

# ТОЭ – часть 2

## практическое занятие 5

Комбинированный операторно-классический метод расчета переходных процессов в линейных цепях

Этот метод используется для расчета переходных процессов в линейных цепях с гармоническими источниками.

Цель метода – упрощение операторных изображений искомых напряжений и токов.

Сущность метода – применение принципа наложения, когда принужденные составляющие находятся символическим методом из расчета установившегося режима после коммутации, а свободные составляющие определяются из расчета операторной схемы (после коммутации).

# Задача 1

Дано:

$$e(t) = 282,8 \sin(200t - 90^\circ) \text{ (В);}$$

$$L = 0,5 \text{ (Гн); } R = 100 \text{ (Ом).}$$

Определить:

$$i(t) = ? \quad u_L(t) = ?$$

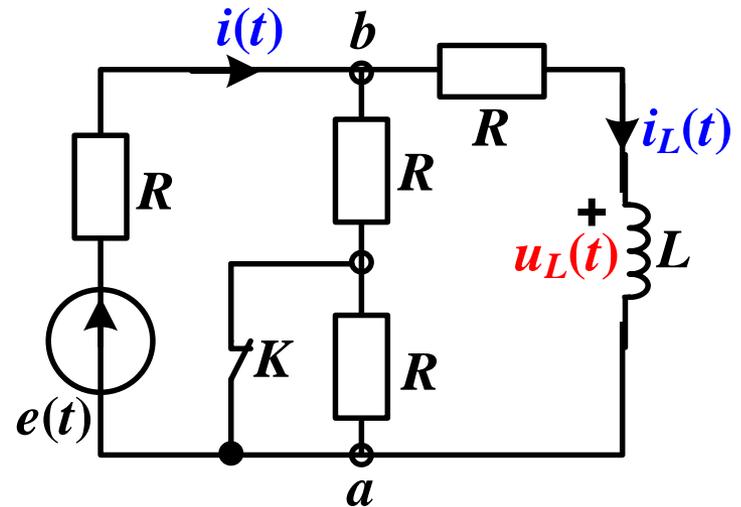
Ключ **K** **размыкается**:

а) **до** коммутации

ключ **замкнут**;

б) **после** коммутации

ключ **разомкнут**.



1. Находим ННУ (схема до коммутации):

При гармонических источниках символический метод:

$$\underline{E}_m = 282,8e^{-j90^\circ} \text{ (В)}; X_L = \omega L = 200 \cdot 0,5 = 100 \text{ (Ом)}; R = 100 \text{ (Ом)}.$$

По закону Ома и по правилу разброса:

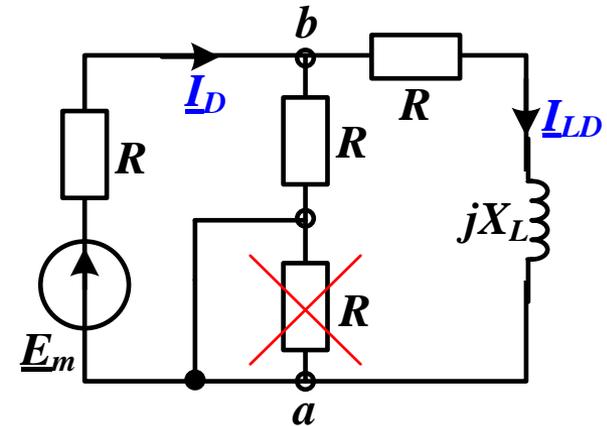
$$\underline{I}_D = \underline{E}_m / [R + R(R + jX_L) / (2R + jX_L)] = 1,75e^{-j97^\circ} \text{ (А)},$$

$$\underline{I}_{LD} = \underline{I}_D R / (2R + jX_L) = 0,785e^{-j124^\circ} \text{ (А)}.$$

Тогда  $i_{LD}(t) = 0,785 \sin(200t - 124^\circ)$  А,

$i_D(t) = 1,75 \sin(200t - 97^\circ)$  А,

причем  $i(0^-) = i_D(0) = 1,75 \sin(-97^\circ) = -1,74$  (А).



