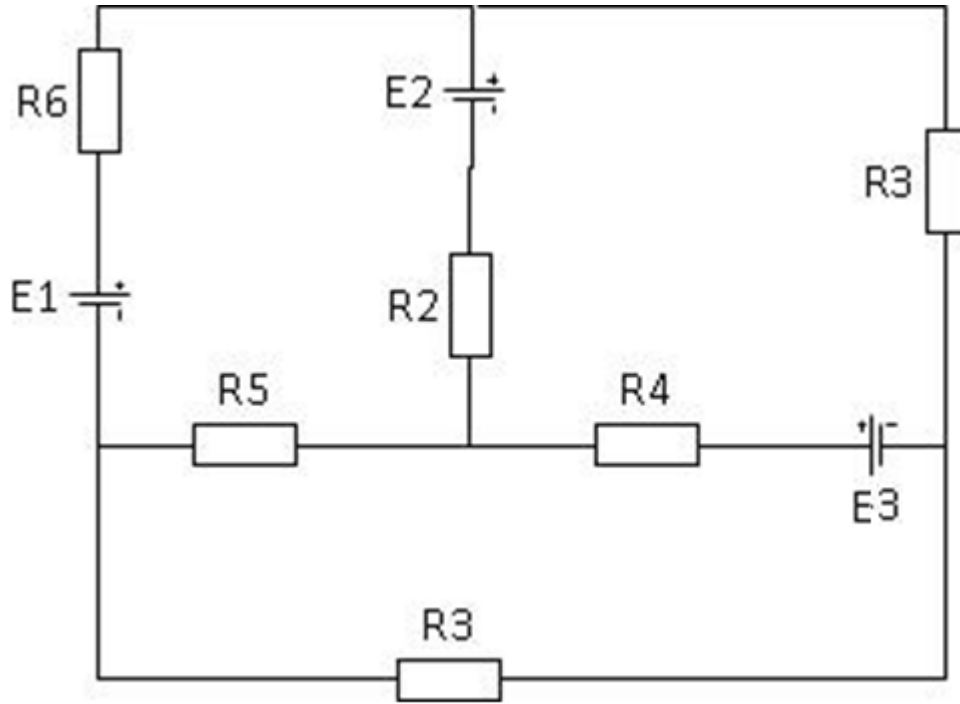


# Исходные данные



$$R1 = 10 \text{ Ом}$$

$$E1 = 10 \text{ В}$$

$$R2 = 8 \text{ Ом}$$

$$E2 = 15 \text{ В}$$

$$R3 = 15 \text{ Ом}$$

$$E3 = 20 \text{ В}$$

$$R4 = 5 \text{ Ом}$$

$$R5 = 4 \text{ Ом}$$

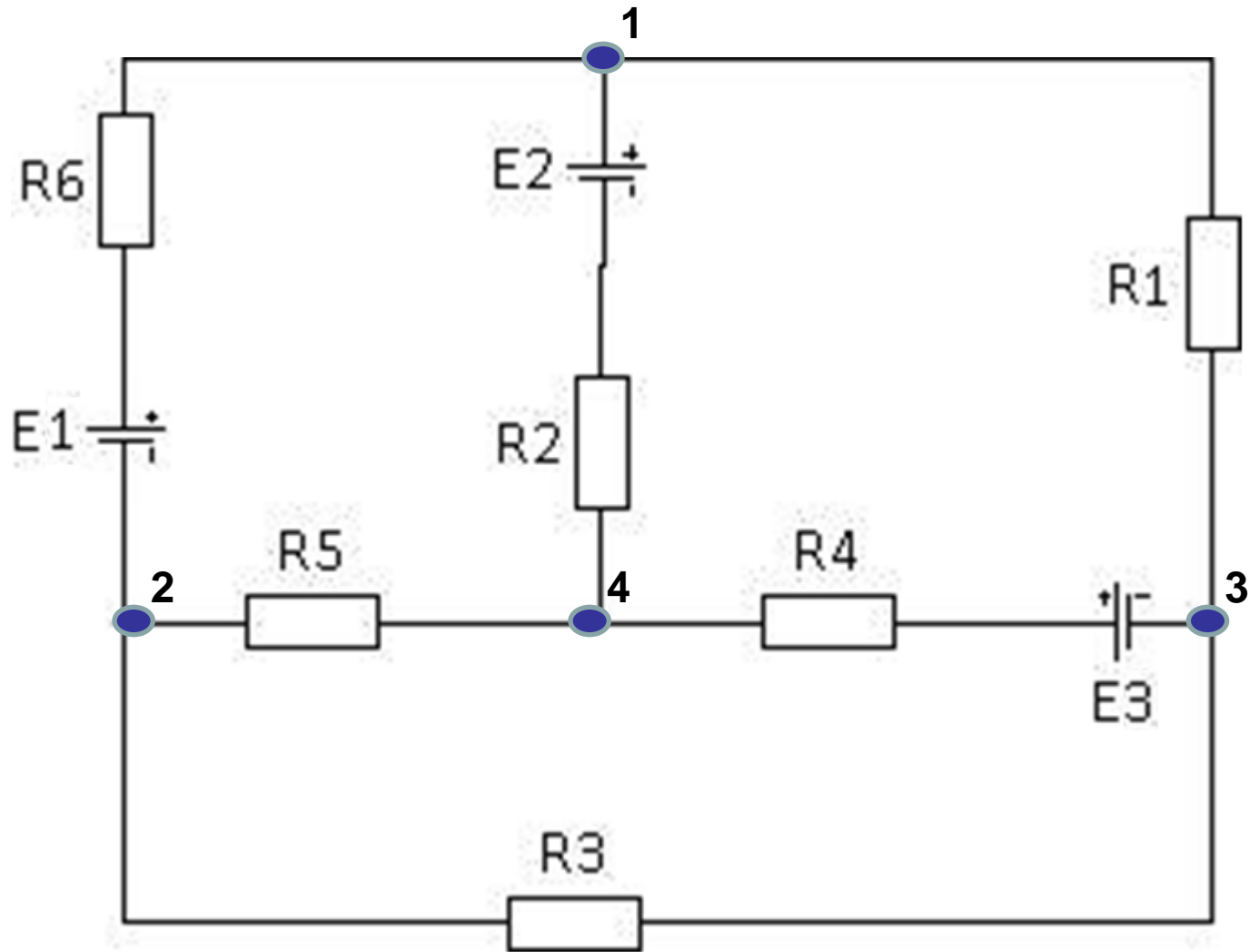
$$R6 = 2 \text{ Ом}$$

# Законы Киргофа (постоянное напряжение)

## 1. Ищем узлы

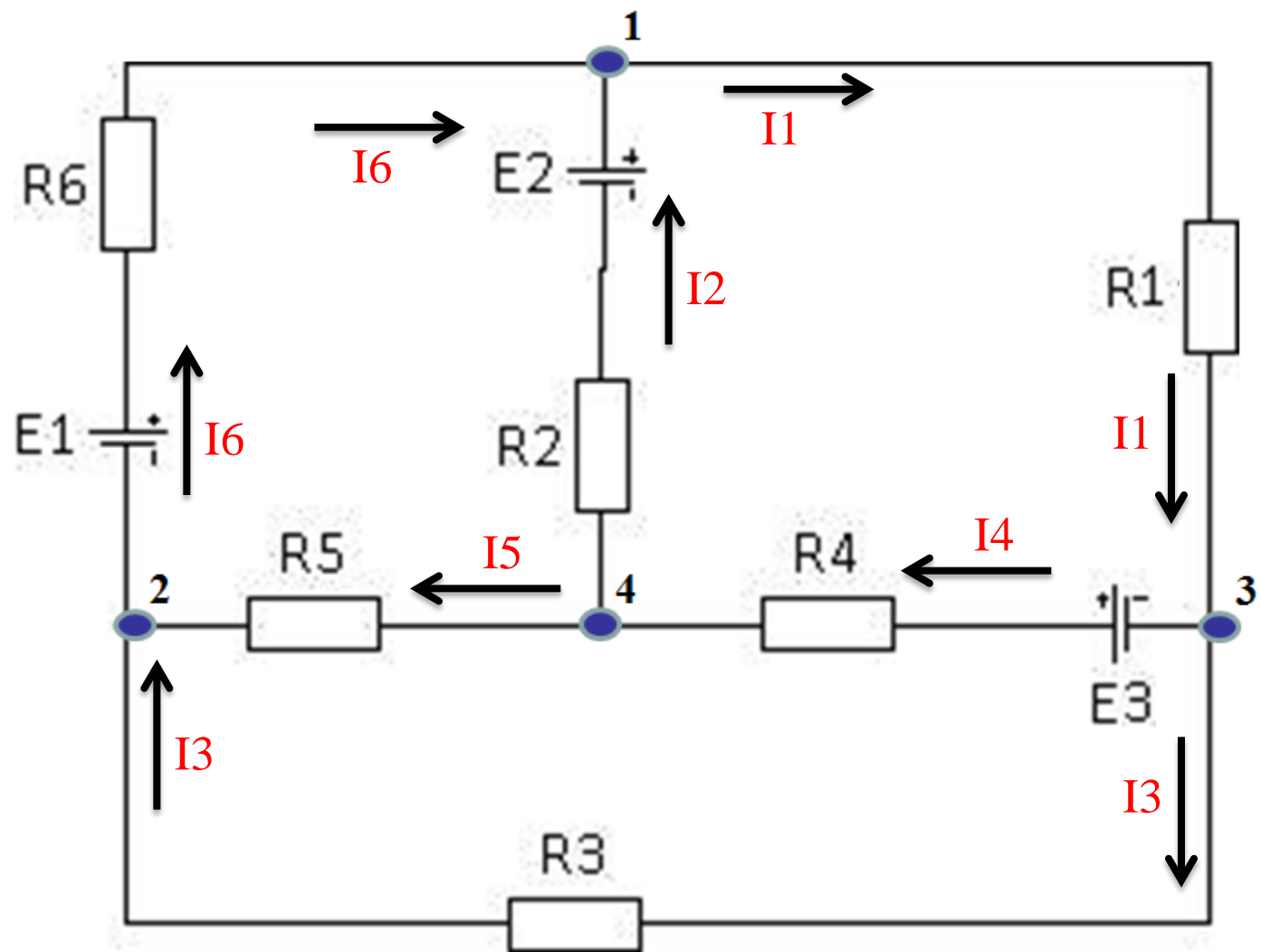
**Узел** — точка, в которой соединяются три (или более) проводника

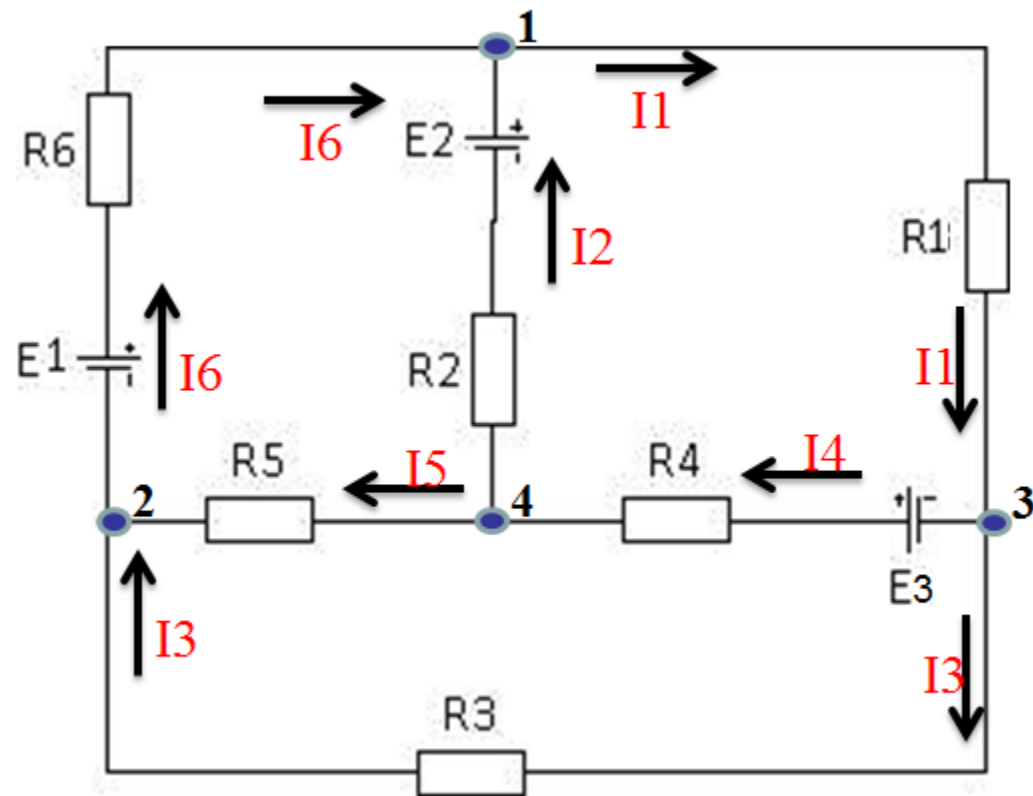
# Отмечаем узлы



# Первый закон Киргофа

*Алгебраическая сумма токов в узле равняется нулю*





1 узел  $I_1 - I_2 - I_6 = 0$   
 2 узел  $I_6 - I_3 - I_5 = 0$   
 3 узел  $I_1 - I_4 - I_3 = 0$

