

# ТОЭ – часть 2

## практическое занятие 15

Расчет переходных процессов в  
длинных линиях без потерь

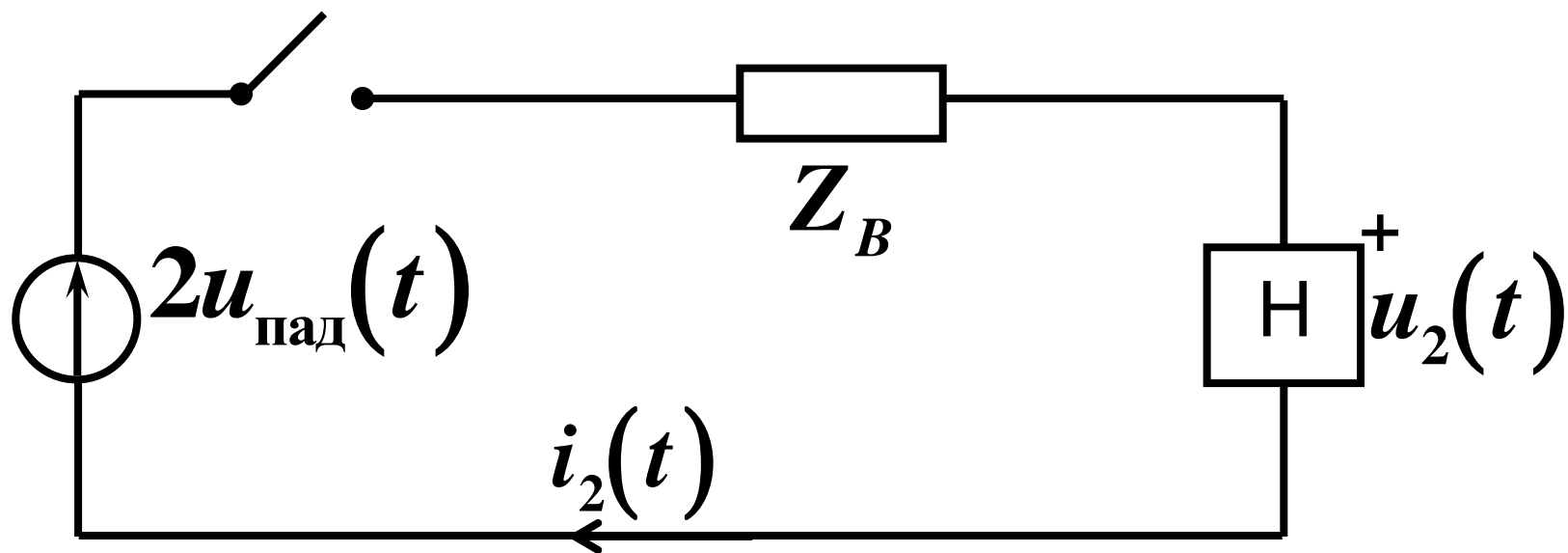
После подключения линии к источнику постоянного напряжения  $U_0$  по линии начнут перемещаться **падающие** волны **напряжения**  $u_{\text{пад}}$  и **тока**  $i_{\text{пад}}$  с прямоугольным фронтом и со скоростью  $V$ :

$$u_{\text{пад}} = U_0; \quad i_{\text{пад}} = \frac{u_{\text{пад}}}{Z_B}; \quad Z_B = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}; \quad V = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}.$$

Когда **падающие** волны достигнут конца линии, то появляются **отраженные** волны, которые определяются **характером нагрузки**.

Для любой точки линии **напряжение** и **ток** равен сумме **падающей** и **отраженной** волн, тогда и для нагрузки имеем при  $x=l$ :

$$\begin{cases} u_2 = u_{\text{пад}} + u_{\text{отр}} \\ i_2 = i_{\text{пад}} + i_{\text{отр}} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} u_{\text{отр}} = u_2 - u_{\text{пад}} \\ i_{\text{отр}} = -\frac{u_{\text{отр}}}{Z_B} = i_2 - i_{\text{пад}} \end{cases}$$



Эта схема используется для определения в нагрузке  $i_2(t)$  и  $u_2(t)$  после прихода в нагрузку **падающей** волны  $u_{\text{пад}}(t)$  при **нулевых** начальных условиях в нагрузке.

За начало переходного процесса в нагрузке ( $t=0$ ) принимается момент прихода туда **падающих** волн **напряжения**  $u_{\text{пад}}(t)$  и **тока**  $i_{\text{пад}}(t)$ .

