внешних источников энергии (правую часть

равенства 3.1 приравниваем к нулю). Характер ее изменения не зависит от вида внешнего источника энергии. Принужденная составляющая определяется внешним источником энергии и характеризует состояние цепи после окончания переходного процесса.

Классический метод анализа переходного процесса

В классическом методе решения дифференциального уравнения коэффициенты $p_1, p_2 \dots p_N$ являются корнями так называемого характеристического уравнения. Характеристическое уравнение можно получить, подставив результат решения однородной части дифференциального уравнения $I(t) = I_0(t) \cdot e^{Pt}$ в само уравнение (например, в уравнение 3.3 для цепи на рис. 3.1). Это называется алгебраизацией дифференциального уравнения.

$$0 = I \cdot r \cdot e^{Pt} + pL \cdot I \cdot e^{Pt} + \frac{I \cdot e^{Pt}}{pC},$$

после сокращения

$$r + pL + \frac{1}{pC} = 0. \quad (3.4)$$

Решив уравнение (3.4), найдем его корни p_1, p_2 . Теперь свободная составляющая решения (например, для тока) будет иметь вид

$$I(t) = I_{01}e^{p_1 t} + I_{02}e^{p_2 t}.$$

Постоянные коэффициенты I_{01} и I_{02} находят из анализа начальных условий переходного процесса, т. е. мгновенных величин токов и напряжений в цепи в моменты времени t_{0-} и t_{0+} (моменты, бесконечно близко прилегающие к моменту t_0 начала переходного процесса, как показано, например, на рис. 58). Анализ начальных условий опирается на законы Кирхгофа и законы коммутации. Напомним законы коммутации.

1. Ток через индуктивность не может измениться мгновенно и в моменты t_{0-} и t_{0+} остается неизменным.

2. Напряжение на емкости не может измениться мгновенно и в моменты t_{0-} и t_{0+} остается неизменным.

Анализ начальных условий удобно проводить с помощью таблицы, куда заносятся значения токов и напряжений в цепи в моменты времени $t_{0-}t_{0+}$ и по окончании переходного процесса (обозначим $t \rightarrow \infty$).

Частное решение дифференциального уравнения отражает, по сути дела, новое стационарное состояние цепи по окончании переходного процесса (т. е. при $t \rightarrow \infty$).

Кратко сформулируем теперь алгоритм решения задачи о переходном процессе классическим методом:

1. Составляется дифференциальное уравнение (или система дифференциальных уравнений для многоконтурной цепи) по принципиальной схеме цепи. Уравнения составляются в форме уравнений Кирхгофа или используются методы контурных токов и узловых потенциалов.

2. Составляется характеристическое уравнение цепи (или система характеристических уравнений для многоконтурной цепи). Находятся корни характеристического уравнения.

3. Анализируется состояние цепи в моменты времени $t_{0-}t_{0+}$ и $t \rightarrow \infty$. Составляется таблица начальных условий цепи. На основании составленной таблицы находятся постоянные коэффициенты $A_1, A_2 \dots A_N$ для свободной части решения и $A_{пр}$ для принужденной части решения (под символом A подразумеваются ток или напряжение).

4. Рисуются график переходного процесса, на котором показываются как реальные токи и напряжения, так и их составляющие (свободные и принужденные составляющие).

Пример 1. На рис. 3.2 $E = 100$ В, $L = 10$ Гн, $R = 20$ Ом. Найдите ток I и напряжения U_L, U_R после коммутации цепи (при переходе ключа из состояния 1 в состояние 2).

Решение.

1. Дифференциальное уравнение цепи после коммутации

$$I \cdot R + L \frac{dI}{dt} = 0.$$

2. Характеристическое уравнение

$$R + pL = 0,$$

откуда

$$p = -\frac{R}{L}.$$

3. Таблица начальных условий, из которой видно, что принужденные составляющие всех решений равны нулю.