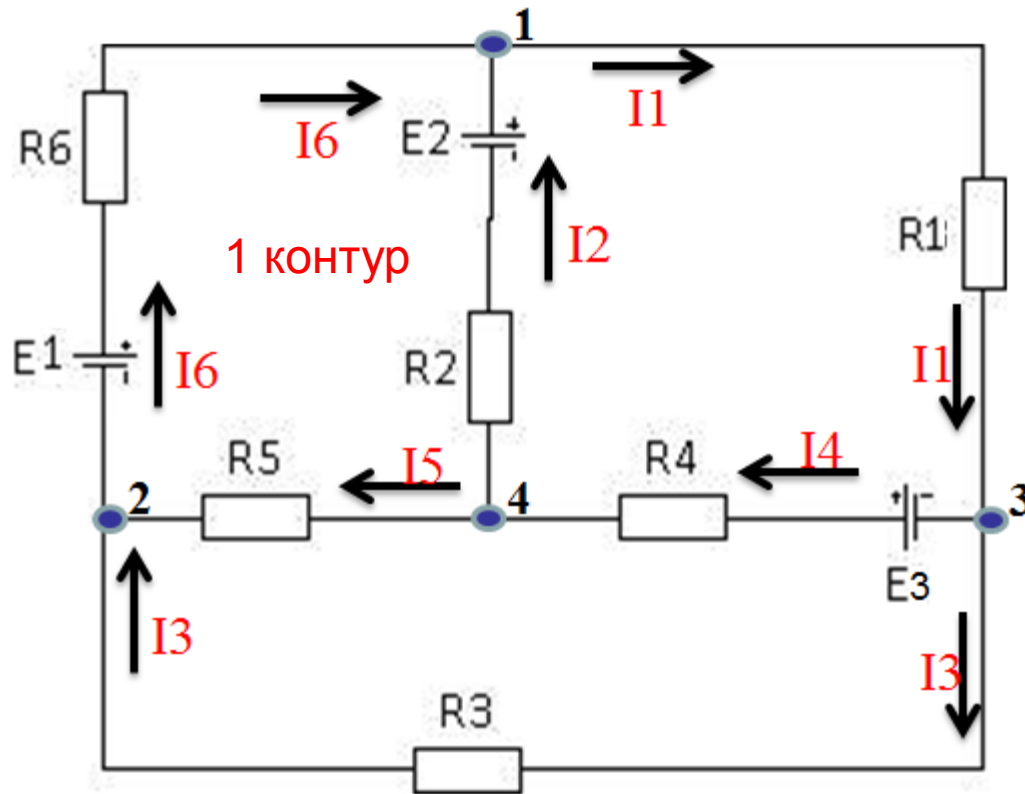
Если цепь содержит  $p$  узлов, то она описывается  $p-1$  уравнениями токов

## Второй закон Киргофа

*Алгебраическая сумма ЭДС, действующая в замкнутом контуре, равна алгебраической сумме падений напряжения в этом контуре*

$$\sum_m \pm E_m = \sum_k \pm U_k$$

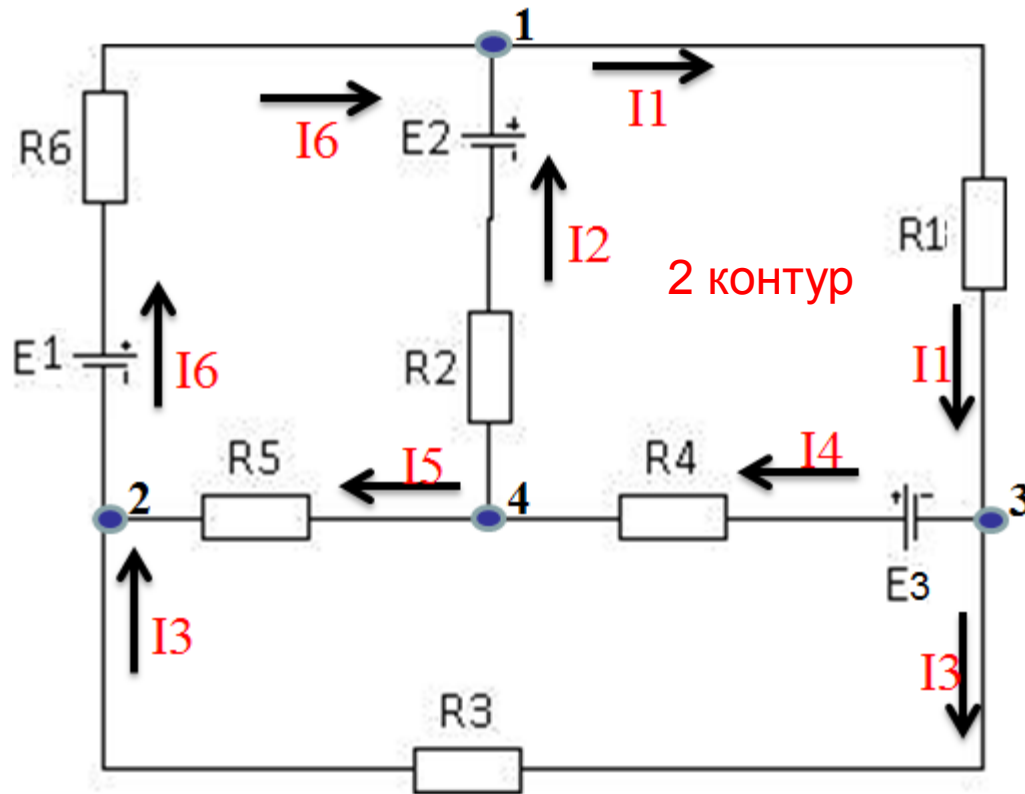
## Второй закон Киргофа



Обходим первый контур по часовой стрелке

$$I_6 \cdot R_6 - I_2 \cdot R_2 + I_5 \cdot R_5 = E_1 - E_2$$

## Второй закон Киргофа

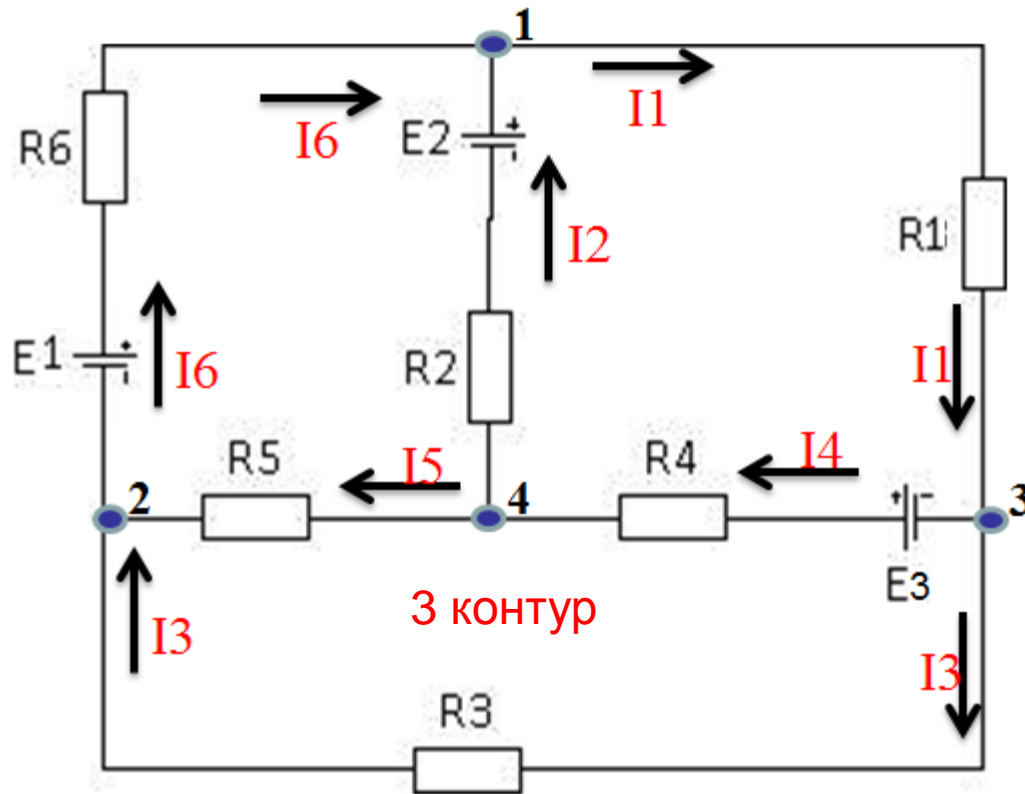


Обходим второй контур по часовой стрелке

$$I_1 \cdot R_1 + I_4 \cdot R_4 + I_2 \cdot R_2 = E_3 + E_2$$



## Второй закон Киргофа



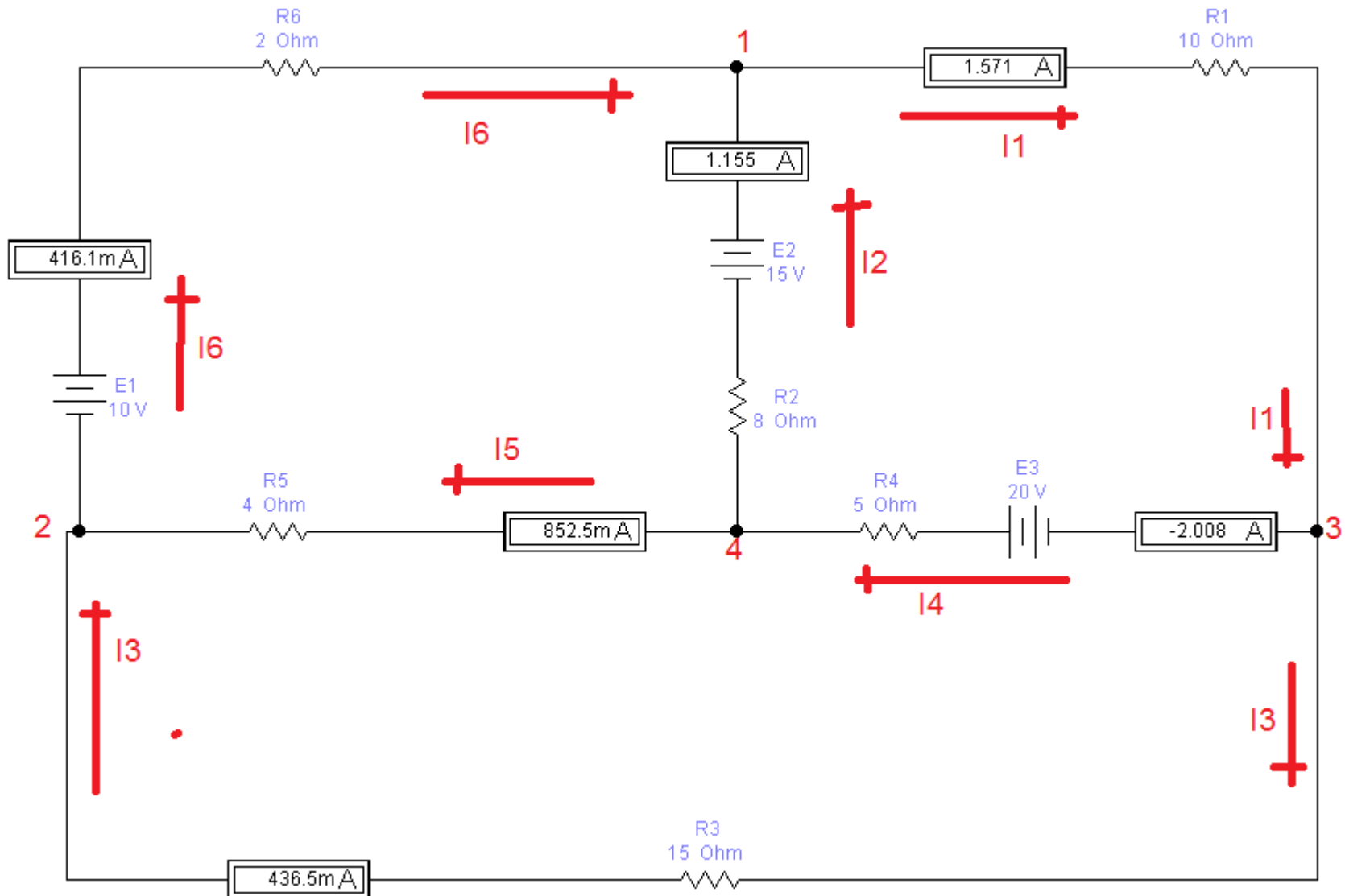
Обходим третий контур по часовой стрелке

$$I_3 \cdot R_3 - I_5 \cdot R_5 - I_4 \cdot R_4 = -E_3$$

# Выполнение работы

1. Собираем схему в EWB
2. Отмечаем все узлы и токи
3. Записываем систему уравнений по 1 и 2 законам Киргофа
4. Решаем в Mathcad

