

$$Z_{вх} = Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{\frac{U_2}{Z_2} \operatorname{ch} \beta l} = Z_2 \operatorname{cth} \beta l$$

для мин. дж потерь гр (55) преобр.

$$Z_{вх} = Z_2 \frac{\cos \beta l}{j \sin \beta l} = -j Z_2 \operatorname{ctg} \beta l = -j Z_2 \operatorname{ctg} \frac{2\pi l}{\lambda}$$

$\beta l = 2l$  (56)

Миним дж потерь носят реактив харак-тер.

График  $Z_1(l)$  - см рис. 8.

Вход. сопротивление мин. дж потерь равна от ее длины - при длине которой периодич. меняется.

Это сопротивление является чисто реактивным, периодич. меняет свой знак.

Если сопротивление чисто, то паразит. миним дж потерь - емкость.

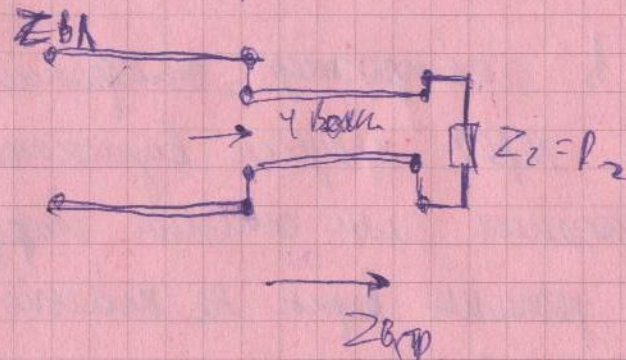
миним дж потерь в  
резонансе короткого замкнутого

Согласование мин

дж потерь с нагрузкой

Важно при сов. нагруз. опре-  
мим с  $l = \frac{\lambda}{4}$ , пом. разб. температур.

новой преобразование



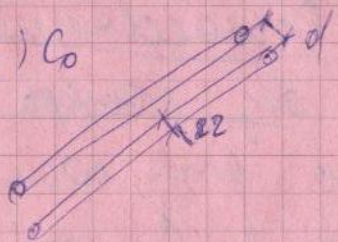
$$Z_{вхтр} = Z_{втр} \frac{Z_2 \cdot \cos \beta l + j Z_{втр} \sin \beta l}{Z_{втр} \cdot \cos \beta l + j Z_2 \sin \beta l} =$$

$$= Z_{втр} \frac{Z_2 + j Z_{втр} \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{4}}{Z_{втр} + j Z_2 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{4}} = Z_{втр} \cdot \frac{Z_{втр}}{Z_2} =$$

$$= \frac{Z_{втр}^2}{Z_2}$$

$$\frac{Z_{втр}^2}{Z_2} = Z_{вх} \text{ (конс!)}$$

$$Z_{\text{втр}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \rightarrow L_0 \text{ и } C_0$$



## Переходные процессы в длинных линиях

Введение в электроэнергетическую систему и телеграф. перех. процессы возникают при коротком замыкании или отключении нагрузки. Переходные режимы верны не только для установившихся цепей, но и для длинн.

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} & (1) \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} & (2) \end{cases}$$

3) Для переход. проц. в длинн. лин. из-за индукции, так как решение 1 и 2 достаточно подробное задание.

34) Обратное реш. перех. проц. в односторонней лин. без потерь.

$$L_0 \approx 0, \quad C_0 \approx 0$$

При малом затухании нагрузкой можно считать рез-том для 1-х ступеней перех. процесса.

Классическое ур-е

$$\text{из ур. (1)-(2) и } L_0 \approx 0, C_0 \approx 0 \Rightarrow$$

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} & (3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t} & (4) \end{cases}$$

$$\begin{cases} -\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t \partial x} & (5) \\ -\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} = C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} & (6) \end{cases}$$

$$(6) \rightarrow (5)$$

$$\begin{cases} +\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} & (7) \\ +\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = -\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} & (8) \end{cases}$$

$$v_{\text{ф}} = v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$$

- волновые уравнения

Решение волнового уравнения

Параболические и гиперболические волны в линиях

из математически известно, что напря-  
жение в шире.

$$(9) \quad u(x; t) = f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) = u_n + u_o$$

$$(10) \quad i(x; t) = \frac{1}{Z_0} \left[ f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) - f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \right] =$$

$$= \frac{u_n}{Z_0} - \frac{u_o}{Z_0} = i_n - i_o$$

Из (9) и (10) следует, что какие бы  
ни были  $f_1$  и  $f_2$  — произвольные функции в  
пространстве, но так как же законы, но  
с запаздыванием времени, произвольные функции  
в пространстве или.

Скорость своей формы — скорость. Величина  
перемещения со скоростью  $v$  в направлении увеличения  
 $x$ . Обратная величина движется с той же скоростью,  
но в обратном направлении.

Для напряжений — из  $i_n$  и  $i_o$  в направлении  
а для напряжений — в обратном направлении и  
и в обратном.

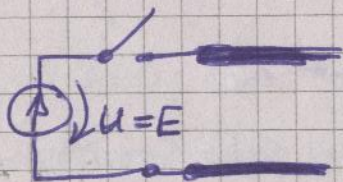
$U_0$  (9) и (10)  $\Rightarrow$  какой бы не был закон  
изм. пад. волны в начале по такому  
же закону, но с соотв. запазд-ем во  
время изм-ся  $U_n$  в лоб. др. точке  
линии.

Сохранен форму падению волна  
перемещ-ся со скор.  $v$  вдоль линии в  
напр. увелич-ия коорд.  $x$ .

Отраж. замедл волна движ-ся с той же  
скор-ю, но в обратном напр-ии. Для волн  
и в лоб. точке  $U_n$  и  $U_0$  сум-ся, а тока  
— из  $i_n$  вычлесть  $i_0$ .

