

## Основы электротехники

### Отчёт по лабораторной работе №3

#### Исследование линейных двухполюсников в электрических цепях однофазного синусоидального тока

Группа *P3331*  
Вариант *29*

Выполнил: *Нодири Хисравхон*

Дата сдачи отчёта: *06.11.2024*

Дата защиты: *08.11.2024*

Контрольный срок защиты: 23.10.2024

Количество баллов:

# Содержание

Цель работы	2
Часть 1	2
1.1 Введение . . . . .	2
1.2 Параметры элементов исследуемых схем . . . . .	2
1.3 Общие расчёты . . . . .	2
1.4 Двухполюсник 1 . . . . .	3
1.4.1 Схема исследуемой цепи . . . . .	3
1.4.2 Расчётные формулы и расчёты . . . . .	3
1.4.3 Вектора входного напряжения и тока . . . . .	4
1.5 Двухполюсник 2 . . . . .	4
1.5.1 Схема исследуемой цепи . . . . .	4
1.5.2 Расчётные формулы и расчёты . . . . .	5
1.5.3 Вектора входного напряжения и тока . . . . .	5
1.6 Двухполюсник 3 . . . . .	5
1.6.1 Схема исследуемой цепи . . . . .	5
1.6.2 Расчётные формулы и расчёты . . . . .	6
1.6.3 Вектора входного напряжения и тока . . . . .	6
1.7 Двухполюсник 4 . . . . .	7
1.7.1 Схема исследуемой цепи . . . . .	7
1.7.2 Расчётные формулы и расчёты . . . . .	7
1.7.3 Вектора входного напряжения и тока . . . . .	8
1.8 Двухполюсник 5 . . . . .	9
1.8.1 Схема исследуемой цепи . . . . .	9
1.8.2 Расчётные формулы и расчёты . . . . .	9
1.8.3 Вектора входного напряжения и тока . . . . .	10
1.9 Двухполюсник 6 . . . . .	11
1.9.1 Схема исследуемой цепи . . . . .	11
1.9.2 Расчётные формулы и расчёты . . . . .	11
1.9.3 Вектора входного напряжения и тока . . . . .	12
1.10 Двухполюсник 7 . . . . .	13
1.10.1 Схема исследуемой цепи . . . . .	13
1.10.2 Расчётные формулы и расчёты . . . . .	13
1.10.3 Вектора входного напряжения и тока . . . . .	13
1.11 Двухполюсник 8 . . . . .	15
1.11.1 Схема исследуемой цепи . . . . .	15
1.11.2 Расчётные формулы и расчёты . . . . .	15
1.11.3 Вектора входного напряжения и тока . . . . .	15
1.12 Двухполюсник 9 . . . . .	17
1.12.1 Схема исследуемой цепи . . . . .	17
1.12.2 Расчётные формулы и расчёты . . . . .	17
1.12.3 Вектора входного напряжения и тока . . . . .	18
1.13 Заполненная таблица 2.2 . . . . .	18
1.14 Выводы . . . . .	19

# Цель работы

Исследование свойств линейных цепей синусоидального тока, а также особых режимов работы, таких как резонанс напряжений и токов.

## Часть 1

### 1.1 Введение

В данной части лабораторной работы произведены измерения действующих значений входного напряжения, тока и фазового сдвига между ними для девяти различных двухполюсников, а также произведены сравнения результатов с расчётными значениями.

### 1.2 Параметры элементов исследуемых схем

1. Расчёт амплитуды синусоидального напряжения:

$$U_{max} = U_d \cdot \sqrt{2} = 14 \cdot \sqrt{2} = 19.799 \text{ В}$$

2. Известные значения:

$$U_d = 14 \text{ В}, \quad \psi_n = 0^\circ, \quad f = 397.887 \text{ Гц}, \quad R_1 = 25 \text{ Ом}, \quad R_k = 15 \text{ Ом} \\ L_k = 2.798 \text{ мГн}, \quad C = 27.713 \text{ мкФ}$$

### 1.3 Общие расчёты

1. Угловая частота:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3.1416 \cdot 397.887 \approx 2500 \text{ рад/с}$$

2. Реактивная составляющая сопротивления ёмкостного элемента:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2500 \cdot 27.713 \cdot 10^{-6}} \approx 14.4 \text{ Ом}$$

3. Реактивная составляющая сопротивления индуктивного элемента:

$$X_L = \omega L = 2500 \cdot 2.798 \cdot 10^{-3} \approx 6.995 \text{ Ом}$$

4. Реактивная проводимость ёмкостного элемента:

$$B_c = \omega C = 2500 \cdot 27.713 \cdot 10^{-6} = 0.0693 \text{ См}$$

5. Реактивная проводимость индуктивного элемента:

$$B_k = \frac{X_L}{R_k^2 + X_L^2} = \frac{6.995}{15^2 + (6.995)^2} \approx 0.0267 \text{ См}$$

## 1.4 Двухполюсник 1

### 1.4.1 Схема исследуемой цепи

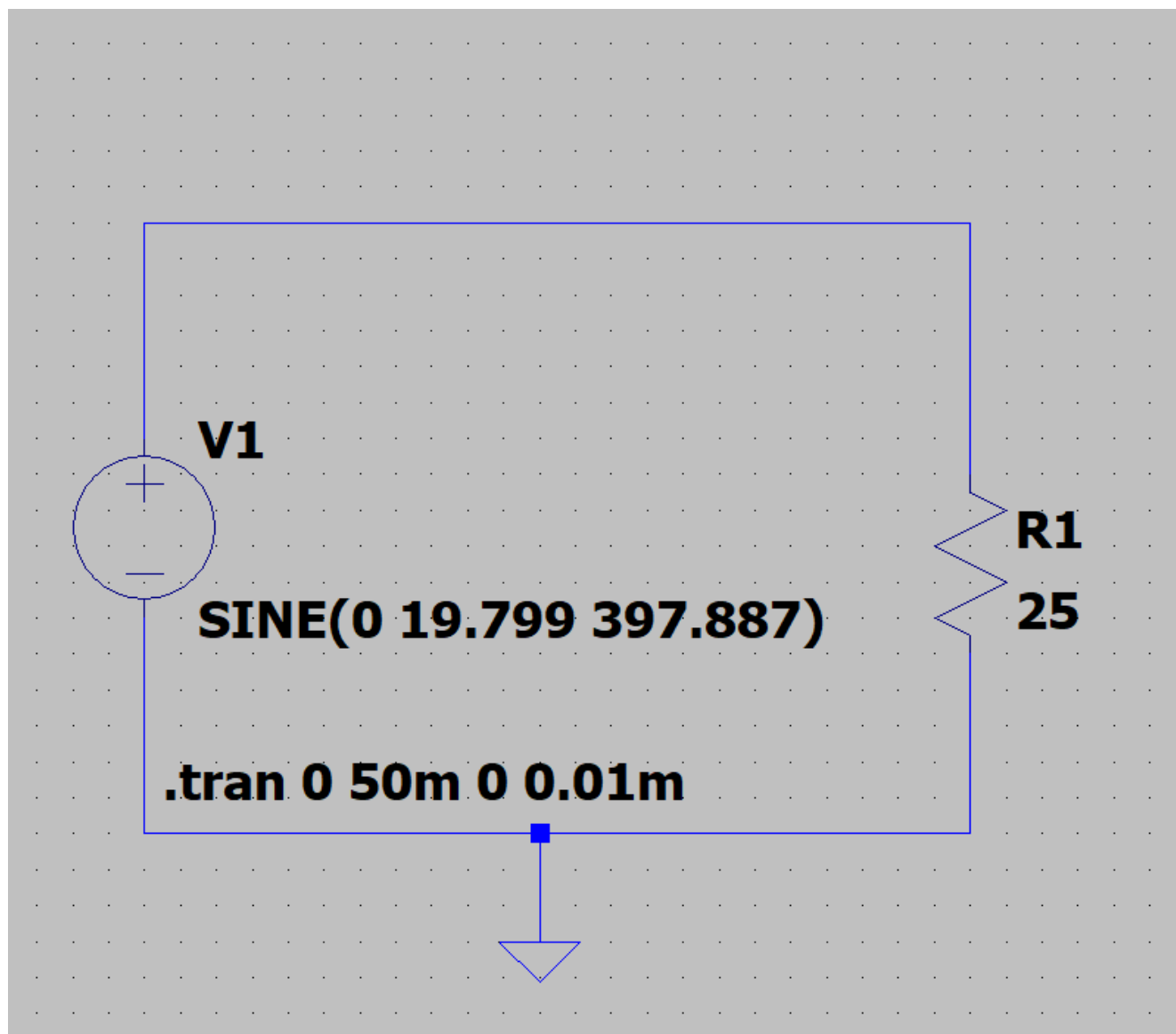


Рис. 1: Схема замещения Двухполюсника 1 в LTspice.

