8 лекция

Переходные процессы,

законы коммутации,

Классический метод расчета

Переходные процессы и законы коммутации

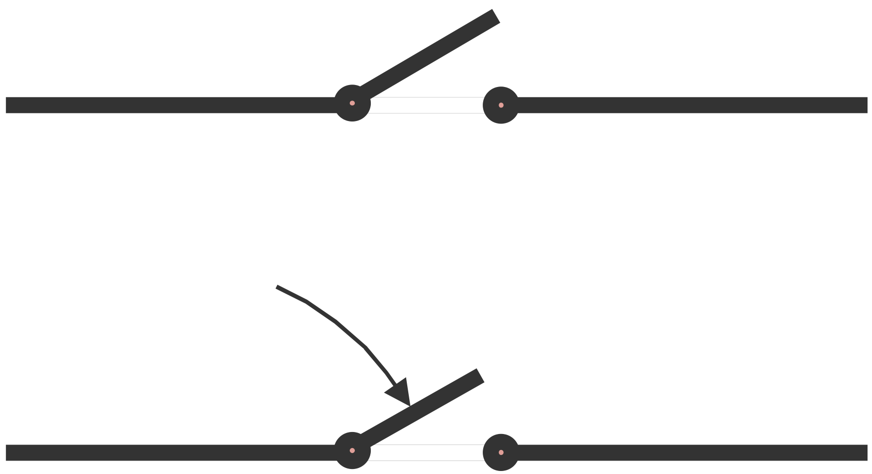
Коммутация

Под ***переходными процессами*** понимают процессы перехода от одного установившегося режима работы электрической цепи к другому, чем-либо отличающемуся от предыдущего, например величиной амплитуды, фазы, частоты или значениями параметров схемы.

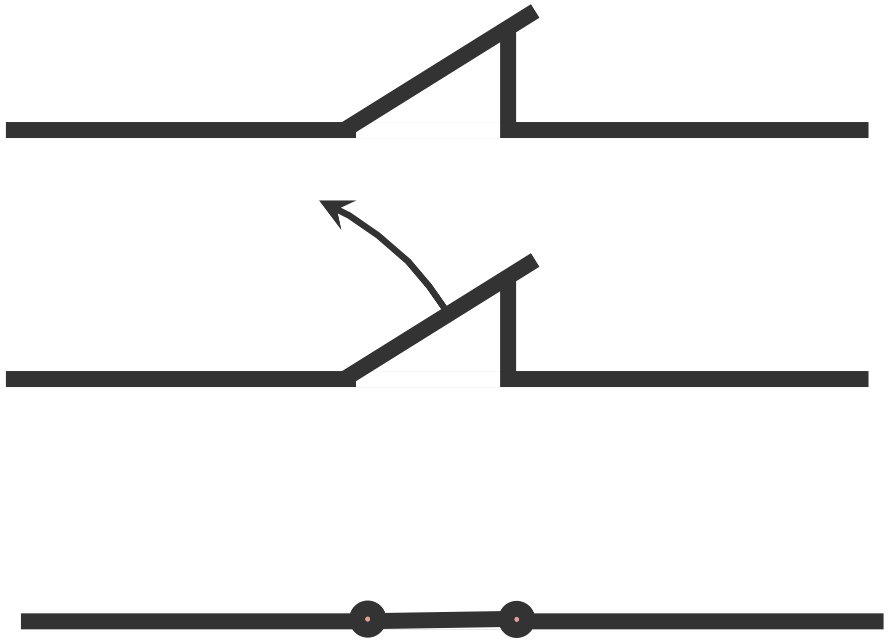
Коммутация это процесс замыкания и размыкания ключей. Переходные процессы обычно являются быстропротекающими; длительность их составляет десятые, сотые, а иногда даже милиарные доли секунд. Сравнительно редко длительность переходных процессов достигает секунд и десятков секунд.