Тогда решения будут иметь вид

$$I(t) = I e^{-\frac{R}{L}t}; U_R(t) = U_R e^{-\frac{R}{L}t}; U_L(t) = U_L e^{-\frac{R}{L}t}.$$

Величины I , U_R , U_L находятся из частного решения этих уравнений при $t_0 = t_{0+}$:

$$I(t_{0+}) = I_0 = 5 \text{ А}; U_R(t_{0+}) = U_{R0} = 100 \text{ В}; U_L(t_{0+}) = U_{L0} = -100 \text{ В}.$$

Окончательно решения имеют вид

$$I(t) = 5 e^{-2t} \text{ А}; U_R(t) = 100 e^{-2t} \text{ В}; U_L(t) = -100 e^{-2t} \text{ В}.$$

4. Графики переходного процесса изображены на рис. 3.3 а и б.

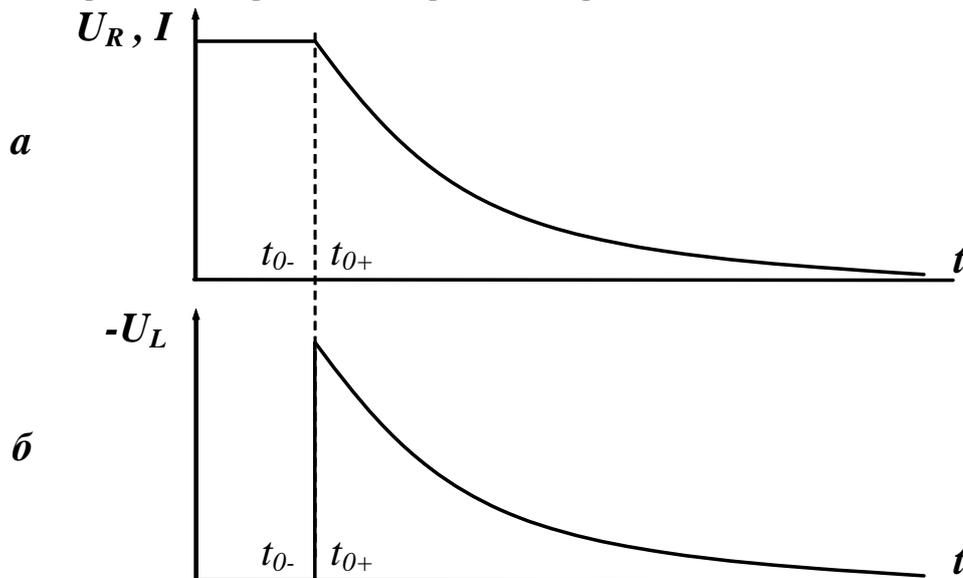


Рис. 3.3.

Операторный метод анализа переходных процессов

Решение дифференциальных уравнений, как правило, осуществляется путем их алгебраизации тем или иным методом.

В классическом методе результатом алгебраизации дифференциального уравнения является характеристическое уравнение, которое является как бы схемой цепи, представленной в алгебраической форме. Если мы имеем характеристическое уравнение, по нему можно изобразить схему цепи, и наоборот: по схеме цепи можно составить характеристическое уравнение.

Другим примером алгебраизации дифференциального уравнения может быть символический метод, где алгебраизация достигается заменой функции времени ее изображением – комплексной амплитудой.

Преобразование Лапласа, аналогично символическому методу, позволяет, путем перехода от функции времени к функции комплексной частоты p алгебраизировать дифференциальное уравнение. Подобно символическому методу решение разбивается на три этапа:

1. Переход от функции времени к функции комплексной частоты p с помощью преобразования Лапласа

$$F(p) \equiv \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt .$$

2. Решение задачи в функциях комплексной частоты, т. е. нахождение токов и напряжений в цепи как функций комплексной частоты p .

3. Обратный переход от функций комплексной частоты к функциям времени.

Процесс обратного перехода является наиболее сложным моментом решения задачи. Существует несколько способов перехода от изображения к оригиналу. Наиболее употребляемые из них:

Подгонка уравнения решения под одну из формул соответствия, которые приводятся в справочниках.

Непосредственное применение формулы обратного преобразования Лапласа с использованием теории вычетов.

Использование так называемой формулы разложения.