### 1.4.2 Расчётные формулы и расчёты

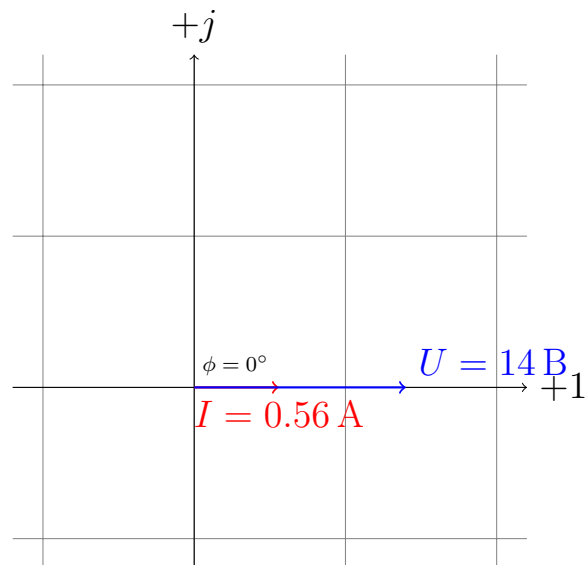
1. Расчёт действующего тока в цепи:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$
$$X = 0, R = R_1 \implies I = \frac{U}{R_1} = \frac{14}{25} = 0.56 \text{ A}$$

2. Расчёт фазового сдвига:

$$\phi = \arctan\left(\frac{0}{R_1}\right) = 0^\circ$$

### 1.4.3 Вектора входного напряжения и тока



## 1.5 Двухполюсник 2

### 1.5.1 Схема исследуемой цепи

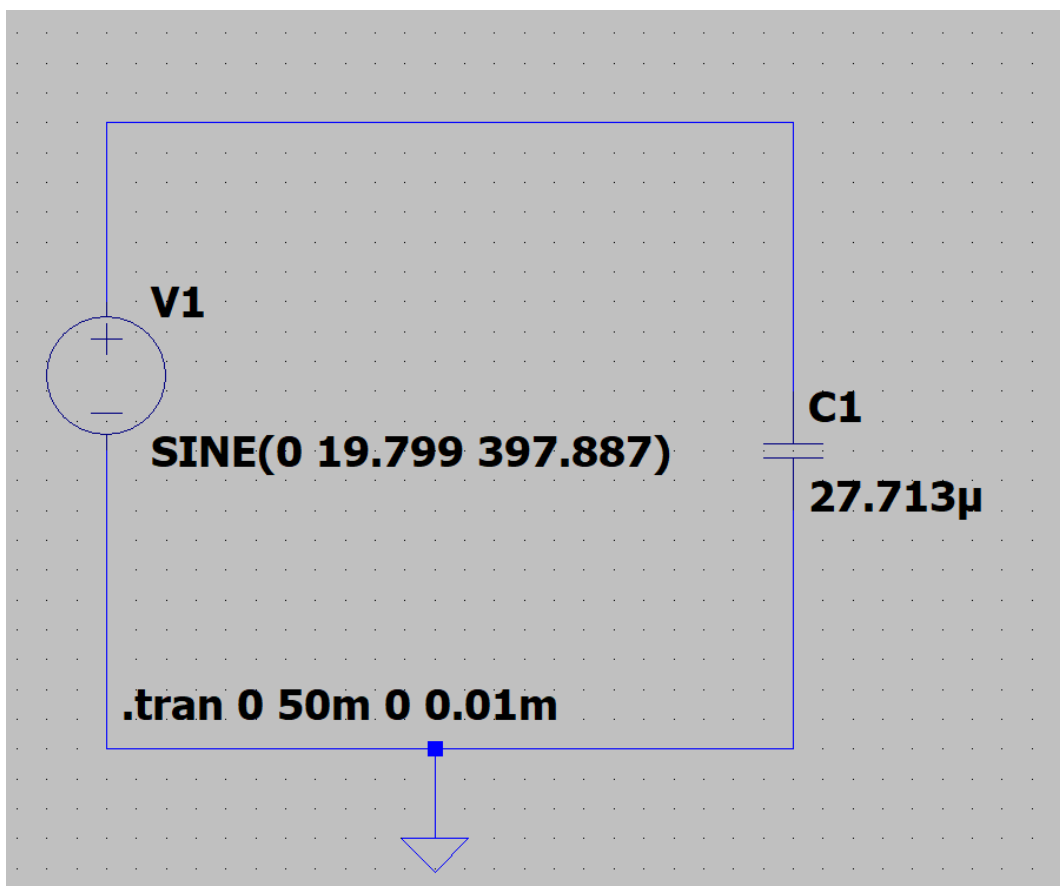


Рис. 2: Схема замещения Двухполюсника 2 в LTspice.

### 1.5.2 Расчётные формулы и расчёты

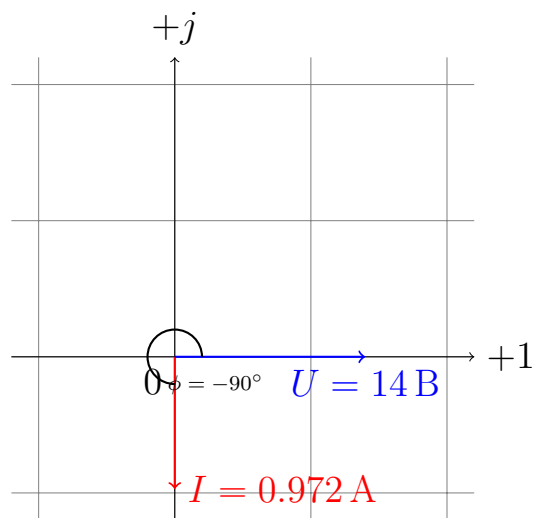
1. Расчёт действующего тока в цепи:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$
$$X = -X_C, R = 0 \implies I = \frac{U}{X_C} = \frac{14}{14.4} \approx 0.972 \text{ A}$$

2. Расчёт фазового сдвига:

$$\phi = \arctan(-\infty) = -90^\circ$$

### 1.5.3 Вектора входного напряжения и тока



## 1.6 Двухполюсник 3

### 1.6.1 Схема исследуемой цепи

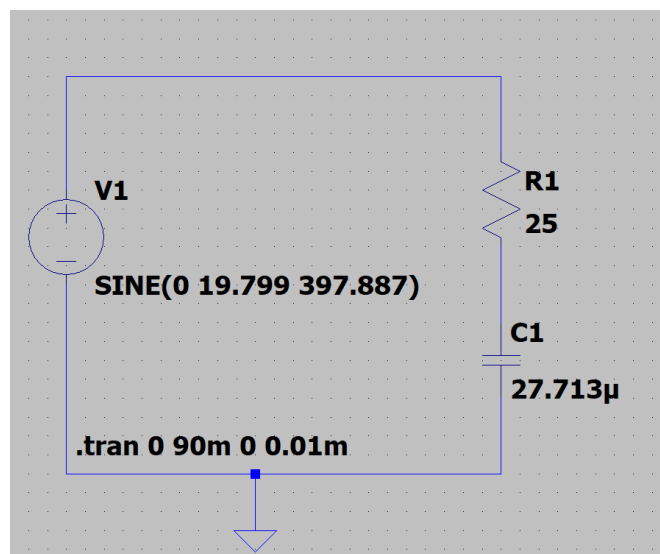


Рис. 3: Схема замещения Двухполюсника 3 в LTspice.

### 1.6.2 Расчётные формулы и расчёты

1. Расчёт действующего тока в цепи:

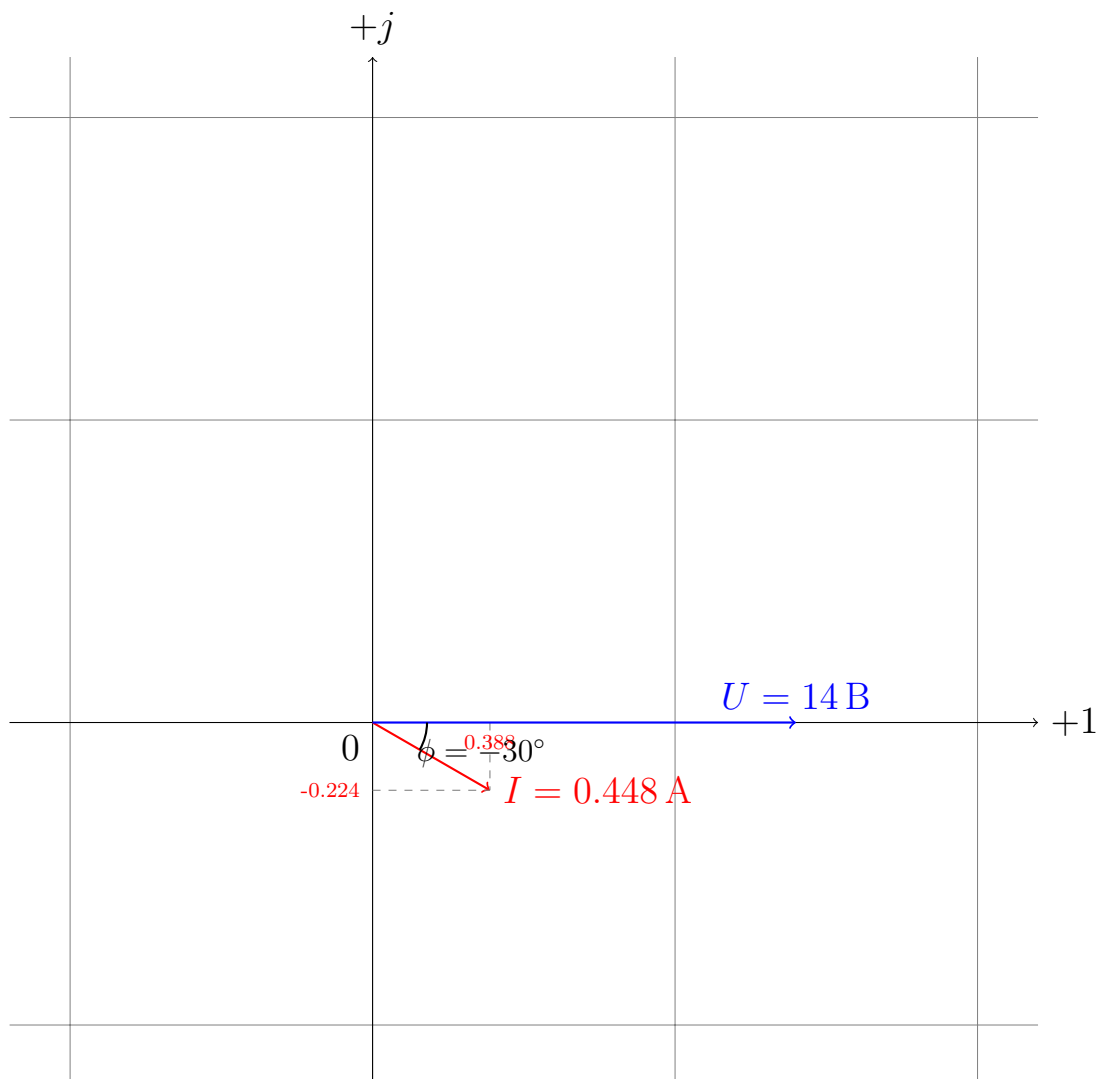
$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$
$$X = -X_C, R = R_1 \Rightarrow I = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + X_C^2}} = \frac{14}{\sqrt{25^2 + 14.4^2}} \approx 0.448 \text{ A}$$