12.08.06г.

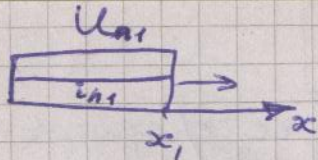
## Процессы в линии при дв-ии флукт. волн.



1-ая стадия пп — от начала к концу дв-ся  
падающая волна.

При замыкании на линию подается  
посл.  $U$  ген-ра. В начале возникают  $U_{n1} = U$  и  
 $i_{n1} = \frac{U_{n1}}{Z_0} = \frac{U}{Z_0}$ . Эти волны перем-ся со ск-ю  $v$ .

Двигаясь по линии волна создает эл. и  
магн. поля. Углоток маг-ой наз. флотом  
волны. Точки где волна еще не дошла  
 $i$  и  $U = 0$ .



$$l_1 = \frac{x_1}{v}$$

Замечание: ① при подк. кст. др. формы, форма падающей волны будет также иной.

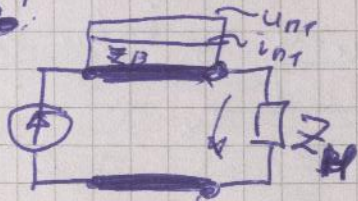
② в инт. времени от 0 до  $t = dl/v$  линия отн-но кст-ка ведёт себя как сосред-ое сопр-ие  $Z_B$ .

③ если в начале линии подк-ном накопителе падающие волны  $U$  и  $i$  опр-от из расчёта ПП проводящего с учётом зам-ия ②.

## Схема замещения для концов линии

Когда пад. волна дост-ет конца линии, где есть нагрузка или др. линия с др. сопр.  $Z_B$ , часть пад. волны проходит, часть — отражается.

Сх. зам. для конца позв-ет опр-ть какова форма волны проходящей и отражённой.

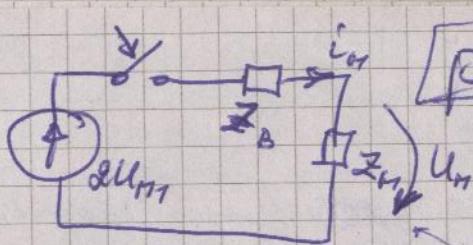


Для любого  $z$  в лоб. точке  $= U_H = U_{n1} + U_{o1}$  и  $i = i_{n1} - i_{o1} = \frac{U_{n1}}{Z_B} - \frac{U_{o1}}{Z_B} \Rightarrow$

$$\Rightarrow i_H Z_B = U_{n1} - U_{o1}$$

$$2U_{n1} = i_H Z_B + U_H$$

соот-ет схема:  $\rightarrow$



**рис. 1**

— схема со средоточенными параметрами.

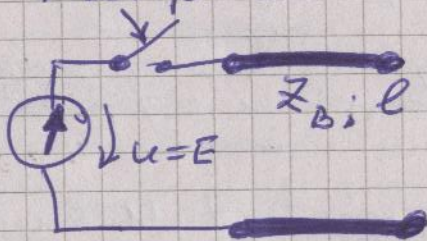
Рассчитав по схеме птп входной  $U_{01}$   
 $U_H(t)$ , после чего  $U_{01} = U_H - U_{\pi 1}$  и  $i_{01} = \frac{U_{01}}{Z_B}$

Это ф-ты опис-ные  $U_{01}$  и  $i_{01}$  в конце линии.  
 Зная их изм-ия в конце и получив  $U_{01}$  и  $i_{01}$   
 влюб. др-точке зная  $\sigma$  перемещение

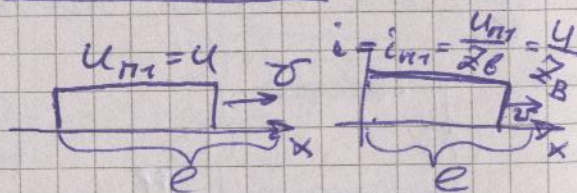
Отраз. волна двит-ся к началу. Дойдя  
 до начала она опять отражается. Для расчета  
 волны отра-ой от начала исп-ся схема  
 зам-ия аналогич. (рис. 1).

## **Примеры:** (длин. линией $\sigma$ /потерь)

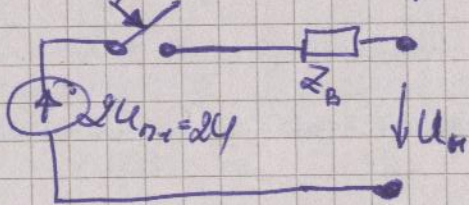
① Подкл. разомкн. на конце исп. пост.  
 напр-ия.



$$0 \leq t \leq \frac{l}{v}$$



Для расчета отр. волны исп-ют эк. зам-ия



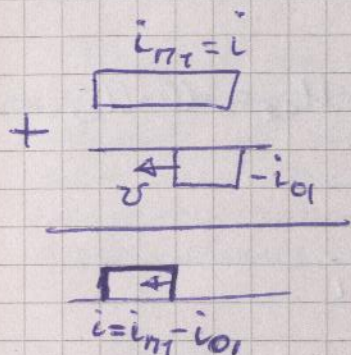
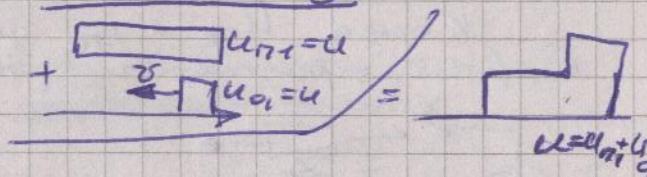
$$\Rightarrow U_H = 2U_{\pi 1} = 2U$$