В результате ННУ:

$$i_L(0^-) = i_L(0) = i_{LD}(0) = 0,785 \sin(-124^\circ) = -0,651 \text{ (А)}.$$

2. Находим ПС (схема после коммутации при  $t=\infty$ ):

При гармонических источниках символический метод:

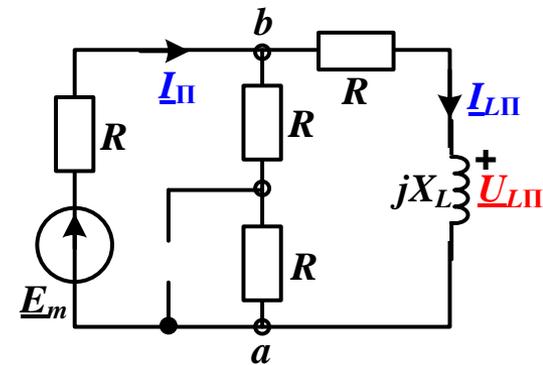
$$\underline{E}_m = 282,8e^{-j90^\circ} \text{ (В)}; \quad X_L = 100 \text{ (Ом)}; \quad R = 100 \text{ (Ом)}.$$

По закону Ома и по правилу разброса:

$$\underline{I}_\Pi = \underline{E}_m / [R + 2R(R + jX_L) / (3R + jX_L)] = 1,53e^{-j102,5^\circ} \text{ (А)},$$

$$\underline{I}_{L\Pi} = \underline{I}_\Pi 2R / (3R + jX_L) = 0,97e^{-j121^\circ} \text{ (А)},$$

$$\underline{U}_{L\Pi} = jX_L \underline{I}_{L\Pi} = 97e^{-j31^\circ} \text{ (В)}.$$



В результате принужденные составляющие:

$$i_{\text{пр}}(t) = 1,53 \sin(200t - 102,5^\circ) \text{ А};$$

$$i_{L\text{пр}}(t) = 0,97 \sin(200t - 121^\circ) \text{ А};$$

$$u_{L\text{пр}}(t) = 97 \sin(200t - 31^\circ) \text{ В}.$$

3. Находим начальное значение свободных составляющих тока в индуктивности и напряжения на емкости при  $t=0$ :

$$i_{LCB}(0) = i_L(0) - i_{LПР}(0) = -0,651 - 0,97 \sin(-121^\circ) = 0,179 \text{ (A)}.$$

#### 4. Операторная схема после коммутации для свободных составляющих:

ЭДС закорочены, ветви с источниками тока разорваны.

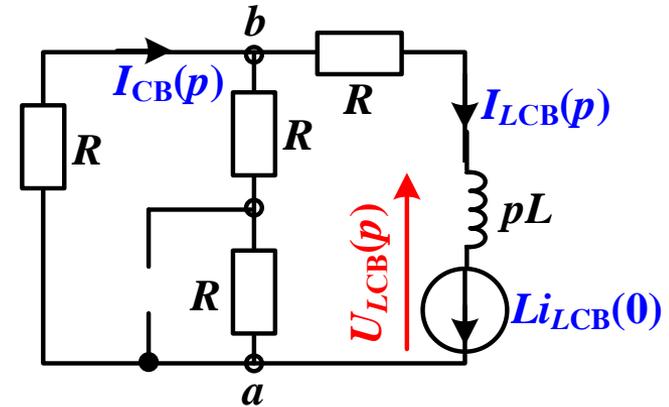
По закону Ома и правилу

разброса:

$$I_{LCB}(p) = Li_{LCB}(0) / (R + pL + 2RR/3R);$$

$$I_{CB}(p) = I_{LCB}(p) 2R/3R;$$

$$U_{LCB}(p) = pLI_{LCB}(p) - Li_{LCB}(0).$$



В результате:

$$I_{CB}(p) = \frac{0,12}{333,33 + p} = \frac{D_1(p)}{B(p)}; \quad U_{LCB}(p) = \frac{-30}{333,33 + p} = \frac{D_2(p)}{B(p)}.$$

## 5. Окончательный результат:

$$i(t) = i_{\text{ИП}}(t) + \sum_{k=1}^1 \frac{D_1(p_k)}{B'(p_k)} e^{p_k t} = 1,53 \sin(200t - 102,5^\circ) + 0,12e^{-333,33t} \text{ (A)};$$

$$u_L(t) = u_{L\text{ИП}}(t) + \sum_{k=1}^1 \frac{D_2(p_k)}{B'(p_k)} e^{p_k t} = 97 \sin(200t - 31^\circ) - 30e^{-333,33t} \text{ (B)}.$$

