

# Радиотехническая работа 23

## Безынерционные линейные цепи

### Выполнил Жданов Елисей Б01-205

## 1 Оборудование:

Макетная плата

Электронный осциллограф на печатной плате

Электронный генератор сигналов на печатной плате

Набор резисторов различных номиналов

Коаксиальный кабель

Программное обеспечение Micro-Cap

## 2 Задание

### 2.1 Измерение параметров линии

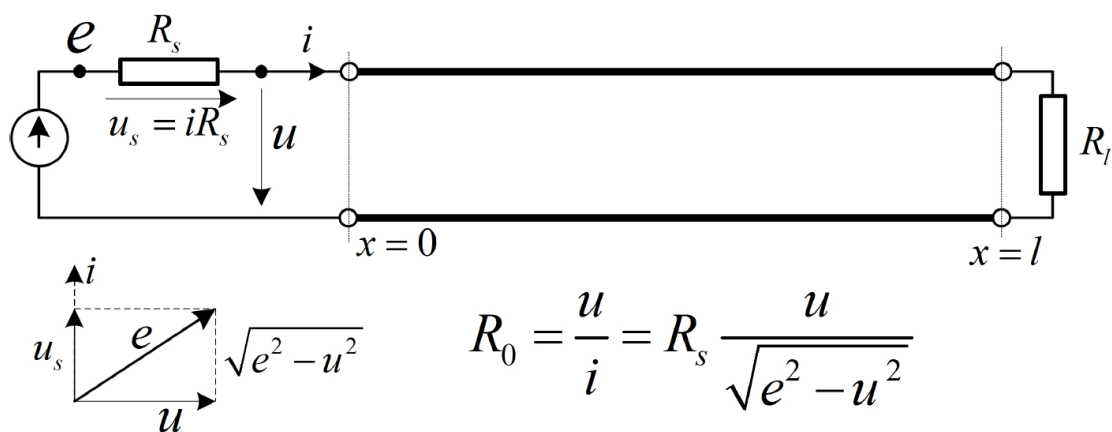


Рис. 10. Схема эксперимента

### 2.1.1 Теория

Измерения проводить на частоте  $f = 1.0-1.5$  МГц при высоком уровне входного сигнала порядка 2-3 В. Эффективные значения напряжения источника  $e$  и напряжения на входе линии  $u$  измерять параллельно двумя каналами осциллографа, используя входы с делением на 10. Имеет смысл предварительно проверить тождественность показаний в каналах и, при необходимости, ввести поправочный коэффициент. Для достижения достаточной точности измерений сопротивление источника  $R_s$  подбирать так, чтобы напряжение  $u$  на входе линии составляло порядка  $\frac{e}{\sqrt{2}}$ . В режиме короткого замыкания на выходе потребуется  $R_s \approx 30 - 50$  Ом, в режиме холостого хода -  $R_s \approx 250 - 400$  Ом.

Для вычисления входного сопротивления линии  $R_0$  по измеренным значениям  $e$  и  $u$  использовать приведенную на рис формулу, которая учитывает факт ортогональности напряжений  $u_s$  и  $u$  на резисторе  $R_s$  и входе линии вследствие мнимости входного импеданса линии в отсутствие потерь.

### 2.1.2 Выполнение

- 1) Длина кабеля составляет  $L = 5.9$  метра.
- 2) Используем сопротивления для короткого замыкания и холостого хода

$$R_{s0} = 29 \text{ Ом}$$

$$R_{s\infty} = 352 \text{ Ом}$$

Частота генератора  $f = 1$  МГц.

Для короткого замыкания ( $R_{s0}$ ),  $e = 3.09$  Вольта,  $u = 1.955$  Вольта. Тогда

$$R_0 = R_{s0} \frac{u}{\sqrt{e^2 - u^2}} = 287 \text{ Ом}$$

Для холостого хода ( $R_{s\infty}$ ),  $e = 3.09$  Вольта,  $u = 1.855$  Вольта. Тогда

$$R_\infty = R_{s\infty} \frac{u}{\sqrt{e^2 - u^2}} = 21.8 \text{ Ом}$$

- 3) Волновое сопротивление линии

$$\omega = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{R_0 \cdot R_\infty} = 79 \text{ Ом}$$

Скорость распространения волны

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \approx 2\pi f l \frac{\omega}{R_0} = 0.45c$$

Погонные емкость и индуктивность

$$= \frac{1}{\omega v} = 9.42 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}$$

$$L = \frac{\omega}{v} = 5.88 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$$

4) Исследуем резонансный пик на частоте  $f_0 = 7.4 \text{ МГц}$  и  $R_s = 1.1 \text{ кОм}$ . Тогда сопротивление

$$R_0 = R_s \frac{u}{e - u} = 1 \text{ кОм}$$

Ширина в результате

$$\Delta f = 0.75 \text{ МГц}$$

5) Погонное сопротивление

$$R = \frac{\omega^2}{R_0 l} = 0.9 \text{ Ом}$$

, что неплохо согласуется с прямым замером мультиметром.

Добротность

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \left( 1 + \frac{R_0}{R_s} \right) \approx 10$$

Результат второй формулы  $Q = \frac{\pi \omega}{4 R l}$  эквивалентен полученному.