Осуществим в качестве примера преобразование по Лапласу уравнения последовательного контура, подключенного к источнику ЭДС:

$$E(t) = I \cdot r + L \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t I dt + U_{C0} .$$

Подвергнем преобразованию Лапласа каждый член этого уравнения:

$$\begin{aligned} 1. & \int_0^{\infty} E(t) \cdot e^{-pt} dt = E(p); \\ 2. & \int_0^{\infty} I(t) r \cdot e^{-pt} dt = r \int_0^{\infty} I(t) \cdot e^{-pt} dt = rI(p); \\ 3. & \int_0^{\infty} L \frac{dI}{dt} e^{-pt} dt = L \int_0^{\infty} \frac{dI}{dt} e^{-pt} dt = L \int_0^{\infty} e^{-pt} dI . \end{aligned} \quad (3.5)$$

Далее интегрирование производим по частям:

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} e^{-pt} dI &= I(t) e^{-pt} \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} I(t) d e^{-pt} = 0 - I(0) - \int_0^{\infty} I(t) \frac{d}{dt} e^{-pt} dt = \\ &= -I(0) + p \int_0^{\infty} I(t) e^{-pt} dt = pI(p) - I(0). \end{aligned}$$

Подставим полученный результат в (3.5):

$$\begin{aligned} L \int_0^{\infty} e^{-pt} dI &= pL \cdot I(p) - L \cdot I(0); \\ 4. & \int_0^{\infty} \left[\frac{1}{C} \int_0^t I(t) dt \right] e^{-pt} dt = \frac{1}{pC} \int_0^{\infty} \left[\int_0^t I(t) dt \right] d(e^{-pt}) \end{aligned}$$

Аналогично возьмем интеграл по частям:

$$-\frac{1}{pC} \left[\int_0^t I(t) dt \right] e^{-pt} \Big|_0^\infty + \frac{1}{pC} \int_0^\infty e^{-pt} \left[\frac{d}{dt} \int_0^t I(t) dt \right] dt =$$

$$= \frac{1}{pC} \int_0^\infty I(t) e^{-pt} dt = \frac{I(p)}{pC};$$

$$5. \int_0^\infty U_{C0} e^{-pt} dt = \frac{U_{C0}}{p};$$

Результирующее изображение дифференциального уравнения примет вид

$$E(p) = I(p) \cdot r + pL \cdot I(p) - L \cdot I(0) + \frac{I(p)}{pC} + \frac{U_{C0}}{p} =$$

$$= I(p) \cdot \left(r + pL + \frac{1}{pC} \right) - L \cdot I(0) + \frac{U_{C0}}{p}. \quad (3.6)$$

Как видно, изображение (3.6) есть алгебраическое равенство. Выражения pL и $1/pC$ есть по смыслу индуктивное и емкостное сопротивление в операторном представлении, называются они операторными сопротивлениями. Константы интегрирования $L \cdot I(0)$ и U_{C0}/p отображают начальные условия задачи, т.е. тот факт, что в момент времени t_0- в индуктивности протекал ток $I(0)$, а на емкости было напряжение U_{C0} . Знаки этих ЭДС таковы, что $L \cdot I(0)$ всегда совпадает с внешней ЭДС $E(p)$, а U_{C0}/p направлена против ЭДС $E(p)$.

Пример 2. На рис. 3.4 представлена принципиальная схема колебательного контура в операторном представлении, соответствующая уравнению (3.6).

Найдем изображение тока и напряжений колебательного контура:

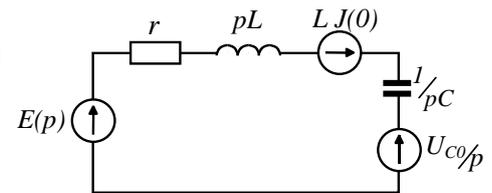


Рис. 3.4.

$$I(p) = \frac{E(p) + L \cdot I(0) - \frac{U_{C0}}{p}}{r + pL + \frac{1}{pC}}. \quad (3.7)$$

$$U_r(p) = I(p)r = r \frac{E(p) + L \cdot I(0) - \frac{U_{C0}}{p}}{r + pL + \frac{1}{pC}}. \quad (3.8)$$

$$U_L(p) = pLI(p) - LI(0) = pL \frac{E(p) + LI(0) - \frac{U_{C0}}{p}}{r + pL + \frac{1}{pC}} - LI(0). \quad (3.9)$$

$$U_C(p) = \frac{I(p)}{pC} + \frac{U_{C0}}{p} = \frac{1}{pC} \frac{E(p) + L \cdot I(0) - \frac{U_{C0}}{p}}{r + pL + \frac{1}{pC}} + \frac{U_{C0}}{p}. \quad (3.10)$$

Третий этап решения – переход от изображений к оригиналам – лучше продемонстрировать на конкретном примере.