# Рабочий рисунок



# Mathcad

Формируем блок исходных данных

R1 := 10

R2 := 8

R3 := 15

R4 := 5

R5 := 4

R6 := 2

E1 := 10

E2 := 15

E3 := 20

# СИМВОЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ (Find)

Записываем систему уравнений

Given

$$I_1 - I_2 - I_6 = 0$$

$$I_6 - I_3 - I_5 = 0$$

$$I_1 - I_4 - I_3 = 0$$

$$I_6 \cdot R_6 - I_2 \cdot R_2 + I_5 \cdot R_5 = E_1 - E_2$$

$$I_1 \cdot R_1 + I_4 \cdot R_4 + I_2 \cdot R_2 = E_3 + E_2$$

$$I_3 \cdot R_3 - I_5 \cdot R_5 - I_4 \cdot R_4 = -E_3$$

Find(I1,I2,I3,I4,I5,I6) →

$$\begin{pmatrix} 1350 \\ \hline 859 \\ 1985 \\ \hline 1718 \\ 375 \\ -\hline 859 \\ \hline 1725 \\ \hline 859 \\ \hline 1465 \\ \hline 1718 \\ 715 \\ \hline 1718 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.572 \\ 1.155 \\ -0.437 \\ 2.008 \\ 0.853 \\ 0.416 \end{pmatrix}$$

# Метод обратной матрицы

$$AX = B$$

**A** – матрица системы

**B** – столбец свободных коэффициентов

**X** – столбец неизвестных

$$X = A^{-1}B$$

# Mathcad

$$I_1 - I_2 - I_6 = 0$$

$$I_6 - I_3 - I_5 = 0$$

$$I_1 - I_4 - I_3 = 0$$

$$I_6 \cdot R_6 - I_2 \cdot R_2 + I_5 \cdot R_5 = E_1 - E_2$$

$$I_1 \cdot R_1 + I_4 \cdot R_4 + I_2 \cdot R_2 = E_3 + E_2$$

$$I_3 \cdot R_3 - I_5 \cdot R_5 - I_4 \cdot R_4 = -E_3$$

$$a_1 \cdot I_1 - a_2 \cdot I_2 + 0 \cdot I_3 + 0 \cdot I_4 + 0 \cdot I_5 + a_6 \cdot I_6 = 0$$

$$\underline{\underline{A}} := \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -R_2 & 0 & 0 & R_5 & R_6 \\ R_1 & R_2 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & -R_4 & -R_5 & 0 \end{pmatrix}$$



$$B := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ E1 - E2 \\ E3 + E2 \\ -E3 \end{pmatrix}$$

$$I := A^{-1} \cdot B = \begin{pmatrix} 1.572 \\ 1.155 \\ -0.437 \\ 2.008 \\ 0.853 \\ 0.416 \end{pmatrix}$$

# Метод Крамера (википедия)

Система линейных уравнений с вещественными коэффициентами:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 = b_2 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 = b_3 \end{cases}$$

Определители:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & a_{13} \\ b_2 & a_{22} & a_{23} \\ b_3 & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix},$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 & a_{13} \\ a_{21} & b_2 & a_{23} \\ a_{31} & b_3 & a_{33} \end{vmatrix}, \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & b_3 \end{vmatrix}$$

$$x_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad x_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad x_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta}$$

$$\underline{\underline{A}} := \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -R2 & 0 & 0 & R5 & R6 \\ R1 & R2 & 0 & R4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R3 & -R4 & -R5 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ E1 - E2 \\ E3 + E2 \\ -E3 \end{pmatrix}$$

$$A1 := \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ E1 - E2 & -R2 & 0 & 0 & R5 & R6 \\ E3 + E2 & R2 & 0 & R4 & 0 & 0 \\ -E3 & 0 & R3 & -R4 & -R5 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\underline{\underline{I1}} := \frac{|A1|}{|A|} = 1.572$$

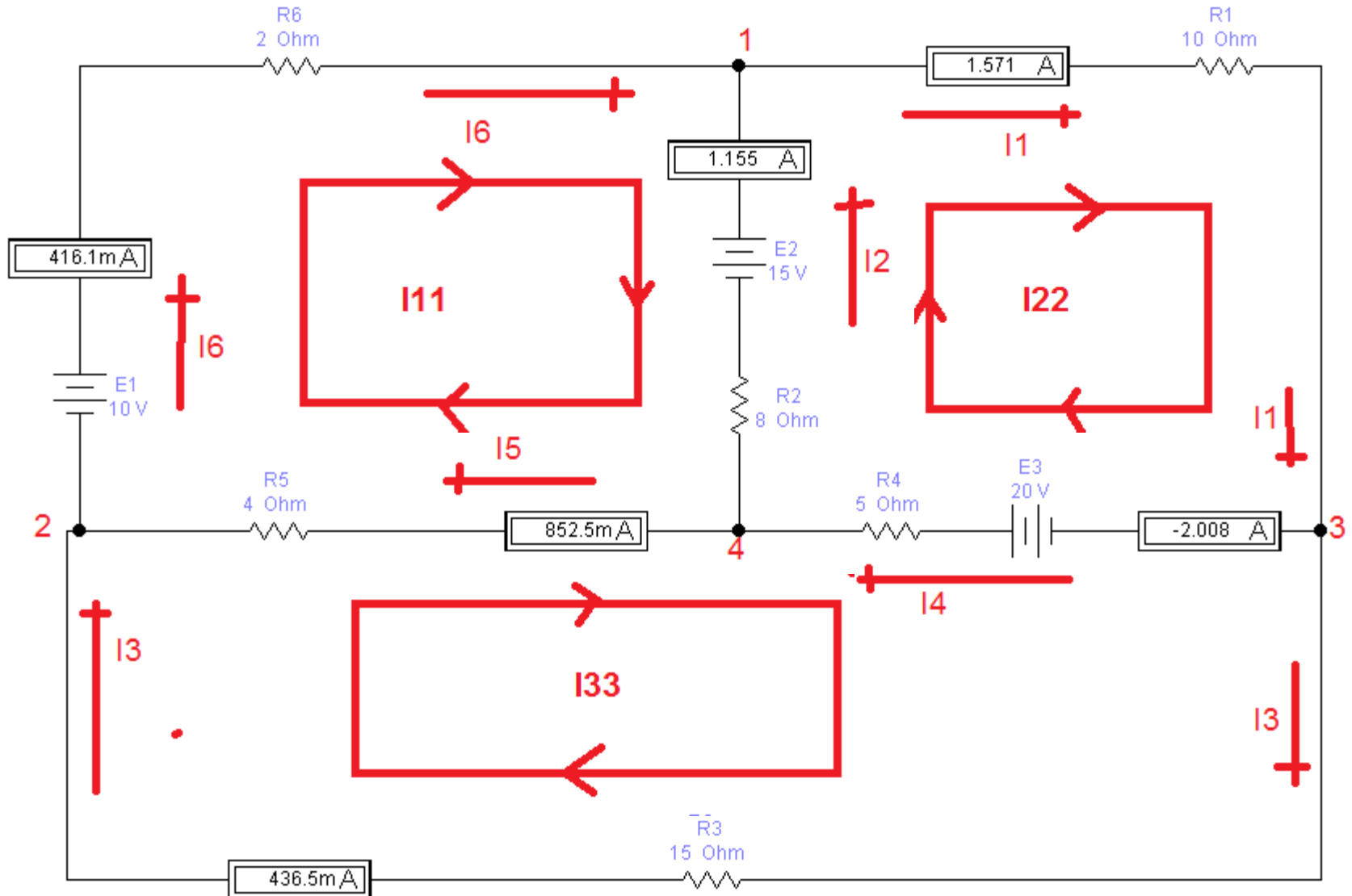
# Метод контурных токов

Метод контурных токов основан на допущении, что в каждом из независимых контуров схемы циркулирует некоторый виртуальный контурный ток.

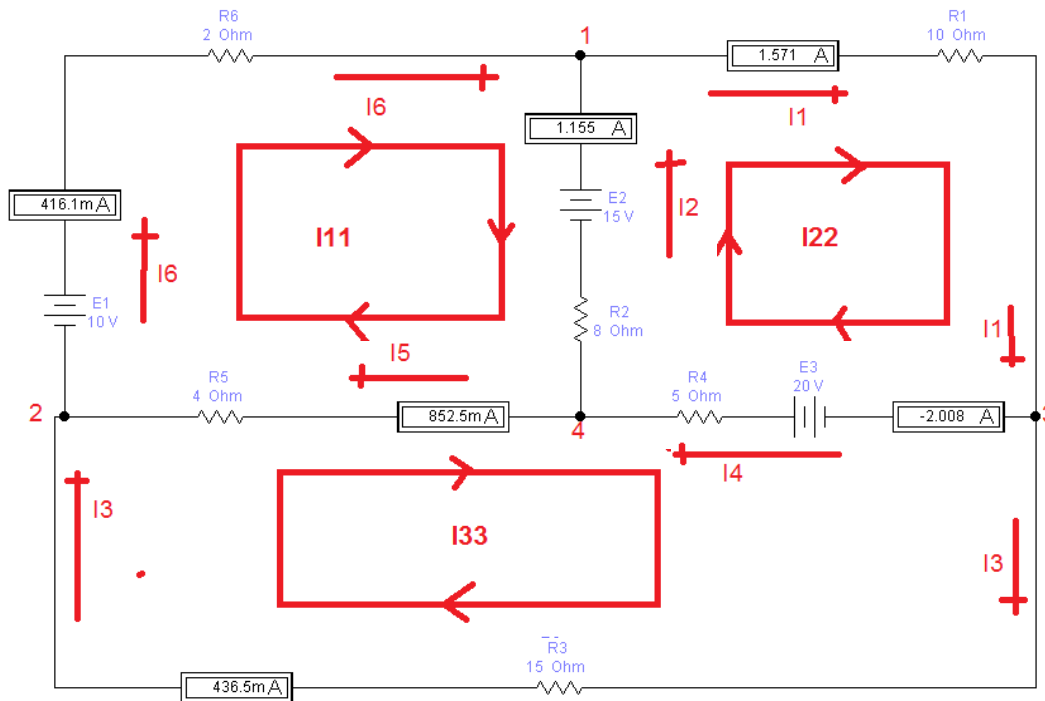
Если некоторое ребро принадлежит только одному контуру, реальный ток в нём равен контурному.

Если же ребро принадлежит нескольким контурам, ток в нём равен сумме соответствующих контурных токов (с учётом направления обхода контуров).

# Метод контурных токов



# Система уравнений



$$I_{11} \cdot (R_6 + R_2 + R_5) - I_{22} \cdot R_2 - I_{33} \cdot R_5 = E_1 - E_2$$

$$I_{22} \cdot (R_2 + R_1 + R_4) - I_{11} \cdot R_2 - I_{33} \cdot R_4 = E_3 + E_2$$

$$I_{33} \cdot (R_3 + R_5 + R_4) - I_{11} \cdot R_5 - I_{22} \cdot R_4 = -E_3$$

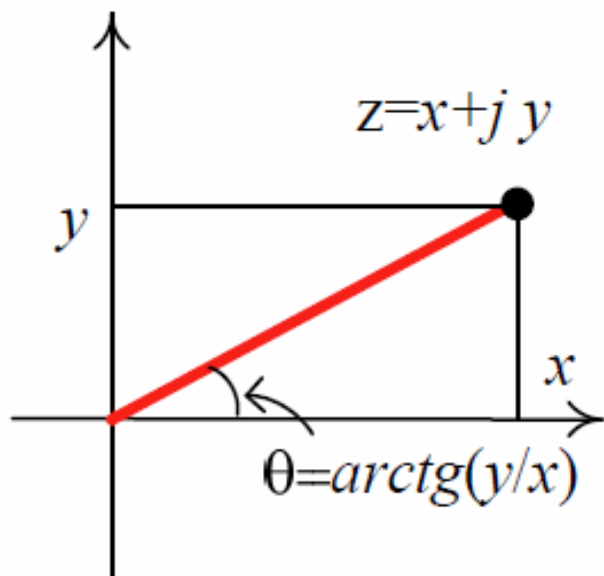
$$I_{11} = I_6; \quad I_{22} = I_1; \quad I_{33} = I_3$$