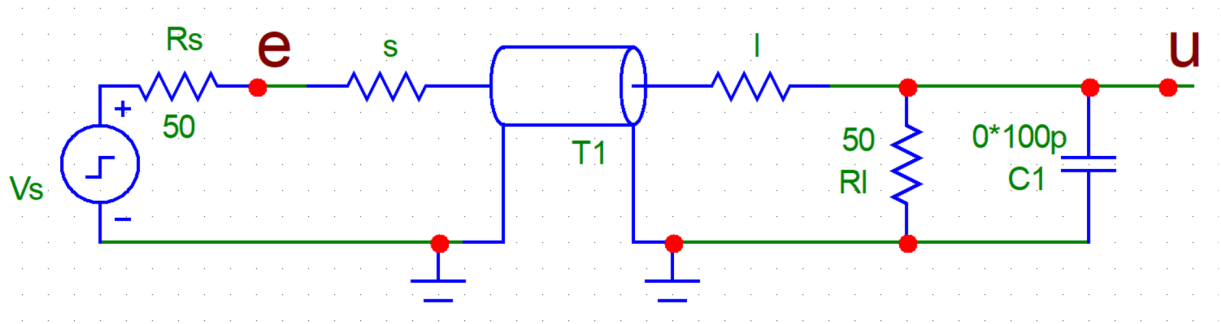
Шунтирование ожидаемо расширяет полосу пропускания в  $\simeq 1.9$  раз.

### 2.1.3 Вывод

## 2.2 Исследование переходных процессов

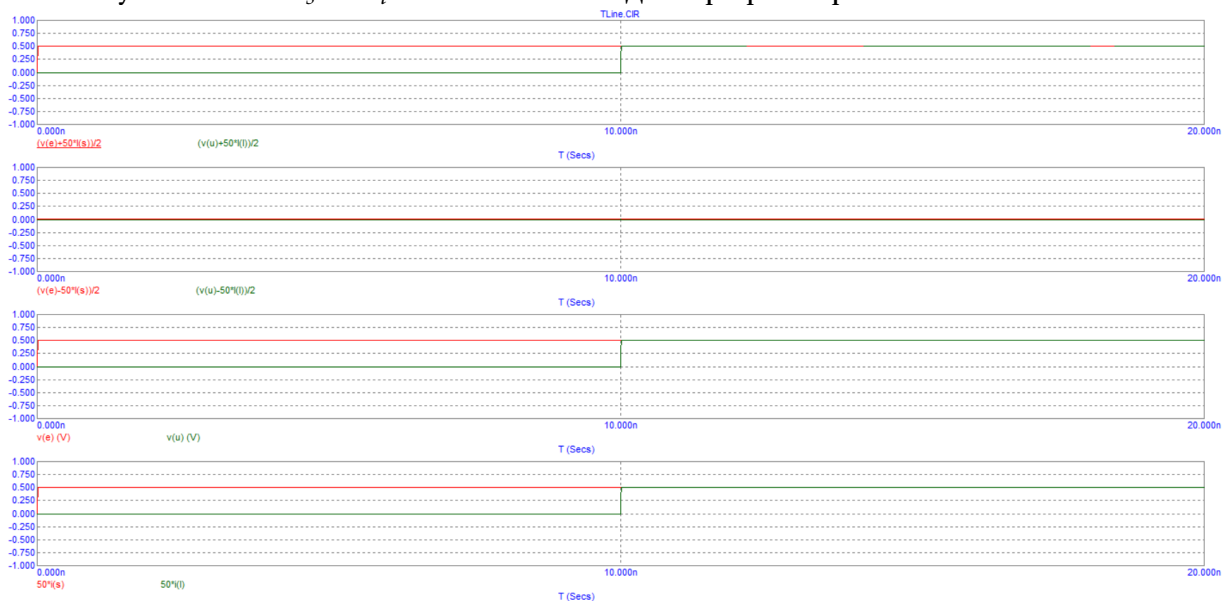
### 2.2.1 Теория

Исследования проводятся в режиме Transient MicroCap.



### 2.2.2 Выполнение. Согласованная линия

На схеме установим  $R_s = R_l = 50 \text{ Ом}$  и выведем график в режиме *Transient*.



Проанализируем графики и получим:  $v(u) = 0.5 \text{ В}$  и  $i(l) \cdot \omega = 0.5 \text{ В}$ . Убедимся, что источник отражает предельную мощность

$$P = v(u)i(l) = \frac{V^2}{4R_s}, \text{ где } V = 1 \text{ В}$$

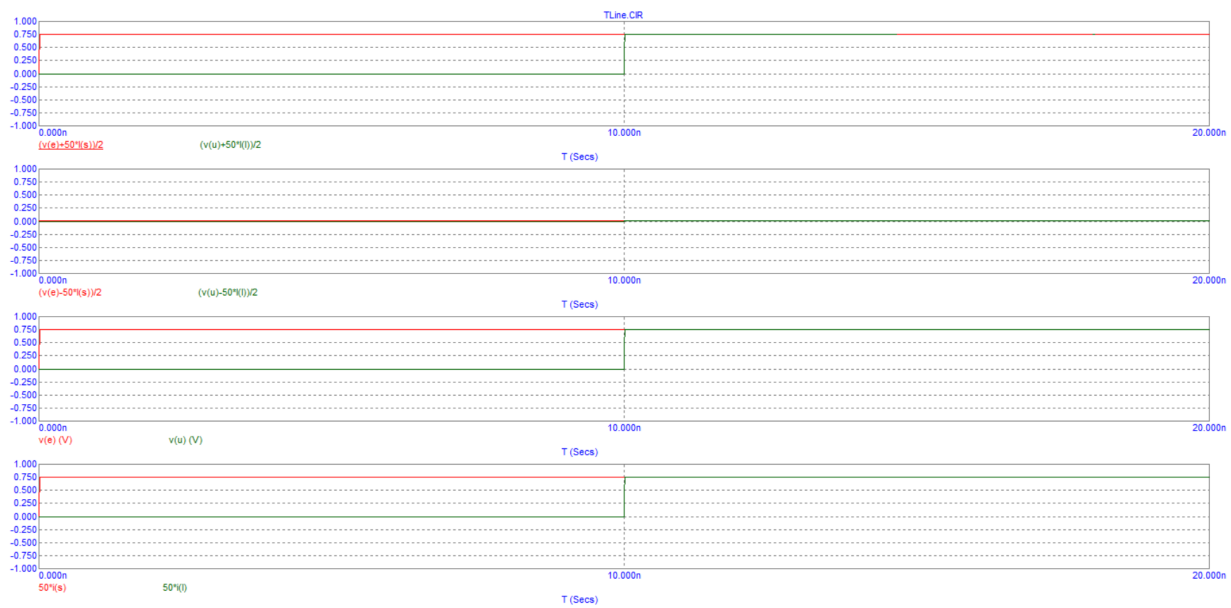
$$P\omega = v(u)i(l)\omega = 0.5 \cdot 0.5 = 0.25 = \frac{V^2}{4R_s}\omega,$$

