Лекция 7. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПЯХ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

План

1. Переходные процессы в *RC*-цепях первого порядка.
2. Переходные процессы в *RL*-цепях первого порядка.
3. Примеры расчета переходных процессов в цепях первого порядка.
4. Интегрирующие и дифференцирующие цепи.
5. Заключение.

1. Переходные процессы в *RC*-цепях первого порядка

Рассмотрим резистивную цепь произвольной конфигурации, к внешним зажимам которой подключен емкостный элемент (рис. 7.1, *а*).

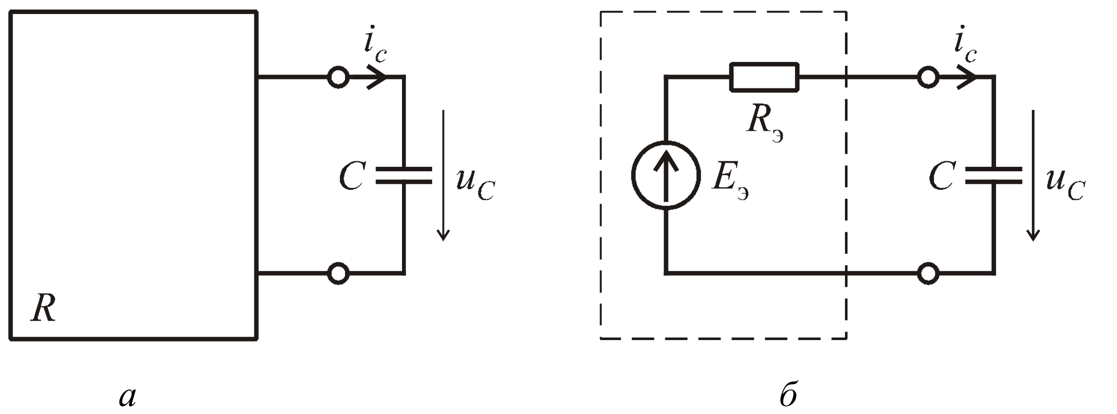


Рис. 7.1

Резистивная подсхема, изображенная на рис. 7.1, *а* в виде «черного ящика», может содержать резисторы, независимые и управляемые источники, идеальные ОУ. Необходимо определить закон изменения напряжения емкостного элемента $u_C(t)$. Зная $u_C(t)$, мы можем представить конденсатор в любой момент времени *t* источником напряжения $E = u_C(t)$ и рассчитать ток в любой ветви полученной резистивной цепи.

Заменим резистивный двухполюсник эквивалентной схемой Тевенина (рис. 7.1, *б*). ЭДС эквивалентной схемы $E_э$ равна напряжению холостого хода резистивного двухполюсника, а сопротивление $R_э$ – его входному сопротивлению. Для цепи на рис. 7.1, *б* справедливо уравнение:

$$R_э i_C + u_C = E_э.$$

Выполняя подстановку $i_C = C\dfrac{du_C}{dt}$ и решая полученное уравнение относительно $\dfrac{du_C}{dt}$, получим

$$\frac{du_C}{dt} = -\frac{1}{R_э C} u_C + \frac{1}{R_э C} E_э . \qquad (7.1)$$

Уравнение, записанное в такой форме, когда в левой части находится только первая производная, называют уравнением состояния, а $u_C(t)$ – переменной состояния. Действительно, значение $u_C(t)$ определяет состояние цепи, т. е. токи в ветвях резистивной подсхемы в любой момент времени t .

Обозначим $\tau = R_э C$. Величину τ называют *постоянной времени*. Уравнение (7.1) примет вид

$$\frac{du_C}{dt} = -\frac{1}{\tau} u_C + \frac{1}{\tau} E_э . \qquad (7.2)$$

Обозначим начальное напряжение емкостного элемента $u_C(0) = U_0$. Решение уравнения (7.2) имеет вид

$$u_C(t) = \left(U_0 - u_{уст}\right) e^{-t/\tau} + u_{уст} . \qquad (7.3)$$

Чтобы показать, что (7.3) является решением уравнения (7.2), достаточно выполнить прямую подстановку.

Напряжение $u_C(t)$ в формуле (7.3) представлено в виде суммы двух слагаемых. Первое слагаемое называют *свободной составляющей*. Закон изменения свободной составляющей напряжения $u_{св}(t)$ определяется тремя величинами: начальным состоянием $U_0 = u_C(0)$, установившимся состоянием $u_{уст}$ и постоянной времени $\tau = R_э C$. Характер переходного процесса определяется знаком постоянной времени. Если $\tau > 0$, то свободная составляющая $u_{св}(t) = \left(U_0 - u_{уст}\right) e^{-t/\tau}$ затухает с течением времени. Если постоянная времени отрицательна, то свободная составляющая неограниченно растет и цепь неустойчива.

Величина постоянной времени определяет скорость изменения свободной составляющей. Предположим, что при $t = 0$ $u_{св}(0) = 1$. Тогда при

$t=\tau$ $u_{св}(\tau)=u_{св}(0)e^{-1}=0.38$, а при $t=4\tau$ $u_{св}(4\tau)=0.02$. Таким образом, постоянная времени равна промежутку времени, за который свободная составляющая переходного тока или напряжения изменяется в e = 2.718 раза.

Как следует из уравнения (4.12), теоретически стационарный режим в цепи устанавливается спустя бесконечно большое время после коммутации, поскольку свободная составляющая никогда не обращается в нуль. На практике длительность переходного процесса принимают равной (4–5)τ. Чем больше τ, тем медленнее затухает экспоненциальная функция в (4.12) и тем дольше длится переходный процесс.

