

1 Выбор схемы и числовых данных

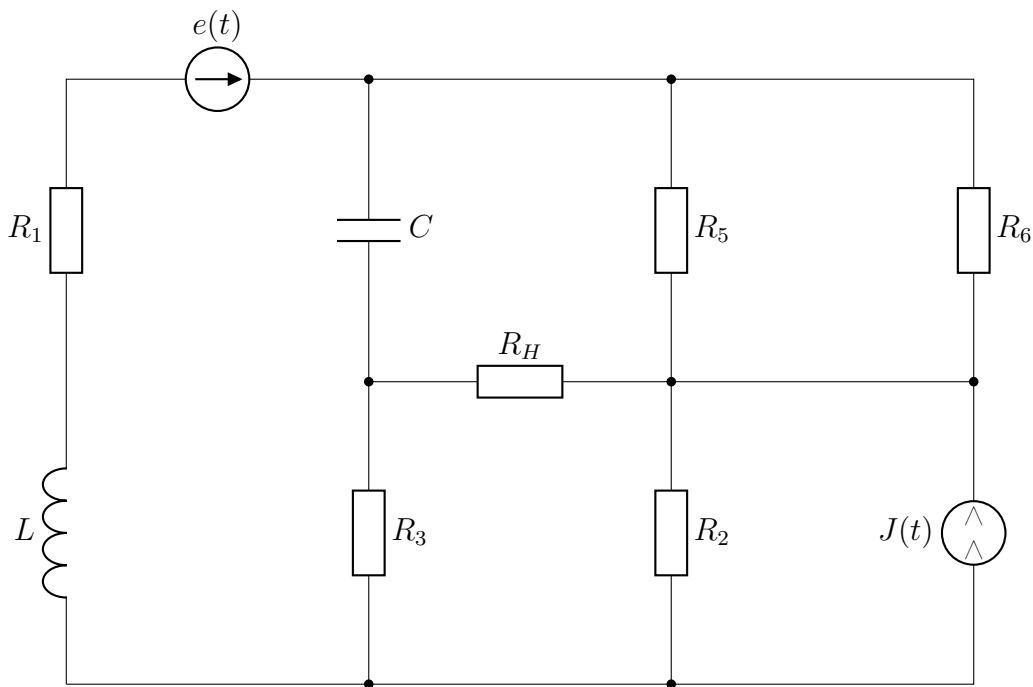


Рис. 1: Электрическая цепь

Параметры:

$$N = 7$$

$$n = 16$$

$$\omega = 1300 \text{ rad/c}$$

$$k = 3$$

$$e(t) = E_0 + E_m \sin 3\omega t$$

$$E_0 = 2 + 0.5 \cdot N + 0.3 \cdot n = 2 + 0.5 \cdot 7 + 0.3 \cdot 16 = 10.3 \text{ B}$$

$$E_m = E_0 \sqrt{2} = 10.3 \cdot \sqrt{2} = 14.57 \text{ B}$$

$$e(t) = 10.3 + 14.57 \cdot \sin(3 \cdot 1300t) = 10.3 + 14.57 \cdot \sin 3900t \text{ B}$$

$$J(t) = J_0 + J_m \sin \omega t$$

$$J_0 = 7 + 3 \cdot N + 7 \cdot n = 7 + 3 \cdot 7 + 7 \cdot 16 = 140 \text{ mA}$$

$$J_m = J_0 \sqrt{2} = 140 \cdot \sqrt{2} = 197.99 \text{ mA}$$

$$J(t) = 140 + 197.99 \cdot \sin 1300t \text{ mA}$$

$$R_1 = 50 + 7 \cdot N + 5 \cdot n = 50 + 7 \cdot 7 + 5 \cdot 16 = 179 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 75 + 9 \cdot N + 7 \cdot n = 75 + 9 \cdot 7 + 7 \cdot 16 = 250 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 100 + 7 \cdot N + 5 \cdot n = 100 + 7 \cdot 7 + 5 \cdot 16 = 229 \text{ Ом}$$

$$R_4 = 75 + 7 \cdot N + 5 \cdot n = 75 + 7 \cdot 7 + 5 \cdot 16 = 204 \text{ Ом}$$

$$R_5 = R_6 = 100 + 9 \cdot N + 7 \cdot n = 100 + 9 \cdot 7 + 7 \cdot 7 = 212 \text{ Ом}$$

$$R_H = 60 + 9 \cdot N + 7 \cdot n = 60 + 9 \cdot 7 + 7 \cdot 16 = 235 \text{ Ом}$$

$$L = 50 + 0.8 \cdot N + 0.3 \cdot n = 50 + 0.8 \cdot 7 + 0.3 \cdot 16 = 60.4 \text{ мГн}$$

$$C = 3 + 0.3 \cdot N + 0.2 \cdot n = 3 + 0.3 \cdot 7 + 0.2 \cdot 16 = 8.3 \text{ мкФ}$$