Источник отражает предельную мощность.

### 2.2.3 Рассогласованный источник

Установим  $R_s = \frac{\omega}{3} = \frac{50}{3} \text{ Ом}$ . Выведем график в режиме *Transient*.

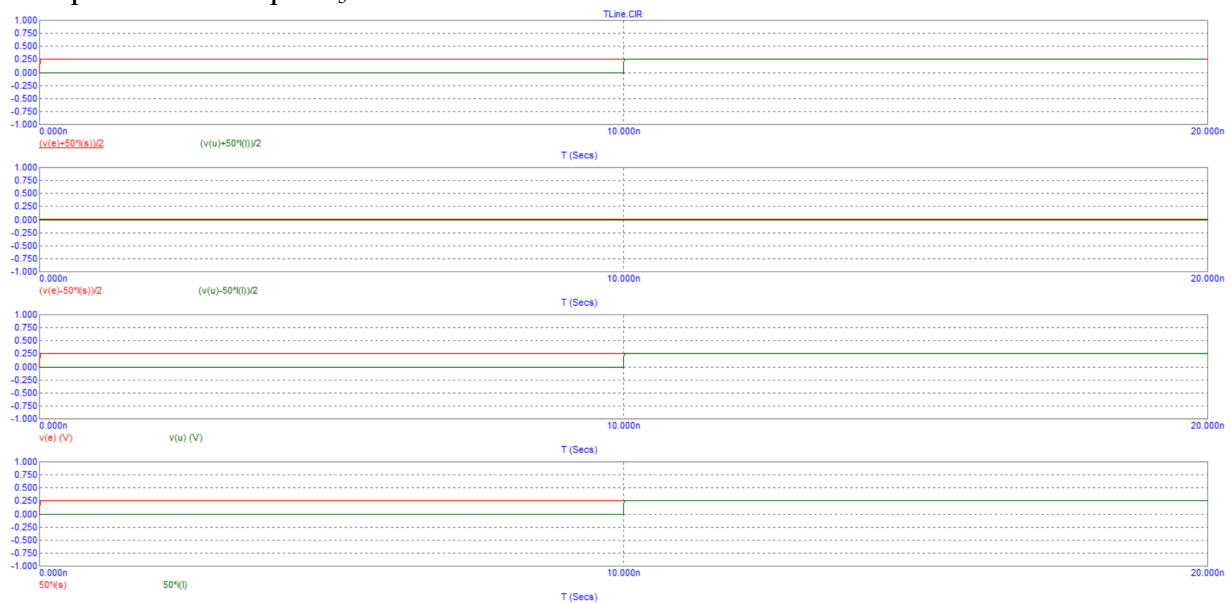
Проанализируем графики и получим:  $u(v) = 0.75 \text{ В}$  и  $i(l) \cdot \omega = 0.75 \text{ В}$ . Проверим, что отдаваемая мощность  $P$  меньше мощности источника в  $(1 - \rho_s^2)$  раз:



$$\rho_s = \frac{R_s - \omega}{R_s + \omega} = -\frac{1}{2}$$

$$P\omega = v(u)i(l)\omega = 0.75 \cdot 0.75 = 0.5625 = \frac{V^2}{4R_s}\omega(1 - \rho_s^2),$$

Повторим все это при  $R_s = 3\omega = 150 \text{ Ом}$



Проанализируем графики и получим:  $u(v) = 0.25 \text{ В}$  и  $i(l) \cdot \omega = 0.25 \text{ В}$ . Проверим, что отдаваемая мощность  $P$  меньше мощности источника в  $(1 - \rho_s^2)$  раз:

$$\rho_s = \frac{R_s - \omega}{R_s + \omega} = \frac{1}{2}$$

$$P\omega = v(u)i(l)\omega = 0.25 \cdot 0.25 = 0.0625 = \frac{V^2}{4R_s}\omega(1 - \rho_s^2)$$

Равенства справедливы.

## 2.2.4 Рассогласованная нагрузка

Установим варьированием  $R_l = \frac{\omega}{3} = \frac{50}{3}$  Ом [ $\rho_l = -\frac{1}{2}$ ],  $R_l = 0$  Ом [ $\rho_l = 0$ ],  $R_l = 3\omega = 150$  Ом, [ $\rho_l = \frac{1}{2}$ ]  $R_l = \frac{\omega}{3} = 50$  кОм [ $\rho_l = +1$ ] ( $R_s = 50$  Ом). Измерим установившиеся значения амплитуд волн, напряжений и токов.