Второе слагаемое в формуле (4.12) выражает установившийся, или принужденный, режим, задаваемый источником. Его называют принужденной составляющей. Принужденная составляющая имеет форму, сходную с формой входного сигнала. Так, если входной сигнал постоянен, то и принужденная составляющая будет постоянной, а уравнение (4.12) примет вид

$$u_C(t)=(U_0-E_э)e^{-t/\tau}+E_э.$$

Уравнение (4.12) можно записать и в иной форме:

$$u_C(t)=U_0e^{-t/\tau}+u_{уст}\left(1-e^{-t/\tau}\right). \qquad (4.13)$$

Уравнение (4.13) будет содержать только первое слагаемое, если в цепи отсутствуют независимые источники. По этой причине первое слагаемое в (4.13) называют *реакцией при нулевом входном сигнале* (реакцией при нулевом входе). Если начальные условия нулевые (т. е. $u_C(0)=U_0=0$), то формула (4.13) содержит только второе слагаемое, которое называют *реакцией при нулевом начальном состоянии*.

Таким образом, реакция линейной *RC*-цепи является суммой реакций при нулевом входном сигнале и при нулевом начальном состоянии. Такое представление реакции справедливо для линейных цепей любого порядка. Это свойство является фундаментальным свойством линейных цепей и систем.

Рассмотрим теперь, как изменяются токи и напряжения в ветвях резистивной подсхемы. Для определенности будем считать, что требуется определить закон изменения тока *k*-й ветви $i_k(t)$. В соответствии с принципом наложения его можно представить в виде суммы двух составляющих. Первая составляющая определяется независимыми источниками, действующими в резистивной подсхеме. Вторая составляющая определяется напряжением емкостного элемента $u_C(t)$. Если в цепи действуют только источники постоянных напряжений и токов, то первая составляющая – постоянная величина, не зависящая от времени.

В соответствии с (4.12) вторая составляющая определяется напряжением емкостного элемента в моменты $t=0$ и $t \to \infty$, а также постоянной времени τ. Поэтому для определения закона изменения тока $i_k(t)$ необходимо знать значения этого тока при $t=0_+$, $t \to \infty$ и постоянную времени τ.

Рассмотрим порядок расчета переходных процессов в *RC*-цепях первого порядка. Считаем, что переходный процесс вызван замыканием или размыканием идеального ключа в момент $t=0$ и нужно определить ток *k*-й ветви.

1. Анализируем цепь в момент, предшествующий коммутации (т. е. при $t=0_-$), и определяем напряжение емкостного элемента $u_C(0)$.

2. Заменяем емкостный элемент источником напряжения $E=u_C(0)$ (рис. 4.8, *а*). Анализируя полученную резистивную схему замещения, находим начальные значения искомых токов и напряжений $i_k(0_+), u_k(0_+)$.

3. Рассчитываем установившиеся значения искомых токов и напряжений, анализируя цепь в момент времени $t \to \infty$. Если в цепи действуют источники постоянного напряжения и тока, зажимы, к которым подключен емкостный элемент, размыкаем (рис. 4.8, *б*), затем анализируем полученную резистивную схему замещения.

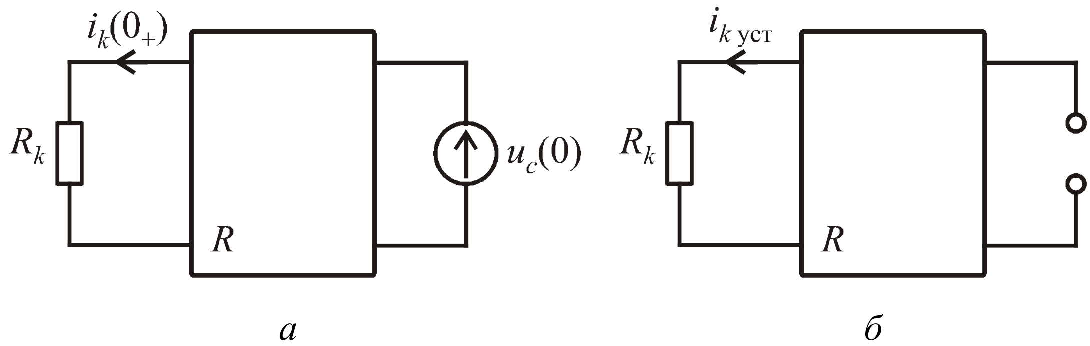


Рис. 4.8

4. Определяем входное сопротивление резистивной цепи со стороны зажимов, к которым подключен емкостный элемент. Рассчитываем постоянную времени цепи по формуле

$$\tau = R_{вх} C .$$

5. Решение записываем в виде

$$i_k(t) = \left[i_k(0_+) - i_{k\,уст} \right] e^{-t/\tau} + i_{уст} . \qquad (4.14)$$

Важно помнить, что все переходные токи и напряжения имеют одинаковую постоянную времени.

7.2. Переходные процессы в *RL*-цепях первого порядка

Рассмотрим разветвленную резистивную цепь, к внешним зажимам которой подключен индуктивный элемент (рис. 4.17, *а*).

Примем, что начальный ток индуктивного элемента $i_L(0) = I_0$. Представим резистивный двухполюсник эквивалентной схемой Нортона (рис. 4.17, *б*).

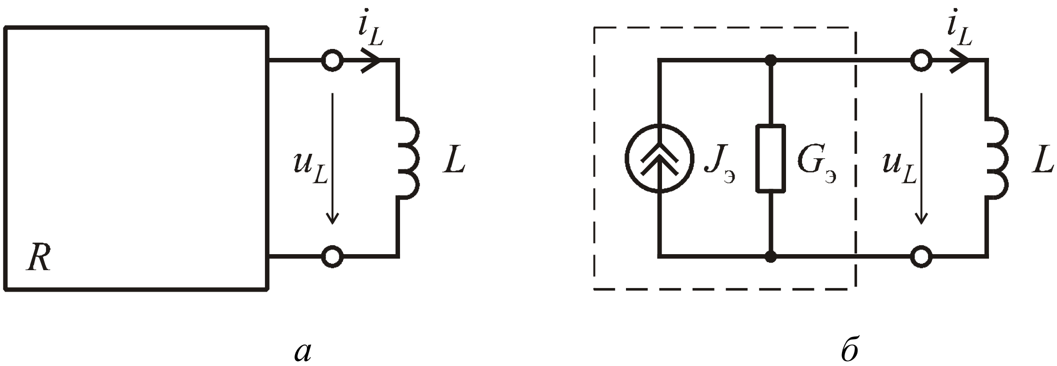


Рис. 4.17

Параметры эквивалентного резистивного двухполюсника $J_э = I_{кз}$, $G_э = 1/R_{вх}$.