2 Расчет установившихся режимов линейной электрической цепи при постоянных воздействиях

При постоянном токе конденсатор создает разрыв, катушка индуктивности закорочена, источник тока и источник напряжения имеют только компоненты J_0, E_0 соответственно, поэтому возможно перерисовать цепь следующим образом:

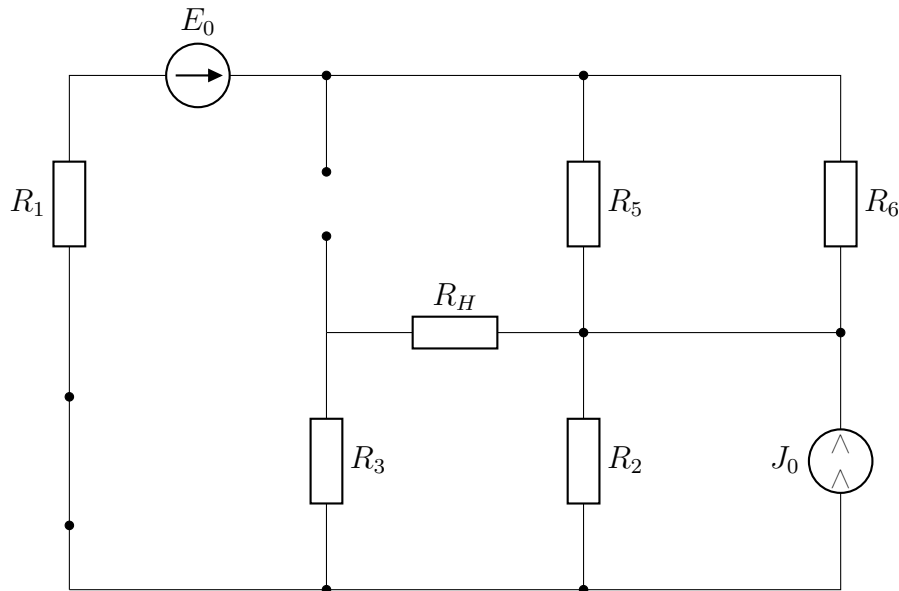


Рис. 2: Электрическая цепь

2.1 Нахождение потенциалов и токов методом узловых потенциалов

Расставим потенциалы, случайным образом укажем направления токов в ветвях:

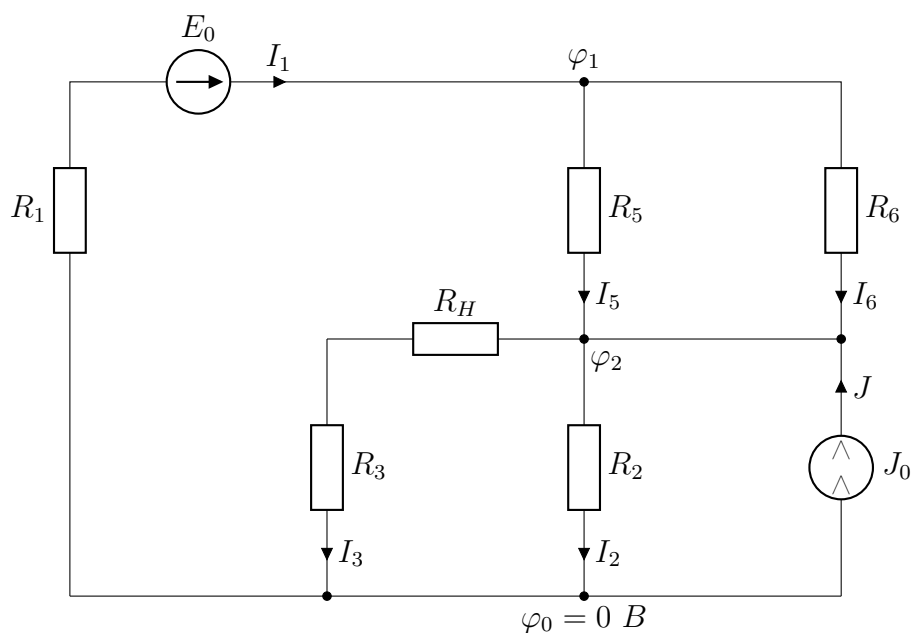


Рис. 3: Электрическая цепь

Определим потенциалы узлов и узловые токи в ветвях с помощью метода узловых потенциалов, при условии, что $\varphi_0 = 0$ В:

Рассчитаем проводимости каждой ветви:

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{1}{R_1} = \frac{1}{179} = 5.59 \text{ мСм} \\ G_2 &= \frac{1}{R_2} = \frac{1}{250} = 4 \text{ мСм} \\ G_3 &= \frac{1}{R_3+R_H} = \frac{1}{229+235} = 2.16 \text{ мСм} \\ G_5 &= \frac{1}{R_5} = \frac{1}{212} = 4.72 \text{ мСм} \\ G_6 &= \frac{1}{R_6} = \frac{1}{212} = 4.72 \text{ мСм} \\ G_J &= 0 \text{ См} \end{aligned}$$

Рассчитаем собственные и взаимные проводимости:

$$\begin{aligned} G_{11} &= G_1 + G_5 + G_6 = 5.59 + 4.72 + 4.72 = 15.03 \text{ мСм} \\ G_{22} &= G_2 + G_3 + G_5 + G_6 = 4 + 2.16 + 4.72 + 4.72 = 15.6 \text{ мСм} \\ G_{12} &= G_{21} = G_5 + G_6 = 4.72 + 4.72 = 9.44 \text{ мСм} \end{aligned}$$

Узловые токи:

$$\begin{aligned} J_1^y &= \frac{E_0}{R_1} = \frac{10.3}{179} = 57.5 \text{ мА} \\ J_2^y &= J = J_0 = 140 \text{ мА} \end{aligned}$$

Запишем уравнения:

$$\begin{cases} \varphi_1 G_{11} - \varphi_2 G_{12} = J_1^y \\ -\varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} = J_2^y \end{cases}$$

Подставим значения:

$$\begin{cases} 15.03\varphi_1 - 9.44\varphi_2 = 57.5 \\ -9.44\varphi_1 + 15.6\varphi_2 = 140 \end{cases}$$

Составим Матричное уравнение:

$$\begin{pmatrix} 15.03 & -9.44 \\ -9.44 & 15.6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 57.5 \\ 140 \end{pmatrix}$$

Решив матрицу, получаем ответ:

$$\begin{cases} \varphi_1 = 15.26 \text{ В} \\ \varphi_2 = 18.21 \text{ В} \end{cases}$$

Рассчитаем узловые токи:

$$\begin{cases} I_1 = (\varphi_0 - \varphi_1 + E_0) \cdot G_1 = (0 - 15.26 + 10.3) \cdot 5.59 = -27.73 \text{ мА} \\ I_2 = (\varphi_2 - \varphi_0) \cdot G_2 = (18.21 - 0) \cdot 4 = 72.84 \text{ мА} \\ I_3 = (\varphi_2 - \varphi_0) \cdot G_3 = (18.21 - 0) \cdot 2.16 = 39.33 \text{ мА} \\ I_5 = (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot G_5 = (15.26 - 18.21) \cdot 4.72 = -13.92 \text{ мА} \\ I_6 = (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot G_6 = (15.26 - 18.21) \cdot 4.72 = -13.92 \text{ мА} \end{cases}$$

Знак минус перед токами I_1 , I_5 и I_6 обозначает, что истинное направление токов противоположно.

2.2 Расчет параметров двухполюсника ($U_p, R_{BX}, I_{кз}$) относительно сопротивления R_H

Перерисуем схему относительно R_H для нахождения эквивалентного сопротивления и напряжения:

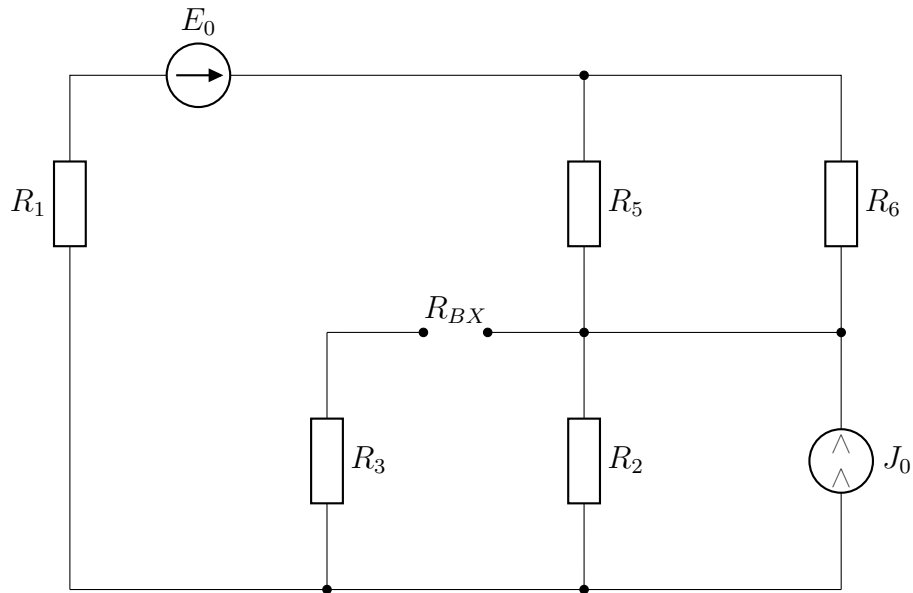


Рис. 4: Электрическая цепь

Закоротим источник напряжения и разорвем цепь на месте источника тока:

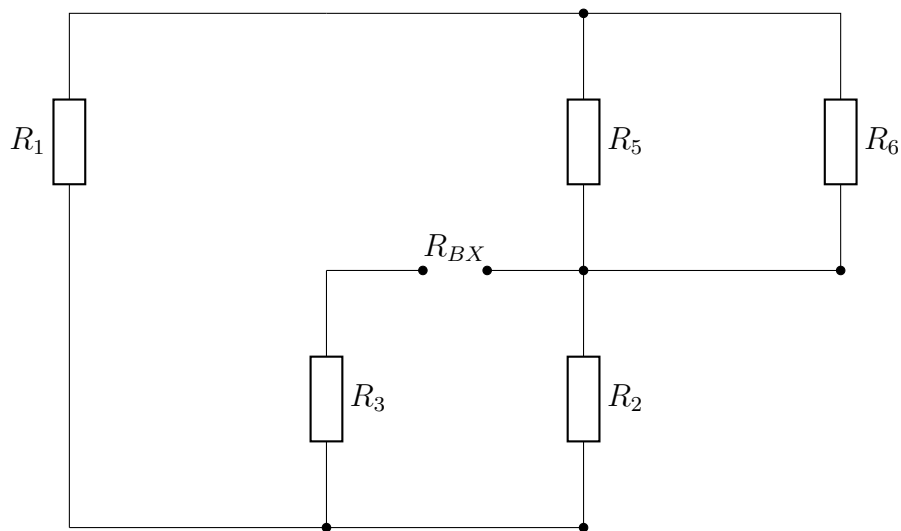


Рис. 5: Электрическая цепь

Перерисуем схему для более удобного вычисления R_{BX} :

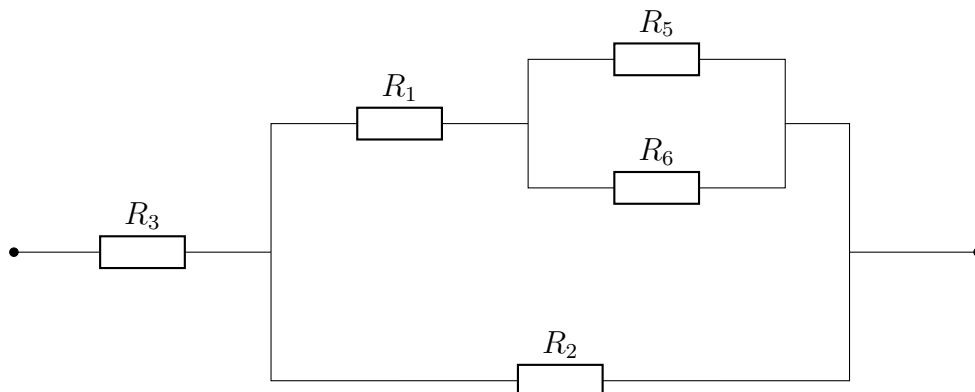


Рис. 6: Общее сопротивление

Рассчитаем общее сопротивление R_{BX} :

$$R_{BX} = R_3 + R_{1256} = 229 + 133.18 = 362.18 \text{ Ом}$$

$$R_{1256} = \frac{R_{156} \cdot R_2}{R_2 + R_{156}} = \frac{285 \cdot 250}{285 + 250} = 133.18 \text{ Ом}$$

$$R_{156} = R_1 + R_{56} = 179 + 106 = 285 \text{ Ом}$$

$$R_{56} = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6} = \frac{212 \cdot 212}{212 + 212} = 106 \text{ Ом}$$