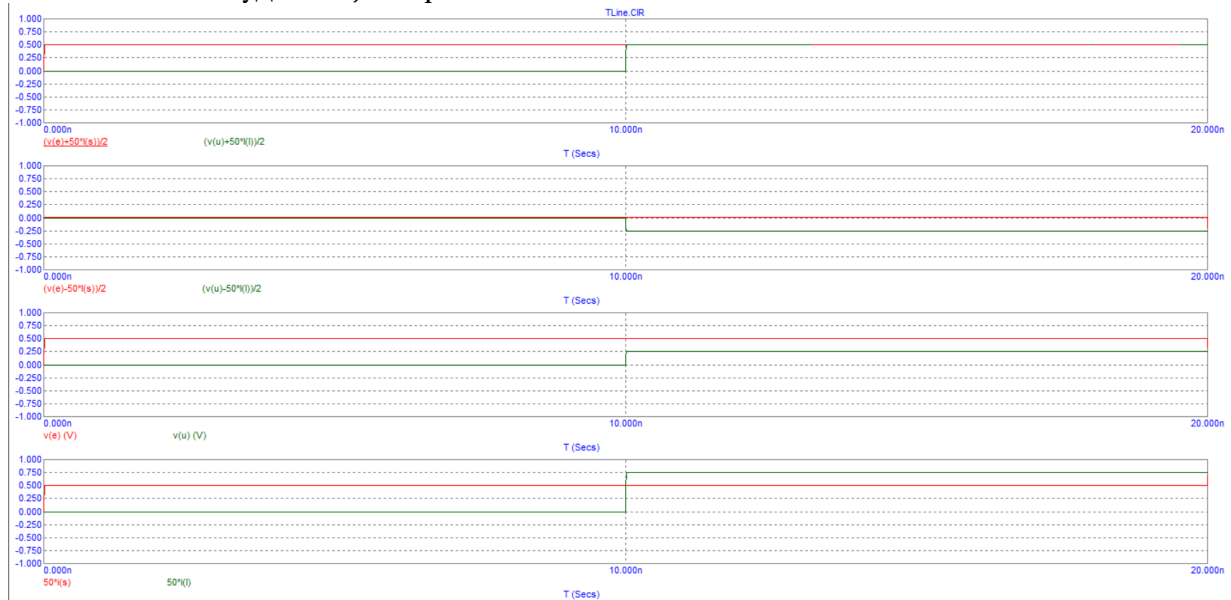


Рис. 1:  $R_l = \frac{\omega}{3}$

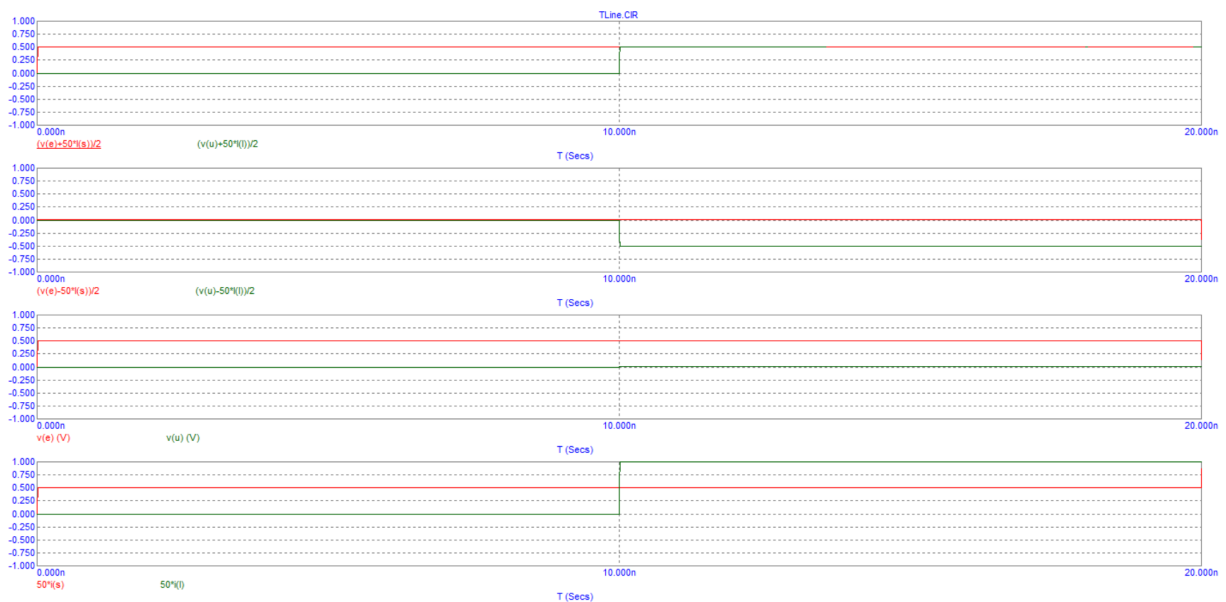


Рис. 2:  $R_l = 0$

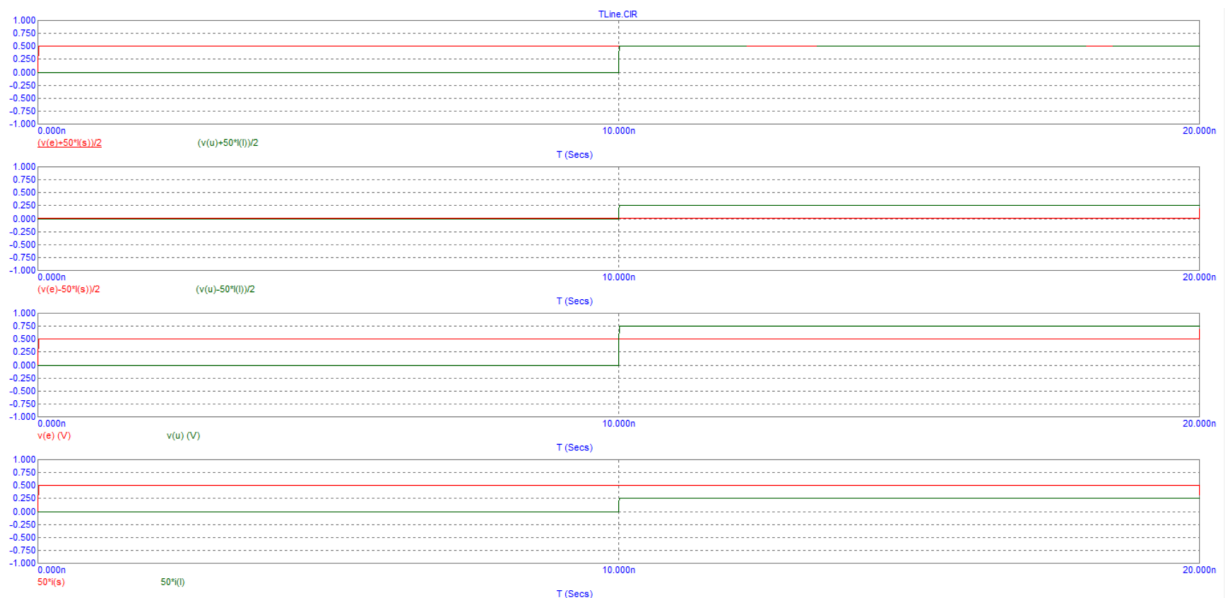


Рис. 3:  $R_l = 3\omega$

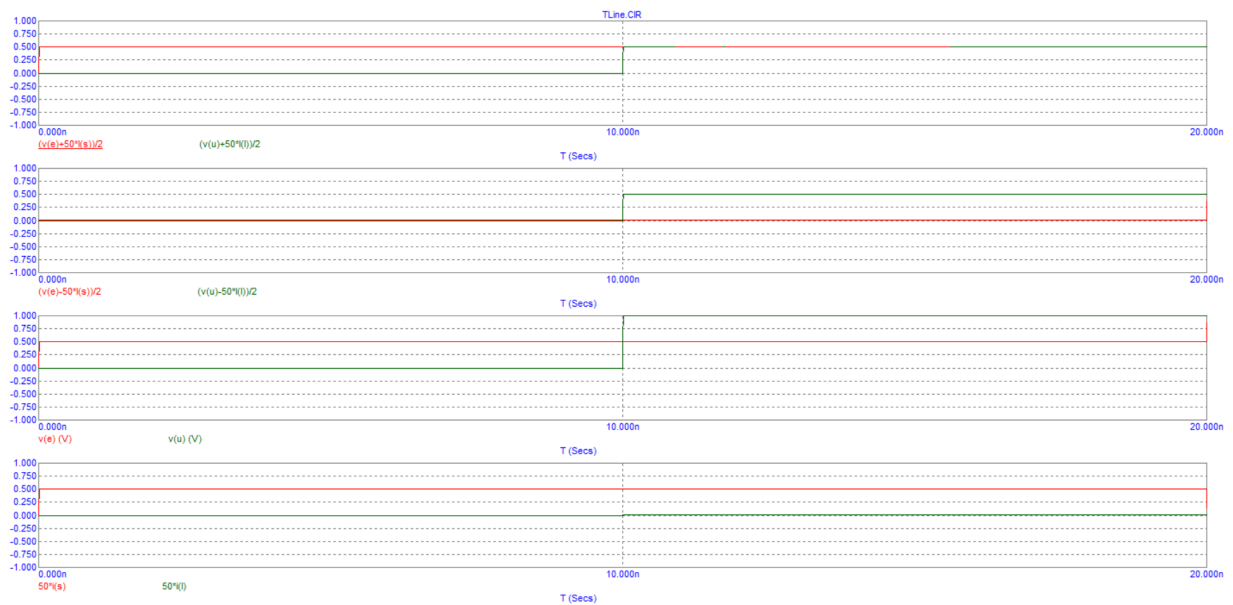


Рис. 4:  $R_l = 50k$

Запишем данные в таблицу:

$R_l/\omega$	1/3	0	3	$\infty$
A	0.5	0.5	0.5	0.5
B	-0.25	-0.5	0.25	0.5
$v(u)$	0.25	0	0.75	1
$i(l)\omega$	0.75	1	0.25	0

### 2.2.5 Рассогласованные источник и нагрузка

Установим на схеме  $R_s = 50/3$  [ $\rho_s = -\frac{1}{2}$ ]. Установим варьированием  $R_l = 0$  [ $\rho_l = -1$ ],  $\rho_s \rho_l = \frac{1}{2}$ , выведем графики.