# Задача

Дано:

$$U_0 = 100 \text{ (кВ)}; l = 600 \text{ (км)}; t_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ (с)};$$

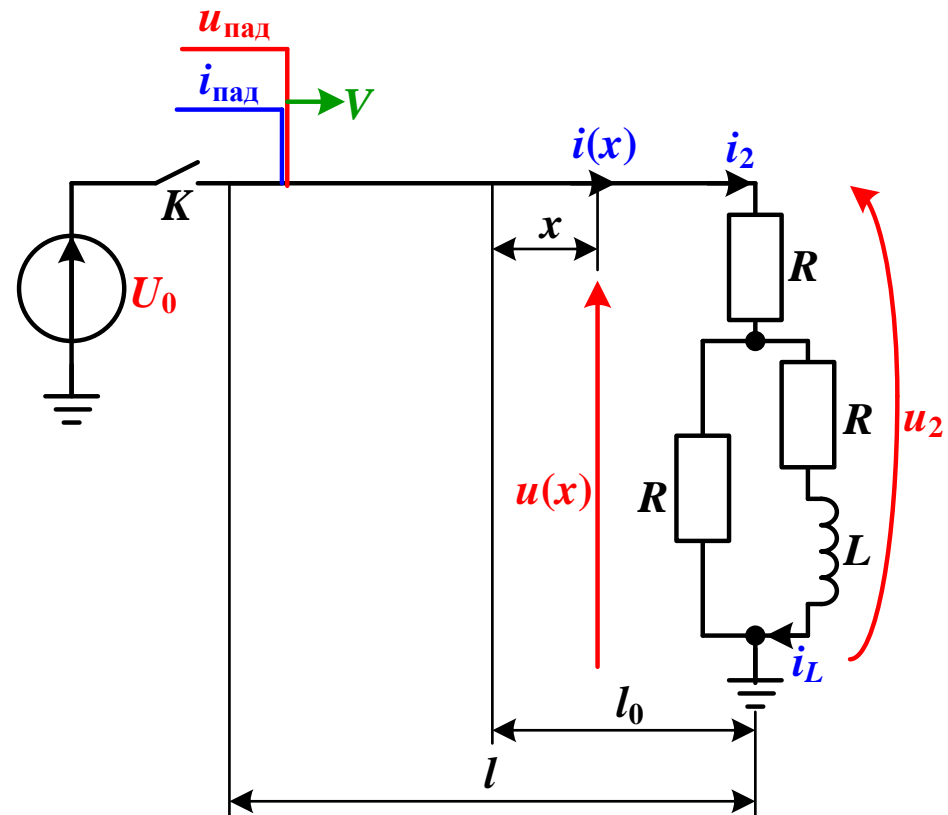
$$L_0 = 1,33 \cdot 10^{-6} \text{ (Гн/км)}; C_0 = 8,33 \cdot 10^{-12} \text{ (Ф/км)};$$

$$R = 300 \text{ (Ом)}; L = 0,51 \text{ (Гн)}.$$

Определить:

$$u_2 = ? \quad i_2 = ? \quad u_{\text{отр}} = ? \quad i_{\text{отр}} = ?$$

Ключ  $K$  замыкается,  
нулевые начальные  
условия:  $i_L(0^-) = i_L(0^+) = 0$ ;  
 $u_C(0^-) = u_C(0^+) = 0$ .



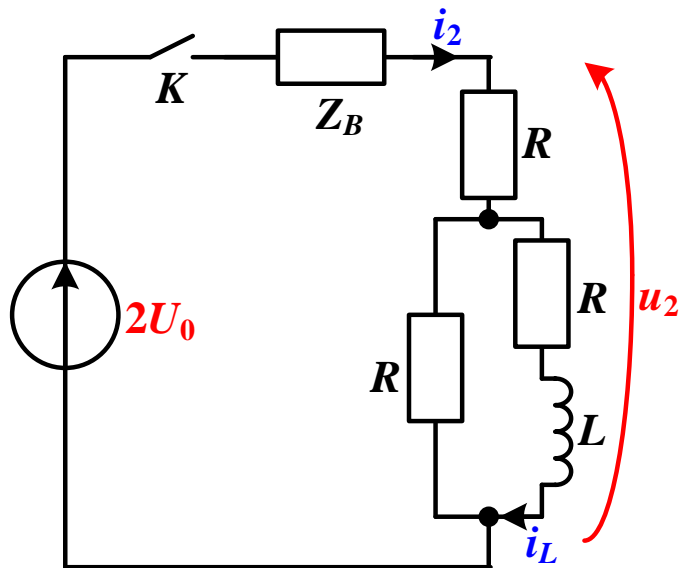
## Решение: 1. Параметры линии:

$$Z_B = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \approx 400(\text{Ом}); V = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \approx 3 \cdot 10^5 (\text{км/с}); l_0 = V t_0 - l = 300(\text{км}).$$