Пример 3. На рис. 3.5 $r_1 = r_2 = 10$ Ом, $L = 160 \cdot 10^{-6}$ Гн, $C = 160 \cdot 10^{-12}$ Ф. Источник постоянной ЭДС $E = 2$ В. Рассмотрите переходный процесс в контуре при размыкании ключа K , найдите ток и напряжения, используя операторный метод.

Решение. В момент размыкания ключа в цепи имели место следующие начальные условия:

$$U_{C0} = \frac{E}{2}; \quad I_0 = \frac{E}{2r}.$$

Найдем изображение тока и напряжений контура, используя равенства (3.7) – (3.10), подставив в них начальные условия:

$$I(p) = \frac{\frac{E}{p} + L \cdot I(0) - \frac{U_{C0}}{p}}{r + pL + \frac{1}{pC}} = \frac{\frac{E}{p} + L \frac{E}{2r} - \frac{E}{2p}}{\frac{L}{p} \left(p^2 + p \frac{r}{L} + \frac{1}{LC} \right)} = \frac{\frac{E}{2L} \left(1 + p \frac{L}{r} \right)}{p^2 + p \frac{r}{L} + \omega_0^2};$$

$$U_r(p) = \frac{\frac{Er}{2L} \left(1 + p \frac{L}{r} \right)}{p^2 + p \frac{r}{L} + \omega_0^2};$$

$$U_L(p) = pL \frac{\frac{E}{2L} \left(1 + p \frac{L}{r} \right)}{p^2 + p \frac{r}{L} + \omega_0^2} - L \cdot I(0) = \frac{p \frac{E}{2} \left(1 + p \frac{L}{r} \right)}{p^2 + p \frac{r}{L} + \omega_0^2} - L \frac{E}{2r};$$

$$U_C(p) = \frac{1}{pC} \frac{\frac{E}{2L} \left(1 + p \frac{L}{r} \right)}{p^2 + p \frac{r}{L} + \omega_0^2} + \frac{U_{C0}}{p} = \frac{\omega_0^2 \frac{E}{2} \left(1 + p \frac{L}{r} \right)}{p^2 + p \frac{r}{L} + \omega_0^2} + \frac{E}{2p}.$$

Перейдем от изображений к оригиналам, используя формулу разложения:

$$f(t) = \sum \frac{N(p_k)}{M'(p_k)} e^{p_k t}, \text{ где } p_k \text{ есть корни многочлена } M(p):$$

$$p^2 + p \frac{r}{L} + \omega_0^2 = 0;$$

$$\begin{aligned} p_k &= -\frac{r}{2L} \pm \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \omega_0^2} = -\frac{r}{2L} \pm \omega_0 \sqrt{\frac{r^2 C}{4L} - 1} = \\ &= -\frac{r}{2L} \pm \omega_0 \sqrt{\frac{r^2}{4\rho^2} - 1} \approx -\frac{r}{2L} \pm j\omega_0. \end{aligned}$$

Здесь сделано приближение, учитывающее, что $\frac{r^2}{4\rho^2} = \frac{10^2}{4 \cdot 10^6} \ll 1$:

$$p_1 = -\frac{r}{2L} + j\omega_0; \quad p_2 = -\frac{r}{2L} - j\omega_0;$$

$$M'(p) = 2p + \frac{r}{L};$$

$$M'(p_1) = 2 \left(-\frac{r}{2L} + j\omega_0 \right) + \frac{r}{L} = j2\omega_0;$$

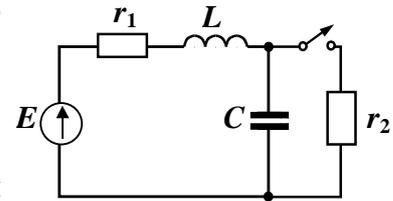


Рис. 3.5

$$M'(p_2) = 2 \left(-\frac{r}{2L} - j\omega_0 \right) + \frac{r}{L} = -j2\omega_0.$$