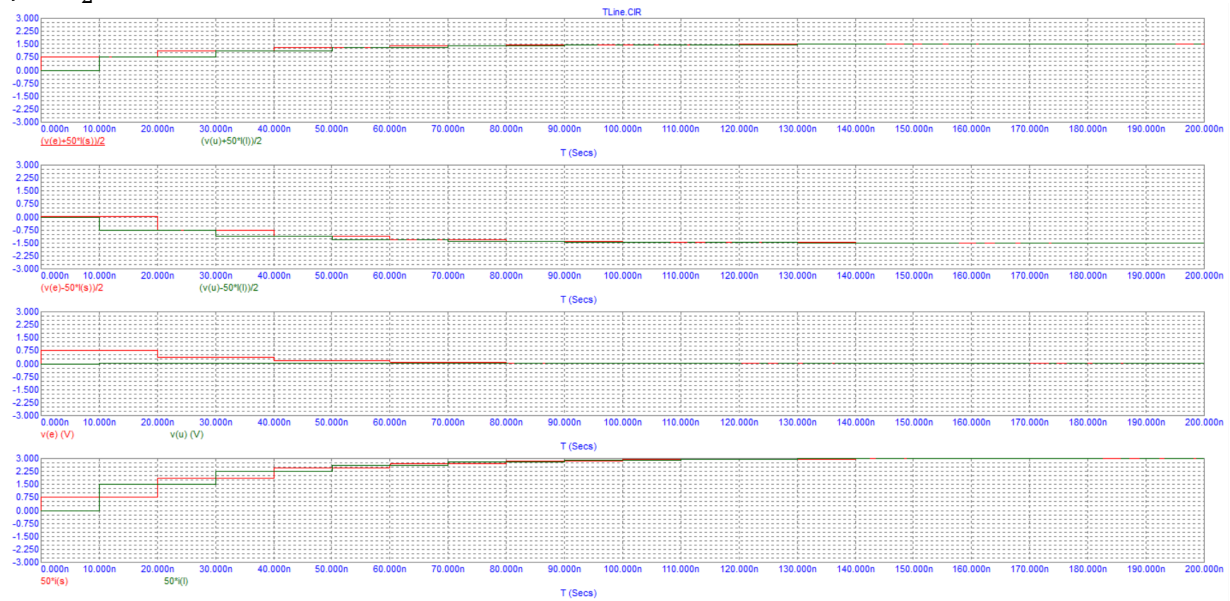


Рис. 5:  $R_l = 0, R_s = 50/3$

Убедимся в том, что амплитуда падающей волны нарастает, как последовательных частичных сумм прогрессии:

$$A = \frac{\omega}{\omega + R_s} \left( 1 + \rho_s \rho_l + (\rho_s \rho_l)^2 + \dots \right) = \frac{3}{4} \left( 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \dots \right) = 1.5$$

Первый шаг ( $n = 1$ ) :  $A = 0.75$ .

Второй шаг ( $n = 2$ ) :  $A = 1.125$ .

Третий шаг ( $n = 3$ ) :  $A = 1.3125$ .

Установившееся значение: ( $n = \infty$ ) :  $A = 1.5$ .



Повторим наблюдения при  $R_l = 50k \approx \infty$  [ $\rho_l = 1$ ],  $\rho_s \rho_l = -\frac{1}{2}$ :



Рис. 6:  $R_l = 50k, R_s = 50/3$

$$A = \frac{\omega}{\omega + R_s} \left( 1 + \rho_s \rho_l + (\rho_s \rho_l)^2 + \dots \right) = \frac{3}{4} \left( 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{4} - \dots \right) = \frac{3}{4} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{2}$$

Первый шаг ( $n = 1$ ) :  $A = 0.75$ .

Второй шаг ( $n = 2$ ) :  $A = 0.375$ .

Третий шаг ( $n = 3$ ) :  $A = 0.5625$ .

Установившееся значение: ( $n = \infty$ ) :  $A = 0.5$ .

Установим на схеме  $R_s = 50\omega$  [ $\rho_s = \frac{1}{2}$ ] и повторим наблюдения при  $R_l = 0$  [ $\rho_l = -1$ ].



Рис. 7:  $R_l = 50k, R_s = 50/3$

$$A = \frac{\omega}{\omega + R_s} \left( 1 + \rho_s \rho_l + (\rho_s \rho_l)^2 + \dots \right) = \frac{1}{4} \left( 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{4} - \dots \right) = \frac{1}{4} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{6}$$

Первый шаг ( $n = 1$ ) :  $A = 0.25$ .

Второй шаг ( $n = 2$ ) :  $A = 0.125$ .

Третий шаг ( $n = 3$ ) :  $A = 0.1875$ .

Установившееся значение: ( $n = \infty$ ) :  $A = \frac{1}{6}$ .

Установить на схеме  $R_s = 0$  [ $\rho_s = -1$ ] (предельно сильное рассогласование на источнике) и повторить наблюдения при