2. Расчёт фазового сдвига:

$$\phi = \arctan\left(\frac{-X_C}{R_1}\right) = \arctan\left(\frac{-14.4}{25}\right) \approx -30^\circ$$

### 1.6.3 Вектора входного напряжения и тока

$$I_x = I \cos(\phi), \quad I_y = I \sin(\phi)$$
$$I_x = 0.448 \cdot \cos(30^\circ) \approx 0.388 \text{ A}, \quad I_y = 0.448 \cdot \sin(30^\circ) \approx -0.224 \text{ A}$$



## 1.7 Двухполюсник 4

### 1.7.1 Схема исследуемой цепи

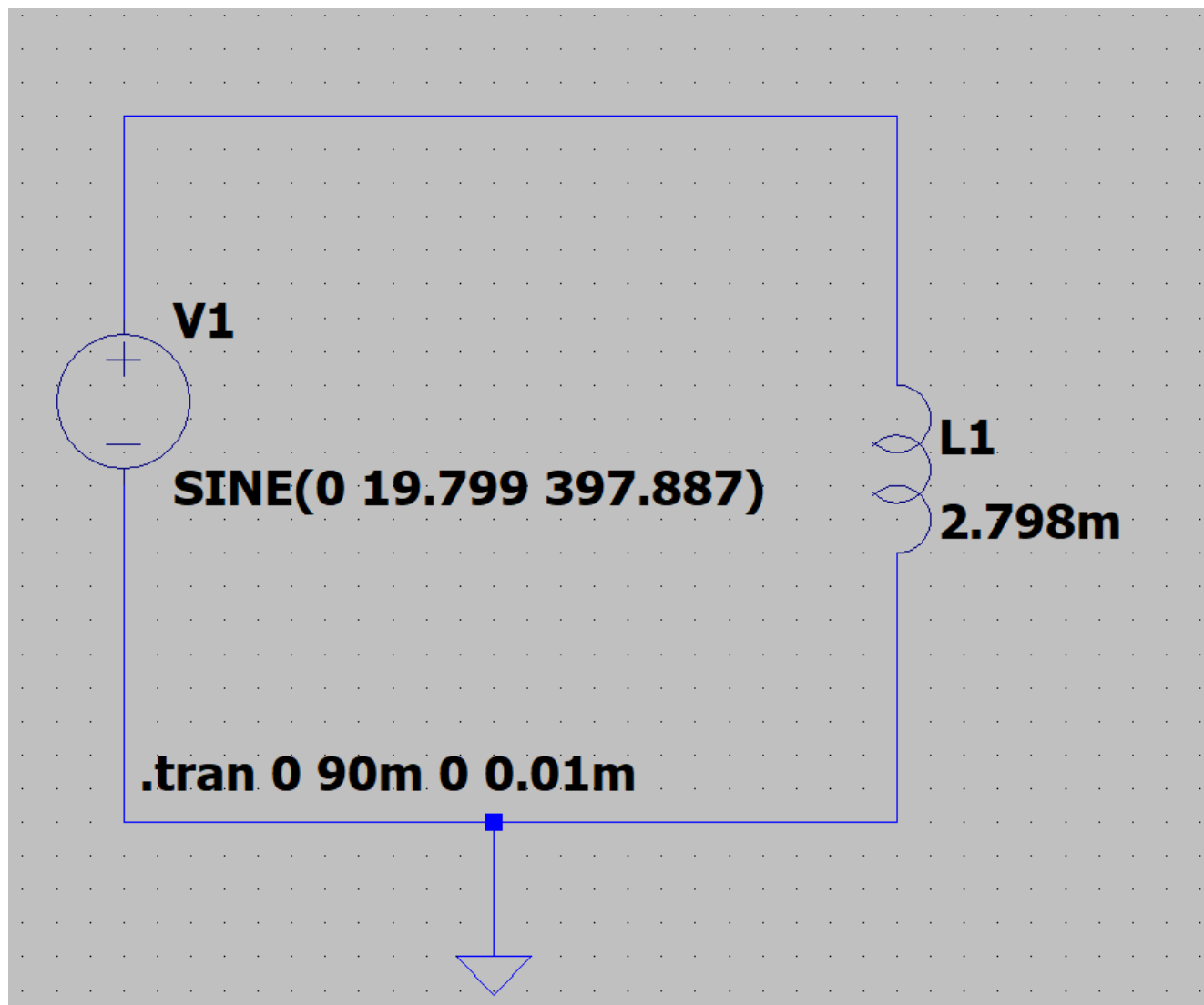


Рис. 4: Схема замещения Двухполюсника 4 в LTspice.

### 1.7.2 Расчётные формулы и расчёты

1. Расчёт действующего тока в цепи:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$
$$X = X_L, R = R_k \implies I = \frac{U}{\sqrt{R_k^2 + X_L^2}} = \frac{14}{\sqrt{15^2 + 6.995^2}} \approx 0.817 \text{ A}$$

2. Расчёт фазового сдвига:

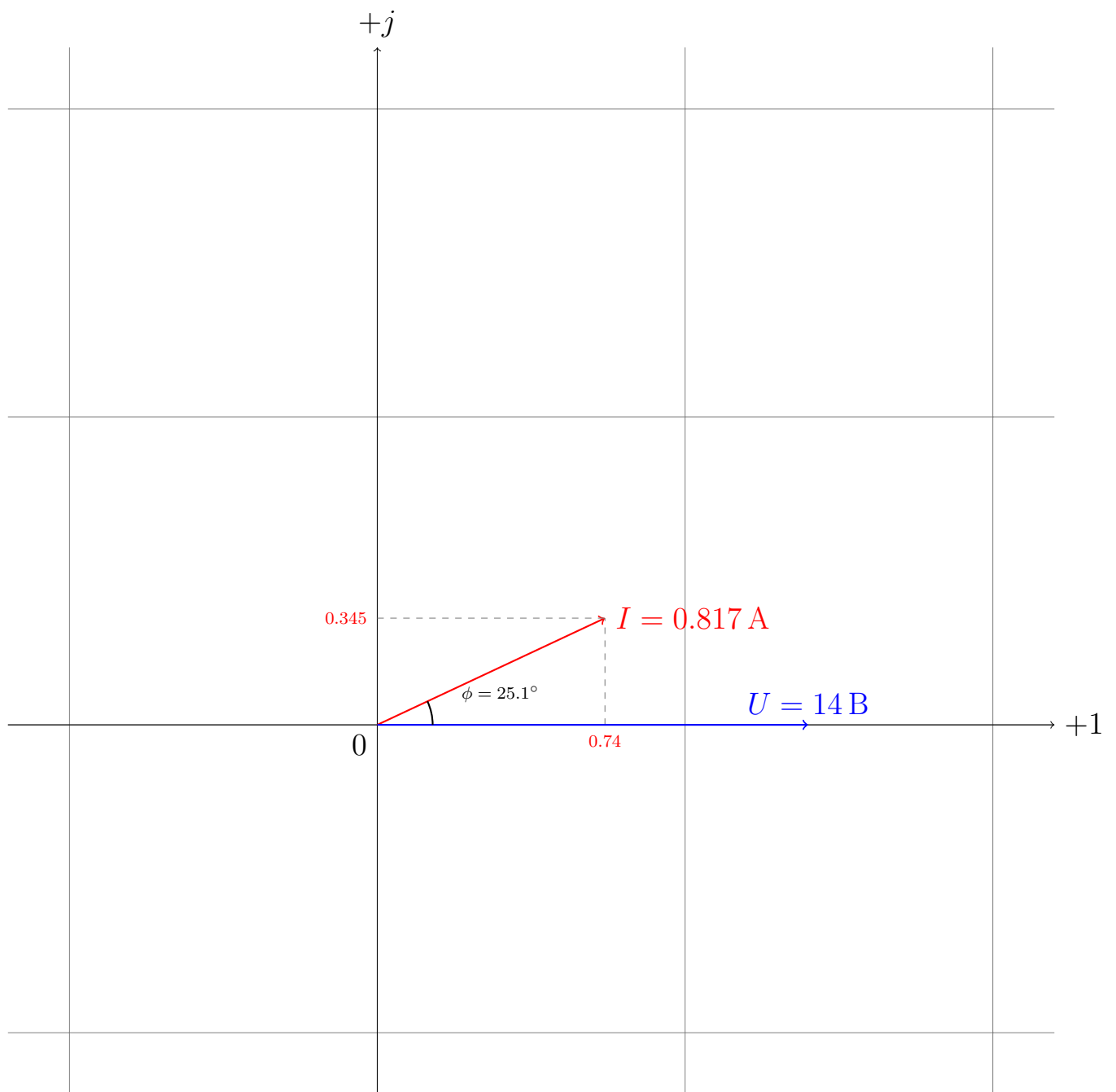
$$\phi = \arctan\left(\frac{X_L}{R_k}\right) = \arctan\left(\frac{6.995}{15}\right) \approx 25.1^\circ$$