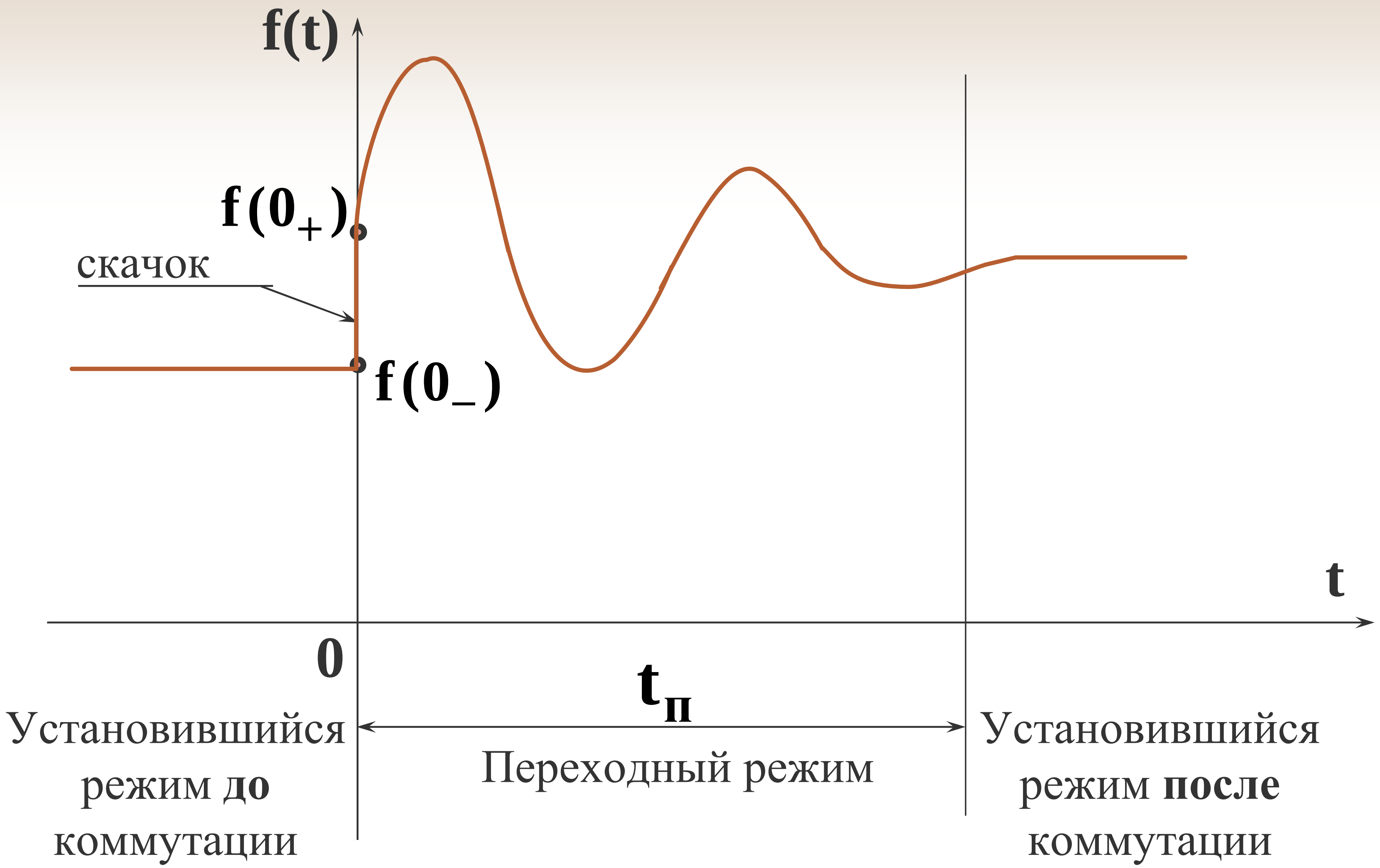
Физически переходные процессы представляют собой процессы перехода электрической системы от одного энергетического состояния к другому, то есть это процесс перераспределения энергии между элементами цепи.

Ключ замыкается:



Ключ размыкается:




f(t)
f(0+)
скачок
f(0_)
t
0
tп
Установившийся режим **до** коммутации
Переходный режим
Установившийся режим **после** коммутации

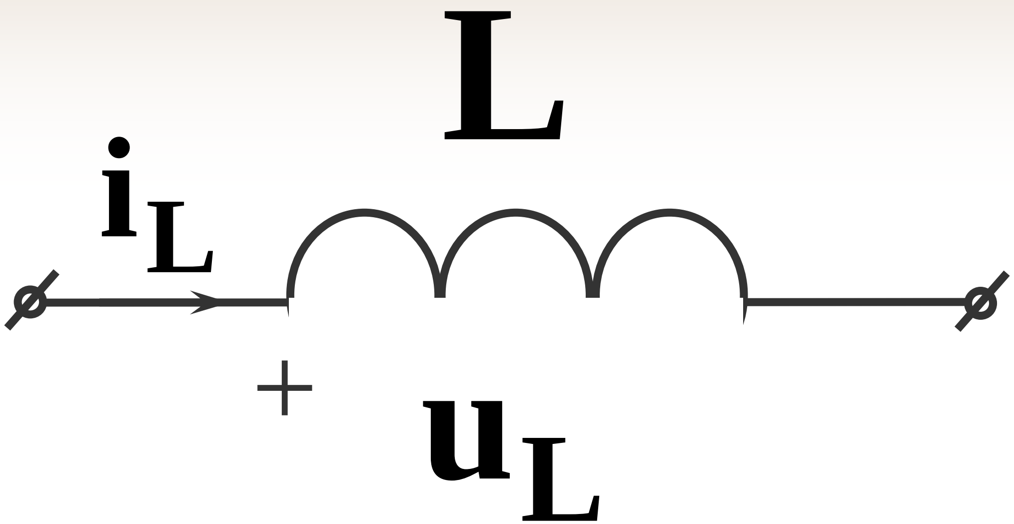
В электрической цепи, не может быть мгновенного изменения накопленной в электрических и магнитных полях энергии

$$W(0-) = W(0+) = W(0).$$

Так как энергия электрического поля конденсатора и энергия магнитного поля индуктивной катушки равны соответственно