## 2. Падающие волны:

$$u_{\text{пад}} = U_0 = 100(\text{кВ}); i_{\text{пад}} = \frac{u_{\text{пад}}}{Z_B} = 250(\text{А}) = 0,25(\text{кА}).$$

## 3. Напряжение $u_2$ и ток $i_2$ в нагрузке (в конце линии):



а) ННУ

$$i_L(0-) = i_L(0+) = 0; u_C(0-) = u_C(0+) = 0.$$

б) ЗНУ ( $L$  - обрыв;  $C$  - коротка)

$$i_2(0+) = \frac{2U_0}{Z_B + 2R} = 200(\text{А});$$

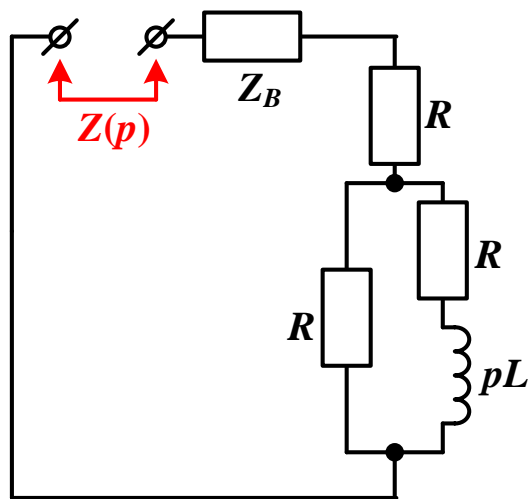
$$u_2(0+) = 2U_0 - Z_B i_2(0+) = 120(\text{кВ}).$$

в) ПС ( $L$  - короткая;  $C$  - обрыв)

$$i_{2np} = \frac{2U_0}{Z_B + R + \frac{RR}{R+R}} \approx 235,3(\text{A}); u_{2np} = 2U_0 - Z_B i_{2np} \approx 105,88(\text{кВ}).$$

г) корни характеристического уравнения

ЭДС  $U_0$  – короткая, индуктивный элемент  $L \Rightarrow pL$ ;  
емкостный элемент  $C \Rightarrow 1/pC$ .



$$Z(p) = Z_B + R + \frac{R(R + pL)}{2R + pL} = 0 \rightarrow$$

$$\rightarrow p = -\frac{(2Z_B + 3R)R}{(Z_B + 2R)L} = -1000(1/c).$$

д) постоянные интегрирования

$$A = i_2(0+) - i_{2np} \approx -35,3(\text{A}); B = u_2(0+) - u_{2np} \approx 14,12(\text{кВ}).$$

е) результат

$$i_2(t) = i_{2np} + Ae^{pt} = 235,3 - 35,3e^{-1000t} \text{ (A)};$$

$$u_2(t) = u_{2np} + Be^{pt} = 105,88 + 14,12e^{-1000t} \text{ (кВ)},$$

причем

$$i_2(t_0) = 235,3 - 35,3e^{-1000\left(t_0 - \frac{l}{v}\right)} = 222 \text{ (A)}.$$

4. Отраженные волны:

$$\begin{cases} u_{\text{отр}}(t) = u_2(t) - u_{\text{пад}} = 5,88 + 14,12e^{-1000t} \text{ (кВ)}; \\ i_{\text{отр}}(t) = i_2(t) - i_{\text{пад}} = -14,7 - 35,3e^{-1000t} \text{ (A)}. \end{cases}$$

5. Распределение напряжения и тока вдоль линии в момент времени  $t=t_0$ : заменяем  $t$  на  $x/V$ , где  $x$  – расстояние от фронта отраженных волн, причем  $0 < x < l_0$ :

$$u(x) = u_2(x/V) = 105,88 + 14,12e^{-1000(x/V)} \text{ (кВ)};$$

$$i(x) = i_2(x/V) = 235,3 - 35,3e^{-1000(x/V)} \text{ (А)},$$

$$\begin{cases} u_{\text{отр}}(x) = 5,88 + 14,12e^{-1000(x/V)} \text{ (кВ)}; \\ i_{\text{отр}}(x) = -14,7 - 35,3e^{-1000(x/V)} \text{ (А)}. \end{cases}$$