$$U_H = U_{\pi 1} + U_{01} = U + U_{01}$$

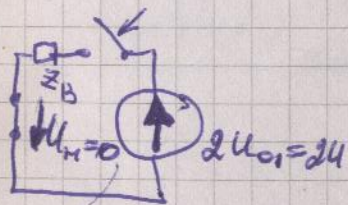
$$U_{01} = U$$

$$i_{01} = \frac{U_{01}}{Z_B} = \frac{U}{Z_B} = i_{n1} = i$$

$$\frac{l}{v} \leq t \leq \frac{2l}{v}$$



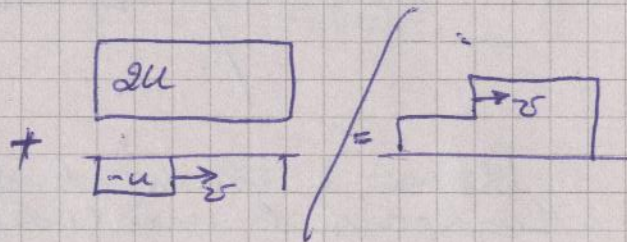
Когда волна  $U_{01}$ ,  $i_{01}$  дойдет до начала она отражается от начала, с противоположным отражением от начала имеет вид:



$$= U_{01} + U_{n2} = U + U_{n2} \Rightarrow U_{n2} = 0 - U = -U$$

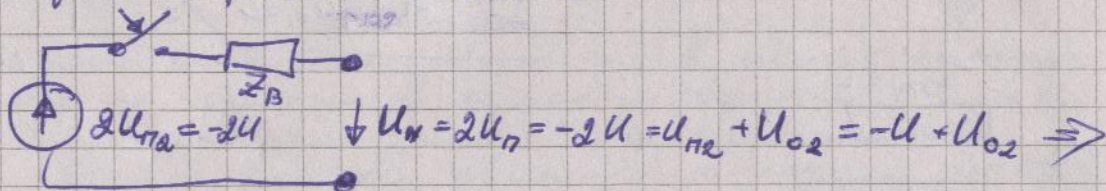
$$i_{n2} = \frac{U_{n2}}{Z_B} = -\frac{U}{Z_B} = -i$$

$$\frac{2l}{v} < t < \frac{3l}{v}$$



$$+ \frac{\begin{array}{c} i \\ \hline i\pi_2 = i \end{array}}{\vartheta} = \frac{\boxed{i\pi_2 = i}}{\vartheta}$$

Когда  $U_{\pi_2}$  и  $i_{\pi_2}$  доходят до конца цепи, вторая сформированная волна.



$$\Rightarrow U_{02} = -U$$

$$i_{02} = \frac{-U}{Z_B} = -i$$

$$\frac{3\ell}{\vartheta} \leq t \leq \frac{4\ell}{\vartheta}$$

$$+ \frac{\begin{array}{c} \boxed{U} \\ \hline \boxed{-U} \end{array}}{\vartheta} = \frac{\boxed{U}}{\vartheta}$$

$$+ \frac{\begin{array}{c} \boxed{-i} \\ \hline \boxed{i} \end{array}}{\vartheta} = \frac{\boxed{-i}}{\vartheta}$$

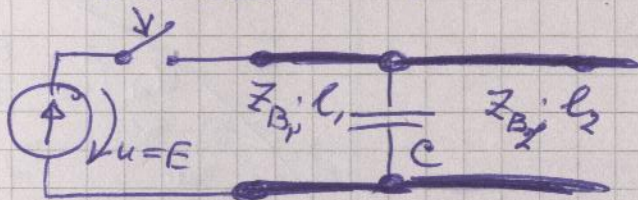
Итак, к концу 4-й стадии ПП линии возвратим в иск. сост. - ие ( $U=0$  и  $i=0$ ).

Теоретически это длится  $\infty$ .  
 На практике  $R_0 \neq 0$  и  $G_0 \neq 0$ , с теч-ем  
 времени ПП зак-ся и в итоге всей линии  
 установ-ся режим соот-вний установив-  
 шаяся процессу в линии подк-от-ой  
 к ист. пост. напр-ия.

И показать, что если линия прил. ①  
 замкнуть, то хар-р ~~ПП~~ тот же.

Если в состав нагрузки входит  $L$  или  $C$ ,  
 или вместе перехода есть  $L$  или  $C$ , то  
 отраж. и преломл. волны не будут тако-  
 жой же величиной. Волны эти waves  
 опр-ся после расчёта ПП в нагрузке  
 аналогич-но рис. 1

② Подкл. к ист. пост. напр. двух линий  
 ёмкости  $C$ .



$$0 < t \leq \frac{e}{v}$$

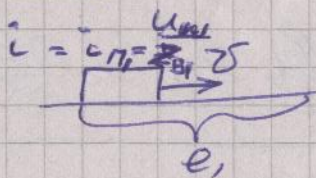
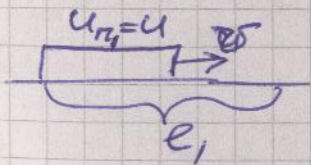
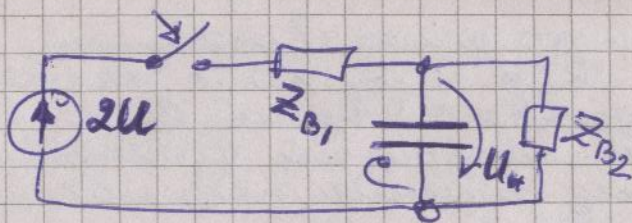