Уравнение по первому закону Кирхгофа для этой цепи:

$$-J_э + G_э u_L + i_L = 0.$$

Учитывая, что $u_L = L\dfrac{di_L}{dt}$, запишем уравнение состояния:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{R_э}{L} i_L + \frac{R_э}{L} J_э. \qquad (4.15)$$

В данном случае переменной состояния является ток индуктивного элемента i_L. Обозначим $\tau = L / R_э$, тогда уравнение (4.15) примет вид

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{\tau} i_L + \frac{1}{\tau} J_э. \qquad (4.16)$$

Как и в случае *RC*-цепи, τ называют *постоянной времени*.

Решение уравнения (4.16) можно представить в следующем виде:

$$i_L(t)=\left(I_0-i_{\text{уст}}\right)e^{-t/\tau}+i_{\text{уст}} \tag{4.17}$$

В равенстве (4.17) первое слагаемое представляет свободную составляющую переходного тока $i_L(t)$, а второе – установившуюся, или принужденную, составляющую. Значение свободной составляющей определяется начальным и установившимся значениями тока индуктивного элемента, а также постоянной времени τ.

Формулу (4.17) можно записать в ином виде

$$i_L(t)=I_0e^{-t/\tau}+\left(1-e^{-t/\tau}\right)i_{\text{уст}}. \tag{4.18}$$

Первое слагаемое в выражении (4.18) является реакцией при нулевом входном сигнале (реакция при нулевом входе). Второе слагаемое представляет реакцию при нулевом начальном состоянии.

Рассмотрим, как изменяются токи и напряжения в ветвях резистивной подсхемы. Считаем, что требуется определить закон изменения тока *k*-й ветви $i_k(t)$.

В соответствии с принципом наложения его можно представить в виде суммы двух составляющих. Первая составляющая определяется независимыми источниками, действующими в резистивной подсхеме. Вторая составляющая определяется током индуктивного элемента $i_L(t)$. Если в цепи действуют только источники постоянных напряжений и токов, то первая составляющая – постоянная величина, не зависящая от времени. В соответствии с (4.17) вторая составляющая зависит от тока индуктивного элемента в моменты $t=0$ и $t\to\infty$, а также от постоянной времени τ. Поэтому для определения закона изменения тока $i_k(t)$ необходимо знать значения этого тока при $t=0_+$, $t\to\infty$ и постоянную времени τ. Как и в *RC*-цепи, постоянная времени одинакова для всех переходных токов и напряжений.

Рассмотрим порядок расчета переходных процессов в *RL*-цепях первого порядка. Считаем, что в цепи действуют источники постоянных напряжений и токов. Переходный процесс вызван замыканием или размыканием идеального ключа в момент $t=0$.

1. Анализируем цепь в момент, предшествующий коммутации (при $t=0_-$), и определяем ток индуктивного элемента $i_L(0)$.

2. Заменяем индуктивный элемент источником тока $i_L(0)$. Анализируя полученную схему замещения, определим начальные значения искомых напряжений или токов $u_k(0_+), i_k(0_+)$.

3. Замыкаем накоротко зажимы, к которым подключен индуктивный элемент. Определяем установившиеся значения интересующих нас токов и напряжений $i_{\text{уст}}$, $u_{\text{уст}}$.

4. Определяем входное сопротивление резистивной цепи со стороны зажимов, к которым подключен индуктивный элемент. Рассчитываем постоянную времени цепи по формуле $\tau = L / R_э$ или $\tau = LG_э$.

5. Записываем решение в виде

$$i_k(t) = \left(i_k(0_+) - i_{\text{уст}}\right)e^{-t/\tau} + i_{k\,\text{уст}}. \tag{4.19}$$

7.3. Примеры расчета переходных процессов в цепях первого порядка

Рассмотрим примеры расчета переходных процессов в *RC*-цепях первого порядка. Считаем, что в цепи действуют источники постоянных напряжений и токов. Переходный процесс вызван замыканием или размыканием идеального ключа в момент $t = 0$.

Пример 7.1. Ключ в цепи на рис. 4.9 замыкается. Рассчитать ток i_1 после коммутации, если $R_1 = R_2 = R_3 = 100$ Ом, $C = 1$ мкФ, $E = 60$ В.

Решение. Определим независимые начальные условия. Для этого рассчитаем режим в цепи в момент, предшествующий коммутации, т. е. при $t = 0_-$. Поскольку в цепи действует источник постоянного напряжения, емкостный элемент представим разрывом. Эквивалентная схема для момента $t = 0_-$ показана на рис. 4.10, *а*.