# Цепь переменного тока

## Немного о комплексных числах

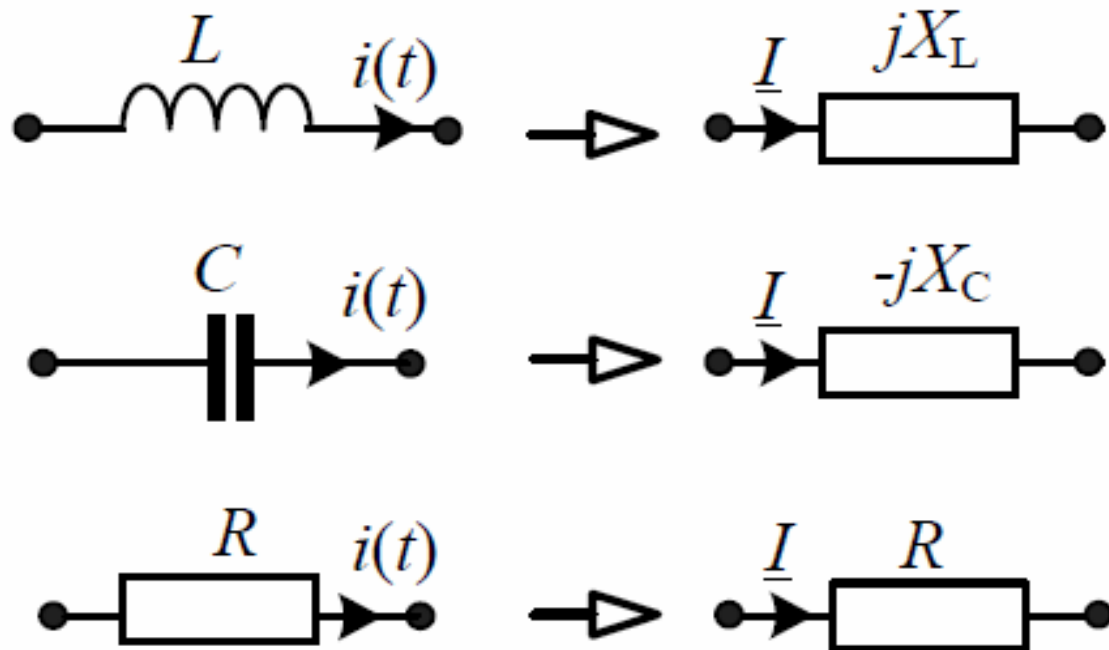
Комплексное число  $z = x + jy$  – это вектор на плоскости

Он имеет модуль  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  и угол наклона к оси  $x$ :



$$\theta = \begin{cases} \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right) & \text{если } x > 0 \\ \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right) \pm \pi & \text{если } x < 0 \end{cases}$$

Вместо реактивных элементов индуктивности и емкости в символическую (комплексную) схему замещения вводятся их реактивные сопротивления:





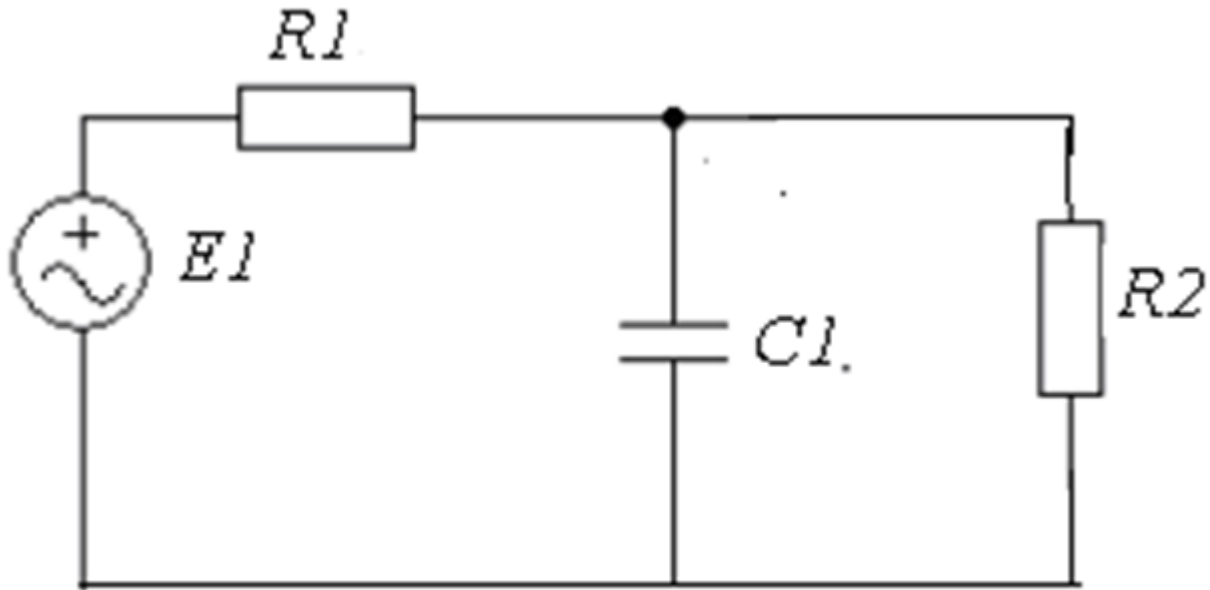
*Факт присутствия комплексной единицы  $j$  перед индуктивным сопротивлением  $jX_L$  означает, что напряжение на индуктивности опережает ток через индуктивность на 90 градусов.*

*Факт присутствия комплексной единицы  $j$  перед ёмкостным сопротивлением  $jX_C$  означает, что напряжение на ёмкости отстает от тока через ёмкость на 90 градусов.*

$X_L = \omega L$  - индуктивное сопротивление

$X_C = 1 / \omega C$  - емкостное сопротивление

# Решение задач



## Исходные данные

$$R1 := 1000$$

$$R2 := 3000$$

$$C1 := 25 \cdot 10^{-6}$$

$$U_d := 220$$

$$f := 115$$

$$\varphi := 0$$

1. представить сопротивления всех ветвей схемы в комплексной форме и рассчитать общее входное сопротивление;

$$Z_c := \frac{-i}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C1} = -55.358i$$

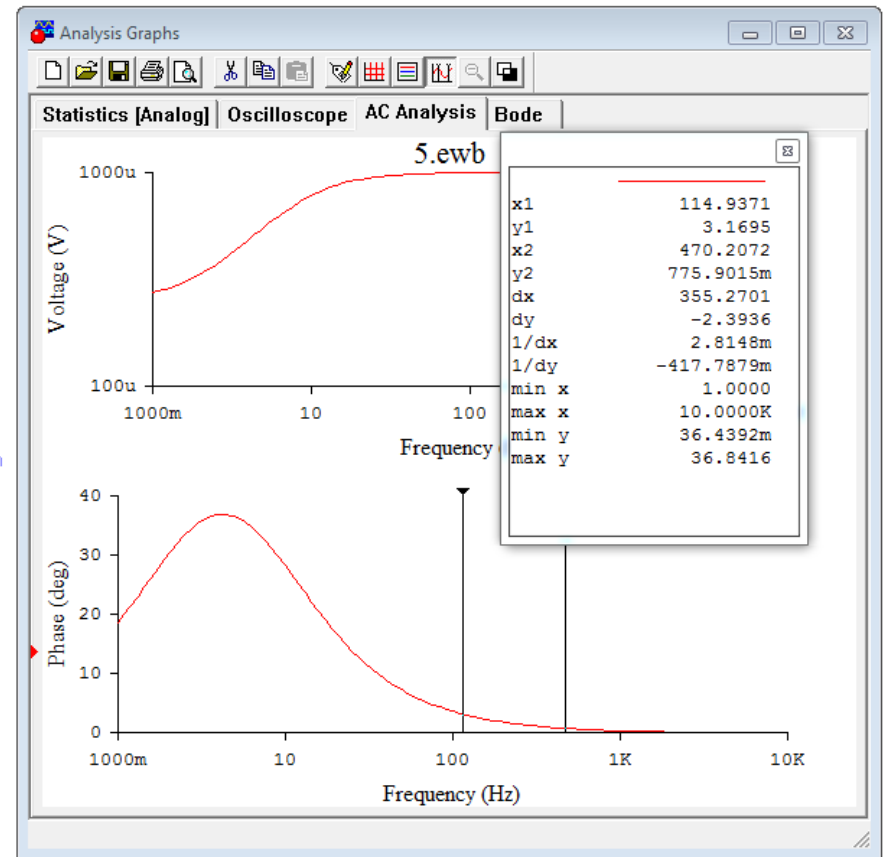
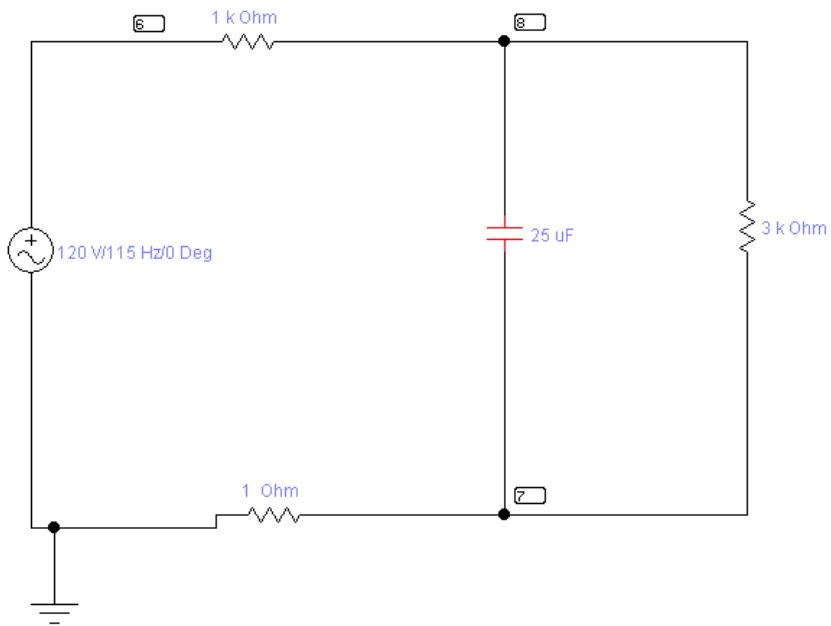
$$Z := R1 + \left( \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{R2} \right)^{-1} = 1.001 \times 10^3 - 55.339i$$

Сдвиг фазы между током и напряжением

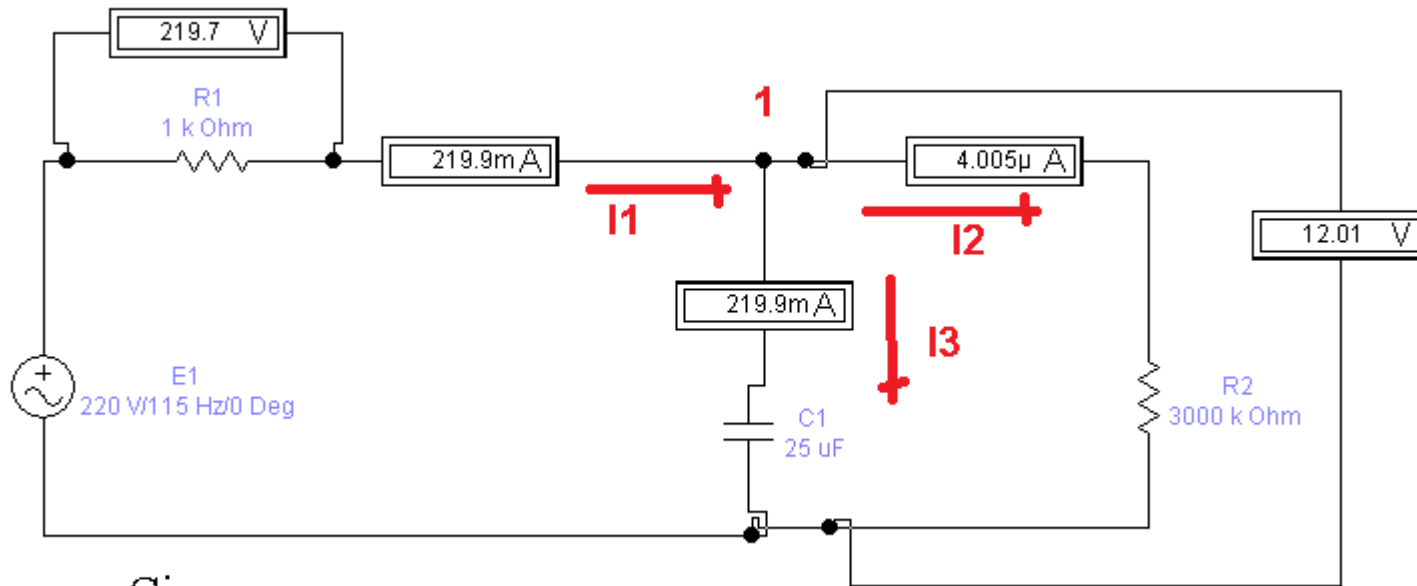
$$d\varphi := \operatorname{atan} \left( \frac{\operatorname{Im}(Z)}{\operatorname{Re}(Z)} \right) = -0.055 \quad \text{В радианах}$$

$$\frac{d\varphi \cdot 180}{\pi} = -3.164 \quad \text{В градусах}$$

# Проверка сдвига фазы



Составить и внести в информационную часть программы уравнения для расчета цепи с использованием законов Кирхгофа