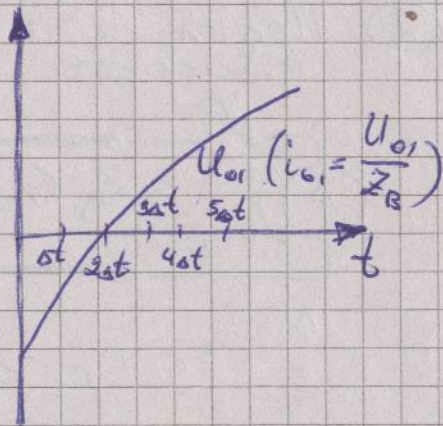
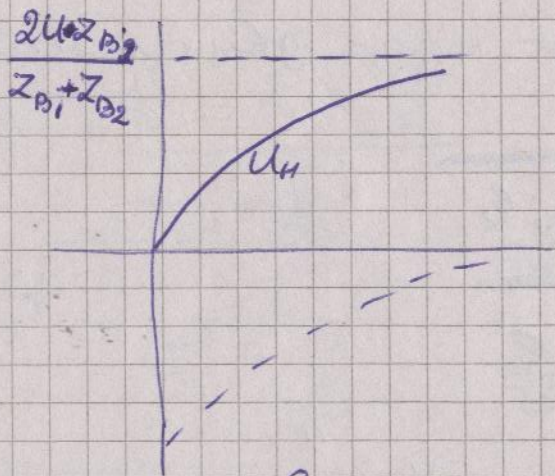
Схема замещ. расчёта ПП в точке 1



$$U_H = U_C = \frac{2U}{Z_{B1} + Z_{B2}} \cdot Z_{B2} (1 - e^{-pt}), \quad (1) \quad p = \frac{Z_{B1} + Z_{B2}}{Z_{B1} \cdot Z_{B2} \cdot C}$$

$$U_H = U_{H1} + U_{O1} \Rightarrow U_{O1} = U_H - U_{H1} = U_H - U \quad (2)$$

$$i_{O1} = \frac{U_{O1}}{Z_{B1}} \quad (3)$$



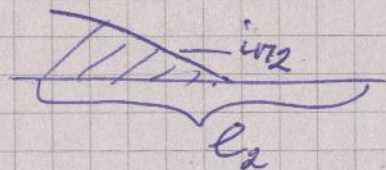
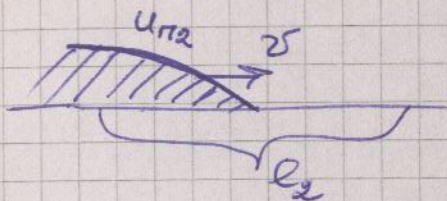
$$\frac{\tau}{5} < t < \frac{2\tau}{5}$$



Часть волны  $U_{\pi 1}$  и  $i_{\pi 1}$  ~~идет~~ в месте стыка не отражается, а проходит во вторую линию. Очевидно, что  $U_H$  есть  $U_{\text{падаю-}} \text{щей}$  волны в конце 1 линии

$$U_{\pi 2} = U_H$$

$$i_{\pi 2} = \frac{U_{\pi 2}}{Z_{B2}} = \frac{U_H}{Z_{B2}}$$



- ① Две лампы 5 кВт на  
напряжении 1000 В.

$$Z_{1X} = 535 e^{-j64}$$

$$Z_{1K} = 467,5 e^{-j10}$$

Найти  $Z_B$  и  $\gamma$  - ?

$$Z_{1X} = \frac{Z_B}{th \gamma l} \quad (55)$$

$$Z_{1K} = Z_B th \gamma l \quad (56)$$

$$Z_B = \sqrt{Z_{1X} \cdot Z_{1K}} = \sqrt{(234,5 - j480,85)(460,4 - j81,18)} =$$

$$th \gamma l = \sqrt{\frac{Z_{1K}}{Z_{1X}}} = \sqrt{\quad} =$$

$$Z_B = 399,4 - j300,98 = 500,1 e^{-37}$$

$$th \gamma l = 0,8329 + j0,4244 = 0,9348 e^{j27}$$

$$\gamma l = \arctg(0,8329 + j0,4244) = 0,7085 + j0,7116$$

$$\gamma = 0,1427 + j0,142 = 0,2 e^{j45}$$

$$th \gamma l = \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}$$

$$\frac{1 + th \gamma l}{1 - th \gamma l} = e^{-2\gamma l}$$

$$e^{2\gamma l} = \dots = 0,606 + j4,08 = 4,125 e^{j81,55^\circ}$$

$$\gamma l = (\alpha + j\beta) \cdot l = \alpha l + j\beta l =$$

$$e^{2\gamma l} = e^{2\alpha l} e^{2j\beta l}$$

$$e^{2\alpha l} = 4,125$$

$$2\alpha l = \ln 4,125$$

$$\alpha = \frac{\ln 4,125}{2 \cdot 5} = \frac{1,417}{10} = 0,1417$$

$$2\beta l = 81,55^\circ \cdot \pi / 180$$

$$\beta = \frac{1,42}{2 \cdot 5} = \frac{1,42}{10} = 0,142$$

② Для примера (1) определить первичные параметры.

$$(4) \gamma = \sqrt{Z_0 \cdot Y_0}$$

$$(7) Z_B = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}}$$

$$Z_0 = \gamma Z_B = (0,1417 + j0,142) \cdot (399,4 - j399,98) =$$

$$= 99,3 + j14,1 = R_0 + j\omega L_0$$

$$\underline{R_0 = 99,3 \text{ Ом/км}} \quad L_0 = \frac{14,1}{\omega} = \frac{14,1}{2\pi \cdot 1000} = 2,24 \frac{\mu\text{H}}{\text{км}}$$

$$Y_0 = G_0 + j\omega C_0 = \frac{1}{Z_B} = \dots = 55,5 \cdot 10^{-6} + j3,97 \cdot 10^{-4}$$

$$G_0 = 55,5 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$$

$$C_0 = \frac{3,97 \cdot 10^{-4}}{2\pi \cdot 1000} = 0,063 \cdot \frac{\mu\text{Ф}}{\text{км}}$$

③ Из примера (2) найти коэффициент к.  
ист. наст. напр-уд.