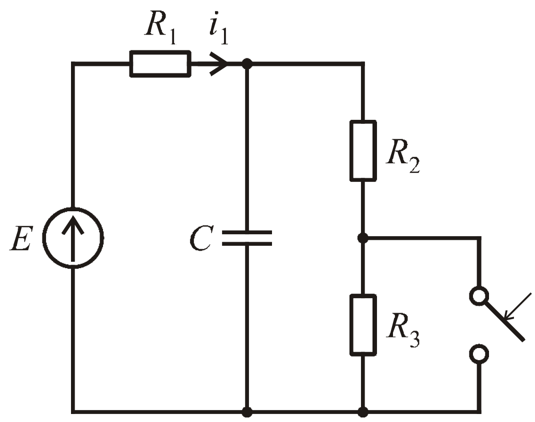


Рис. 4.9

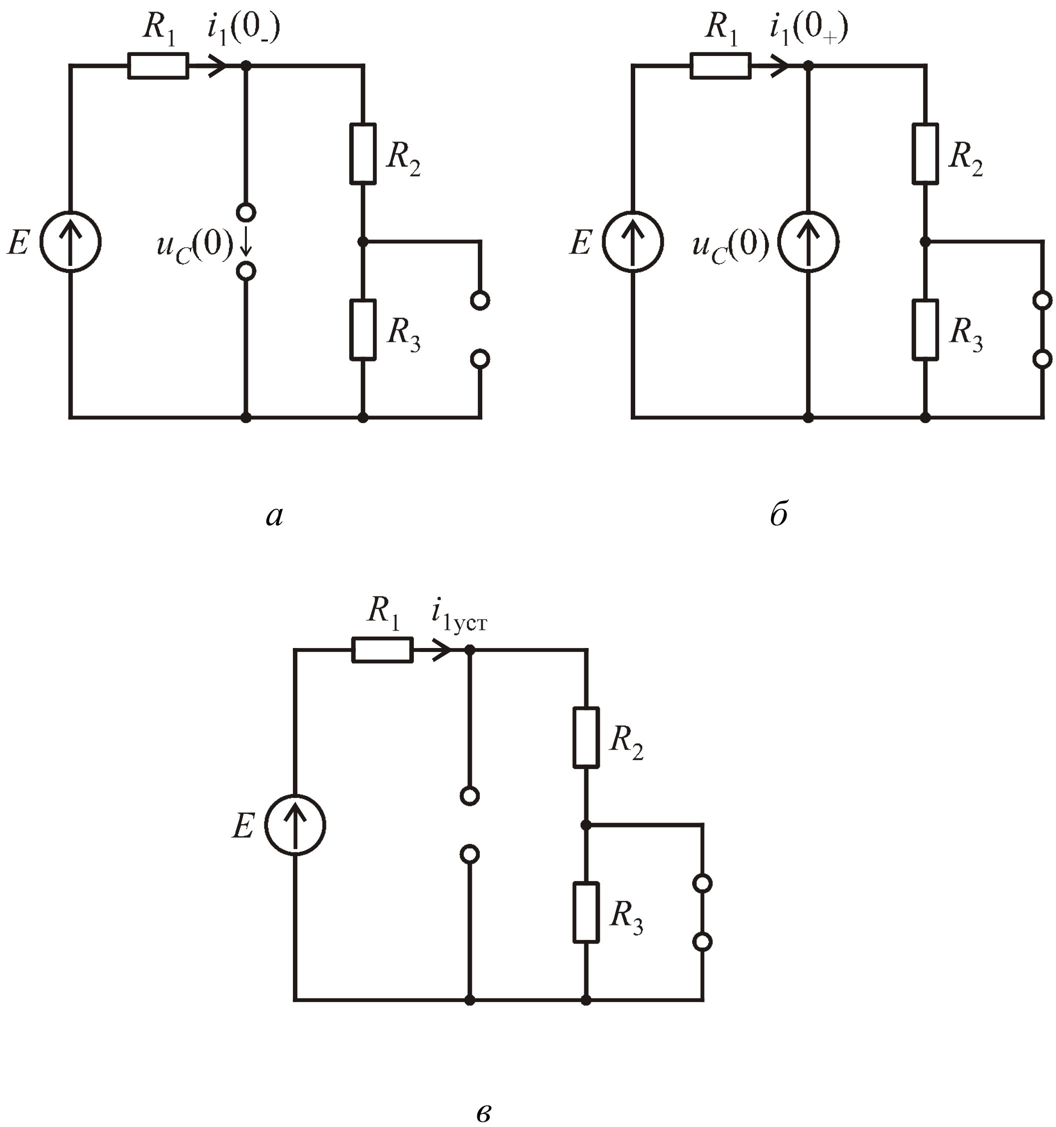


Рис. 4.10

Анализируя схему на рис. 4.10, *а*, найдем, что $i_1(0_-) = 200$ мА, $u_C(0) = 40$ В.

Рассчитаем начальное значение тока i_1 после коммутации при $t = 0_+$. Эквивалентная схема, соответствующая этому моменту времени, изображена на рис. 4.10, *б*. Емкостный элемент заменен источником напряжения. Из этой схемы следует, что

$$i_1(0_+) = \frac{E - u_C(0)}{R_1} = \frac{60 - 40}{100} = 200 \text{ мА}.$$

Определим установившееся значение искомого тока. Схема замещения, соответствующая установившемуся режиму, показана на рис. 4.10, *в*.

Установившееся значение тока

$$i_{1уст} = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{60}{100+100} = 300 \text{ мА}.$$

Определим входное сопротивление схемы относительно зажимов, к которым подключен емкостный элемент (рис. 4.10, *в*). Исключая источник напряжения, получим

$$R_{вх} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{100 \cdot 100}{100+100} = 50 \text{ Ом}.$$

Постоянная времени цепи $\tau = R_{вх} C = 50 \cdot 10^{-6} = 0.5 \cdot 10^{-4}$ с.

В соответствии с (4.14) закон изменения тока

$$i_1(t) = \left[i_1(0_+) - i_{1уст}\right] e^{-t/\tau} + i_{1уст} = -100 e^{-2 \cdot 10^4 t} + 300.$$

График изменения тока $i_1(t)$ показан на рис. 4.11.