$$R_l = 50k, [\rho_l = 1] \Rightarrow A = (1 - 1 + 1 - \dots),$$

$$R_l = 500, [\rho_l = 0.8] \Rightarrow A = (1 - \rho_l + \rho_l^2 - \dots),$$

$$R_l = 0, [\rho_l = 1] \Rightarrow A = (1 + 1 + 1 + \dots),$$

$$R_l = 5, [\rho_l = -0.8] \Rightarrow A = (1 + \rho_l + \rho_l^2 + \dots),$$



Рис. 8:  $R_l = 50k, R_s = 0$

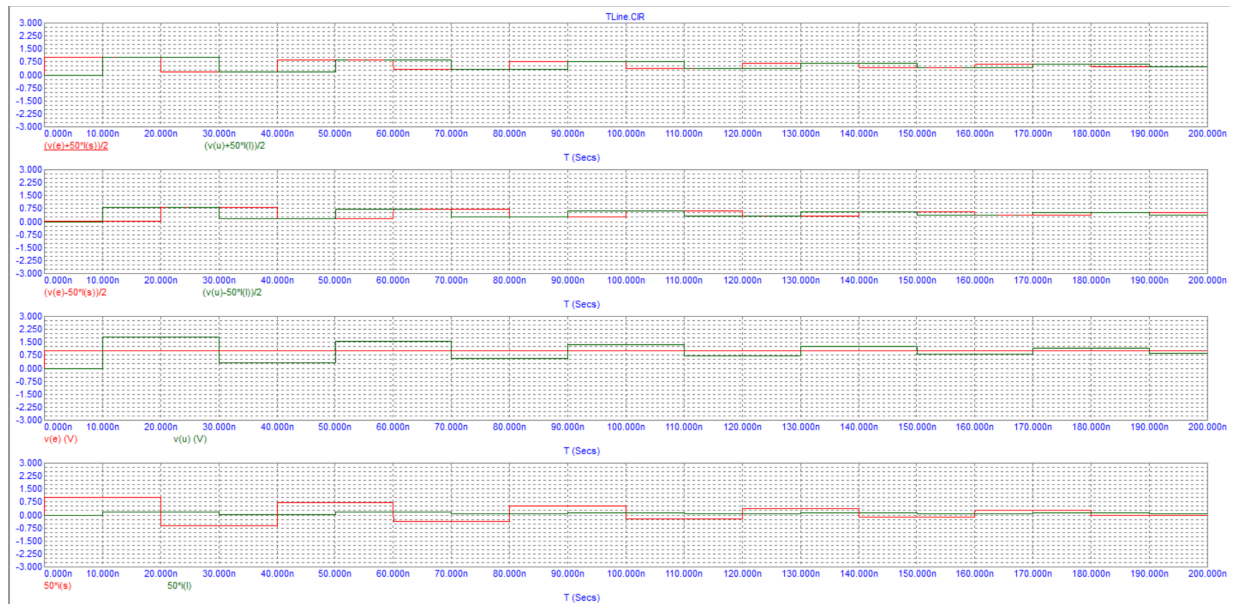


Рис. 9:  $R_l = 500, R_s = 0$



Рис. 10:  $R_l = 0, R_s = 0$



Рис. 11:  $R_l = 5, R_s = 0$

## 2.2.6 Емкостная нагрузка

Установить на схеме  $R_s = 50$  (согласованный источник),  $R_l = 50k \simeq \infty$ ,  $C = 100$  пФ.

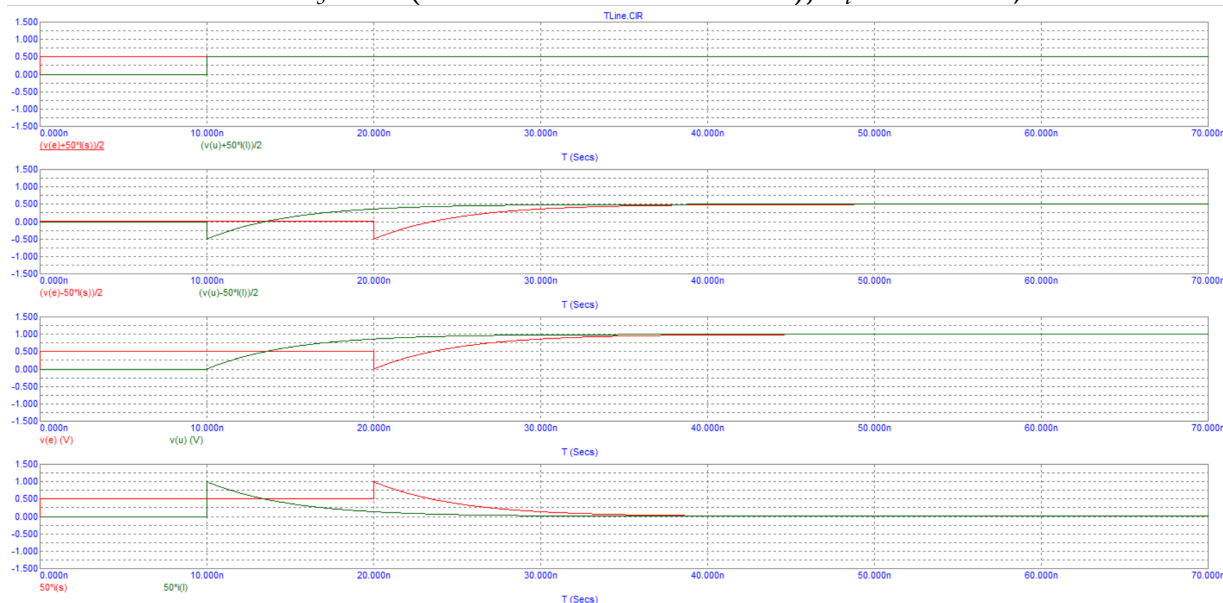


Рис. 12:  $R_l = 50k, R_s = 50$

Измерим установившиеся значения амплитуд волн напряжений и токов:

$$A = 0.5 \text{ B}$$

$$B = 0.5 \text{ B}$$

$$u = 1 \text{ B}$$

$$i\omega = 0 \text{ B}$$

Оценим по графику постоянную времени  $\tau$  экспоненциального переходного процесса:

$$u = u_0 \left(1 - \frac{1}{e}\right),$$

где  $u_0 = 1 \text{ B} \Rightarrow u = 0.63 \text{ B}$ , тогда:

$$\tau_{\text{эксп}} = 5.1 \text{ нс}$$

$$\tau_{\text{теор}} = \omega C = 5 \text{ нс}$$

Варьированием установим  $R_s = 50/3$ , проанализируем графики переходных процессов.