### 1.7.3 Вектора входного напряжения и тока

$$I_x = I \cos(\phi), \quad I_y = I \sin(\phi)$$

$$I_x = 0.817 \cdot \cos(25.1^\circ) \approx 0.74 \text{ A}, \quad I_y = 0.817 \cdot \sin(25.1^\circ) \approx 0.345 \text{ A}$$



## 1.8 Двухполюсник 5

### 1.8.1 Схема исследуемой цепи

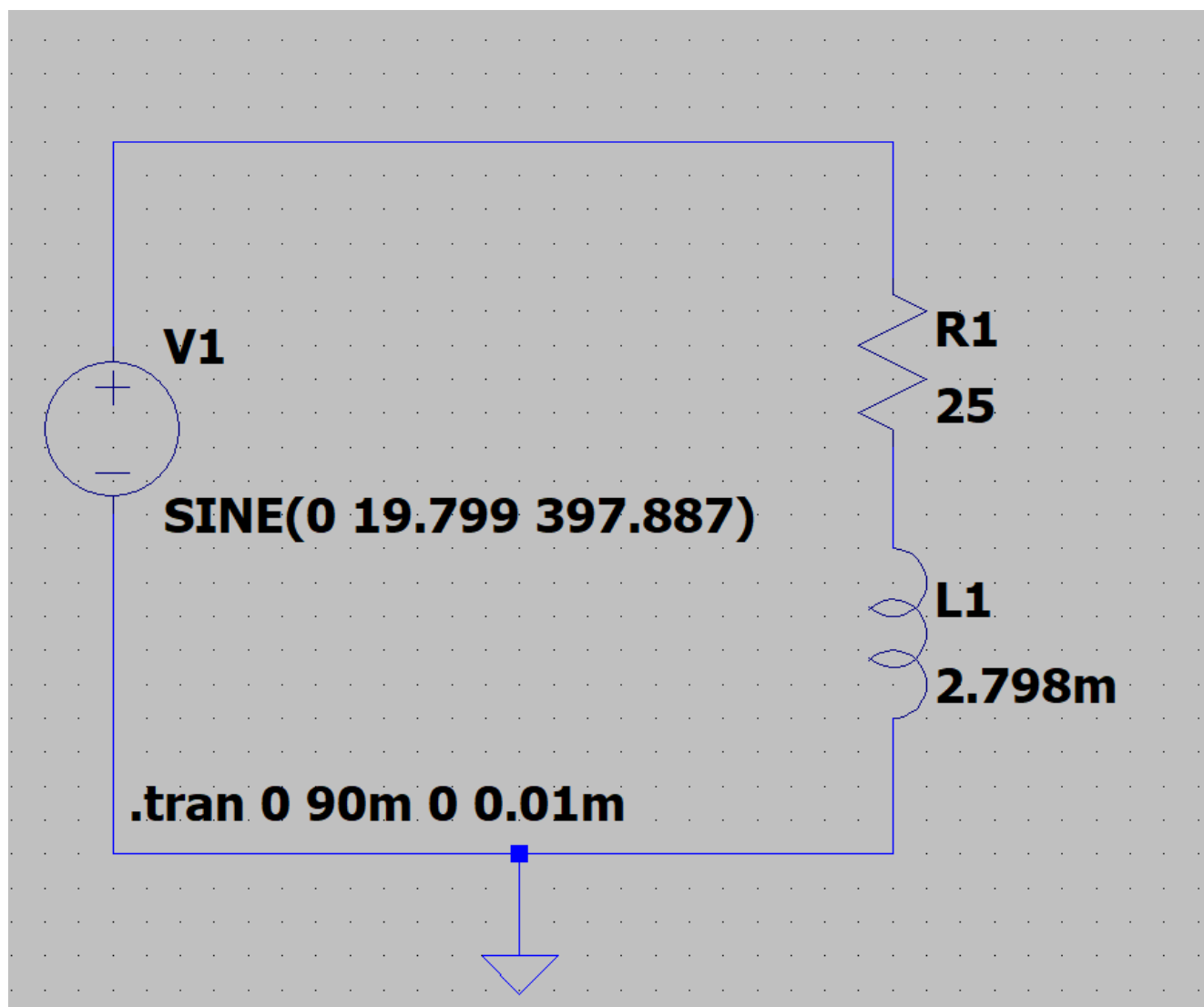


Рис. 5: Схема замещения Двухполюсника 5 в LTspice.

### 1.8.2 Расчётные формулы и расчёты

1. Расчёт действующего тока в цепи:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$
$$X = X_L, R = R_1 + R_k \implies I = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + R_k)^2 + X_L^2}} = \frac{14}{\sqrt{(25 + 15)^2 + 6.995^2}}$$
$$\approx 0.359 \text{ A}$$

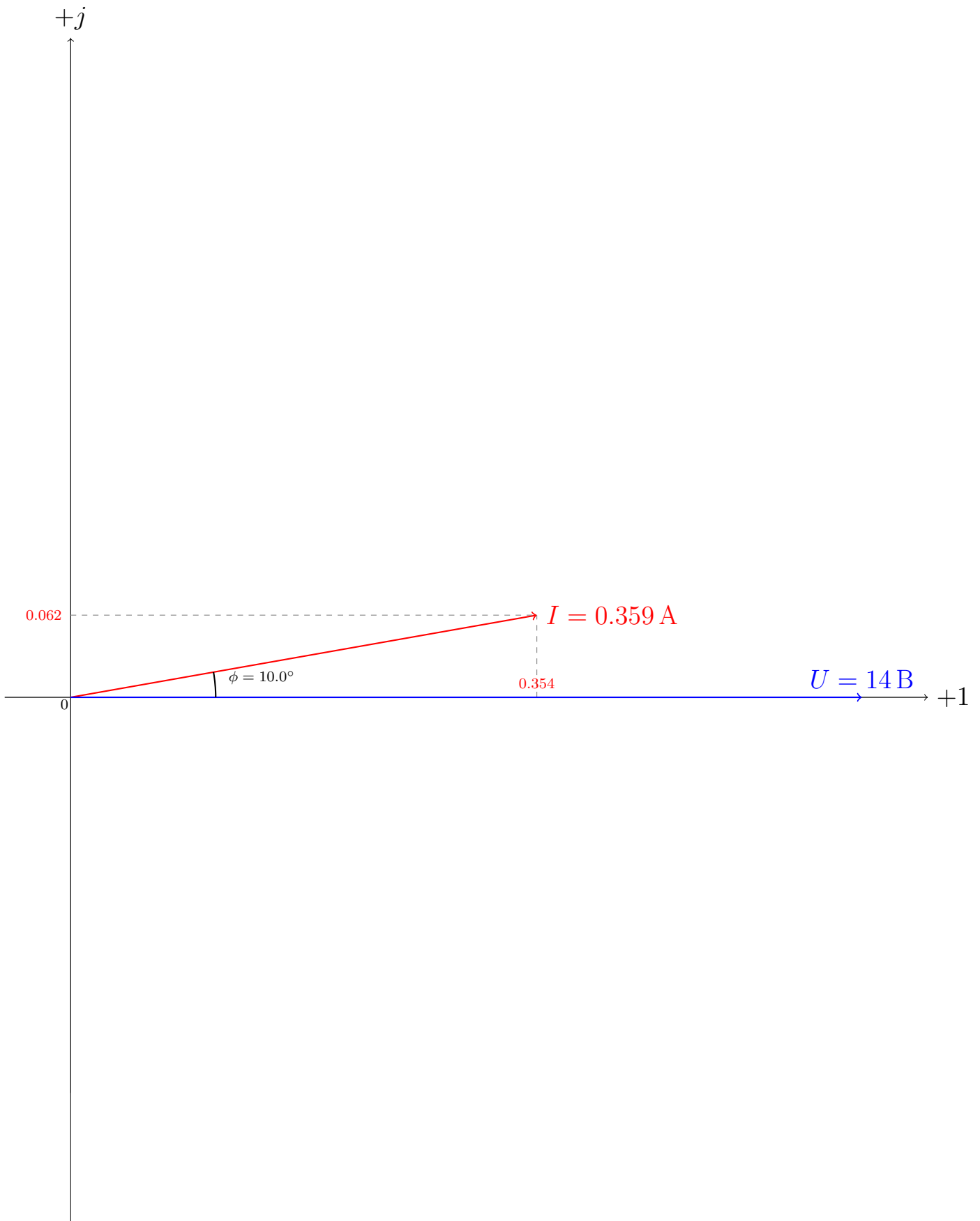
2. Расчёт фазового сдвига:

$$\phi = \arctan\left(\frac{X_L}{R_1 + R_k}\right) = \arctan\left(\frac{6.995}{25 + 15}\right) \approx 10.0^\circ$$