$$W_C = \frac{u^2 C}{2}, \ W_L = \frac{i^2 L}{2},$$

Первый закон коммутации

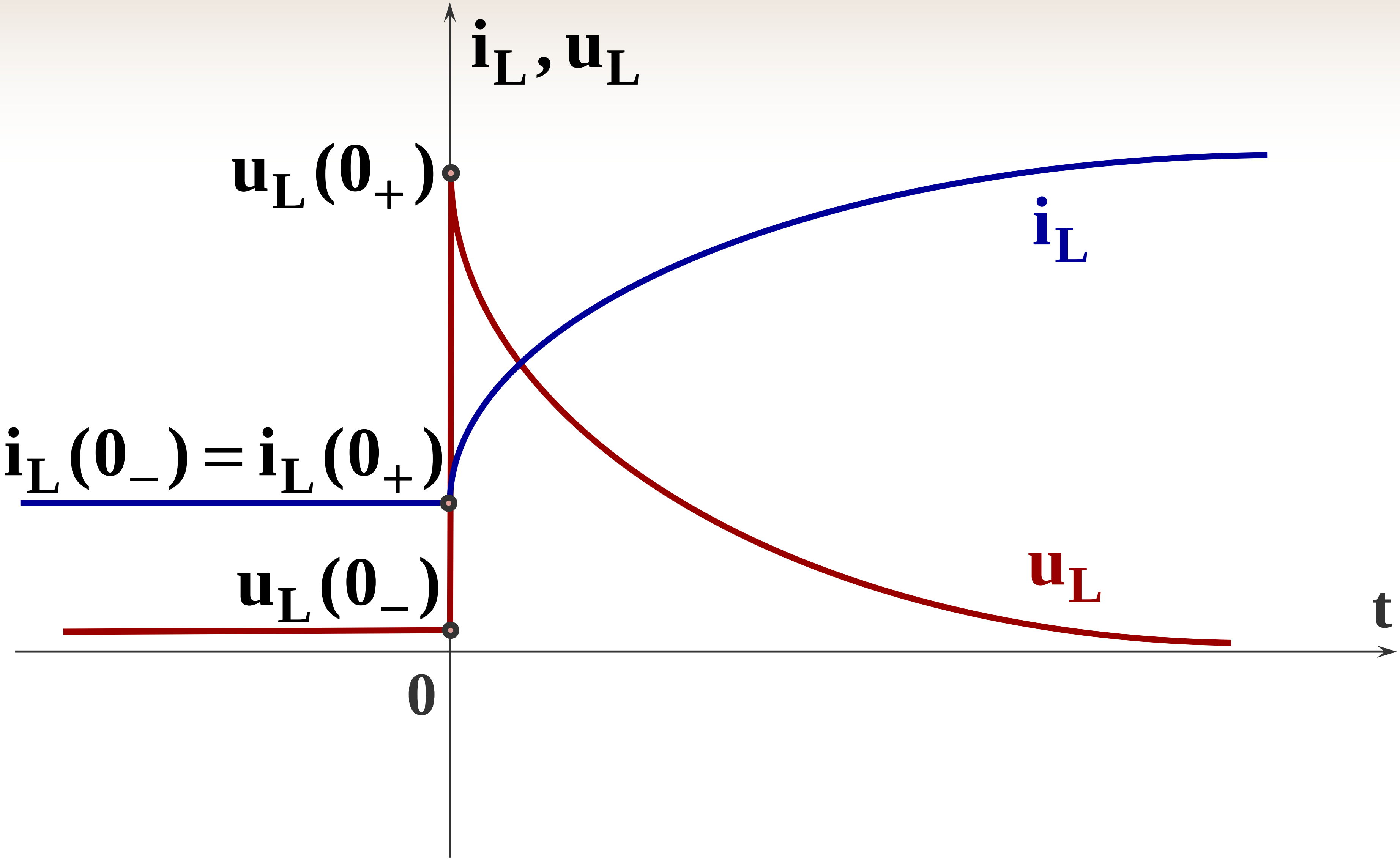


$$\boxed{i_L(0_-) = i_L(0_+)}$$

Ток в индуктивности не может измениться скачком

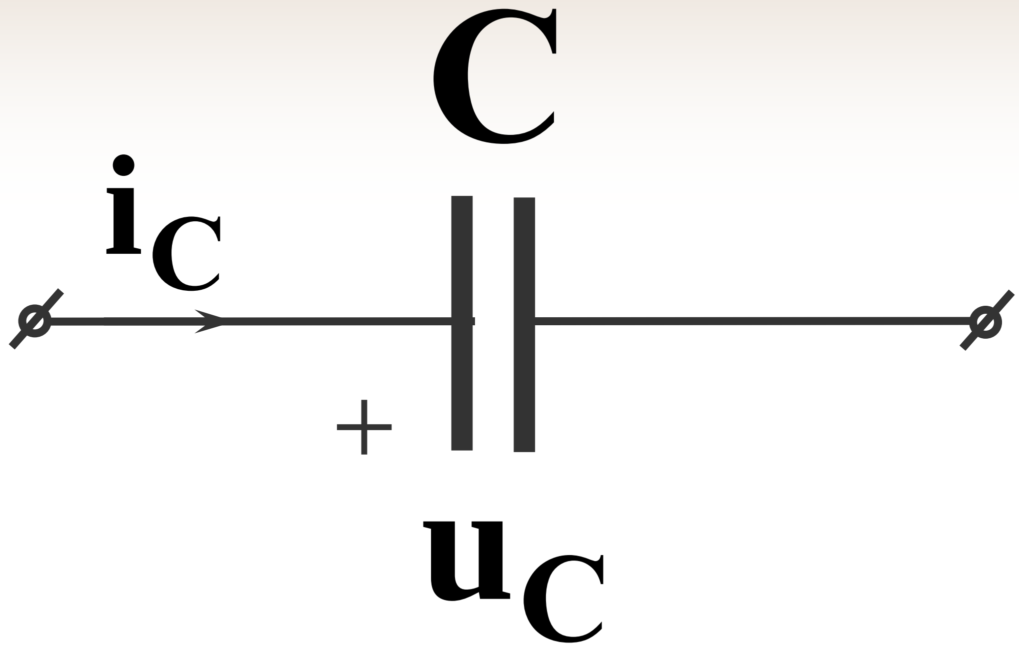
Но $$u_L = L\frac{di_L}{dt}$$