Опр-ть  $U_1$  и  $I_1$ , если  $R_2 = 400 \text{ Ом}$   
 $I_2 = 0,5 \text{ А}$ .

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l + \dot{I}_2 Z_B \operatorname{sh} \gamma l \\ \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l + \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l \end{cases}$$

$$\omega = 0: \gamma = \sqrt{Z_0 \cdot Y_0} = \sqrt{R_0 \cdot G_0} = 0,07423 \text{ 1/км}$$

$$Z_B = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = \sqrt{\frac{R_0}{G_0}} = 1338 \text{ Ом}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \Rightarrow \beta = 0, \alpha = 0,07423$$

$$\begin{aligned} U_1 &= U_2 \operatorname{ch} \gamma l + I_2 Z_B \operatorname{sh} \gamma l = I_2 R_2 \operatorname{ch} \gamma l + I_2 Z_B \operatorname{sh} \gamma l = \\ &= 468 \text{ В} \end{aligned}$$

$$\operatorname{ch} y l = \operatorname{ch} 0,07423 \cdot 5 = \operatorname{ch} 0,371 =$$

$$= \frac{e^{0,371} + e^{-0,371}}{2} = 1,07$$

$$\operatorname{sh} y l = \frac{e^{0,371} - e^{-0,371}}{2} = 0,38$$

$$I_1 = \frac{I_2 Z_B}{Z_B} \operatorname{sh} y l + I_2 \operatorname{ch} y l = \frac{0,5 \cdot 400}{1338} \cdot 0,38 + 0,5 \cdot 1,07 =$$

$$= 0,592 \text{ A}$$

④ Линия коротко замкн на конце и  
подк-на к ил. синус. напря-ия  
 $f = 1000 \text{ Гц}$

$$\dot{I}_2 = 1 \text{ A}$$

Опр-ть  $U_1$  и  $\dot{I}_1 = ?$

Для кз  $U_2 = 0$

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_2 Z_B \operatorname{sh} y l \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \operatorname{ch} y l \end{cases}$$

$$\dot{U}_1 = 1 (399,4 - j 300,98) \cdot \operatorname{sh}((0,1417 + j 0,142) \cdot 5) =$$

$$= 480,5 + j 152,9 = 504 e^{j 17,65^\circ}$$

$$\dot{I}_1 = 0,957 + j 0,501 = 1,08 e^{j 27,63^\circ}$$

$$y = 0,1417 + j0,142$$

$$y_L = 0,7085 + j0,7116$$

$$Z_B = 399,4 - j300,98$$

$$\operatorname{ch} y_L = \frac{e^{y_L} - e^{-y_L}}{2} = 0,9556 + j0,502$$

$$\left( \begin{aligned} e^{y_L} &= e^{0,7085} e^{j0,7116} = 2,031 e^{j0,7116} = \dots = 1,538 + j1,326 \\ e^{-y_L} &= e^{-0,7085} e^{-j0,7116} = 0,373 - j0,322 \end{aligned} \right)$$

$$\operatorname{sh} y_L = 0,5825 + j0,824$$

5) Линия нагружена акт. сопр.  $Z_2 = R_2 = 400 \Omega$   
 $I_2 = 0,5 \text{ A}$

---

$U_1$  и  $I_1$  - ?

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_2 Z_2 \operatorname{ch} y_L + \dot{I}_2 \operatorname{sh} y_L \cdot Z_B$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{I}_2 Z_2}{Z_B} \operatorname{sh} y_L + \dot{I}_2 \operatorname{ch} y_L$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= 0,5 \cdot 400 \cdot (0,9556 + j0,502) + 0,5 \cdot (0,5825 + j0,824) \cdot \\ &\quad \cdot (399,4 - j300,98) = 431,4 + j177,3 \end{aligned}$$

$$\dot{I}_1 = 0,466 + j0,654$$

6 Опре-ть затухание в линиях, если на конце соглас нагрузка.

$$Z_2 = Z_B$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 (\operatorname{ch} \gamma l + \operatorname{sh} \gamma l) - \dot{U}_2 e^{\gamma l}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 (\operatorname{ch} \gamma l + \operatorname{sh} \gamma l) = \dot{I}_2 e^{\gamma l}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= U_2 e^{j\psi_{u1}} = U_2 e^{j\psi_{u2}} e^{\alpha l} e^{j\beta l} = \\ &= U_2 e^{\alpha l} \cdot e^{j(\psi_{u2} + \beta l)} \end{aligned}$$

$$U_1 = U_2 e^{\alpha l}$$

$$\psi_{u1} = \psi_{u2} + \beta l$$

$$a_{\text{нп}} = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 = \ln \frac{U_1}{U_2} = \alpha l = 0,7085 \text{ дБ}$$

Опре-ть  $U_1$ , если  $U_2 = 100 \text{ В}$ ,  $\alpha l = 0,7085$

$$U_1 = U_2 e^{\alpha l} = \underline{203 \text{ В}}$$

### Выводы:

1. Из уравнений, описывающих связь между  $i(t)$  и  $u(t)$  для  $R$ ,  $L$  и  $C$ , а также для последовательного участка, узла и контура схемы, следуют уравнения для Лапласовых изображений  $I(p) \doteq i(t)$  и  $U(p) \doteq u(t)$ .
2. Последние уравнения подобны законам Ома и Кирхгофа в символическом методе (получаются из них заменой  $j\omega$  на  $p$ ). Отличие заключается в появлении т.н. «внутренних» ЭДС  $Li_L(0+)$  и  $u_C(0+)/p$ , определяемых по начальным токам в индуктивностях и напряжениям на емкостях схемы.
3. Элементам  $R$ ,  $L$  и  $C$  соответствуют операторные схемы замещения рис.1-3.
4. С учетом п.3 для исходной схемы составляется эквивалентная схема замещения для операторных изображений ЭДС, токов и напряжений.
5. Эквивалентная схема рассчитывается с применением изученных ранее методов (по законам Кирхгофа, МКТ, МУП, МЭГ, МН и др.).