Оригинал тока:

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{E \left(1 + \frac{p_1 L}{r} \right)}{j2\omega_0} e^{p_1 t} - \frac{E \left(1 + \frac{p_2 L}{r} \right)}{j2\omega_0} e^{p_2 t} = \\ &= \frac{E}{j4\omega_0 L} \left(1 + \frac{L}{r} \left(-\frac{r}{2L} + j\omega_0 \right) \right) e^{\left(-\frac{r}{2L} + j\omega_0 \right) t} - \\ &\quad - \frac{E}{j4\omega_0 L} \left(1 + \frac{L}{r} \left(-\frac{r}{2L} - j\omega_0 \right) \right) e^{\left(-\frac{r}{2L} - j\omega_0 \right) t} = \\ &= \frac{E}{j4\rho} e^{-\frac{rt}{2L}} \left[\left(\frac{1}{2} + jQ \right) \cdot e^{j\omega_0 t} - \left(\frac{1}{2} - jQ \right) \cdot e^{-j\omega_0 t} \right]. \end{aligned}$$

В полученном выражении можно сделать еще одно приближение, если учесть, что $Q = 100 \gg 1/2$:

$$I(t) \approx \frac{jEQ}{j4\rho} e^{-\frac{rt}{2L}} \left(e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t} \right) = \frac{E}{2r} e^{-\frac{rt}{2L}} \cos \omega_0 t.$$

Оригинал напряжения на резисторе r :

$$U_r(t) = I(t) \cdot r = \frac{E}{2} e^{-\frac{rt}{2L}} \cos \omega_0 t.$$

Оригинал напряжения на индуктивности проще получить, продифференцировав выражение оригинала тока. Опуская подробности, приведем ответ:

$$U_L(t) = L \frac{dI}{dt} = -\frac{E}{2} Q e^{\frac{rt}{2L}} \sin \omega_0 t = -100 e^{\frac{rt}{2L}} \sin \omega_0 t.$$

Оригинал напряжения на емкости можно найти из уравнения Кирхгофа:

$$E = U_r + U_L + U_C, \text{ откуда}$$

$$\begin{aligned} U_C &= E - U_r - U_L = E - \frac{E}{2} e^{-\frac{rt}{2L}} \cos \omega_0 t + \frac{E}{2} Q e^{\frac{rt}{2L}} \sin \omega_0 t \approx \\ &\approx E + \frac{E}{2} Q e^{\frac{rt}{2L}} \sin \omega_0 t = 2 + 100 \frac{E}{2} Q e^{\frac{rt}{2L}} \sin \omega_0 t. \end{aligned}$$

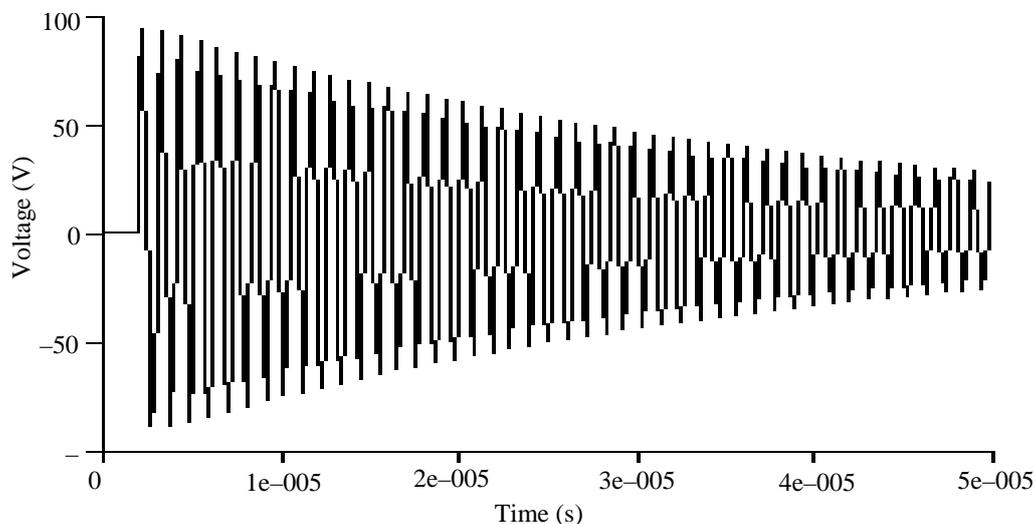
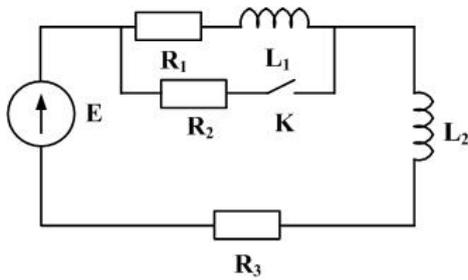