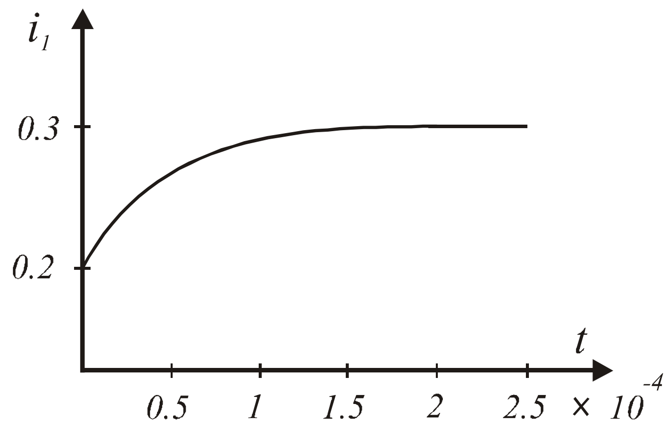


Рис. 4.11

Пример 7.2. Рассчитать напряжение на выходе схемы, показанной на рис. 4.12, при включении на входе источника постоянного напряжения. Операционный усилитель идеальный.

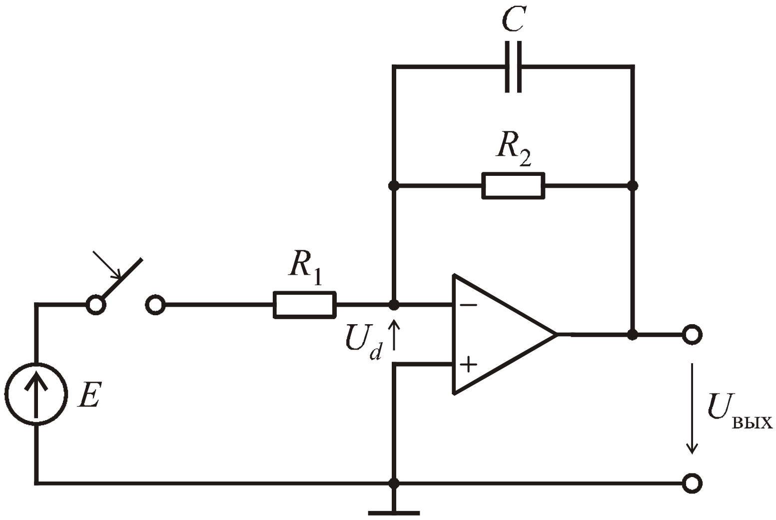


Рис. 4.12

Решение. Поскольку сначала ключ был разомкнут, начальные условия в цепи нулевые: $u_C(0)=0$.

Докоммутационный режим рассчитывать не нужно, поэтому перейдем сразу к второму шагу. Схема замещения для момента времени $t=0_+$ изображена на рис. 4.13, *а*.

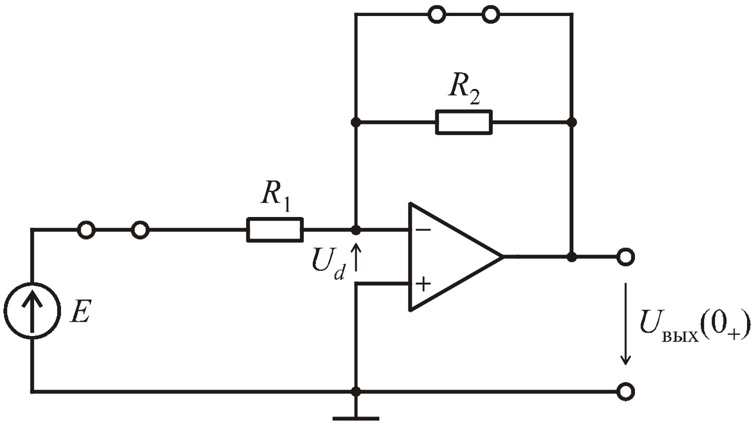
Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для контура, включающего вход ОУ, емкостный элемент и выход схемы:

$$u_d + u_{\text{вых}}(0_+) = 0.$$

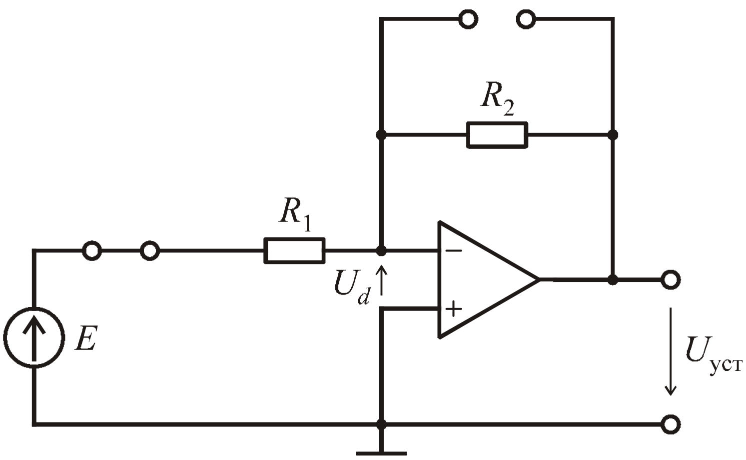
Полагая в соответствии с правилом виртуального короткого замыкания $u_d = 0$ найдем, что $u_{\text{вых}}(0_+) = 0$.

Определим установившееся значение выходного напряжения. Поскольку в цепи действует источник постоянного напряжения, емкостный элемент в установившемся режиме заменим разрывом (рис. 4.13, *б*). Полученная схема замещения представляет инвертирующий усилитель, напряжение на выходе которого $u_{\text{вых}} = -\dfrac{R_2}{R_1}E$.

Рассчитаем входное сопротивление резистивной части цепи относительно зажимов, к которым подключен емкостный элемент. Найдем его как отношение напряжения холостого хода к току короткого замыкания: $R_{\text{вх}} = U_{\text{хх}} / I_{\text{кз}}$.



а



б

Рис. 4.13

Анализируя резистивную схему на рис. 4.13, *б*, найдем, что $U_{\text{хх}} = ER_2 / R_1$, а ток короткого замыкания $I_{\text{кз}} = E / R_1$. Таким образом, $R_{\text{вх}} = R_2$. Постоянная времени цепи $\tau = R_{\text{вх}} C = R_2 C$.