Given

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$U_d = I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot Z_c$$

$$0 = I_3 \cdot R_2 - I_2 \cdot Z_c$$

## Рассчитать токи во всех ветвях схемы и падения напряжений на сопротивлениях

$$\text{Find}(I1, I2, I3) \rightarrow \begin{pmatrix} 0.2191059406665250323 - 0.012112821633772866164i \\ 0.21880792088870004307 - 0.016150428845030488218i \\ 0.00029801977782498923265 - 0.0040376072112576220546i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.219 + 0.012i \\ 0.219 + 0.016i \\ 2.98 \times 10^{-4} - 4.038i \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} |0.219 + 0.012i| \\ |0.219 + 0.016i| \\ |2.98 \times 10^{-4} - 4.038i \times 10^{-3}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.219 \\ 0.22 \\ 4.049 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Комплексное напряжение на ёмкости  $U_c = I2 \cdot Z_c$

$$U_c := 0.22 \cdot Z_c = -12.179i$$

Модуль комплексного напряжения

$$U_c := |U_c| = 12.179$$

Записать выражения для мгновенных значений напряжений и токов и привести их временные зависимости в виде графиков

Вспомним, что  $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_0)$  тогда в Mathcad:

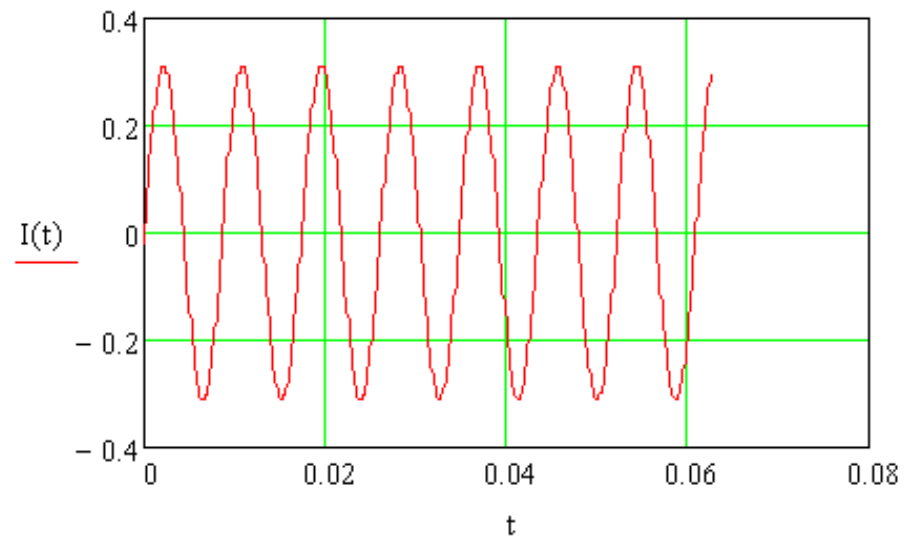
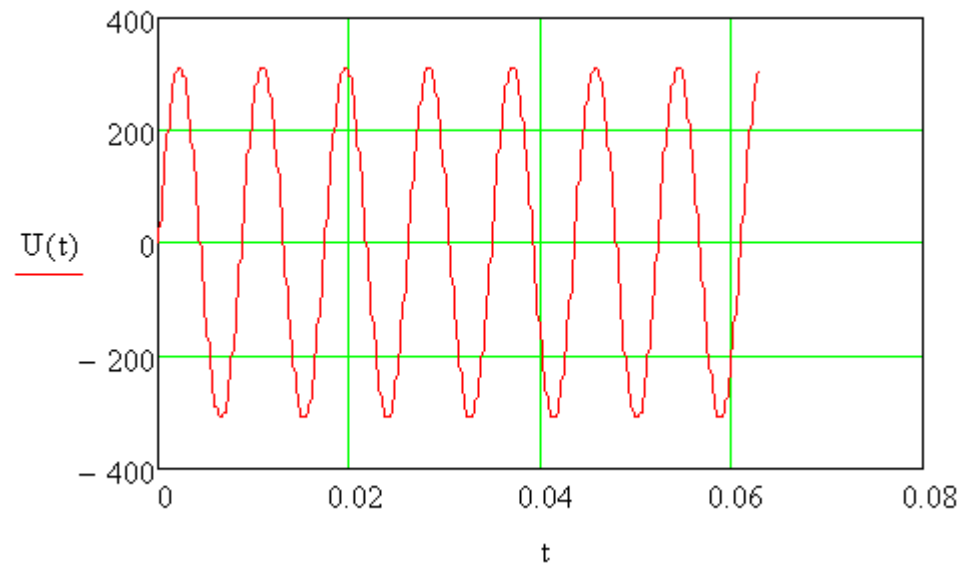
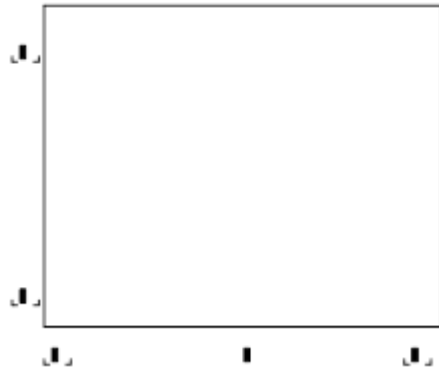
$$U_{\max} := \sqrt{2} \cdot U_d \quad I_{\max} := \frac{U_{\max}}{|Z|} = 0.31$$

Переменный диапазон  $t := 0, 10^{-4} .. 2 \cdot \frac{\pi}{100}$

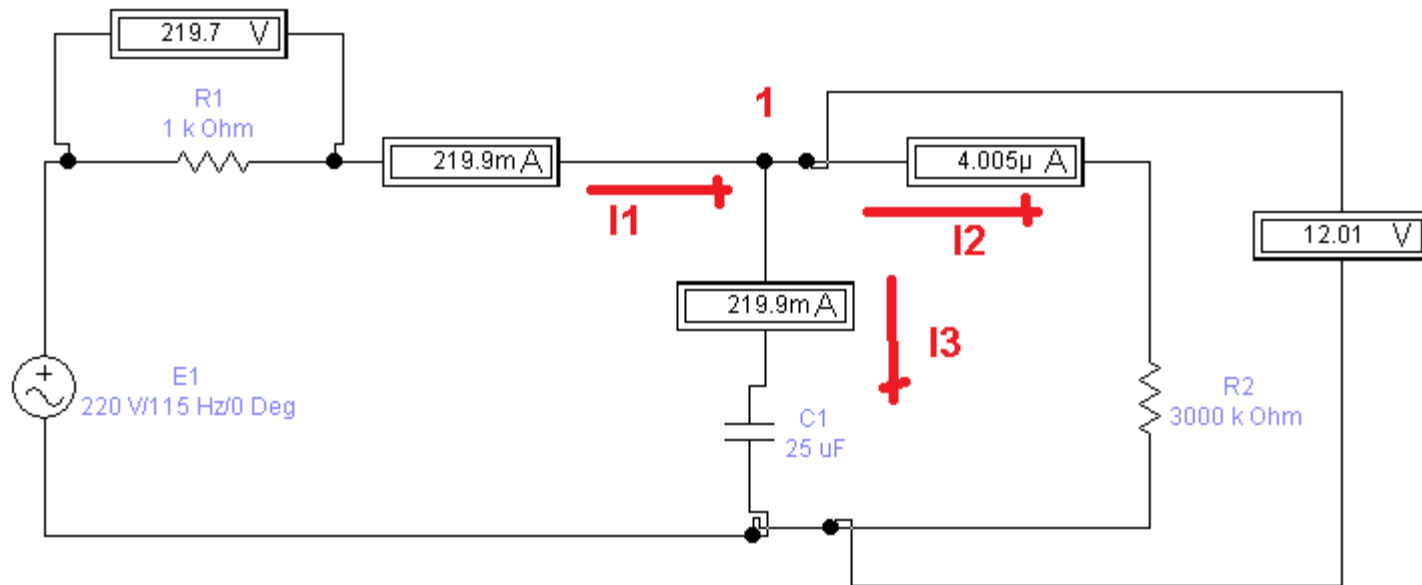
Записываем функции  $U(t) := U_{\max} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi)$

$$I(t) := I_{\max} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi + |d\varphi|)$$

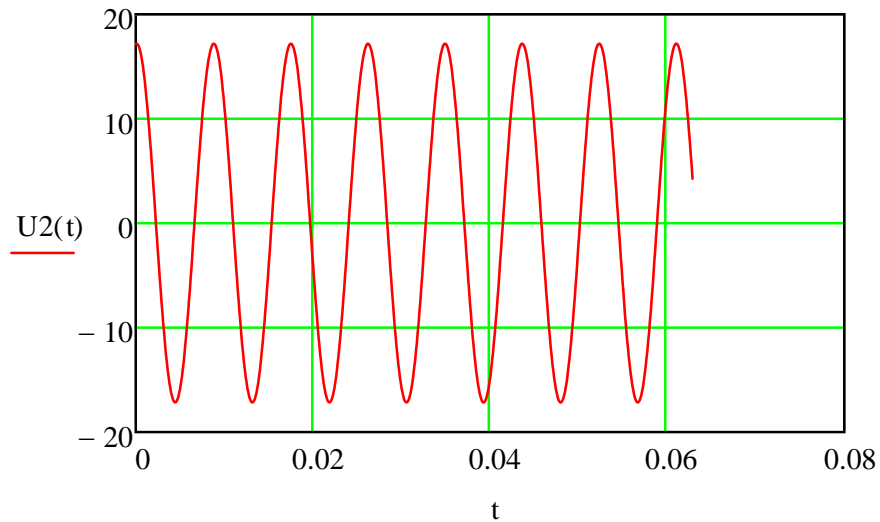
# Построение графиков



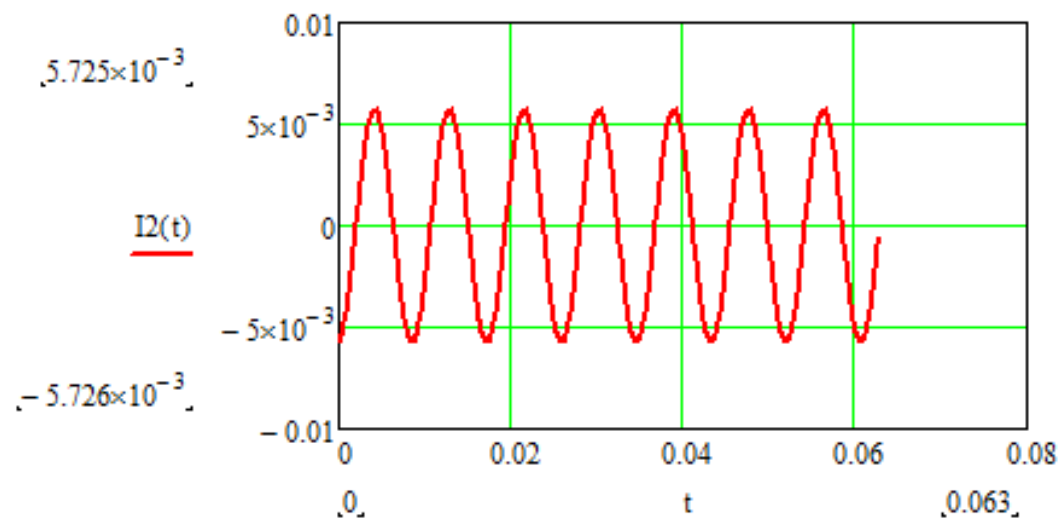




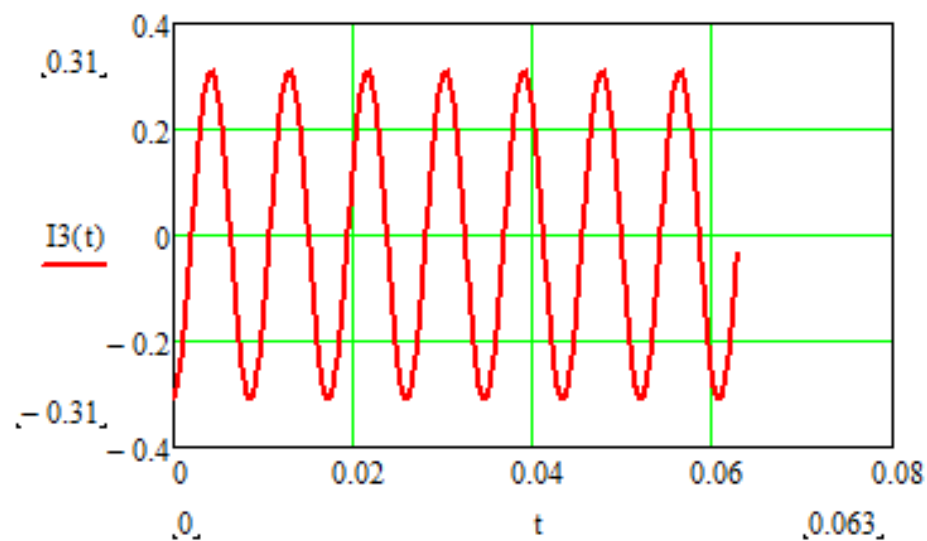
$$U2(t) := U(t) - I(t) \cdot R1$$



$$I_2(t) := \frac{U_2(t)}{R_2}$$



$$I_3(t) := \frac{U_2(t)}{|Z_c|}$$



# ***Переходные процессы***

По типу происходящих процессов, изучаемые цепи, можно поделить на два типа:

1. Цепи установившегося (стационарного) режима
2. Переходные (динамические, нестационарные) цепи

# Цепи установившегося режима

В цепях постоянного тока напряжения и токи неизменны во времени, а в цепях переменного тока они представляют собой периодические функции времени.