### **8. Алгоритм расчета переходного процесса операторным методом.**

1. Задаться положительными направлениями токов, напряжений в схеме.
2. В докоммутационной схеме рассчитать все  $i_L$  и  $u_C$  для  $t = 0-$ .
3. Составить эквивалентную операторную схему послекоммутационной цепи, учитывая ненулевые начальные условия в  $L$  и  $C$  введением ЭДС  $Li_L(0+)$  и  $u_C(0+)/p$ .
4. Рассчитав схему п.3, получить операторные изображения искомых токов и напряжений.
5. Перейти от изображений искомых величин к соответствующим этим изображениям функциям времени, используя таблицу операторных соотношений, свойства преобразования Лапласа и др.

### **9. Теорема разложения.**

Если изображение имеет вид несократимой рациональной дроби:

$$F(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0}, \text{ причем } m < n,$$

то оригинал  $f(t) \doteq F(p)$  равен:

$$f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t}, \quad (12)$$

где  $p_k$  – корни уравнения  $F_2(p)=0$ , один из которых может быть и нулевым.

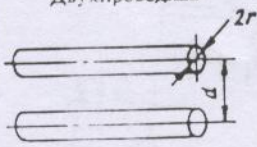
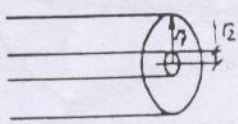
| Первичный параметр                   | Линия                                                                             |                                                                                    |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|                                      | Двухпроводная                                                                     | Коаксиальная                                                                       |
|                                      |  |  |
| Емкость на единицу длины линии       | $C_0 = \pi \epsilon_0 / \ln(d/r)$                                                 | $C_0 = 2 \pi \epsilon_0 / \ln(r_1/r_2)$                                            |
| Индуктивность на единицу длины линии | $L_0 = \frac{\mu_0}{\pi} \ln(d/r)$                                                | $L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(r_1/r_2)$                                            |