Итак, напряжение на выходе интегратора изменяется по закону

$$u_{\text{вых}}(t) = \frac{R_2}{R_1} E e^{-t/\tau} - \frac{R_2}{R_1} E.$$

График напряжения $u_{\text{вых}}(t)$ для случая $R_1 = R_2 = 1\,\text{кОм}$, $C = 0.1\,\text{мкФ}$, $E = 1\,\text{В}$ показан на рис. 4.14.

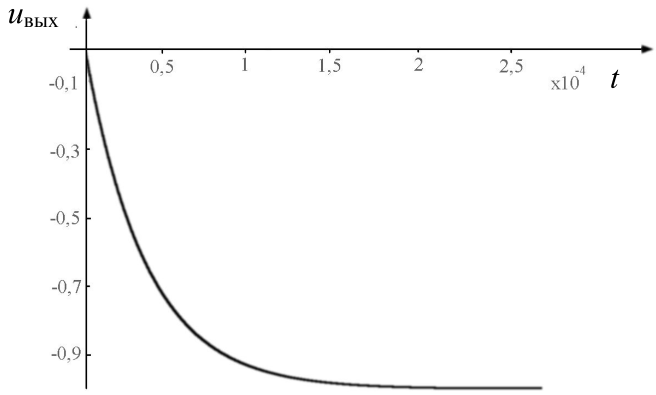


Рис. 4.14

а *б*

.

Пример 7.3. Рассчитать ток i_1 в цепи на рис. 4.18 после замыкания ключа. $R_1 = R_2 = R_3 = 100$ Ом, $L = 1$ Гн, $E = 60$ В.

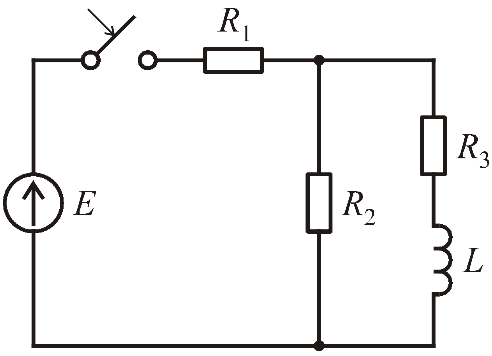
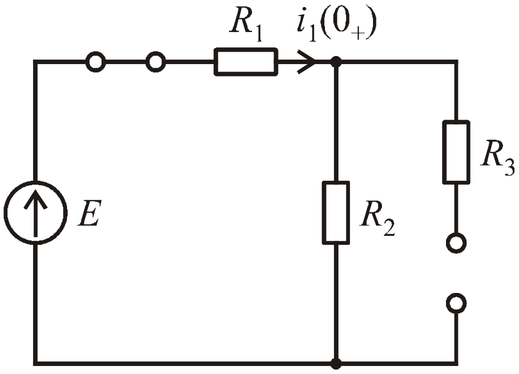


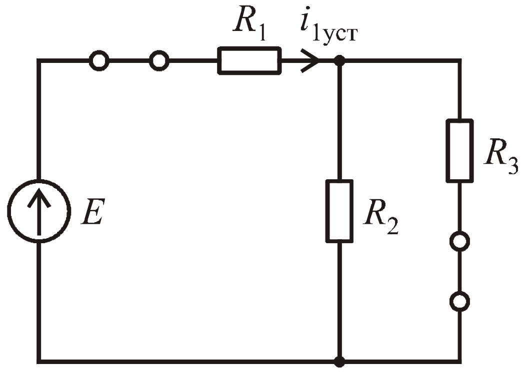
Рис. 4.18

Решение. Поскольку сначала ключ был разомкнут, начальные условия в цепи нулевые: $i_L(0) = 0$, $i_1(0_-) = 0$. Рассчитаем ток i_1 в начальный момент после коммутации. Схема замещения, соответствующая моменту $t = 0_+$, показана на рис. 4.19, *а*. Поскольку начальные условия нулевые, индуктивный элемент заменен разрывом. Из схемы на рис. 4.19, *а* следует, что

$$i_1(0_+) = \frac{E}{R_1 + R_3} = \frac{60}{100 + 100} = 0.3 \text{ А}.$$



а



б

Рис. 4.19

Определим установившееся значение тока i_1. Схема замещения, соответствующая моменту времени $t \to \infty$, показана на рис. 4.19, *б*. Установившееся значение тока

$$i_{1\text{уст}} = \frac{E}{R_1 + \dfrac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{60}{100 + 50} = 0.4\,\text{А}.$$

Входное сопротивление цепи относительно зажимов, к которым подключен индуктивный элемент

$$R_{\text{вх}} = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} 100 + 50 = 150\ \text{Ом}.$$

Рассчитаем постоянную времени:

$$\tau = \frac{L}{R_{\text{вх}}} = \frac{1}{150} = 0.0067\ \text{с}.$$

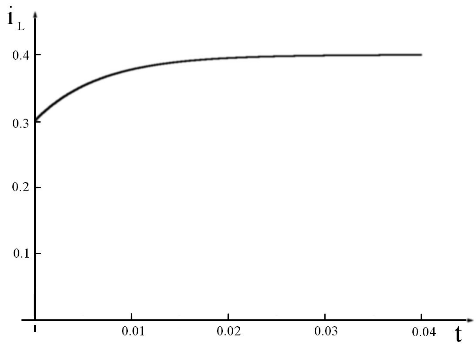


Рис. 4.20

Таким образом, ток i_1 изменяется по закону $i_1(t) = -0.1 \cdot e^{-150t} + 0.4$.

Кривая тока $i_1(t)$ показана на рис. 4.20.

Пример 7.4. Для быстрого гашения тока в обмотке возбуждения электрической машины ее отключают от источника и присоединяют без разрыва цепи к резистору с сопротивлением R_2 (рис. 4.21). Рассчитать ток $i(t)$ и напряжение на обмотке $u(t)$. Индуктивность обмотки $L = 1\text{Гн}$, сопротивление $R_1 = 20\ \text{Ом}$. Сопротивление резистора $R_2 = 30\text{Ом}$. Напряжение источника $E = 40\ \text{В}$.