### 1.8.3 Вектора входного напряжения и тока

$$I_x = I \cos(\phi), \quad I_y = I \sin(\phi)$$

$$I_x = 0.359 \cdot \cos(10.0^\circ) \approx 0.354 \text{ A}, \quad I_y = 0.359 \cdot \sin(10.0^\circ) \approx 0.062 \text{ A}$$



## 1.9 Двухполюсник 6

### 1.9.1 Схема исследуемой цепи

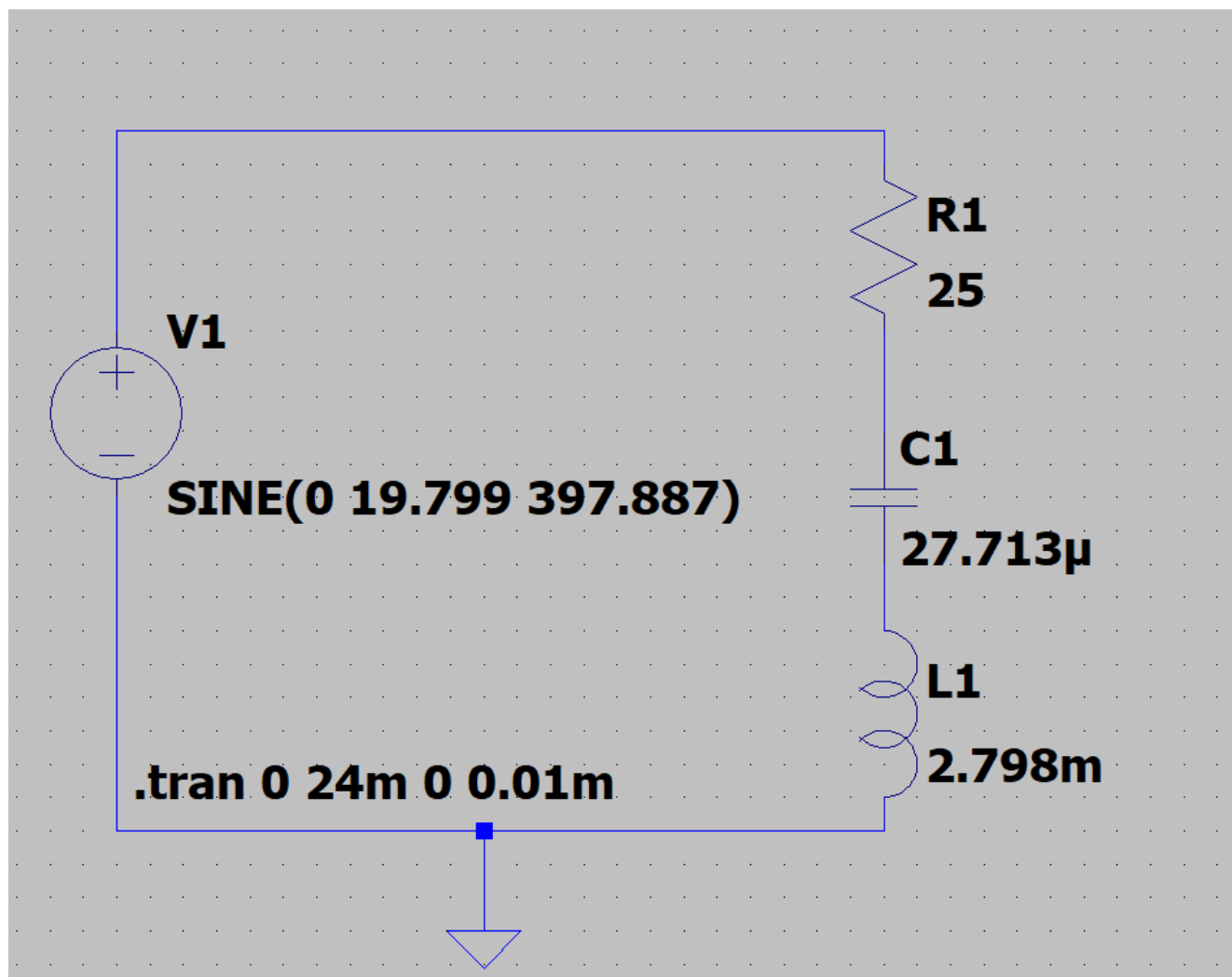


Рис. 6: Схема замещения Двухполюсника 6 в LTspice.

### 1.9.2 Расчётные формулы и расчёты

1. Расчёт действующего тока в цепи:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$
$$X = X_L - X_C, R = R_1 + R_k \Rightarrow I = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + R_k)^2 + (X_L - X_C)^2}} =$$
$$= \frac{14}{\sqrt{(25 + 15)^2 + (6.995 - 14.4)^2}} \approx 0.378 \text{ A}$$

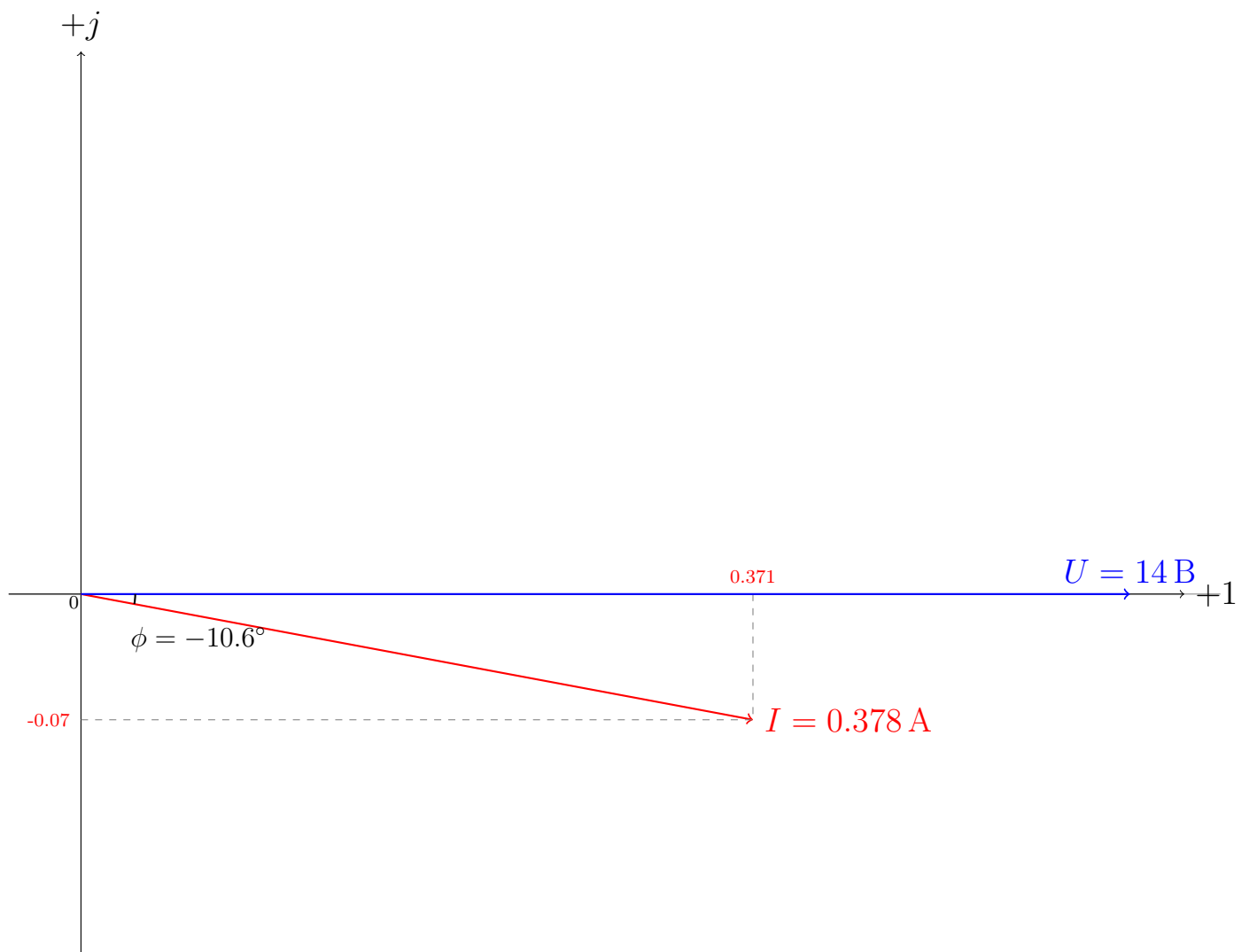
2. Расчёт фазового сдвига:

$$\phi = \arctan\left(\frac{X_L - X_C}{R_1 + R_k}\right) = \arctan\left(\frac{6.995 - 14.4}{25 + 15}\right) \approx -10.6^\circ$$