Рис. 1

Рис. 2

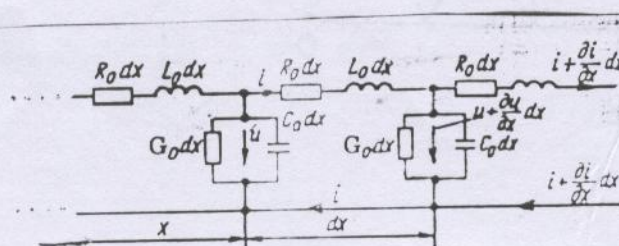


Рис. 3

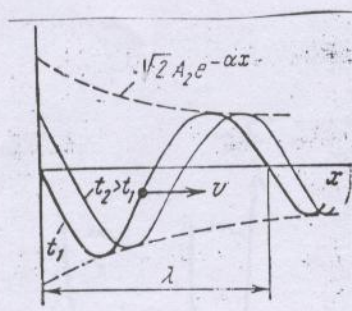


Рис. 4

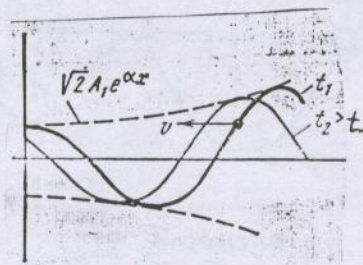


Рис. 5

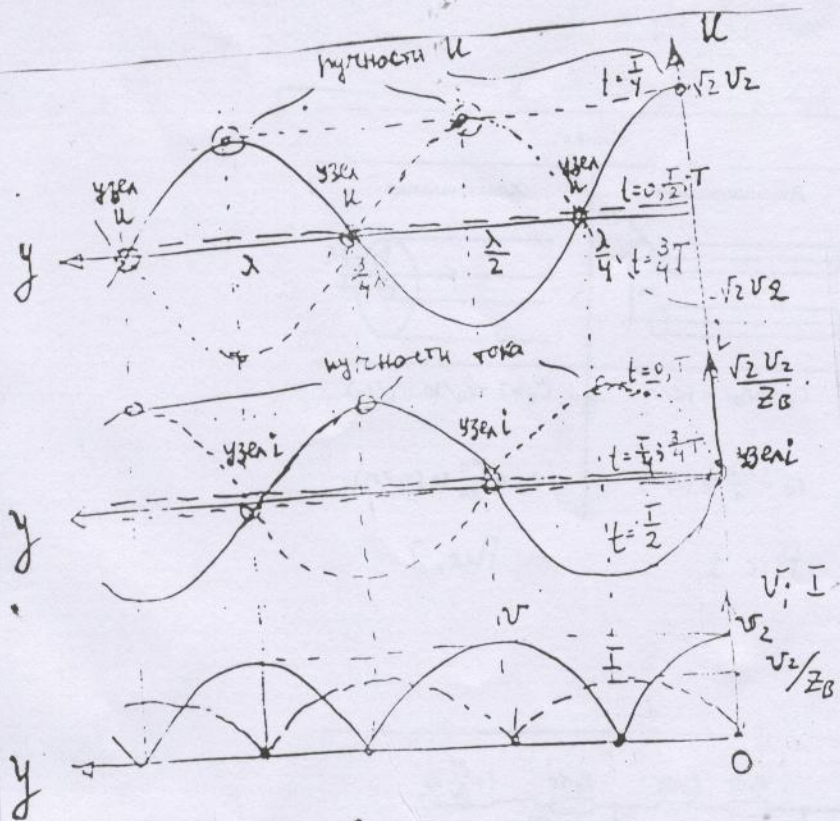


Рис. 7

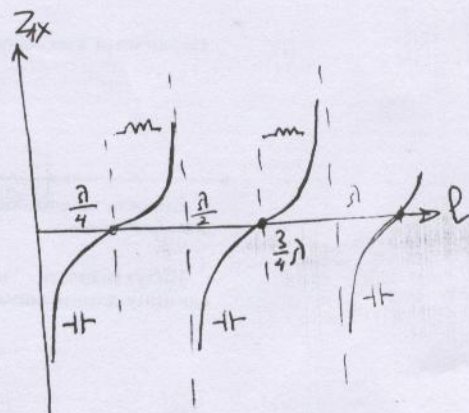


Рис. 8

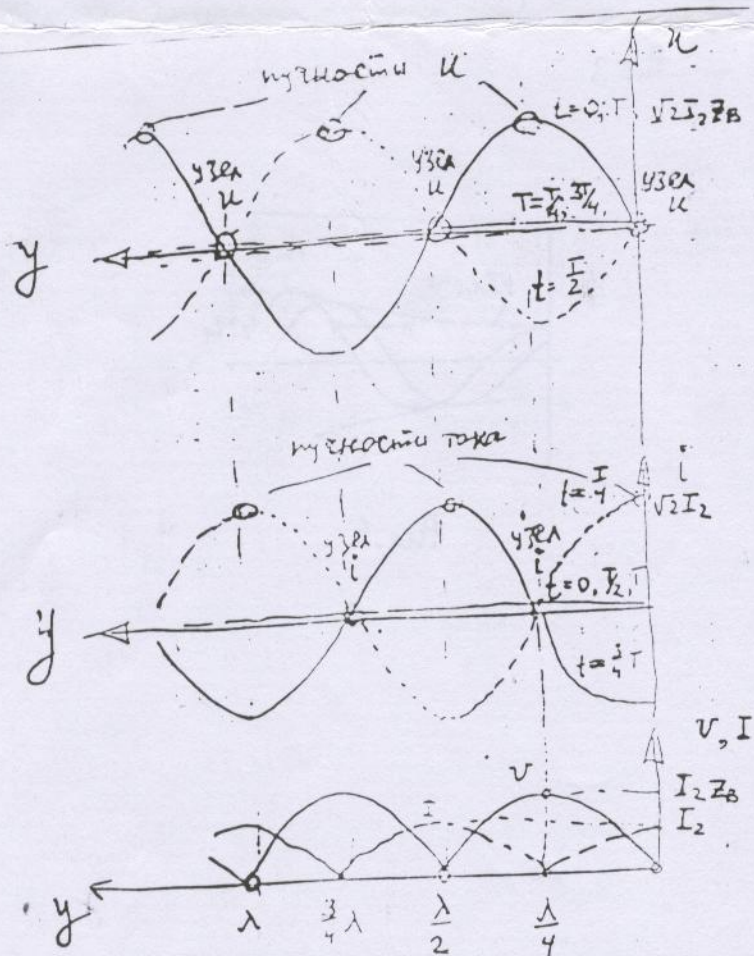


Рис. 9

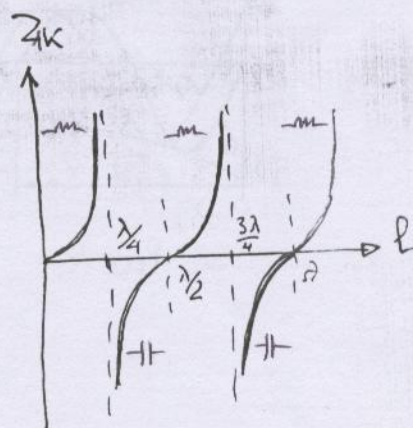


Рис. 10

## 11. Линия без потерь в режиме короткого замыкания.

В уравнениях (47) положим  $\dot{U}_2=0$ :

$$\begin{cases} \dot{U}(y) = j\dot{I}_2 Z_B \sin \beta y; \\ \dot{I}(y) = \dot{I}_2 \cos \beta y \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{- ур-я линии без потерь} \\ \text{в режиме к.з.} \end{array} \quad (57)$$

Пусть  $\Psi_{i_2} = 0$ . Так как  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ , из уравнений (57) следует:

$$\begin{cases} \dot{U}(y) = I_2 Z_B \sin \frac{2\pi}{\lambda} y \cdot e^{j90^\circ}; \\ \dot{I}(y) = I_2 \cos \frac{2\pi}{\lambda} y. \end{cases}$$

или для мгновенных значений:

$$\begin{cases} u(y; t) = I_2 Z_B \sqrt{2} \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} y \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) = I_2 Z_B \sqrt{2} \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} y \cdot \cos \omega t; \\ i(y; t) = I_2 \sqrt{2} \cdot \cos \frac{2\pi}{\lambda} y \cdot \sin \omega t. \end{cases} \quad (58)$$

/ см. рис.9 к формулам (58) /

### Выводы:

1. В закороченной линии без потерь возникает «режим стоячих волн». Появляются точки, в которых  $u$  или  $i$  всегда равны нулю (т.н. «узлы» напряжения и тока). В остальных точках происходит пульсация  $u$  и  $i$ . Наибольшая амплитуда пульсаций – в т.н. «пучностях».
2. Через узлы  $u$  и  $i$  энергия не передается. На участках линии длиной  $\lambda/4$  происходит колебательный процесс обмена энергией между электрическим и магнитным полями.