Определим U_p с помощью метода суперпозиции:

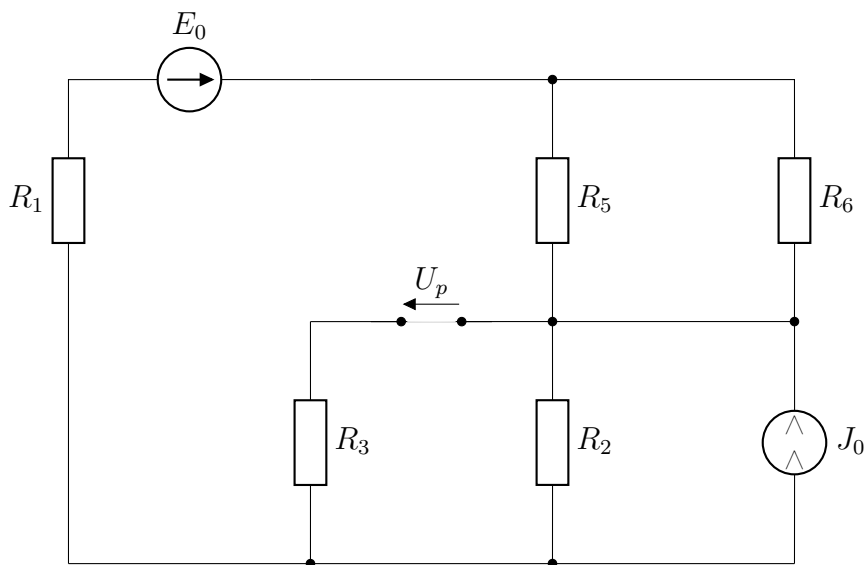


Рис. 7: Электрическая цепь

Для расчета эквивалентного напряжения U_p методом суперпозиции, отметим в цепи частичные токи и заменим сначала источник тока J_0 на разрыв цепи.

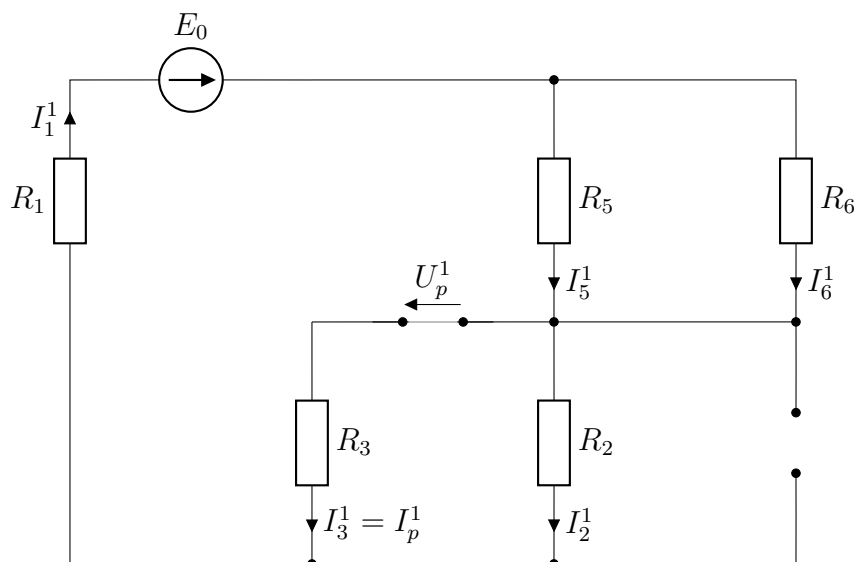


Рис. 8: Электрическая цепь

Вместе с U_p последовательно подключен R_3 , так как в этом месте разрыв цепи, то в расчетах частичных токов оно учитываться не будет.