### 1.9.3 Вектора входного напряжения и тока

$$I_x = I \cos(\phi), \quad I_y = I \sin(\phi)$$

$$I_x = 0.378 \cdot \cos(-10.6^\circ) \approx 0.371 \text{ A}, \quad I_y = 0.378 \cdot \sin(-10.6^\circ) \approx -0.07 \text{ A}$$



## 1.10 Двухполюсник 7

### 1.10.1 Схема исследуемой цепи

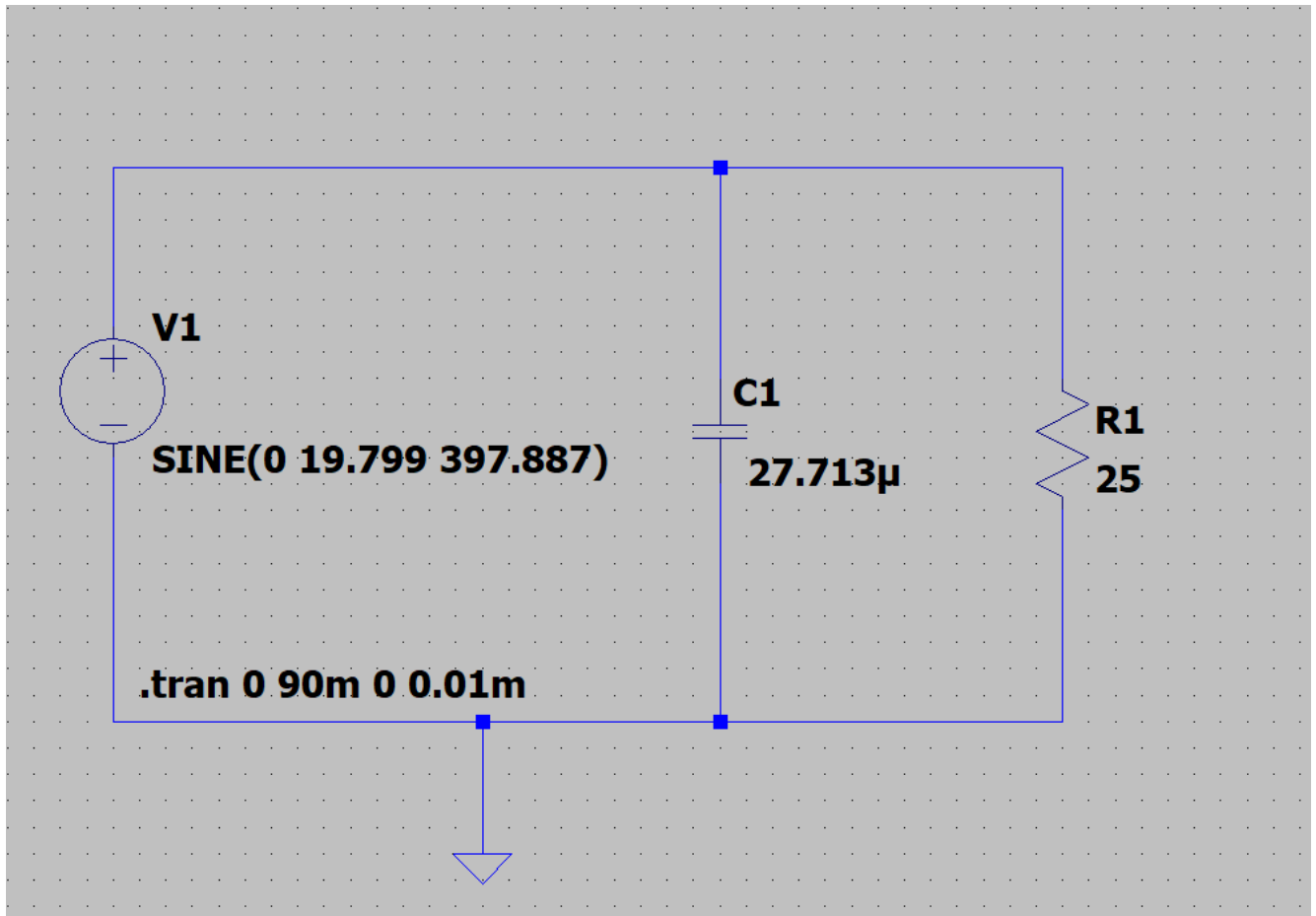


Рис. 7: Схема замещения Двухполюсника 7 в LTspice.

### 1.10.2 Расчётные формулы и расчёты

1. Расчёт действующего тока в цепи:

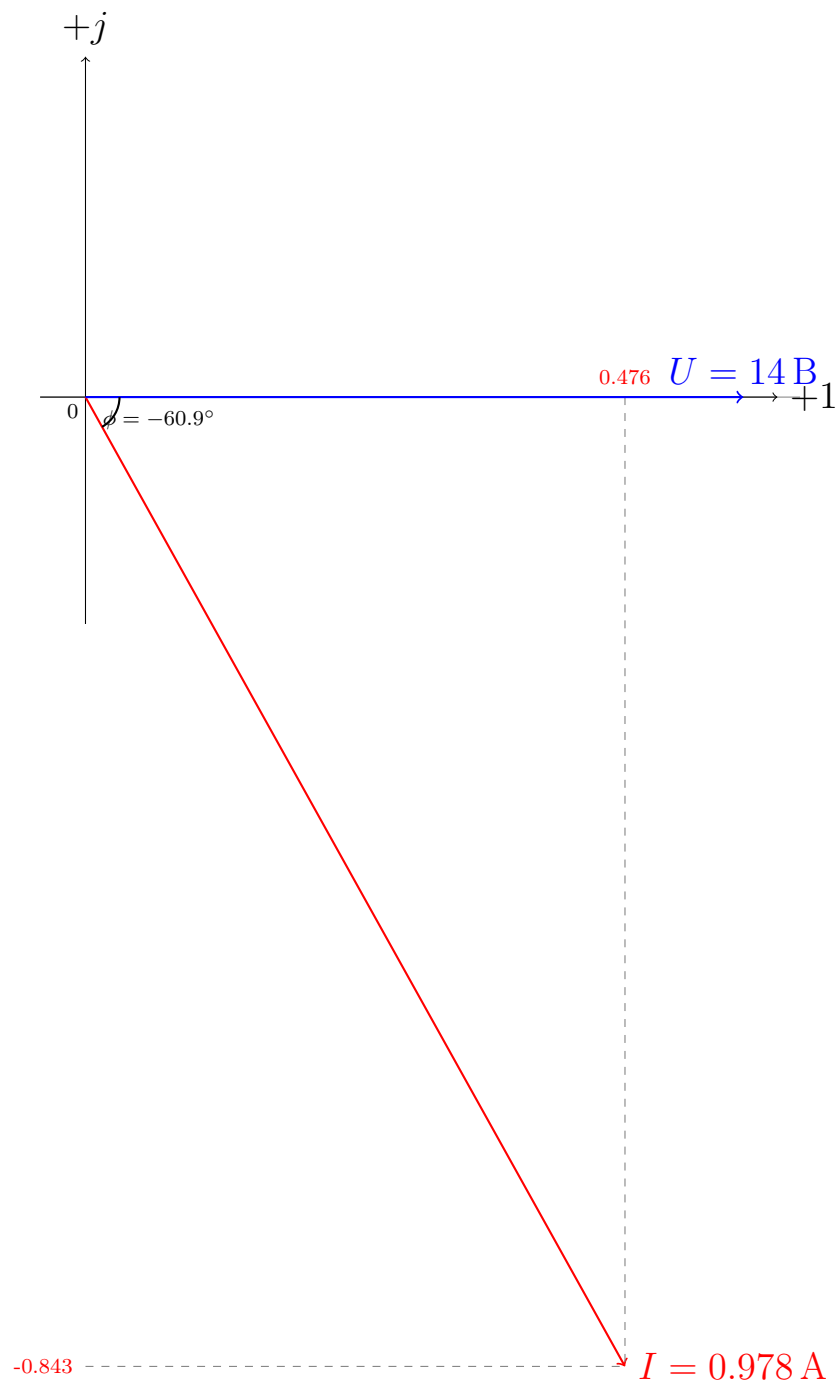
$$I = U \cdot Y = U \cdot \sqrt{G^2 + B^2}$$
$$G = \frac{1}{R_1}, B = -B_C \Rightarrow I = U \cdot \sqrt{\frac{1}{R_1^2} + B_C^2} = 14 \cdot \sqrt{\frac{1}{25^2} + 0.0693^2} \approx 0.978 \text{ A}$$