# Задача 2

Дано:

$$J(t) = 2\sin(100t + 90^\circ) \text{ (A)};$$

$$C = 100 \text{ (мкФ)}; R = 100 \text{ (Ом)}.$$

Определить:

$$u(t) = ? \quad u_C(t) = ?$$

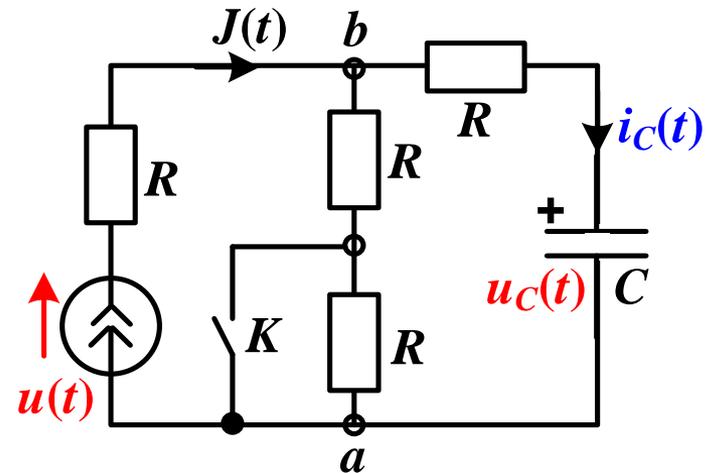
Ключ  $K$  замыкается:

а) до коммутации

ключ разомкнут;

б) после коммутации

ключ замкнут.



# 1. Находим ННУ (схема до коммутации):

При гармонических источниках символический метод:

$$\underline{J}_m = 2e^{j90^\circ} \text{ (А)}; X_C = 1/\omega C = 100 \text{ (Ом)}; R = 100 \text{ (Ом)}.$$

По закону Ома и по правилу разброса:

$$\underline{U}_D = \underline{J}_m [R + 2R(R - jX_C)/(3R - jX_C)] = 369e^{j77,5^\circ} \text{ (В)},$$

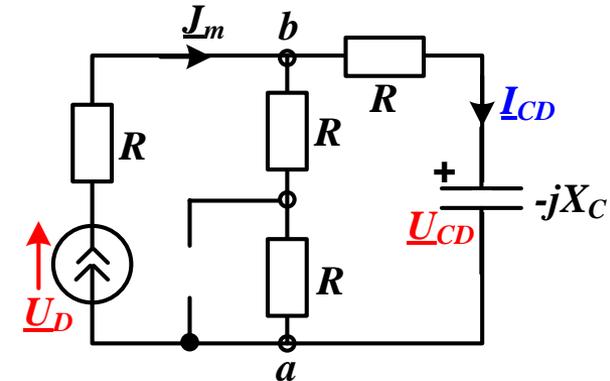
$$\underline{I}_{CD} = \underline{J}_m 2R/(3R - jX_C) = 1,265e^{j108,4^\circ} \text{ (А)},$$

$$\underline{U}_{CD} = (-jX_C)\underline{I}_{CD} = 126,5e^{j18,4^\circ} \text{ (В)}.$$

Тогда  $u_D(t) = 369\sin(100t + 77,5^\circ)$  В,

$u_{CD}(t) = 126,5\sin(100t + 18,4^\circ)$  В,

причем  $u(0^-) = u_D(0) = 369\sin(77,5^\circ) = 360$  (В).



В результате ННУ:

$$u_C(0^-) = u_C(0) = u_{CD}(0) = 126,5\sin(18,4^\circ) = 40 \text{ (В)}.$$

## 2. Находим ПС (схема после коммутации при $t=\infty$ ):

При гармонических источниках символический метод:

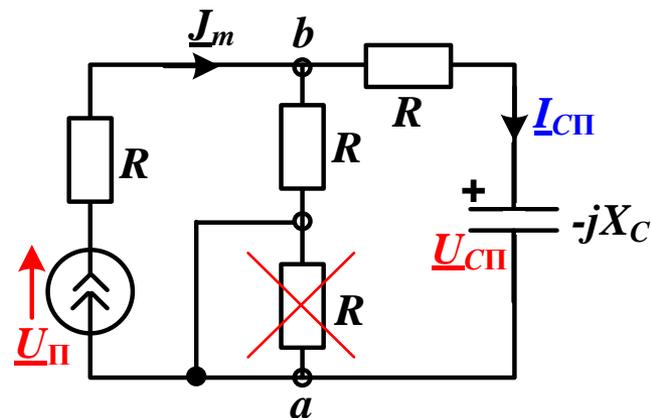
$$\underline{J}_m = 2e^{j90^\circ} \text{ (А)}; X_C = 1/\omega C = 100 \text{ (Ом)}; R = 100 \text{ (Ом)}.$$

По закону Ома и по правилу разброса:

$$\underline{U}_{\Pi} = \underline{J}_m [R + R(R - jX_C) / (2R - jX_C)] = 322,5e^{j83^\circ} \text{ (В)},$$

$$\underline{I}_{C\Pi} = \underline{J}_m R / (2R - jX_C) = 0,894e^{j116,6^\circ} \text{ (А)},$$

$$\underline{U}_{C\Pi} = (-jX_C)\underline{I}_{C\Pi} = 89,44e^{j26,6^\circ} \text{ (В)}.$$



В результате принужденные составляющие:

$$u_{\text{пр}}(t) = 322,5 \sin(100t + 83^\circ) \text{ В};$$

$$u_{C\text{пр}}(t) = 89,44 \sin(100t + 26,6^\circ) \text{ В}.$$

3. Находим начальное значение свободных составляющих тока в индуктивности и напряжения на емкости при  $t=0$ :

$$u_{ССВ}(0) = u_C(0) - u_{СПР}(0) = 40 - 89,44 \sin(26,6^\circ) = 40 - 40 = 0.$$

#### 4. Операторная схема после коммутации для свободных составляющих:

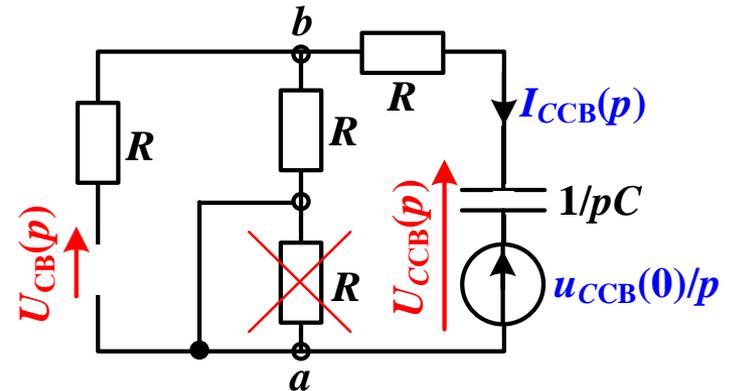
ЭДС закорочены, ветви с источниками тока разорваны.

По закону Ома:

$$I_{CCB}(p) = -u_{CCB}(0)/p(2R + 1/pC);$$

$$U_{CB}(p) = -I_{CCB}(p)R;$$

$$U_{CCB}(p) = I_{CCB}(p)/pC + u_{CCB}(0)/p.$$



В результате при  $u_{CCB}(0)=0$  :

$$U_{CB}(p) = \frac{RC \cdot u_{CCB}(0)}{1 + 2RCp} = \frac{D_1(p)}{B(p)} = 0;$$

$$U_{CCB}(p) = \frac{2RC \cdot u_{CCB}(0)}{1 + 2RCp} = \frac{D_2(p)}{B(p)} = 0.$$

## 5. Окончательный результат:

$$u(t) = u_{\text{ИП}}(t) + \sum_{k=1}^1 \frac{D_1(p_k)}{B'(p_k)} e^{p_k t} = 322,5 \sin(100t + 83^\circ) + 0, (\text{В});$$

$$u_C(t) = u_{\text{СИП}}(t) + \sum_{k=1}^1 \frac{D_2(p_k)}{B'(p_k)} e^{p_k t} = 89,44 \sin(100t + 26,6^\circ) + 0, (\text{В}).$$

Так как свободные составляющие равны нулю, то переходного процесса не будет:

МГНОВЕННО наступает послекоммутационный установившийся режим.