Рис. 3.6.

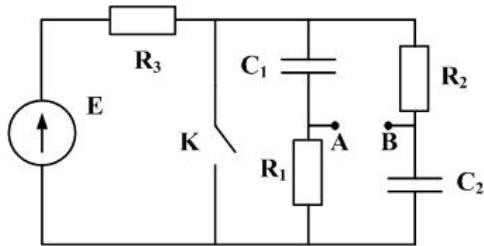
На рис. 3.6 в качестве примера переходного процесса изображен график напряжения на конденсаторе C .

Задачи для самостоятельного решения.



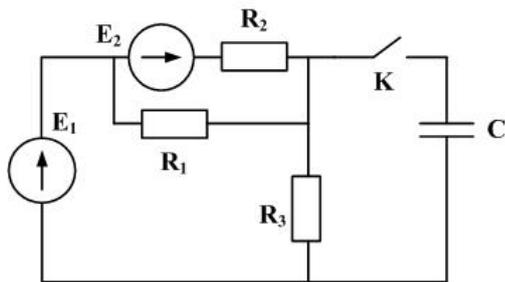
Задача № 3.1

Условие: Определить начальные (в момент замыкания ключа K) напряжения на индуктивностях L_1 и L_2 .



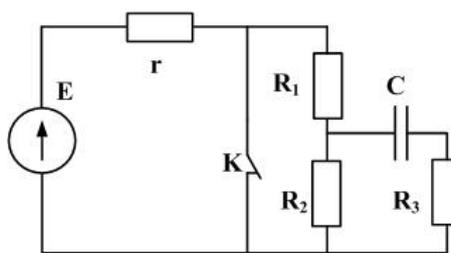
Задача № 3.2

Условие: Определить вид переходного процесса $U_{AB}(t)$ при замыкании ключа K .



Задача № 3.3

Условие: Определить зависимость от времени напряжения на конденсаторе после замыкания ключа K .



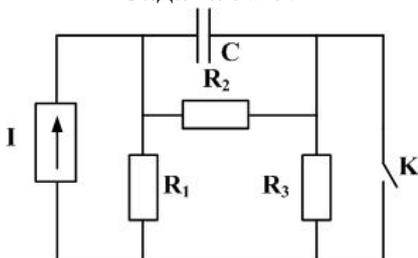
Задача № 3.4

Дано: r, C, E, R_1, R_2, R_3 .

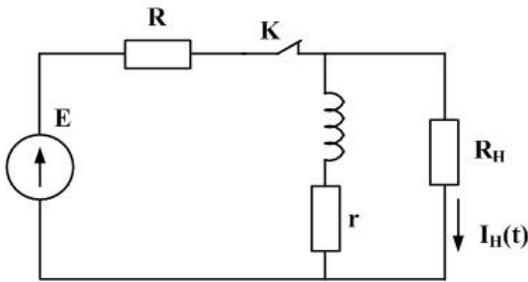
Найти: $U_c(t)$

Условие: Определить зависимость от времени напряжения на конденсаторе $U_c(t)$ после размыкания ключа K .

Задача № 3.5



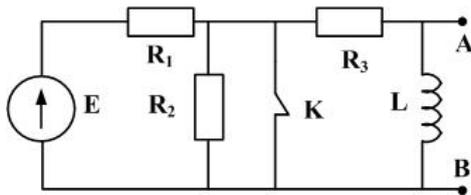
Условие: Найти зависимость от времени напряжения на конденсаторе $U_c(t)$ после замыкания ключа K .