Установившиеся режимы при заданных и неизменных параметрах цепи полностью определяются только источником энергии.

# Переходные цепи

Переходные процессы возникают при любых изменениях режима электрической цепи.

Физически переходные процессы представляют собой процессы перехода от энергетического состояния, соответствующего до коммутационному режиму, к энергетическому состоянию, соответствующему после коммутационному режиму.

Изучение переходных процессов  
позволяет установить:

- как деформируется по форме и амплитуде сигнал
- выявить превышения напряжения на отдельных участках цепи, которые могут оказаться опасными для изоляции установки

- выявить увеличения амплитуд токов, которые могут в десятки раз превышать амплитуду тока установившегося периодического процесса
- определит продолжительность переходного процесса

Кроме того работа многих электротехнических устройств, особенно устройств промышленной электроники, основана на переходных процессах.

Анализ переходных процессов производят путем решения дифференциальных уравнений, составленных для исследуемой электрической цепи на основе *законов Кирхгофа или метода контурных токов.*



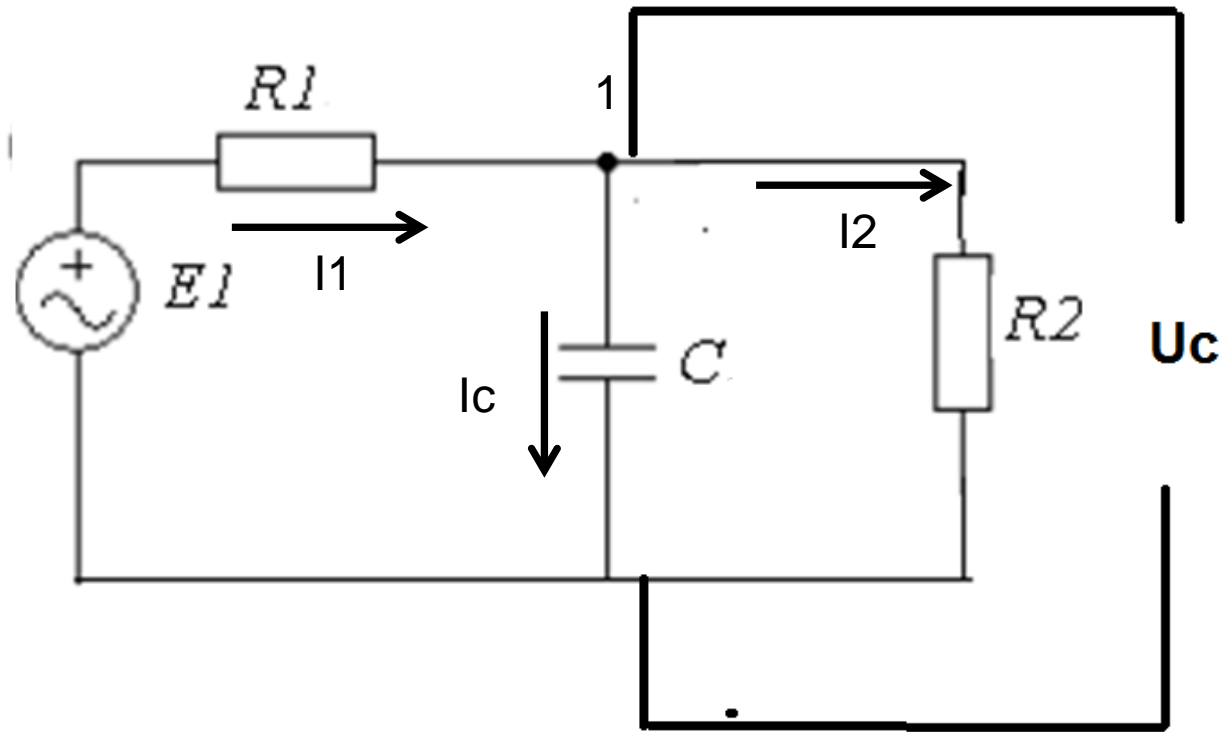
# ВСПОМНИМ

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}.$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C \cdot dt.$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}.$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt$$



По первому закону Киргофа

$$I1 - I2 - Ic = 0$$

$$I1 = \frac{E1 - Uc}{R1} \quad i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad I2 = \frac{U_C}{R2}$$

$$\frac{E1 - Uc}{R1} - C \frac{dUc}{dt} - \frac{Uc}{R2} = 0$$

$$\frac{dUc(t)}{dt} = \frac{E1(t) - Uc(t)}{R1C} - \frac{Uc(t)}{R2C}$$

$$\frac{dUc(t)}{dt} = \frac{E1(t)}{R1C} - Uc(t) \frac{R1 + R2}{R1R2C}$$

# Метод Эйлера

Пусть дана задача Коши для уравнения первого порядка

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y)$$

$$y(x_0) = y_0$$

Решение ищется на интервале

$$(a = x_0, b]$$

Разобьём интервал на узлы:

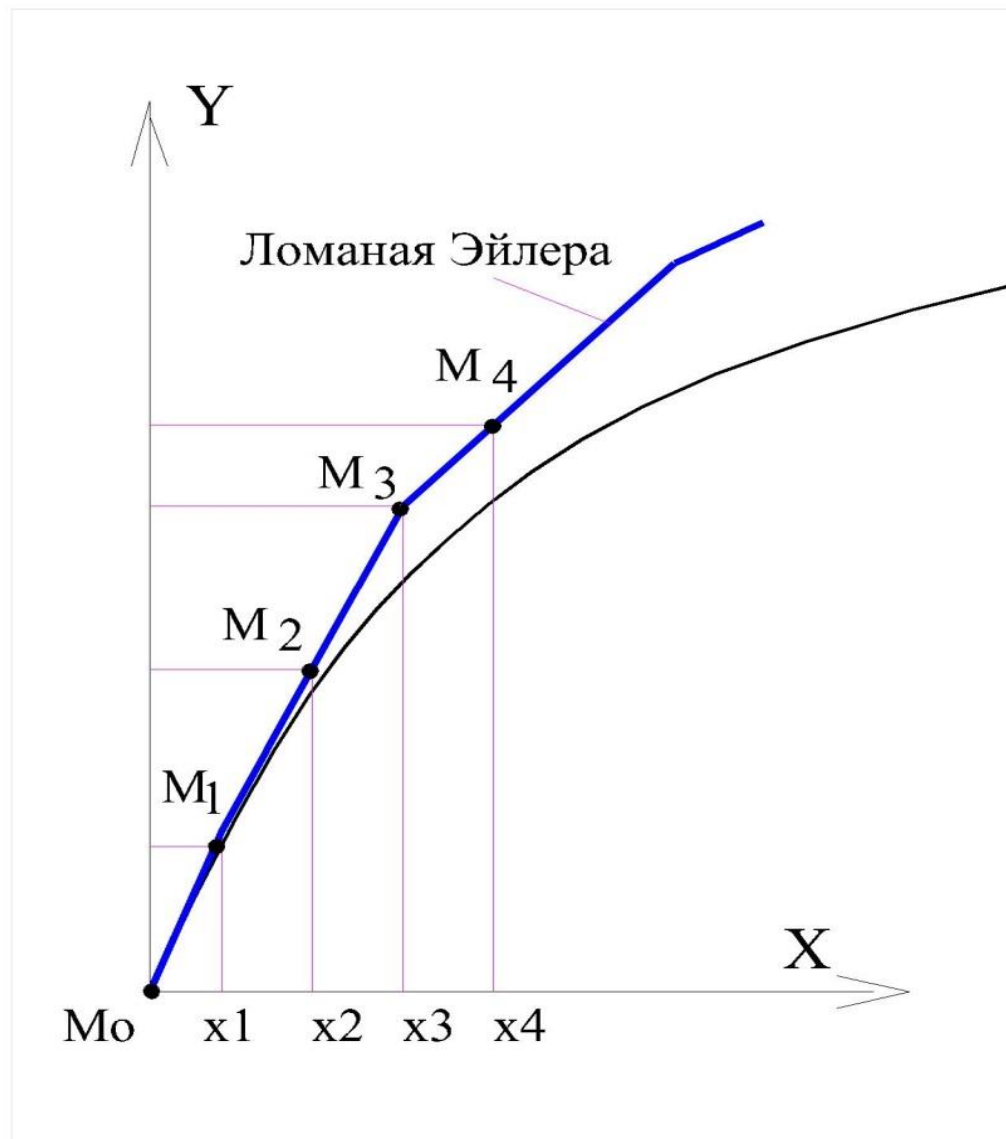
$$x_0 < x_1 < \dots < x_n < b$$

Запишем задачу в следующем виде

$$\frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} = f(x_i, y_i)$$

Приближенное решение в узле  $x_i$

$$y_i = y_{i-1} + (x_i - x_{i-1}) f(x_{i-1}, y_{i-1})$$



# Решение в Mathcad

## Исходные данные

$$R1 := 1000$$

$$R2 := 3000$$

$$C1 := 25 \cdot 10^{-6}$$

$$E1 := 220$$

$$f := 115$$

## Начальные условия

$$\begin{pmatrix} t_0 \\ U_{c_0} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Шаг

$$\underset{\text{M}}{dt} := 10^{-5}$$

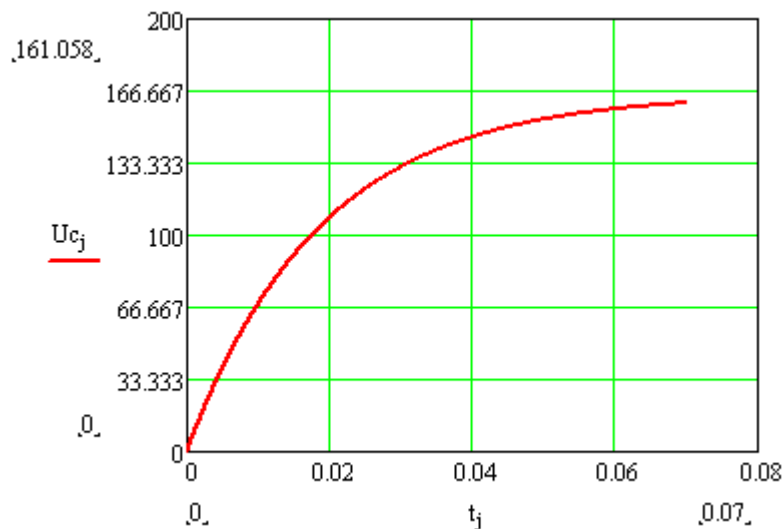
Количество расчётных точек  $j := 0..N$

# Постоянное напряжение

$$\frac{dU_c(t)}{dt} = \frac{E1}{R1C} - U_c(t) \frac{R1 + R2}{R1R2C}$$

$$\begin{pmatrix} t_{j+1} \\ U_{c,j+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} t_j + dt \\ U_{c,j} + \left[ \frac{E1}{R1 \cdot C1} - \frac{U_{c,j} \cdot (R1 + R2)}{R1 \cdot R2 \cdot C1} \right] \cdot dt \end{bmatrix}$$