Свернем R_5 и R_6 в один резистор R_{56} , чтобы получить схему из одной ветви и рассчитать силу тока через закон Ома, причем $I_1^1 = I_2^1 = I_{56}^1 = I^1$.

$$R_{56} = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6} = \frac{212 \cdot 212}{212 + 212} = 106 \text{ Ом}$$

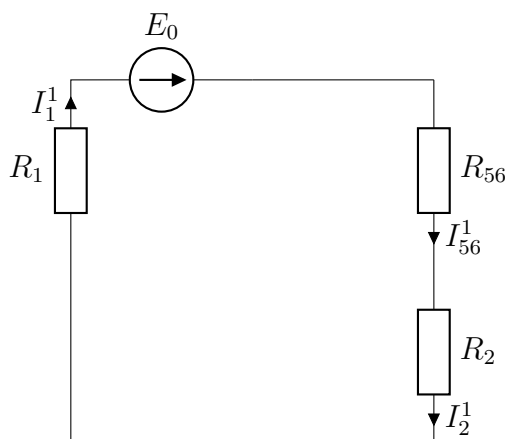


Рис. 9: Электрическая цепь

$$I' = \frac{E_0}{R_1 + R_2 + R_{56}} = \frac{10.3}{179 + 250 + 106} = 19.25 \text{ мА}$$

Изменим схему, подключив источник тока и закоротив источник напряжения:

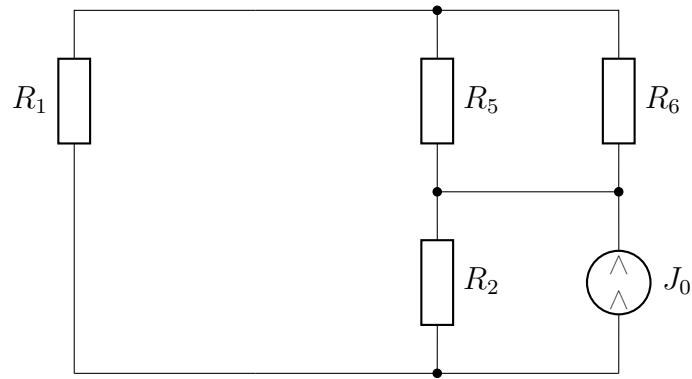


Рис. 10: Электрическая цепь

Сделаем замену источника тока J_0 и резистора R_2 на эквивалентный источник напряжения E_2 и резистор R_2 .

$$E_2 = J_0 \cdot R_2 = 0.140 \cdot 250 = 35B$$

Преобразовав R_5 и R_6 в один резистор R_{56} , снова получим цепь, состоящую из одной ветви. Направим ток против часовой стрелки, сонаправленно с источником тока, и получим следующую схему:

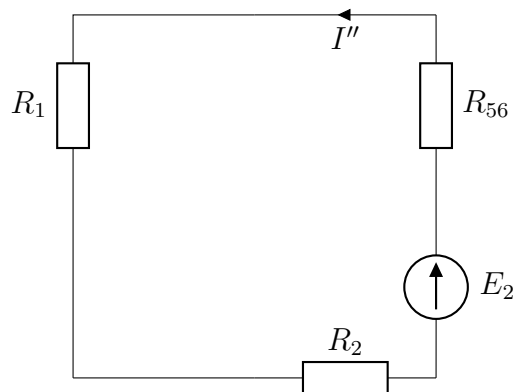


Рис. 11: Электрическая цепь

По закону Ома:

$$I'' = \frac{E_2}{R_1 + R_2 + R_{56}} = \frac{35}{179 + 250 + 106} = 65.42 \text{ мА}$$

Так как токи текут в разные стороны, то вычитая из большего меньший, получаем общий ток, направленный против источника напряжения и сонаправленный с источником тока:

$$I = I'' - I' = 65.42 - 19.25 = 46.17 \text{ мА}$$

Возвращаясь к исходной схеме, расставим потенциалы и посчитаем напряжение между ними:

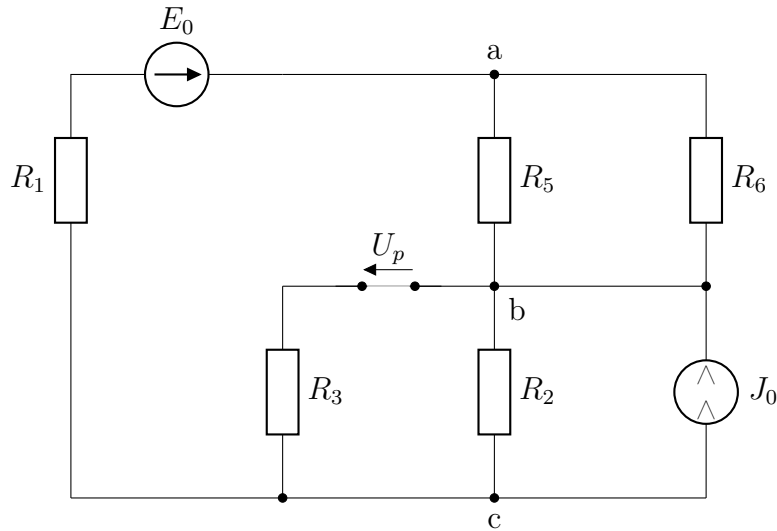


Рис. 12: Электрическая цепь

Рассмотрим часть цепи между потенциалами φ_b и φ_c : $U_p = U_2 = I_2 \cdot R_2$

По первому закону Кирхгофа $I_2 = J_0 - I_1$, где $I_1 = I = 46.17$ мА из метода суперпозиции, тогда:

$$I_2 = J_0 - I_1 = 140 - 46.17 = 93.83 \text{ мА}$$

$$U_p = U_2 = I_2 \cdot R_2 = 93.83 \cdot 10^{-3} \cdot 250 = 23.46 \text{ В}$$

В итоге, можно перерисовать схему с использованием эквивалентного источника напряжения и эквивалентного сопротивления:

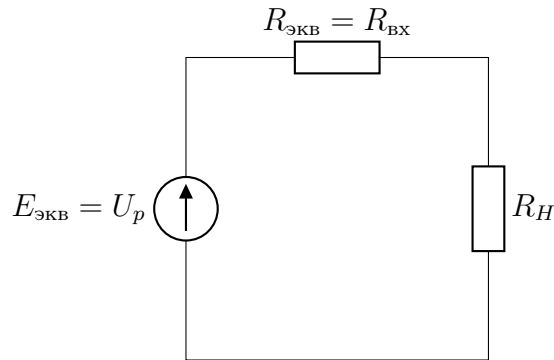


Рис. 13: Схема эквивалентного генератора

Рассчитаем $I_{кз}$ и I_p по определению:

$$I_{кз} = \frac{U_p}{R_{вх}} = \frac{23.45}{362.2} = 64.74 \text{ мА}$$

$$I_H = \frac{U_p}{R_{вх} + R_H} = \frac{23.45}{362.2 + 235} = 39.27 \text{ мА}$$

Ответ:

$$U_p = 23.45 \text{ В}, R_{вх} = 362.2 \text{ Ом}, I_{кз} = 64.74 \text{ мА}$$

Сравнивая значения I_H , полученные методом узловых потенциалов и методом эквивалентного генератора, разница их значений совпадает на $\frac{I_H}{I_{H\varphi}} = \frac{39.27}{39.33} = 0.998$ или 99.8%, то есть погрешность в вычислениях составила менее 0.2%.

2.3 Составление уравнения баланса мощности

Составим уравнение баланса активных мощностей.

Общая формула:

$$\sum P_{\text{ист}} = \sum P_{\text{пр}}$$

$$P_{\text{пр}} = I^2 R;$$

$$P_{\text{ист}} = UI$$

$$\sum I \cdot E = \sum I^2 \cdot R$$

$$E_0 \cdot I_1 + (\varphi_2 - \varphi_0) \cdot J = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 (R_3 + R_H) + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6$$

$$-10.3 \cdot 27.73 \cdot 10^{-3} + 18.21 \cdot 140 \cdot 10^{-3} = (27.73 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 179 + (72.84 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 250 + (39.33 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (229 + 235) + (13.92 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 212 + (13.92 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 212$$

$$2.263 \text{ Вт} = 2.264 \text{ Вт}$$

Рассчитаем погрешность вычислений:

$$\delta = \frac{|P_{\text{ист}} - P_{\text{пр}}|}{P_{\text{ист}}} \cdot 100\% = \frac{|2.263 - 2.264|}{2.263} \cdot 100\% = 0.038\% < 1\% \implies \text{вычисления сошлись, значения верны.}$$

Так как все вычисления были проделаны два раза, двумя разными методами, а также проверены уравнением баланса мощности, и в итоге различие значений составило менее 1%, то можно с уверенностью сказать, что ответы верны.

3 Расчет линейных электрических цепей с синусоидальными периодическими источниками основной частоты

Так расчет проводится только с основной частотой ω , то закоротим источник напряжения, так как у него нет данной частоты.