- напряжение может измениться скачком!



i_L, u_L
$u_L(0_+)$
i_L
$i_L(0_-) = i_L(0_+)$
u_L
$u_L(0_-)$
t
0

Второй закон коммутации

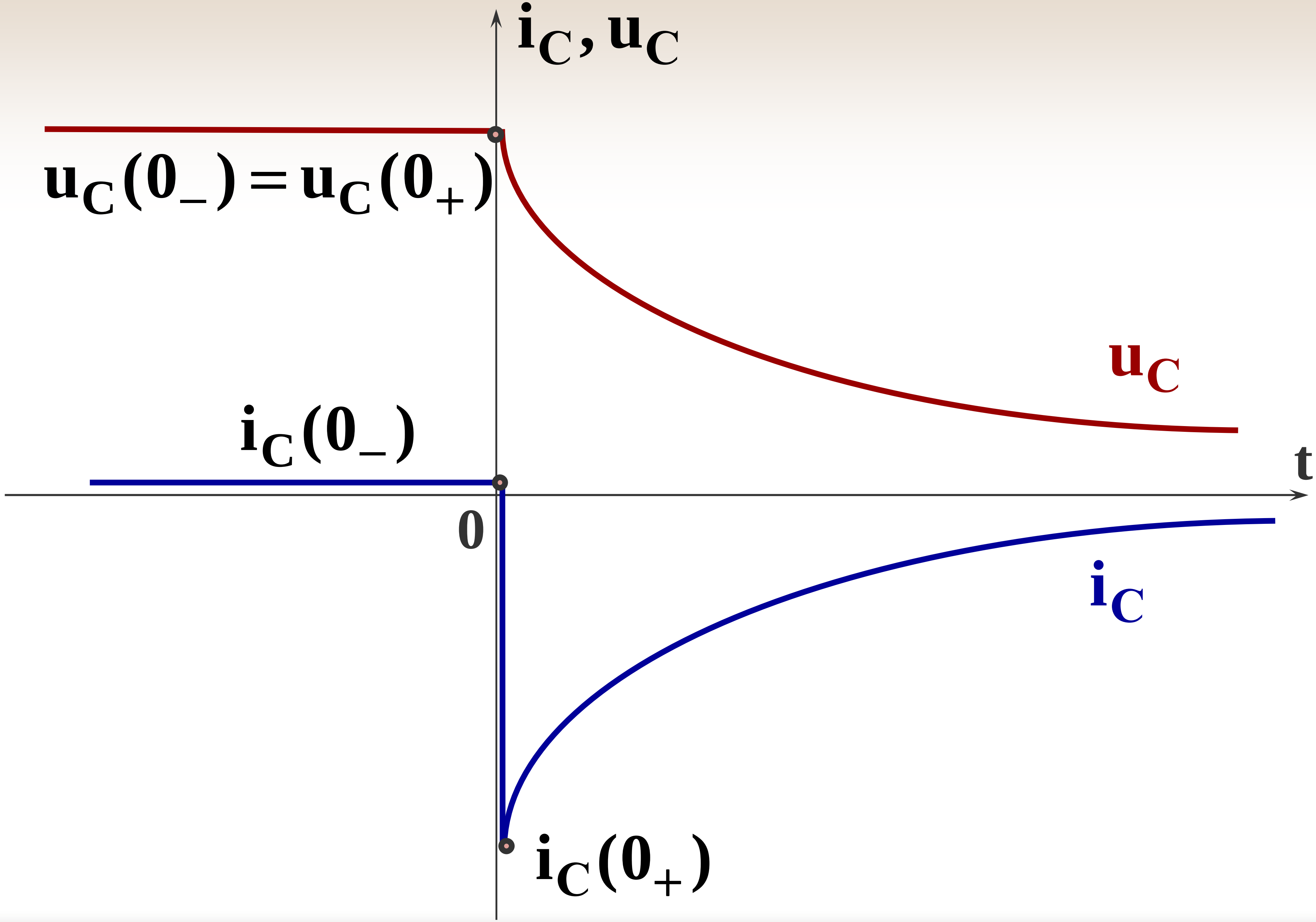


$$\boxed{u_C(0_-) = u_C(0_+)}$$

Напряжение на емкости не может измениться скачком!