$$y_i = y_{i-1} + (x_i - x_{i-1}) f(x_{i-1}, y_{i-1})$$





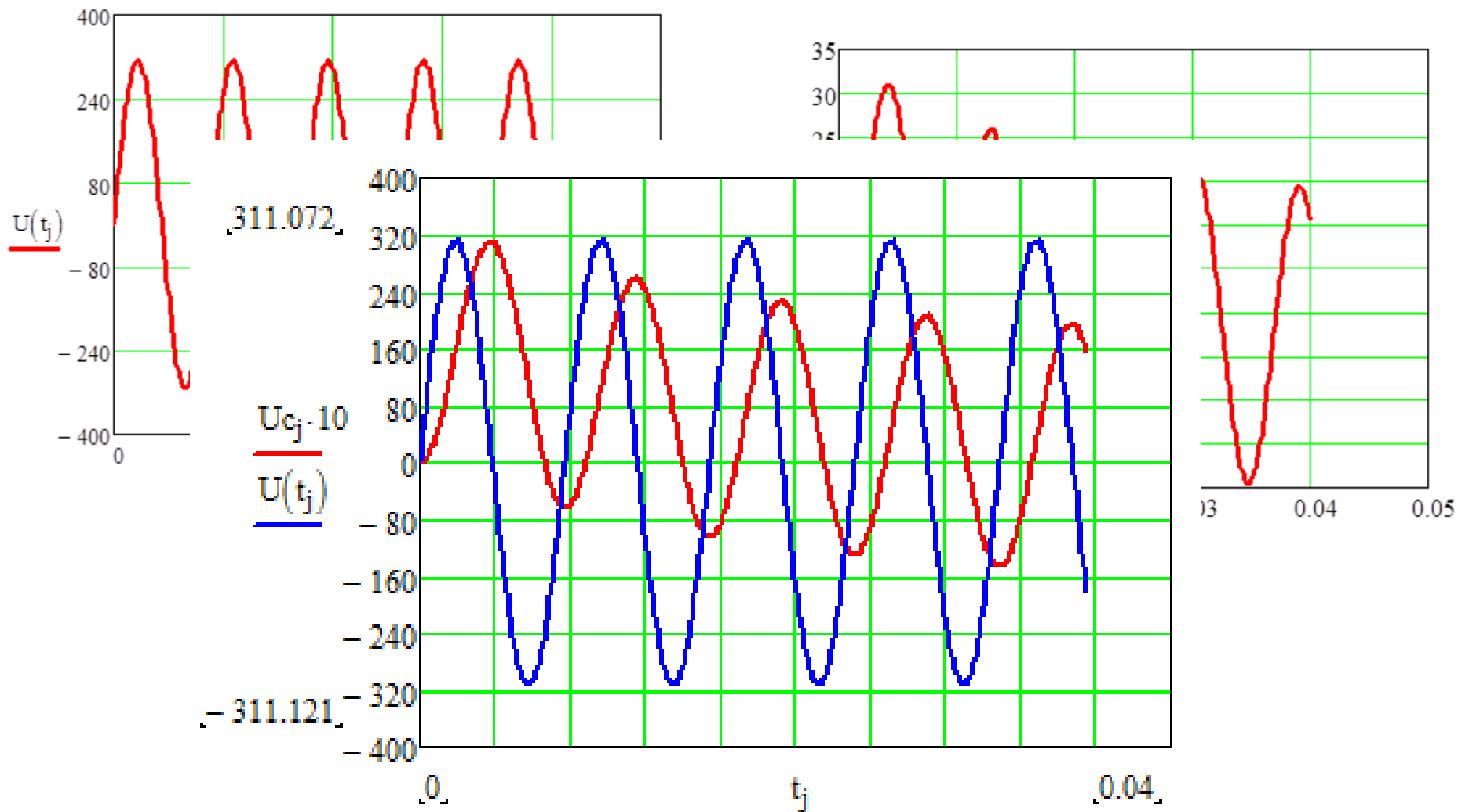
# Переменное напряжение

$$\frac{dU_c(t)}{dt} = \frac{E_1(t)}{R_1 C} - U_c(t) \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C}$$

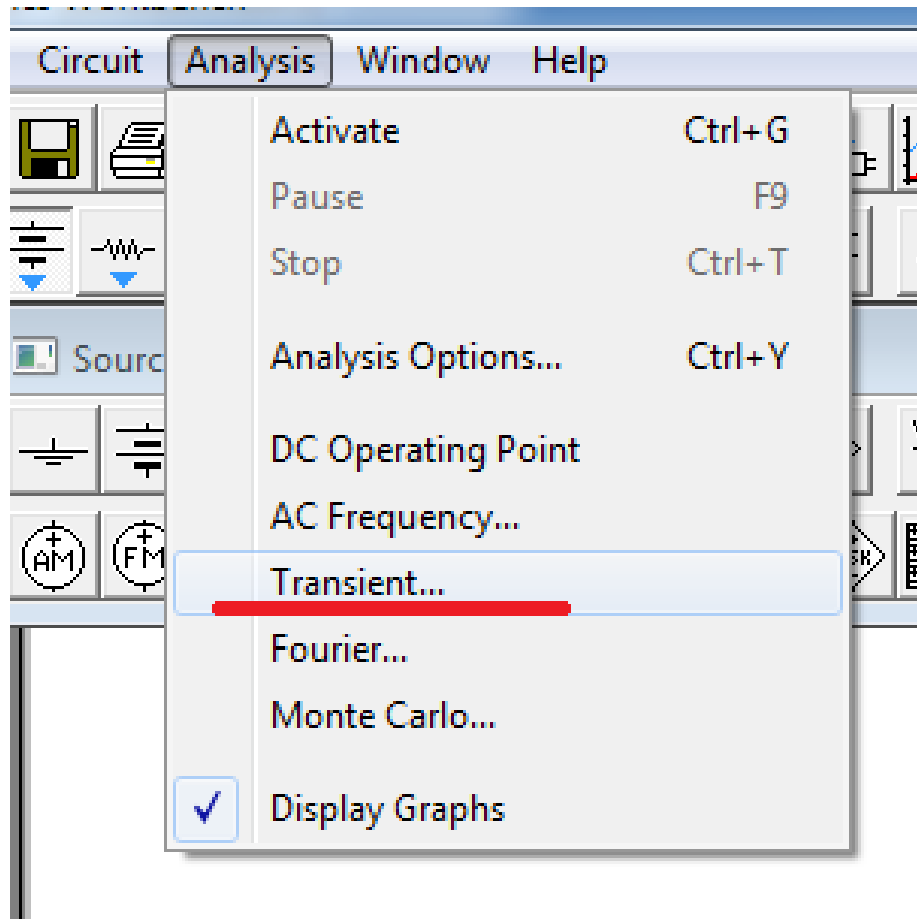
$$U(t) := E_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

$$\begin{pmatrix} t_{j+1} \\ U_{c,j+1} \end{pmatrix} := \left[ \begin{array}{c} t_j + dt \\ U_{c,j} + \left[ \frac{U(t_j)}{R_1 \cdot C_1} - \frac{U_{c,j} \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1} \right] \cdot dt \end{array} \right]$$

# Результаты

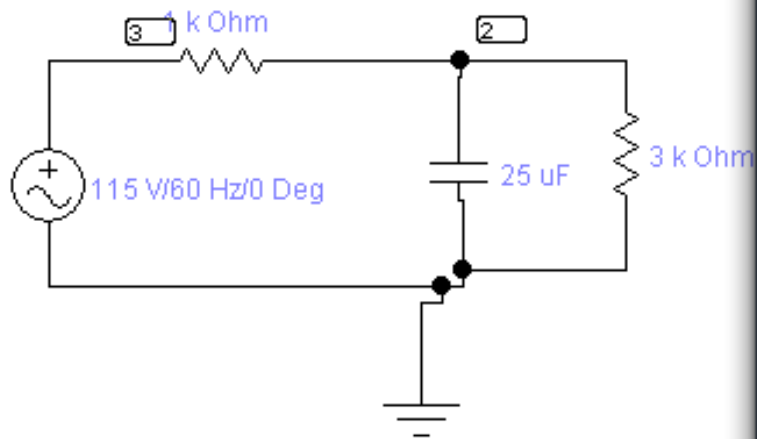


# EWB



Transient - анализ переходных процессов

# EWB



**Transient Analysis** [X]

Initial conditions

- Set to Zero
- User-defined
- Calculate DC operating point

Analysis

Start time (TSTART)  s

End time (TSTOP)  s

Generate time steps automatically

- Minimum number of time points
- Maximum time step (TMAX)  s

Set plotting increment

Plotting increment (TSTEP)  s

Nodes in circuit

- 3
- V1#branch

Nodes for analysis

- 2

Add ->

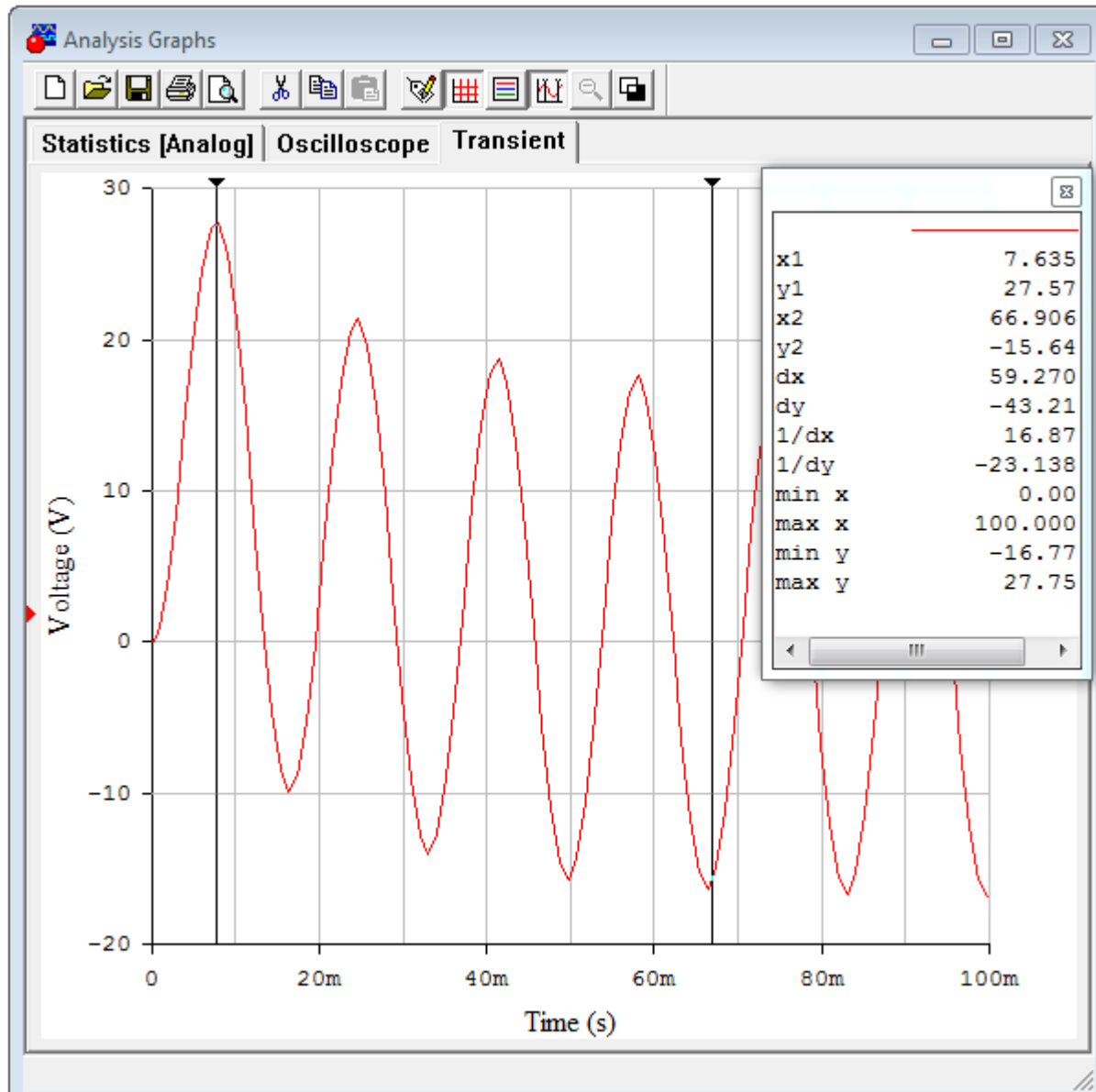
<- Remove

Simulate

Accept

Cancel

# EWB



# Операторный метод

**Преобразование Лапласа** – это интегральное преобразование, связывающее функцию  **$F(p)$**  комплексного переменного с функцией  **$f(t)$**  действительного переменного.

# Операторный метод

- $f(t)$  – оригинал (ограниченная функция);
- $F(p)$  – изображение, не зависит от времени;

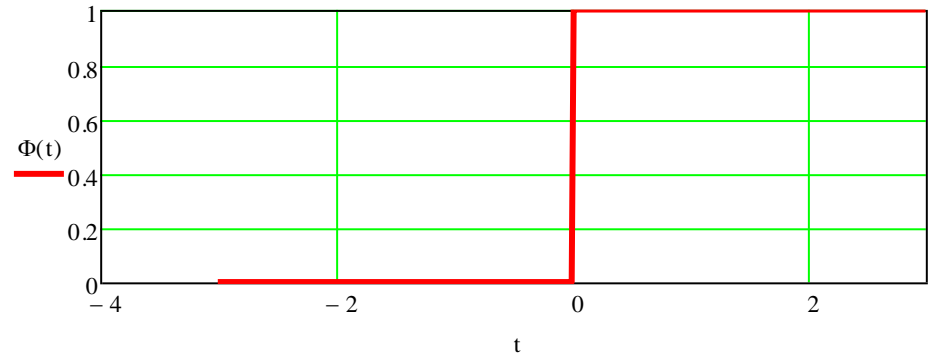
$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt$$

$$p = \alpha + j\omega \quad j = \sqrt{-1}$$

# Изображения

## 1. Функция Хевисайда

$$\theta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$$



$$t \geq 0$$

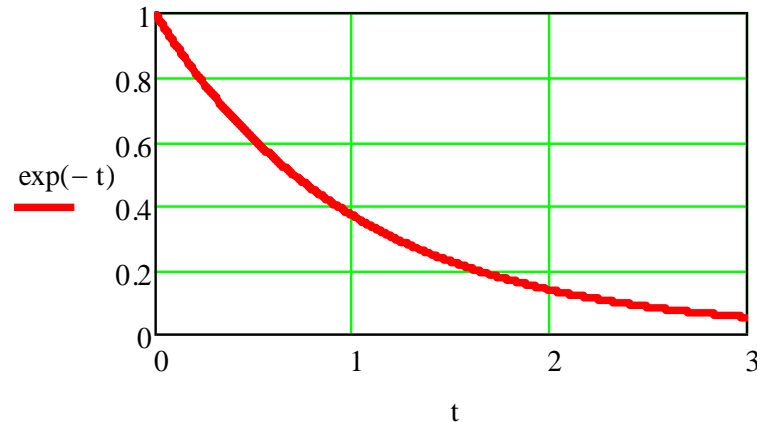
$$F(p) = \int_0^{\infty} 1 \cdot e^{-pt} dt = \frac{1}{-p} e^{-pt} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{-p} e^{-p \cdot \infty} - \frac{1}{-p} e^{-p \cdot 0} = \frac{1}{p}$$