2. Расчёт фазового сдвига:

$$\phi = \arctan\left(\frac{-B_C}{\frac{1}{R_1}}\right) = \arctan\left(\frac{-0.0693}{0.04}\right) \approx -60.9^\circ$$

### 1.10.3 Вектора входного напряжения и тока

$$I_x = I \cos(\phi), \quad I_y = I \sin(\phi)$$
$$I_x = 0.978 \cdot \cos(-60.9^\circ) \approx 0.476 \text{ A}, \quad I_y = 0.978 \cdot \sin(-60.9^\circ) \approx -0.843 \text{ A}$$



## 1.11 Двухполюсник 8

### 1.11.1 Схема исследуемой цепи

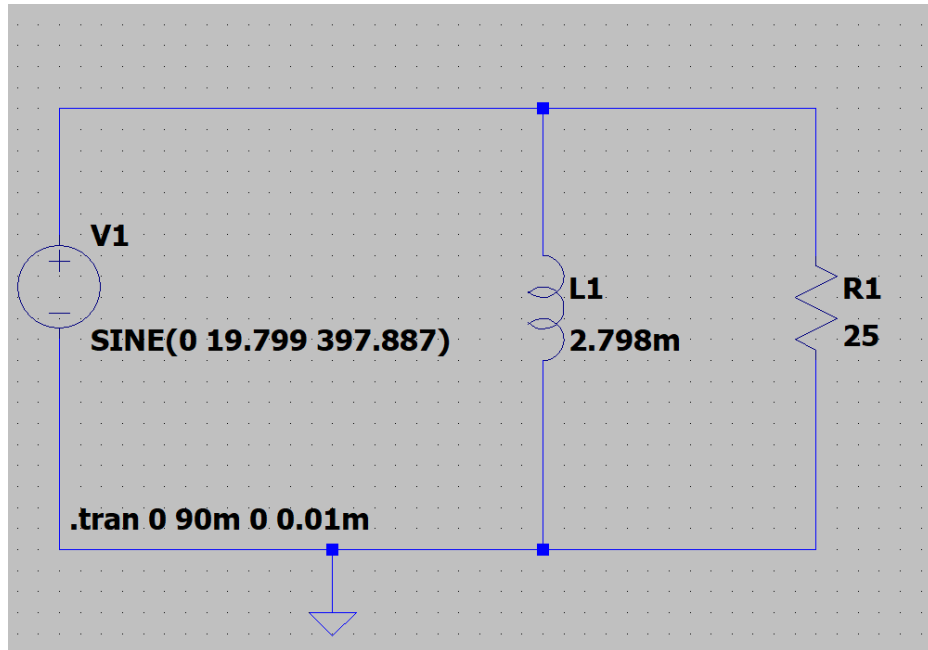


Рис. 8: Схема замещения Двухполюсника 8 в LTspice.

### 1.11.2 Расчётные формулы и расчёты

1. Расчёт действующего тока в цепи:

$$\begin{aligned} I &= U \cdot Y = U \cdot \sqrt{G^2 + B^2} \\ G &= G_1 + G_k, B = B_k - B_1 \implies I = U \cdot \sqrt{(G_1 + G_k)^2 + (B_k - B_1)^2} = \\ &= U \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{R_k}{R_k^2 + X_L^2}\right)^2 + \left(\frac{X_L}{R_k^2 + X_L^2} - 0\right)^2} = \\ &= 14 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{25} + \frac{15}{15^2 + 6.995^2}\right)^2 + \left(\frac{6.995}{15^2 + 6.995^2}\right)^2} \approx 1.384 \text{ A} \end{aligned}$$

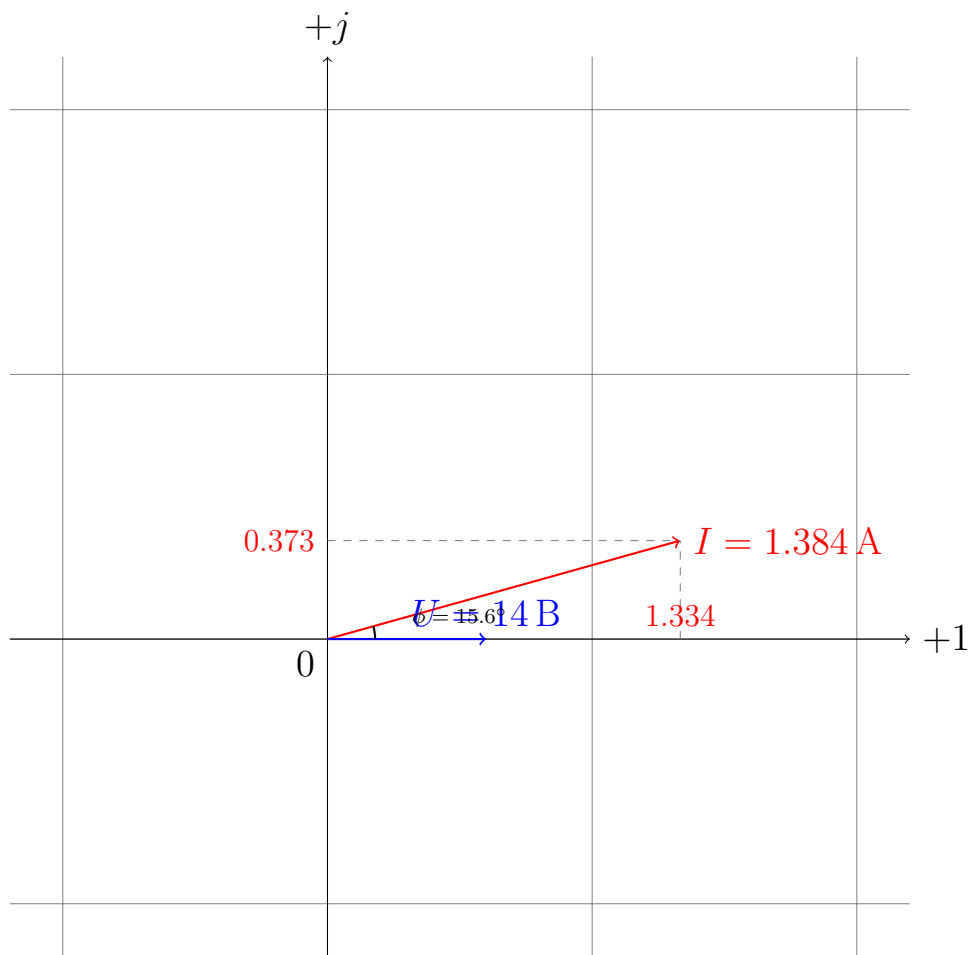
2. Расчёт фазового сдвига:

$$\phi = \arctan\left(\frac{B_k - B_1}{G_1 + G_k}\right) = \arctan\left(\frac{0.0267}{0.096}\right) \approx 15.6^\circ$$

### 1.11.3 Вектора входного напряжения и тока

$$\begin{aligned} I_x &= I \cos(\phi), \quad I_y = I \sin(\phi) \\ I_x &= 1.384 \cdot \cos(15.6^\circ) \approx 1.334 \text{ A}, \quad I_y = 1.384 \cdot \sin(15.6^\circ) \approx 0.373 \text{ A} \end{aligned}$$