Но $$i_C = C\frac{du_C}{dt}$$

- ток может измениться скачком!


i_C, u_C
$u_C(0_-) = u_C(0_+)$
u_C
$i_C(0_-)$
t
0
i_C
$i_C(0_+)$

Переходный процесс обусловлен наличием в цепи L и C

Классический метод расчета переходных процессов

Используется для линейных цепей, которые характеризуются линейными дифференциальными уравнениями

$$a_n \cdot \frac{d^n f(t)}{dt^n} + a_{n-1} \cdot \frac{d^{n-1} f(t)}{dt^{n-1}} + \ldots +$$

$$+ a_1 \cdot \frac{df(t)}{dt} + a_0 \cdot f(t) = F(t)$$

- уравнение 1

- это линейное неоднородное дифференциальное уравнение n- порядка для тока или напряжения $f(t)$ переходного процесса при $t>0$ (схема после коммутации)

Где:

$$a_n, a_{n-1}, \ldots, a_1, a_0 -$$

постоянные коэффициенты, определяемые параметрами (R, L, C) и структурой цепи после коммутации

Где:

F(t) –

функция, определяемая (независимыми) источниками цепи после коммутации

Решение уравнения 1:

$$\boxed{f(t) = f_{пр}(t) + f_{св}(t)} \quad (2)$$

Где:

$$\mathbf{f_{пр}(t)} –$$

принужденная составляющая – это *частное* решение уравнения 1, зависящее от F(t)

Где:

$\mathbf{f_{св}(t)}$–

свободная составляющая – это *общее* решение однородного уравнения 1 при $F(t) = 0$

При постоянных и гармонических источниках

$$\mathbf{f_{пр}(t)} –$$

это *установившееся* значение после коммутации

$\mathbf{f_{св}(t)}$ –

зависит от *корней* характеристического уравнения и *начальных условий*

Характеристическое уравнение 3:

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \ldots + a_1 p + a_0 = 0$$

а) если корни

$$\mathbf{p_1, p_2, \dots, p_n} -$$

уравнения 3 вещественные, отрицательные и *разные*

тогда

$$\mathbf{f_{св}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \ldots + A_n e^{p_n t}}$$

б) если корни уравнения 3 **вещественные**, **отрицательные** и *одинаковые*, т.е.

$$\mathbf{p_1 = p_2 = \ldots = p_n = p}$$

тогда

$$f_{св}(t) = (A_1 + A_2 t + \dots + A_n t^{n-1}) \cdot e^{pt}$$

в) если корни уравнения 3 комплексные и *попарно* сопряженные, т.е.

$$\mathbf{p_{1,2} = -\delta_2 \pm j\omega_{св_2}}$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$\mathbf{p_{n-1,n} = -\delta_n \pm j\omega_{св_n}}$$

То

$$f_{св}(t) = A_2 e^{-\delta_2 t} \cos(\omega_{св_2} t + \beta_2) + \ldots +$$

$$+ A_n e^{-\delta_n t} \cos(\omega_{св_n} t + \beta_n)$$

Где:

$$A_1, A_2, \ldots, A_n, \beta_2, \ldots, \beta_n -$$

постоянные интегрирования, определяемые *начальными условиями*

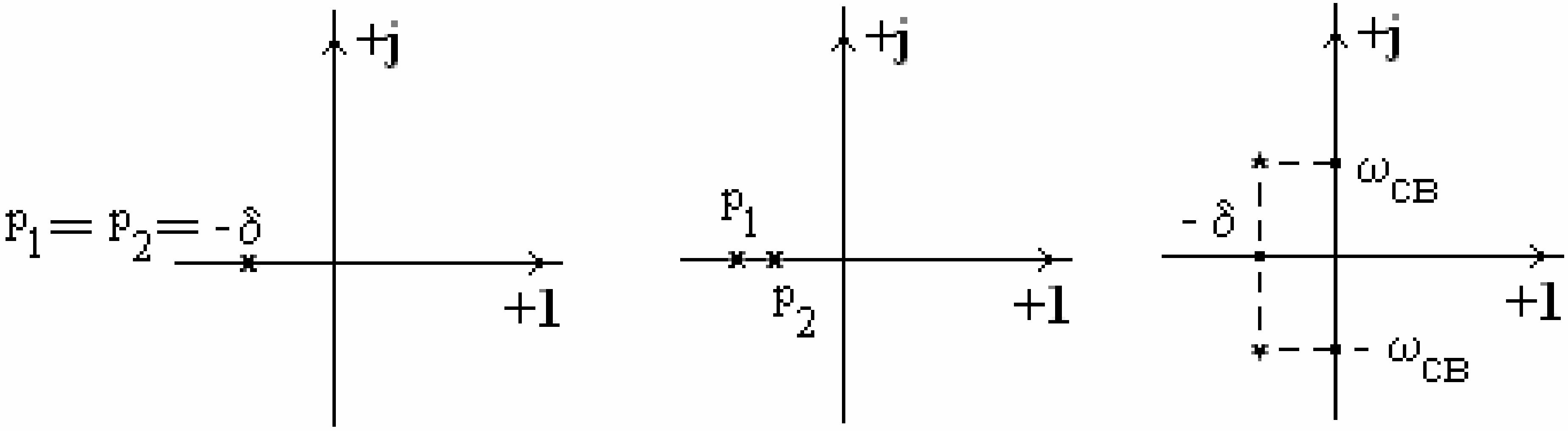
$\delta_2, \ldots, \delta_n$ –

коэффициенты затухания свободных колебаний $\left({}^{1}\!/\!_{c} \right)$

$$\omega_{\text{св}2},\ \ldots,\omega_{\text{св}n} -$$

угловые частоты свободных колебаний

$$\left(\text{рад}/\text{с} \right)$$


+j
p1 = p2 = -δ
+1
+j
p1
p2
+1
+j
ωCB
- δ
+1
- ωCB

Различают:

а) *независимые* начальные условия (ННУ)

$$i_L(0_-) = i_L(0_+)$$

и

$$u_C(0_-) = u_C(0_+)$$

Различают:

б) *зависимые* начальные условия (ЗНУ), например:

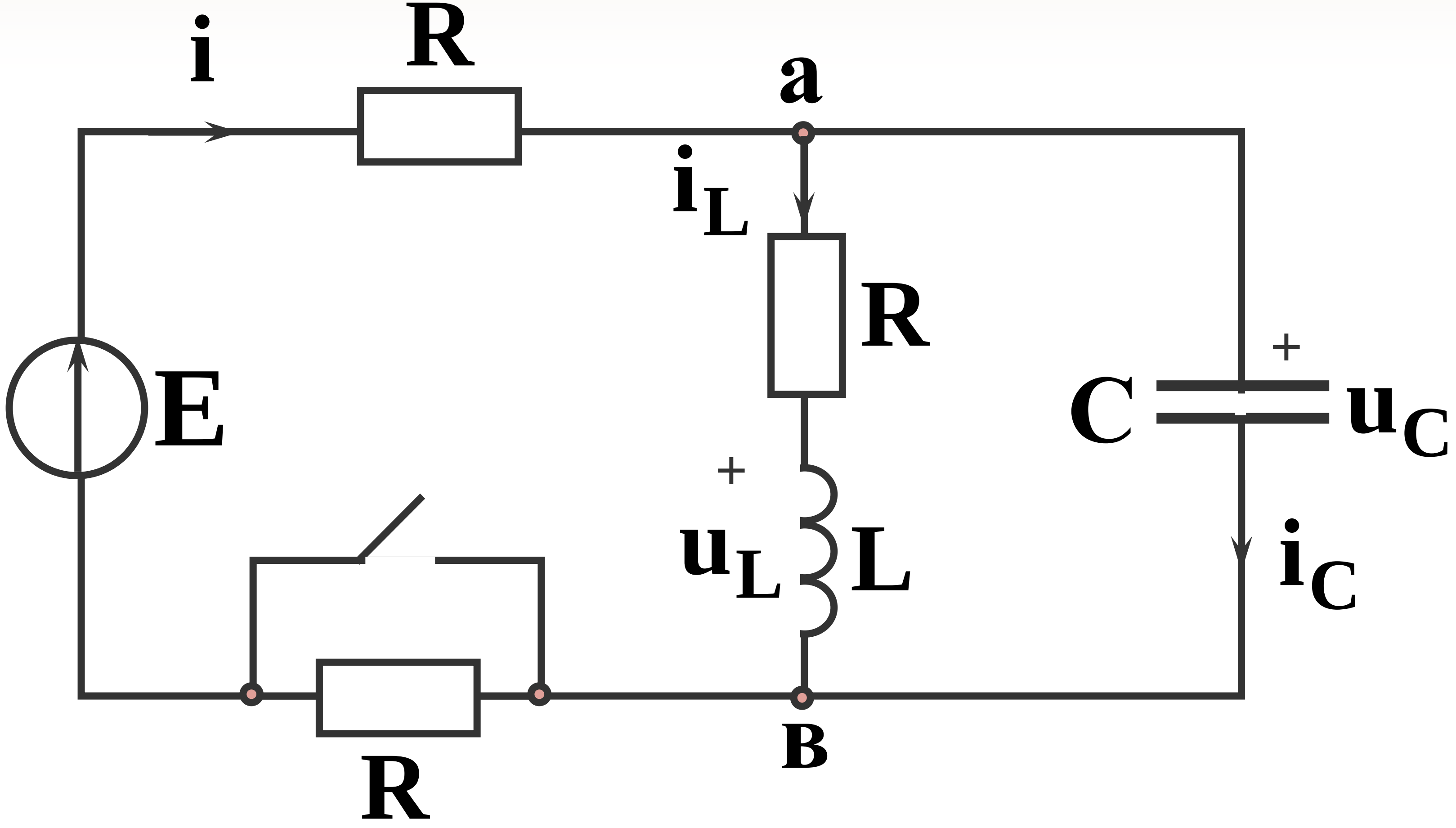
$$\mathbf{i}_C(\mathbf{0}_+), \ \mathbf{u}_L(\mathbf{0}_+)$$