Задача № 3.6

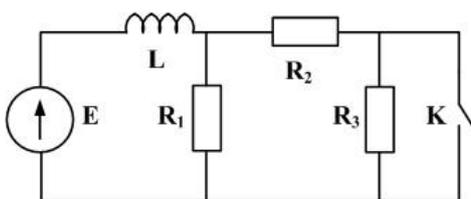
Дано: r, L, E, R, R_H .

Условие: Определить зависимость от времени тока нагрузки $I_H(t)$ после размыкания ключа K .



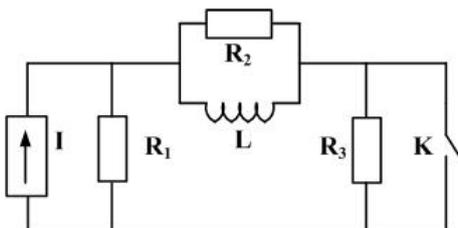
Задача № 3.7

Условие: Определить вид переходного процесса $U_{AB}(t)$ при размыкании ключа K .



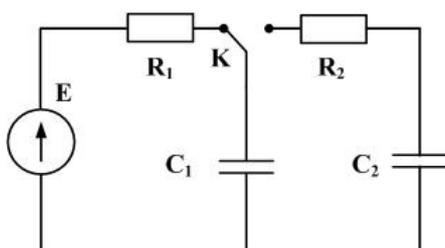
Задача № 3.8

Условие: Определить зависимость от времени напряжения на индуктивности $U_L(t)$ после замыкания ключа K .



Задача № 3.9

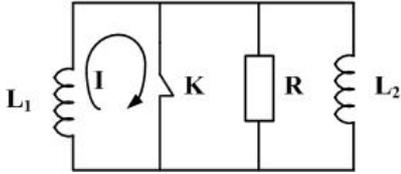
Условие: Определить зависимость от времени напряжения на индуктивности $U_L(t)$ после замыкания ключа K .



Задача № 3.10

Условие: Определить напряжение на конденсаторе C_1 и выделившуюся на резисторе R_2 тепловую энергию после коммутации ключа K и завершения переходного процесса. Начальное напряжение на емкости C_2 отсутствует.

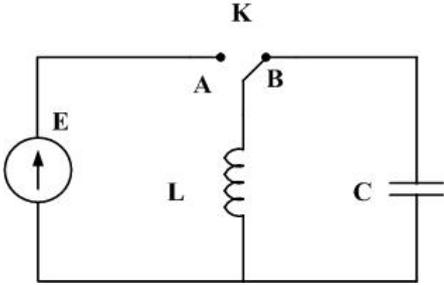
Задача № 3.11



Дано: L_1, L_2, I, R .

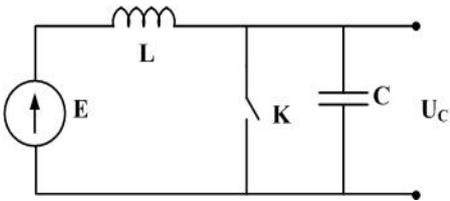
Условие: До коммутации в цепи индуктивности L_1 течет ток I (ток в L_2 отсутствует). Определить, какая энергия выделится в резисторе R после размыкания ключа K и завершения переходного процесса.

Задача № 3.12



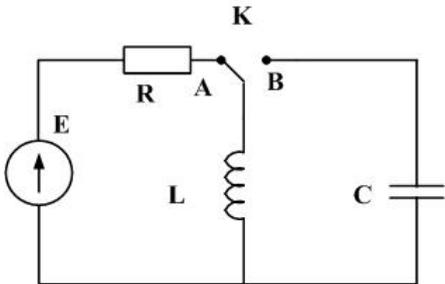
Условие: Ключ K переводится на время τ в положение A и затем возвращается в B . Определить амплитуду колебаний напряжения, возбуждаемых при этом в LC-контуре.

Задача № 3.13



Условие: Ключ K замыкается на время τ . Определить $U_c(t)$ при $t > \tau$.