# Изображения

## 2. Экспоненциально убывающая функция

$$f(t) = e^{-qt}$$



$$F(p) = \int_0^{\infty} e^{-qt} \cdot e^{-pt} dt = \int_0^{\infty} e^{-(q+p)t} dt =$$

$$\frac{1}{-(q+p)} e^{-(q+p)t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{q+p}$$

# Изображения

3. Производная

$$g(t) = \frac{df(t)}{dt}$$

$$G(p) = \int_0^{\infty} \frac{df(t)}{dt} e^{-pt} dt = \int_0^{\infty} e^{-pt} df(t)$$

Интегрирование по частям

$$\int_a^b u dv = uv \Big|_a^b - \int_a^b v du$$

$$f(t) = v(t), e^{-pt} = u(t)$$

$$G(p) = \int_0^{\infty} df(t) e^{-pt} = f(t) e^{-pt} \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} f(t) d e^{-pt} =$$

$$-f(0) + p \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt$$

$$G(p) = pF(p) - f(0)$$

# Изображения

4. Интеграл  $g(t) = \int_0^T f(t) dt$

$$G(p) = \int_0^{\infty} g(t) e^{-pt} dt \quad e^{-pt} dt = d\left(-\frac{1}{p} e^{-pt}\right)$$

## Интегрирование по частям

$$g(t) = u(t), -\frac{1}{p} e^{-pt} = v(t)$$

$$G(p) = uv \Big|_0^\infty - \int_0^\infty v du = \int_0^T f(t) dt \cdot \left(-\frac{1}{p} e^{-pt}\right) \Big|_0^\infty + \frac{1}{p} \int_0^\infty e^{-pt} dg(t)$$

$$G(p) = \frac{1}{p} \int_0^\infty f(t) e^{-pt} dt = \frac{F(p)}{p}$$

# Таблица отображений

$f(t)$	$F(p)$
$1$	$\frac{1}{p}$
$e^{-qt}$	$\frac{1}{q+p}$
$\frac{df(t)}{dt}$	$pF(p) - f(0)$
$\int_0^T f(t)dt$	$\frac{F(p)}{p}$

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad \Longrightarrow \quad I_C(p) = pC \cdot U_C(p)$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C \cdot dt \quad \Longrightarrow \quad U_C(p) = \frac{1}{pC} I_C(p)$$

$$X_C(p) = \frac{1}{pC}$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad \Longrightarrow \quad U_L(p) = pL \cdot I_L(p)$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt \quad \Longrightarrow \quad I_L(p) = \frac{1}{pL} U_L(p)$$

$$X_L(p) = pL$$

# Некоторые вычисления

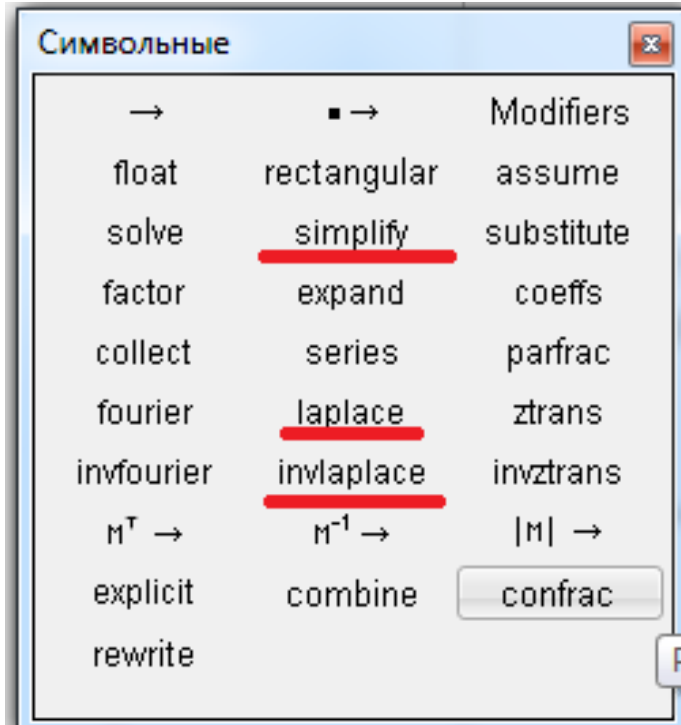
$$\frac{dU_c(t)}{dt} = \frac{E_1(t)}{R_1 C} - U_c(t) \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C}$$

$$pU_c(p) = \frac{E_1(p)}{R_1 C} - U_c(p) \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C}$$

$$U_c(p) = \frac{E_1(p)}{R_1 C} \left[ p + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C} \right]^{-1}$$



# Mathcad



■ laplace →

■ invlaplace →

■ simplify →

# Mathcad

## Блок начальных данных

$$R1 := 1000 \quad R2 := 3000 \quad C1 := 25 \cdot 10^{-6}$$

$$Ud := 220 \quad f := 115 \quad \varphi0 := 0$$

## Решение при постоянном напряжении

$$U(t) := Ud \quad U(s) := U(t) \text{ laplace} \rightarrow \frac{220}{s}$$

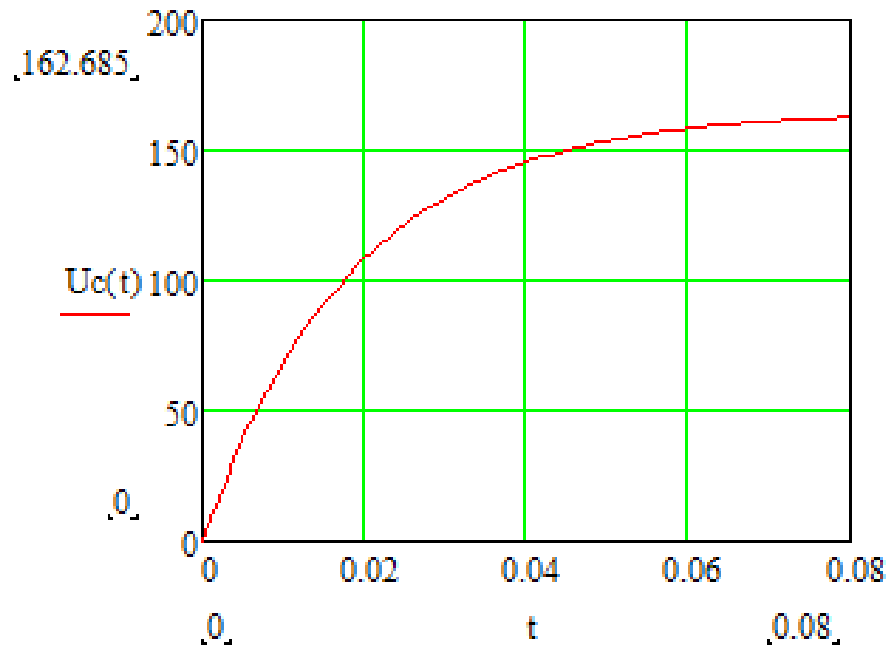
$$Uc(s) := \frac{U(s)}{R1 \cdot C1} \cdot \left( s + \frac{R1 + R2}{R1 \cdot R2 \cdot C1} \right)^{-1}$$

# Mathcad

## Обратное преобразование

$$U_c(t) := U_c(s) \text{ invlaplace} \rightarrow 165 - 165 \cdot e^{-\frac{160 \cdot t}{3}}$$

$$t := 0, 0.001 .. 0.08$$



# Решение при переменном напряжении

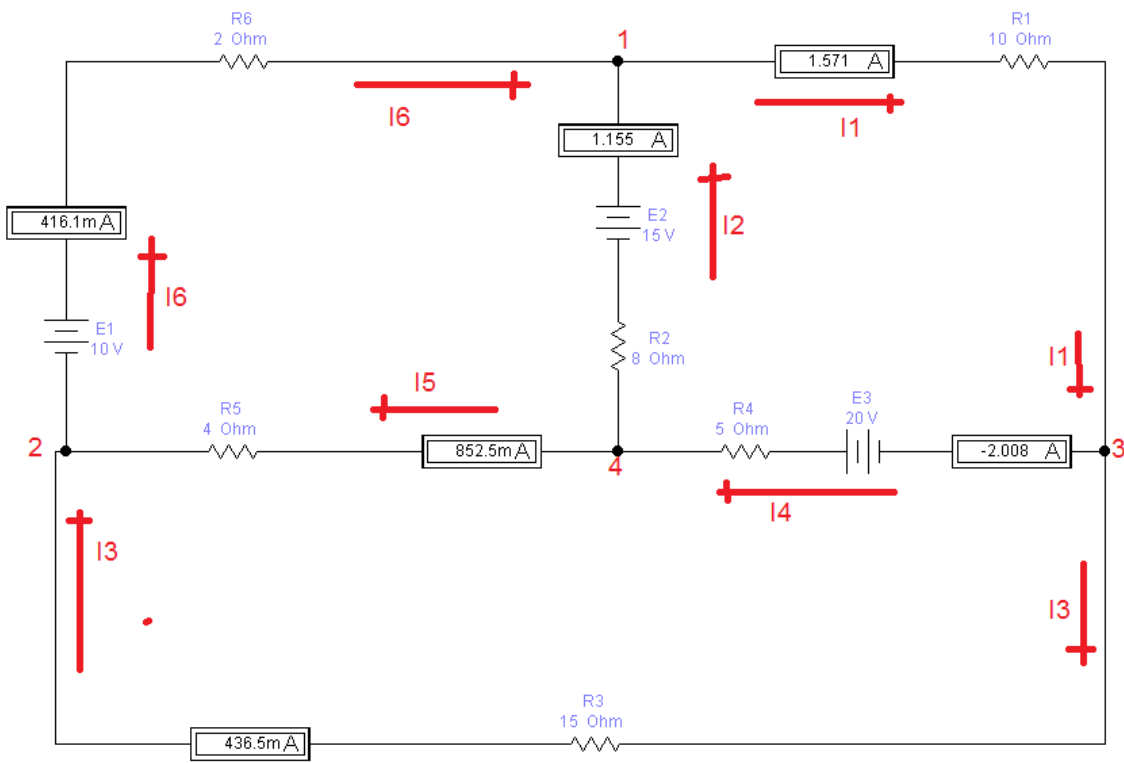
$$U(t) := U_d \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_0)$$

# Метод узловых потенциалов

Данный метод основан на составлении уравнений по первому закону Кирхгофа. При этом, потенциал одного из узлов цепи принимается равным нулю, что позволяет сократить число уравнений до  $n-1$ .

По обобщённому закону Ома:

$$I_i = \frac{\phi_A - \phi_B + E_i}{R_i} + J_i.$$



$$I1 - I2 - I6 = 0$$

$$I6 - I3 - I5 = 0$$

$$I1 - I4 - I3 = 0$$

---

$$I1 = \frac{(\varphi1 - \varphi3)}{R1}$$

$$I2 = \frac{(\varphi4 - \varphi1 + E2)}{R2}$$

$$I3 = \frac{(\varphi3 - \varphi2)}{R3}$$

$$I4 = \frac{(\varphi3 - \varphi4 + E3)}{R4}$$

--

$$I5 = \frac{(\varphi4 - \varphi2)}{R5}$$

$$\varphi4 := 0$$

Given

$$\frac{(\varphi_1 - \varphi_3)}{R_1} - \frac{(\varphi_4 - \varphi_1 + E_2)}{R_2} - \frac{(\varphi_2 - \varphi_1 + E_1)}{R_6} = 0$$

$$-\frac{(\varphi_3 - \varphi_2)}{R_3} - \frac{(\varphi_4 - \varphi_2)}{R_5} + \frac{(\varphi_2 - \varphi_1 + E_1)}{R_6} = 0$$

$$\frac{(\varphi_1 - \varphi_3)}{R_1} - \frac{(\varphi_3 - \varphi_2)}{R_3} - \frac{(\varphi_3 - \varphi_4 + E_3)}{R_4} = 0$$

$$\text{Find}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{4945}{859} \\ -\frac{2930}{859} \\ -\frac{8555}{859} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5.757 \\ -3.411 \\ -9.959 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 5.757 \\ -3.411 \\ -9.959 \end{pmatrix}$$

$$I_1 := \frac{(\varphi_1 - \varphi_3)}{R_1} = 1.572$$

$$I_2 := \frac{(\varphi_4 - \varphi_1 + E_2)}{R_2} = 1.155$$

# Метод наложения

Каждый источник напряжения вызывает в схеме протекание определенных токов.

Когда источников напряжения несколько, грубо говоря, создаваемые ими токи "накладываются" друг на друга.

Чтобы рассчитать результирующий ток методом наложения, нужно определить токи в электрической цепи отдельно для каждого источника, а затем просуммировать их, учитывая знак