и все остальные величины в схеме

Различают:

в) *принужденные* значения, определяемые из расчета установившегося режима *после* коммутации

Пример:



Дано:

E = 300 В

R = 100 Ом

Определить:

начальные условия и *принужденные составляющие* а) *независимые* начальные условия (схема до коммутации)

$$\mathbf{i_L(0\_)=\frac{E}{3R}=1\ A}$$

$$\mathbf{u_C(0\_)=i_L(0\_)R=100\ B}$$

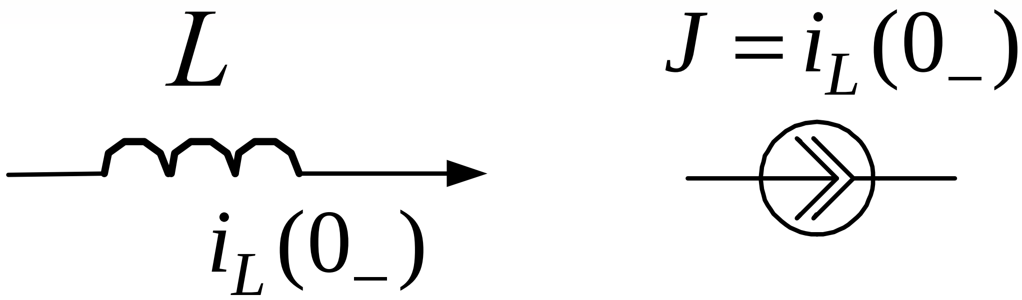
б) *зависимые* начальные условия

(схема после коммутации при $\mathbf{t = 0_+}$)

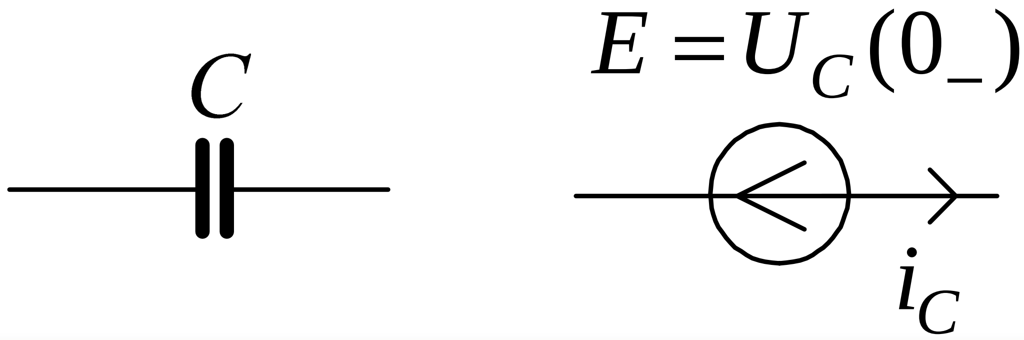
Зависимые начальные условия могут изменятся скачком непосредственно до и после коммутации. То есть их значения «зависят» от того наблюдаем мы их до или после коммутации.