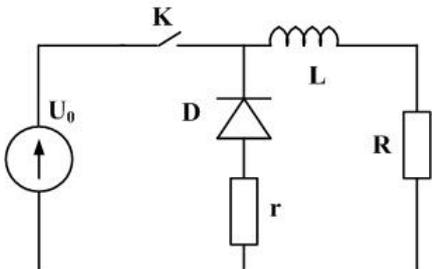
Задача № 3.14



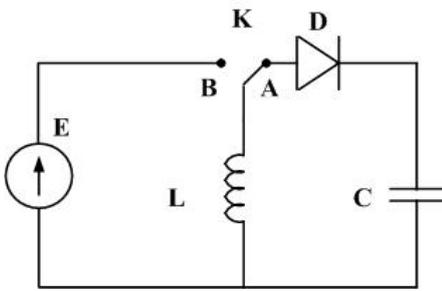
Дано: C, L, E, R, τ

Условие: Ключ K переводится на время τ в положение B и затем возвращается в A . Определить заряд Q_c , оставшийся на емкости.

Задача № 3.15



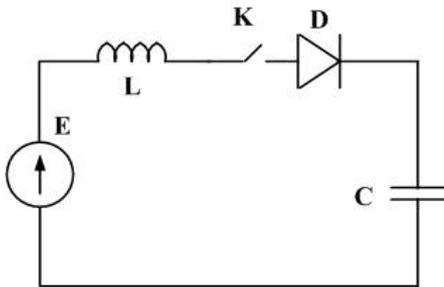
Условие: Ключ K замыкается и через время τ размыкается. Определить напряжение на нагрузке R в зависимости от времени после размыкания. Считать диод D идеальным.

**Задача № 3.16**

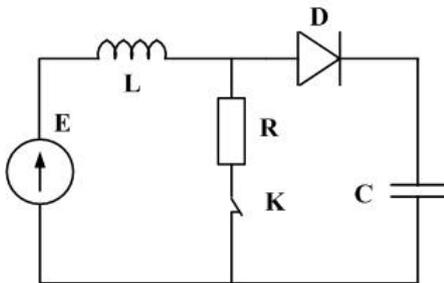
Условие: Ключ К переводится на время τ в положение В и затем возвращается в А. Определить напряжение на конденсаторе С после завершения переходного процесса. Считать диод D идеальным.

Полагать:

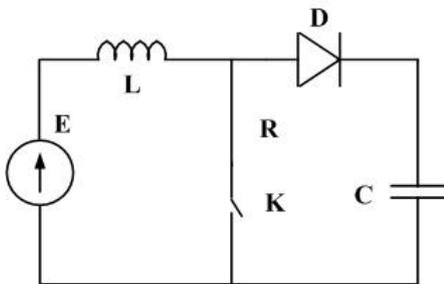
- А) До коммутации напряжения на емкости нет;
 Б) До коммутации конденсатор заряжен до напряжения U_0 .

**Задача № 3.17**

Условие: Определить напряжения и токи в схеме после завершения переходного процесса после замыкания ключа К. Считать диод D идеальным.

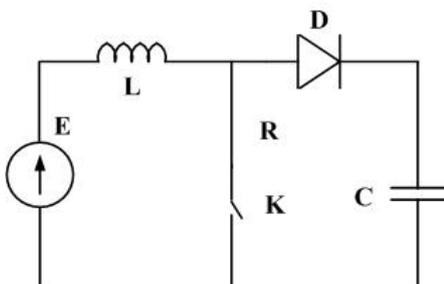
**Задача № 3.18**

Условие: Определить напряжения на конденсаторе С после размыкания ключа К и завершения переходного процесса. Считать диод D идеальным.

**Задача № 3.19**

Дано: С, L, E, τ

Условие: Ключ К замыкается на время τ . Определить, до какого напряжения зарядится емкость С после размыкания ключа и завершения переходного процесса. Считать диод D идеальным.

**Задача № 3.20**

Дано: С, L, E, τ

Условие: Ключ К замыкается на время τ . Определить, какую энергию отдаст источник в цепь:

- А) В течение указанного интервала τ ;
 Б) После размыкания ключа.

Считать диод D идеальным.