## 1.12 Двухполюсник 9

### 1.12.1 Схема исследуемой цепи

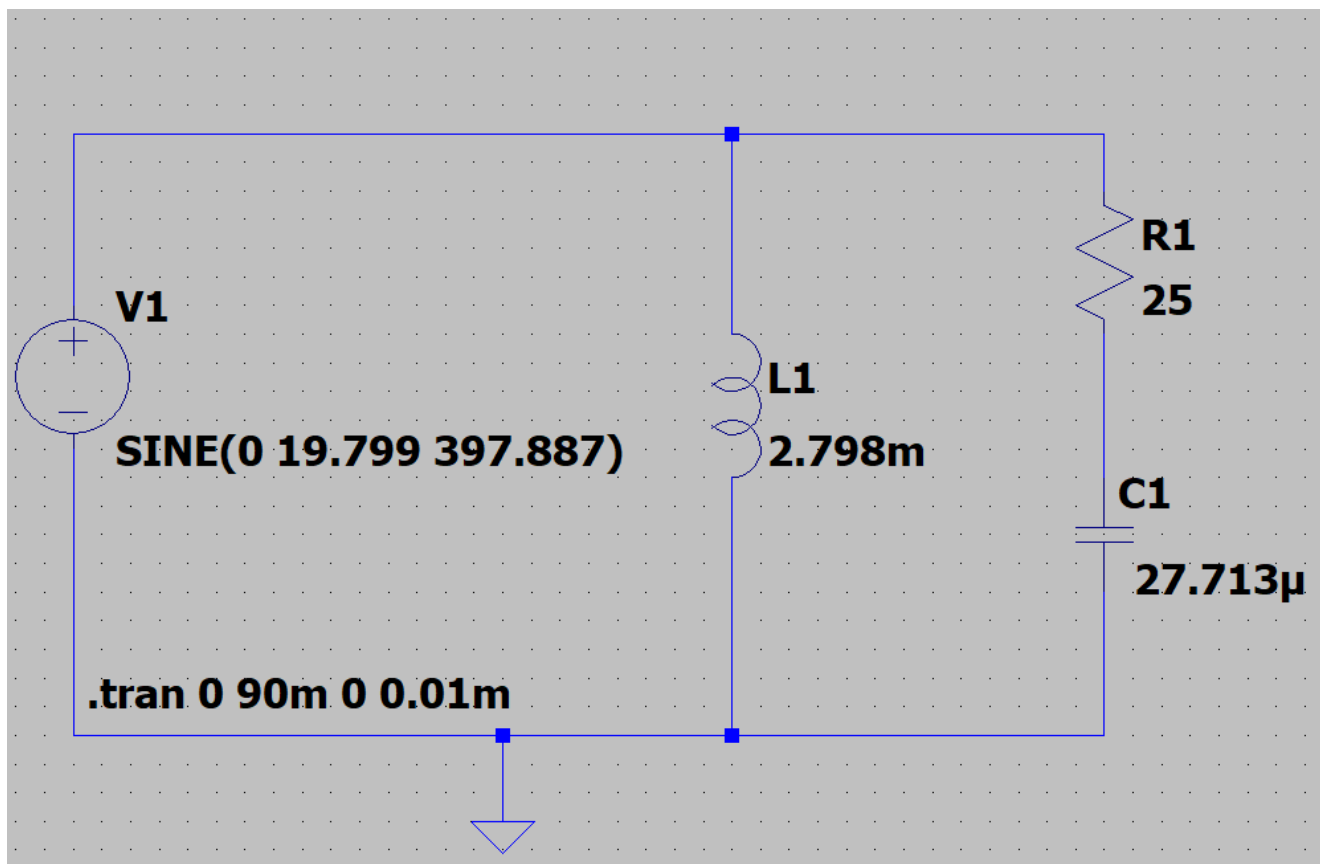


Рис. 9: Схема замещения Двухполюсника 9 в LTspice.

### 1.12.2 Расчётные формулы и расчёты

1. Расчёт действующего тока в цепи:

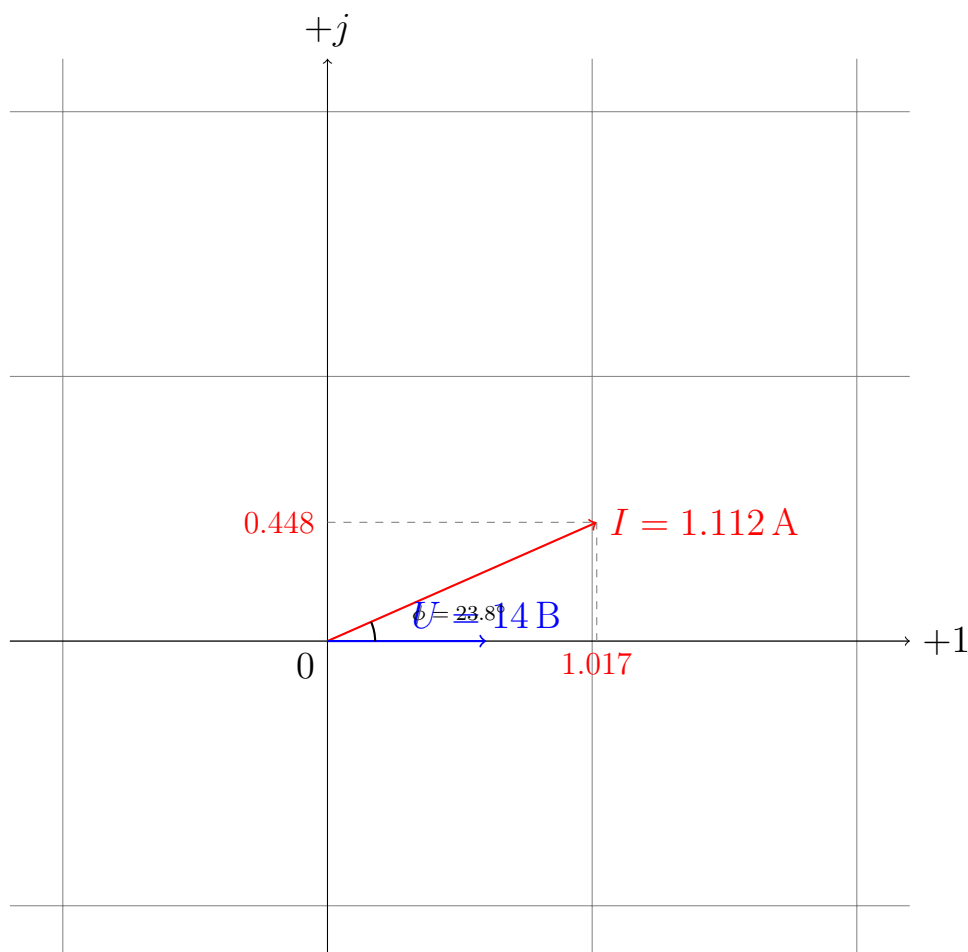
$$\begin{aligned} I &= U \cdot Y = U \cdot \sqrt{G^2 + B^2} \\ G &= G_1 + G_k, B = B_k - B_1 \implies I = U \cdot \sqrt{(G_1 + G_k)^2 + (B_k - B_1)^2} = \\ &= U \cdot \sqrt{\left(\frac{R_1}{R_1^2 + X_C^2} + \frac{R_k}{R_k^2 + X_L^2}\right)^2 + \left(\frac{X_L}{R_k^2 + X_L^2} - \frac{X_C}{R_1^2 + X_C^2}\right)^2} = \\ &= 14 \cdot \sqrt{\left(\frac{25}{25^2 + 14.4^2} + \frac{15}{15^2 + 6.995^2}\right)^2 + \left(\frac{6.995}{15^2 + 6.995^2} - \frac{14.4}{25^2 + 14.4^2}\right)^2} \approx \\ &\approx 1.112 \text{ A} \end{aligned}$$

2. Расчёт фазового сдвига:

$$\phi = \arctan \left( \frac{B_k - B_1}{G_1 + G_k} \right) = \arctan \left( \frac{0.0267 - 0.0576}{0.04 + 0.021} \right) \approx 23.8^\circ$$

### 1.12.3 Вектора входного напряжения и тока

$$I_x = I \cos(\phi), \quad I_y = I \sin(\phi)$$
$$I_x = 1.112 \cdot \cos(23.8^\circ) \approx 1.017 \text{ A}, \quad I_y = 1.112 \cdot \sin(23.8^\circ) \approx 0.448 \text{ A}$$



### 1.13 Заполненная таблица 2.2

Для каждого двухполюсника 1-9, представленного выше, были не только произведены теоретические расчёты действующего тока и фазового сдвига, но и произведено построение временных диаграмм, из которых величины действующего напряжения, тока и фазового сдвига определены экспериментально. Для напряжения и тока были измерены амплитудные значения и вычислены по формуле:

$$U_{\text{д}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$
$$I_{\text{д}} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$$

А фазовый сдвиг рассчитан следующим образом:

$$\phi = 180^\circ \cdot \frac{\delta h}{h}$$

, где  $\delta h$  - расстояние между моментами перехода синусоид напряжения и тока от отрицательных значений к положительным, а  $h$  - половина периода синусоиды, измеренная в секундах.

Таблица 1: Итоговая таблица 2.2

Номер схемы	Параметры двухполюсников		Результаты измерений			Результаты вычислений			
	$R_1$ (Ом)	$R_k$ (Ом)	$L$ (Гн)	$C$ (мкФ)	$U$ (В)	$I$ (А)	$\varphi$ (°)	$I$ (А)	$\varphi$ (°)
1	25	-	-	-	14	0.56	0	0.56	0
2	-	-	-	14.4	14	0.972	-90	0.972	-90
3	25	-	-	14.4	14	0.448	-30	0.448	-30
4	-	15	6.995	-	14	0.817	25.1	0.817	25.1
5	25	15	6.995	-	14	0.359	10.0	0.359	10.0
6	25	15	6.995	14.4	14	0.378	-10.6	0.378	-10.6
7	25	-	-	14.4	14	0.978	-60.9	0.978	-60.9
8	25	15	6.995	-	14	1.384	15.6	1.384	15.6
9	25	15	6.995	14.4	14	1.112	23.8	1.112	23.8

## 1.14 Выводы

В ходе выполнения работы были исследованы параметры девяти двухполюсников, включая значения действующего тока, напряжения и фазового сдвига. Теоретические расчёты подтвердились экспериментальными данными, что указывает на корректность проведённых опытов.

В цепях с резисторами (двухполюсник 1) фазовый сдвиг отсутствует, так как ток и напряжение меняются синхронно. В цепях с конденсаторами (двухполюсники 2, 3 и 7) ток опережает напряжение, что объясняется особенностями ёмкостных элементов. В цепях с индуктивностью (двухполюсники 4, 5 и 8) ток, наоборот, запаздывает относительно напряжения, так как индуктивность сопротивляется изменению тока.

Наиболее интересные эффекты наблюдаются в цепях с комбинированными элементами (двухполюсники 6 и 9), где взаимодействие индуктивности и ёмкости приводит к изменению фазового сдвига в зависимости от соотношения их реактивностей. Эти цепи демонстрируют, как баланс ёмкости и индуктивности может либо сближать, либо отдалять фазы тока и напряжения.

Небольшие расхождения между теоретическими и эмпирическими значениями можно объяснить погрешностями измерений и округления.