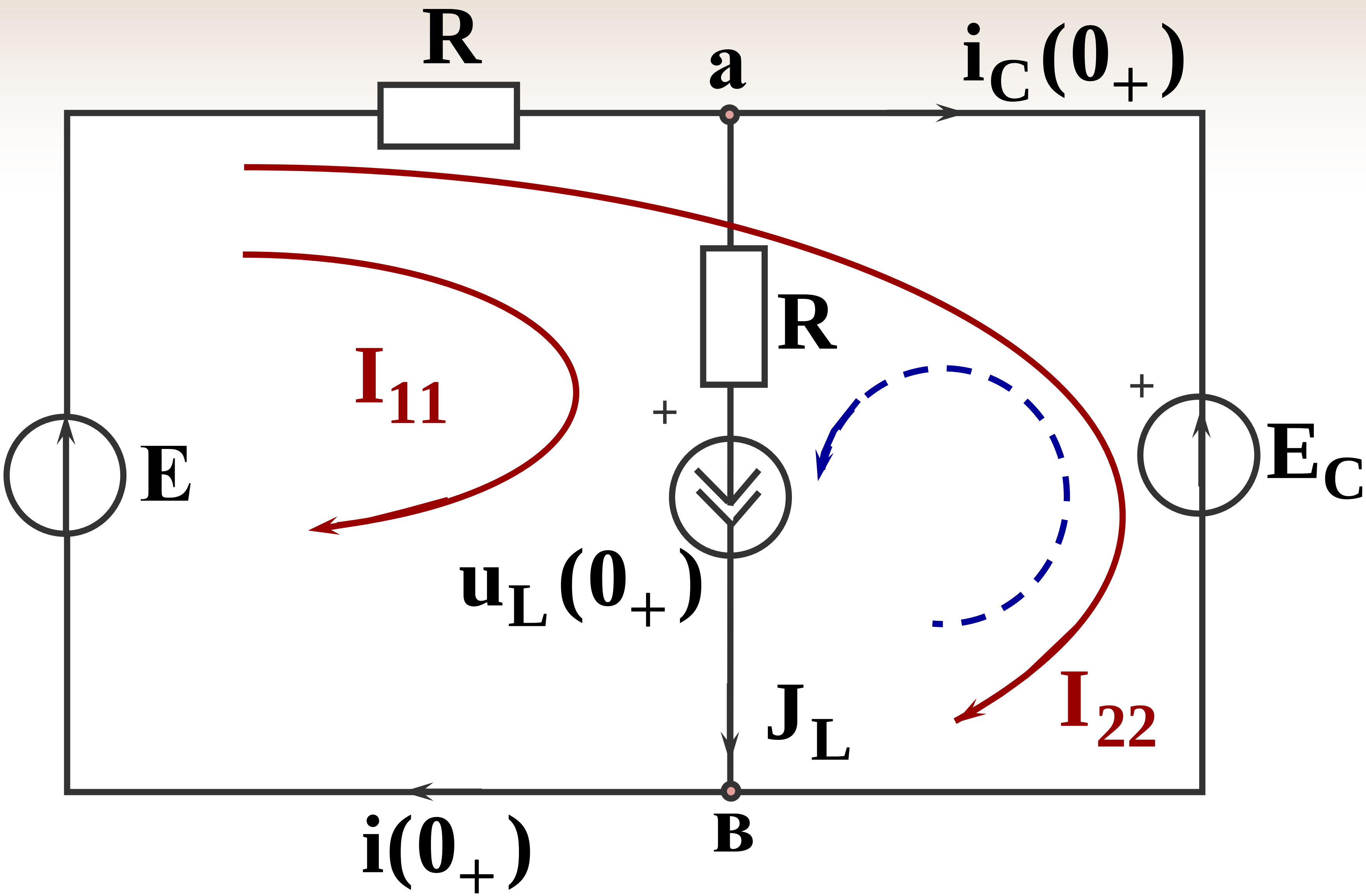
Зависимые начальные условия определяются в схеме после коммутации.

Реактивные элементы согласно теореме компенсации заменяем на:
Индуктивность на источник тока величиной IL(0-)



Ёмкость на источник ЭДС, величиной UC(0-)




R
a
$i_C(0_+)$
R
I_{11}
+
+
E
E_C
$u_L(0_+)$
J_L
I_{22}
$i(0_+)$
B

$$J_L = i_L(0_-) = i_L(0_+) = 1\ \text{A}$$

$$E_C = u_C(0_+) = u_C(0_-) = 100\ \text{B}$$

$$I_{11} = J_L = 1\ \text{A}$$

$$I_{22}R + I_{11}R = E - E_C$$

$$I_{22} = \frac{E - E_C - I_{11}R}{R} = 1\,A$$

$$i(0_+) = I_{11} + I_{22} = 2\,A$$

$$i_C(0_+) = I_{22} = 1\,A$$

$$E_C - u_L(0_+) = R \cdot i_L(0_+)$$

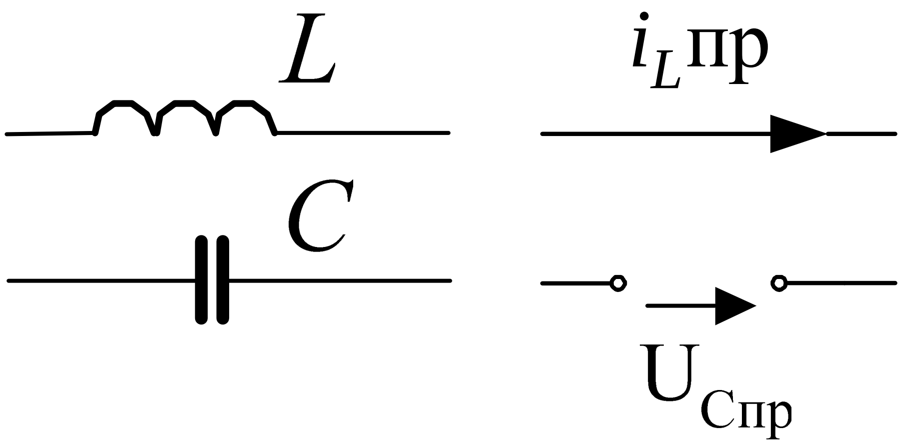
$$\Rightarrow$$

$$u_L(0_+) = E_C - R \cdot i_L(0_+) = 0$$

в) *принужденные* составляющие

(схема *после* коммутации при $t = \infty$)

В схеме после коммутации,
(ключ срабатывает и изменяет свое положение на противоположное)
Установившийся режим: и если источник постоянный, то не забываем, что индуктивность – закоротка, конденсатор разрыв
(не рисуем ветвь с конденсатором при определении принуждённых токов)



$$i_{пр} = i_{L_{пр}} = \frac{E}{2R} = 1.5\ A$$

$$u_{C_{пр}} = R \cdot i_{L_{пр}} = 150\ B$$

$$i_{C_{пр}} = 0$$

$$u_{L_{пр}} = 0$$