## 12. Входное сопротивление закороченной линии.

Из уравнений (25) или (32) при  $\dot{U}_2=0$  следует:

$$Z_{1к} = \frac{\dot{U}_{1к}}{\dot{I}_{1к}} = \frac{\dot{I}_{2к} Z_B \operatorname{th} \gamma l}{\dot{I}_{2к} \operatorname{ch} \gamma l} = Z_B \operatorname{th} \gamma l. \quad (59)$$

Для линии без потерь:

$$Z_B = Z_0; \quad \gamma = j\beta; \quad \operatorname{th} \gamma l = j \operatorname{tg} \beta l; \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$Z_{1к} = j Z_0 \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} l \quad (60)$$

/ см. рис.10 к формуле (60) /

### Выводы:

1. Входное сопротивление закороченной линии без потерь зависит от ее длины, при изменении которой периодически меняется.  
(при длине линии, равной  $\frac{\lambda}{2}; \lambda; \frac{3}{2}\lambda; \dots$   $Z_{1к} = 0$ ; при длине  $\frac{\lambda}{4}; \frac{3}{4}\lambda; \frac{5}{4}\lambda$  и т.д.  $Z_{1к} = \pm j\infty$ ).
2. Это сопротивление является чисто реактивным.
3. Разомкнутая линия без потерь может использоваться как идеальная индуктивность (при  $l < \frac{\lambda}{4}$ ) или как идеальная емкость ( $\frac{\lambda}{4} < l < \frac{\lambda}{2}$ ).

### 13. Реактивная нагрузка в конце линии без потерь.

#### Индуктивная нагрузка в конце линии.

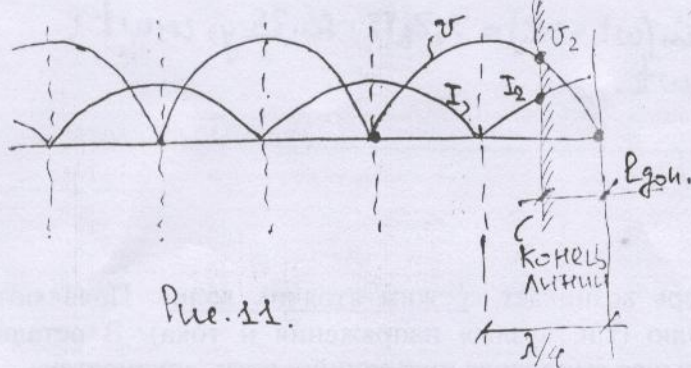
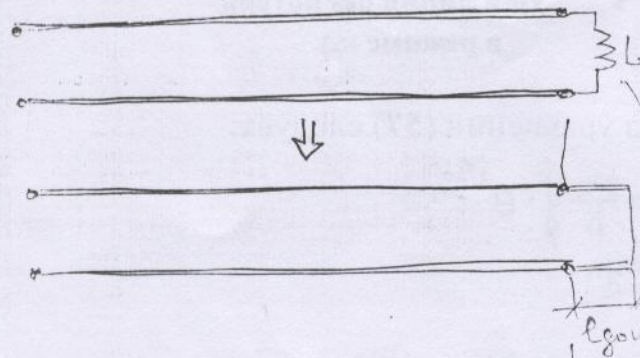


Рис. 11.

Индуктивную нагрузку в конце линии можно заменить отрезком закороченной линии без потерь:

(см. рис. 10)

$$Z_L = Z_K.$$

$$j\omega L = jZ_B \operatorname{tg} \beta l_{\text{гон}}.$$

$$\beta l_{\text{гон}} = \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{Z_B}.$$

$$l_{\text{гон}} = \frac{1}{\beta} \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{Z_B}$$

$$\left( \beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega \sqrt{L_0 C_0} \right)$$

#### Емкостная нагрузка в конце линии.

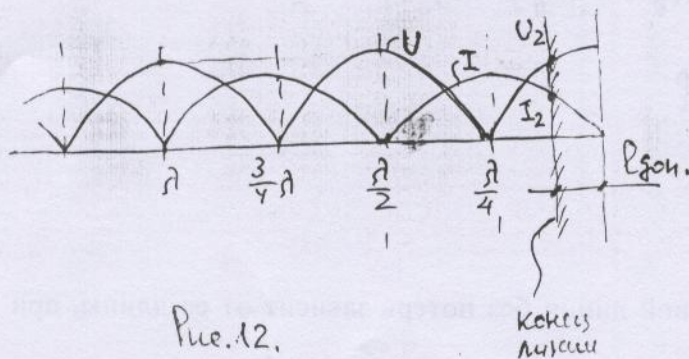
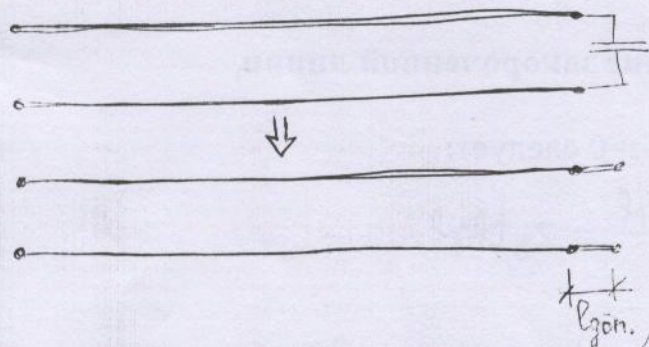


Рис. 12.

Емкостную нагрузку в конце линии можно заменить отрезком разомкнутой линии без потерь:

(см. рис. 8)

$$-j \frac{1}{\omega C} = -jZ_B \operatorname{ctg} \beta l_{\text{гон}}.$$

$$\beta l_{\text{гон}} = \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega C Z_B}.$$

$$l_{\text{гон}} = \frac{1}{\beta} \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega C Z_B}$$

После выполнения таких замен можно использовать рассмотренные ранее уравнения для режимов х.х. и к.з. (с учетом «изменившейся» длины линии).