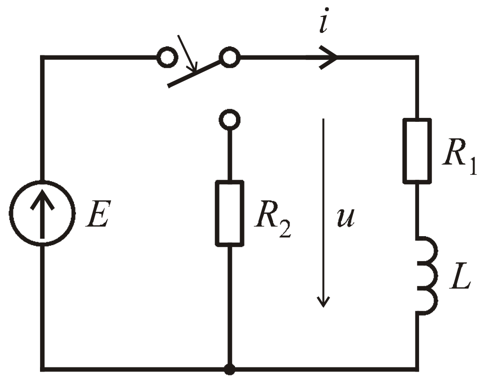


Рис. 4.21

Решение. Ток в обмотке до коммутации

$$i_L(0_-)=I_0=\frac{E}{R_1}=\frac{40}{20}=2\text{ А}.$$

По закону коммутации $i_L(0_+)=i_L(0_-)=I_0$.

Поскольку обмотка отключается от источника ЭДС, установившееся значение тока $i_{L\text{уст}}=i_L(\infty)=0$.

Постоянная времени цепи

$$\tau=\frac{L}{R_{\text{вх}}}=\frac{L}{R_1+R_2}=\frac{1}{20+30}=0.02\text{ с}.$$

Закон изменения тока в обмотке после отключения от источника:

$$i_L(t)=I_0e^{-t/\tau}=2e^{-50t}.$$

Напряжение на обмотке

$$u(t)=-R_2I_0e^{-t/\tau}=-60e^{-50t}.$$

7.4. Интегрирующие и дифференцирующие цепи

Интегрирующими называют цепи, напряжение на выходе которых пропорционально интегралу входного напряжения. Соответственно напряжение на выходе дифференцирующей цепи пропорционально производной входного напряжения. Такие цепи находят широкое применение в электронике, системах автоматического

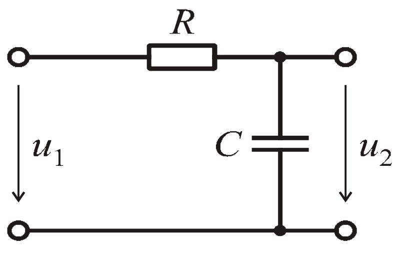


Рис. 4.22

управления, при аналого-цифровом преобразовании и генерации периодических колебаний.

В качестве простейших интегрирующих и дифференцирующих устройств можно использовать последовательную *RC*-цепь. Рассмотрим схему, показанную на рис. 4.22. Напряжение на резисторе *R* равно $u_1 - u_2$. Следовательно, ток в цепи

$$i = C\frac{du_C}{dt} = \frac{u_1 - u_2}{R}.$$

Выходное напряжение

$$u_2(t) = \frac{1}{C}\int i(t)dt.$$

Если обеспечить выполнение условия $u_2 \langle\langle u_1$ за счет большого значения постоянной времени $\tau = RC$, то получим

$$u_2(t) \approx \frac{1}{RC}\int_0^t u_1(t)dt.$$

Итак, интегрирование входного сигнала возможно при выполнении условия $u_2 \langle\langle u_1$. Для этого постоянную времени интегратора следует выбрать максимально возможной.

Схема инвертирующего интегратора на операционном усилителе показана на рис. 4.23, *а*.

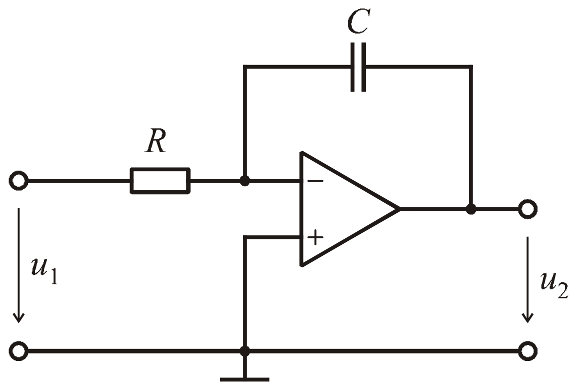
Напряжение на выходе равно напряжению цепи обратной связи:

$$u_2(t) = -u_C(t) = -\frac{1}{C}\int i_C dt.$$

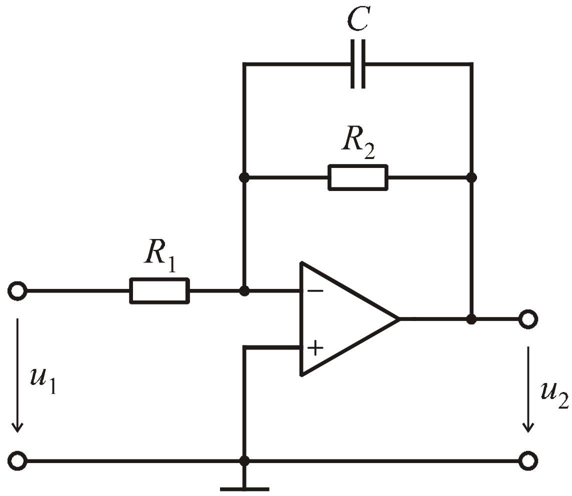
Учитывая, что в соответствии с правилом виртуального короткого замыкания $u_d = 0$, получим

$$u_2(t) = -\frac{1}{RC}\int u_1 dt.$$

Таким образом, напряжение на выходе равно интегралу входного напряжения, т. е. рассматриваемая цепь является инвертирующим интегратором.



а



б

Рис. 4.23

Недостатком интегратора, показанного на рис. 4.23, *а*, является дрейф выходного напряжения, обусловленный неидеальностью операционного усилителя. Кроме того, последний перейдет в насыщение, когда напряжение емкостного элемента достигнет напряжения насыщения ОУ. Эти нежелательные явления можно ослабить, если параллельно конденсатору подключить резистор R_2 с большим сопротивлением (рис. 4.23, *б*).