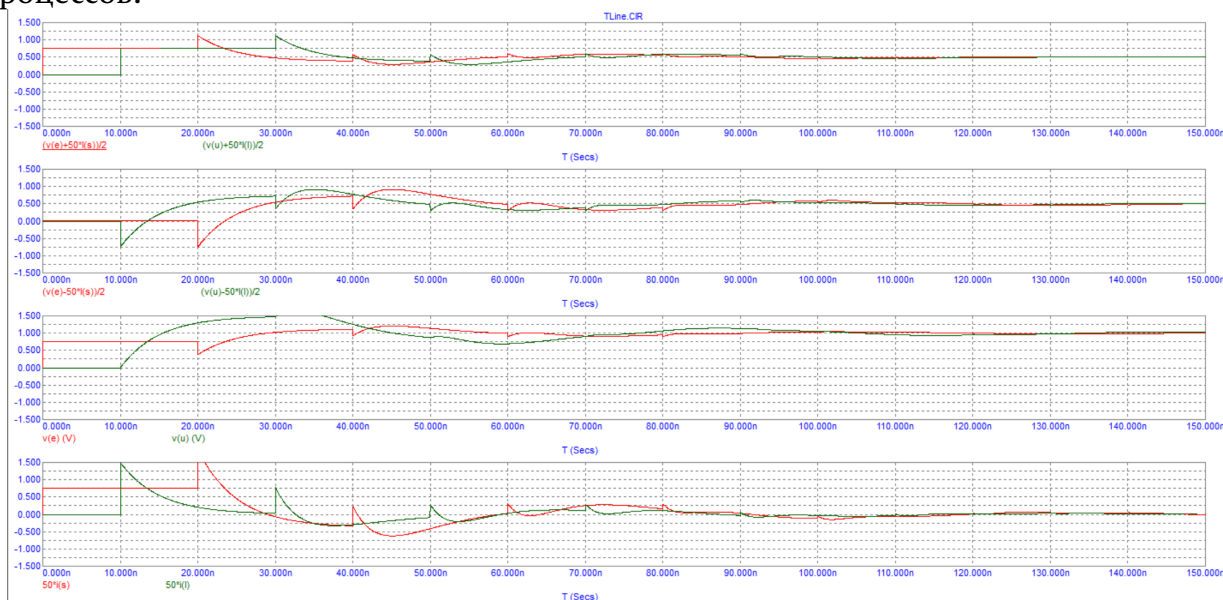


Рис. 13:  $R_l = 50k, R_s = 50/3$

$$A = 0.5 \text{ B}$$

$$B = 0.5 \text{ B}$$

$$u = 1 \text{ B}$$

$$i\omega = 0 \text{ B}$$

Проанализируем графики незатухающего переходного процесса при  $R_s = 0$ .

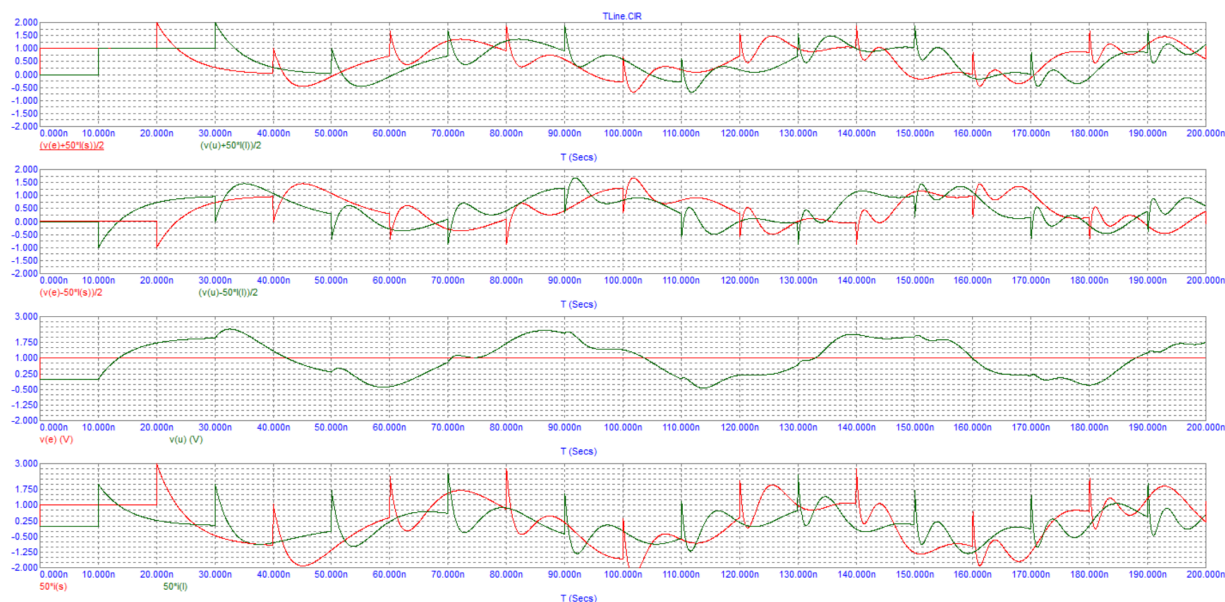


Рис. 14:  $R_l = 50k, R_s = 0$

### 2.2.7 Вывод

Моделирование полностью сходится с теорией, что вполне ожидаемо, разумно и естественно.

## 3 Вывод

Результаты моделирования, как и ожидается, тождественны теории, в то время как замеры на макетной плате незначительно от нее отличаются. Все это позволяет сказать, что использованные методы расчета и анализа безинерционных линейных цепей дают хорошие результаты в области применимости.