При включении на входе источника постоянного напряжения в схеме на рис. 4.23, *б* выходное напряжение изменяется по закону

$$u_2(t) = -\frac{R_2}{R_1}\left(1 - e^{-t/\tau}\right)E,$$

где $\tau = R_2 C$ – постоянная времени цепи. При $t \langle\langle \tau$ закон изменения $u_2(t)$ близок к линейному, т. е. схема выполняет интегрирование входного сигнала.

Простейшая дифференцирующая цепь показана на рис. 4.24, *а*. Выходное напряжение, снимаемое с резистора, пропорционально производной от разности входного и выходного напряжений:

$$u_2 = Ri = RC\frac{du_C}{dt} = RC\frac{d(u_1 - u_2)}{dt}.$$

Дифференцирование входного сигнала возможно при выполнении условия $u_2 << u_1$. При этом

$$u_2 \approx RC\frac{du_1}{dt}.$$

Для того чтобы обеспечить выполнение условия $u_2 << u_1$, постоянную времени следует выбирать минимально возможной.

Дифференцирующую цепь на основе операционного усилителя можно получить, поменяв местами резистор и конденсатор в схеме инвертирующего интегратора (рис. 4.24, *б*).

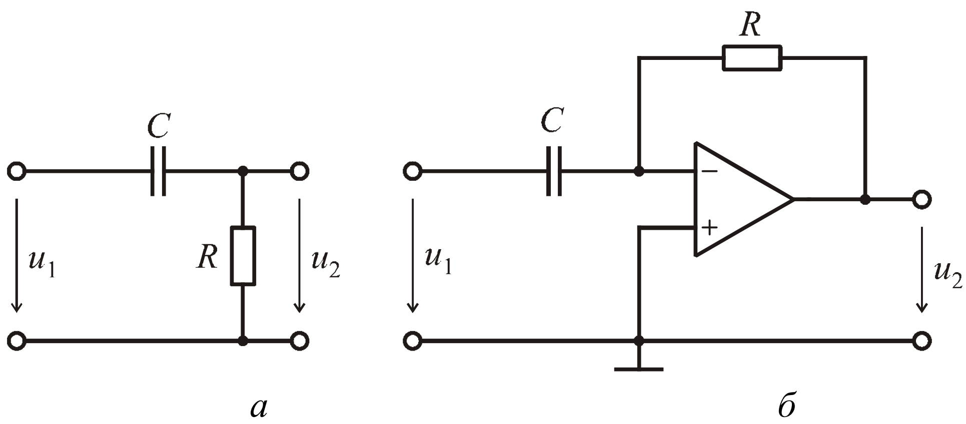


Рис. 4.24

Напряжение на выходе дифференциатора

$$u_2(t) = -RC\frac{du_1}{dt}.$$

Однако практическая реализация такой схемы сопряжена с серьезными трудностями. Из-за неидеальности ОУ на высоких частотах схема работает нестабильно. В связи с этим на высоких частотах дифференцирующие свойства схемы следует ослаблять. Для этого последовательно с конденсатором включают резистор небольшого номинала, а параллельно резистору – конденсатор $C_2 << C_1$ (рис. 4.25).

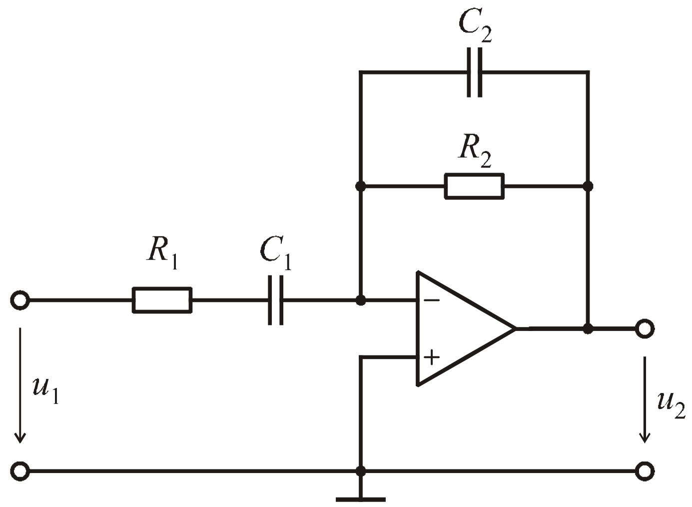


Рис. 4.25

Отметим, что первые операционные усилители использовались для моделирования операций умножения, суммирования и интегрирования в аналоговых вычислительных машинах, откуда и произошло их название.

5. Заключение

Расчет переходных процессов в цепях первого порядка выполняется в следующей последовательности.

1. Анализируем цепь в момент, предшествующий коммутации (т. е. при $t = 0-$), и определяем независимые начальные условия - напряжение $u_C(0)$ или ток $i_L(0)$.

2. Анализируем цепь при $t = 0+$ и находим начальные значения искомых токов и напряжений. Индуктивный элемент при этом заменяем источником тока $i_L(0)$, а емкостный – источником напряжения $u_C(0)$.

3. Рассчитываем установившиеся значения искомых токов и напряжений, анализируя цепь в момент времени $t \to \infty$. Если в цепи действуют источники постоянного напряжения и тока, зажимы, к которым подключен емкостный элемент, размыкаем, а зажимы индуктивного элемента закорачиваем.

4. Определяем входное сопротивление резистивной цепи со стороны зажимов, к которым подключены индуктивный или емкостный элемент.

Рассчитываем постоянную времени цепи по формуле $\tau = R_{\text{вх}} C$ (в случае RC-цепи) или $\tau = L/R_{\text{вх}}$ (для RL-цепи).

5. Решение записываем в виде

$$i_k(t) = \left[i_k(0_+) - i_{k\,\text{уст}} \right] e^{-t/\tau} + i_{\text{уст}}.$$