Перерисуем схему:

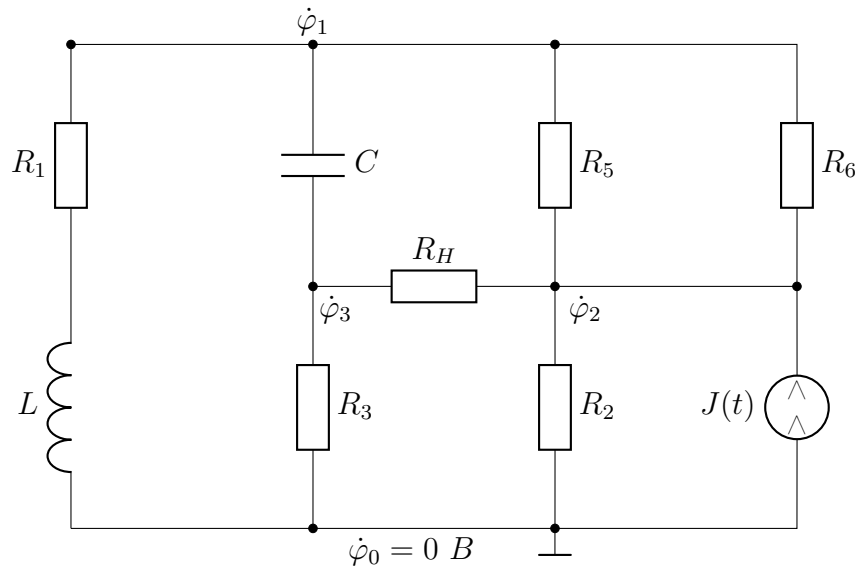


Рис. 14: Электрическая цепь

Рассчитаем ток в нагрузке $i_H^1(t)$ при действии синусоидального источника и основной циклической частоты $\omega = 1300 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ с помощью метода эквивалентного генератора.

Определим реактивные сопротивления:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{1300 \cdot 8.3 \cdot 10^{-6}} = 92.68 \text{ Ом}$$

$$X_L = \omega \cdot L = 1300 \cdot 60.4 \cdot 10^{-3} = 78.52 \text{ Ом}$$

Заменим конденсатор и катушку на резисторы с соответственными сопротивлениями

$$Z_C = -jX_C = -j92.68 \text{ Ом}$$

$$Z_L = jX_L = j78.52 \text{ Ом}$$

Переобозначим активные сопротивления:

$$Z_1 = R_1 = 179 \text{ Ом}$$

$$Z_2 = R_2 = 250 \text{ Ом}$$

$$Z_3 = R_3 = 229 \text{ Ом}$$

$$Z_5 = Z_5 = R_5 = R_6 = 212 \text{ Ом}$$

$$Z_H = R_H = 235 \text{ Ом}$$

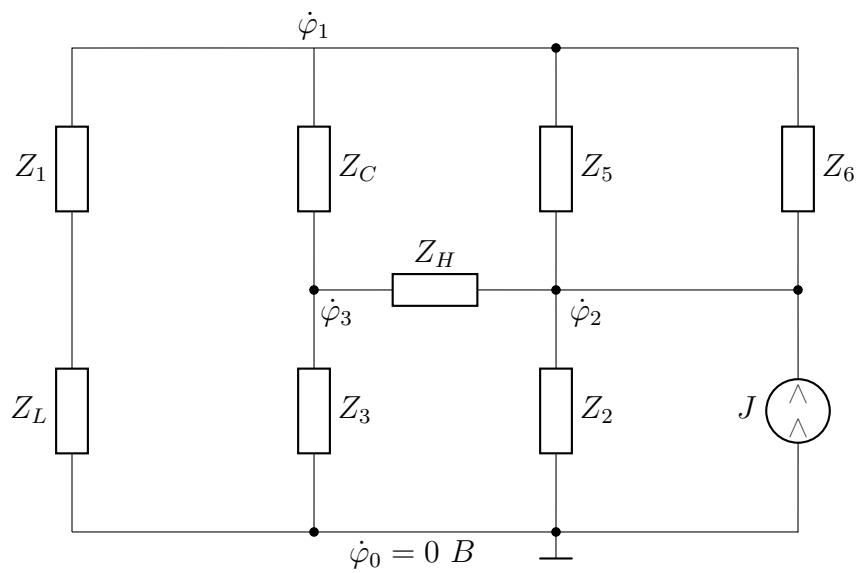


Рис. 15: Электрическая цепь

Разорвем цепь на месте R_H :

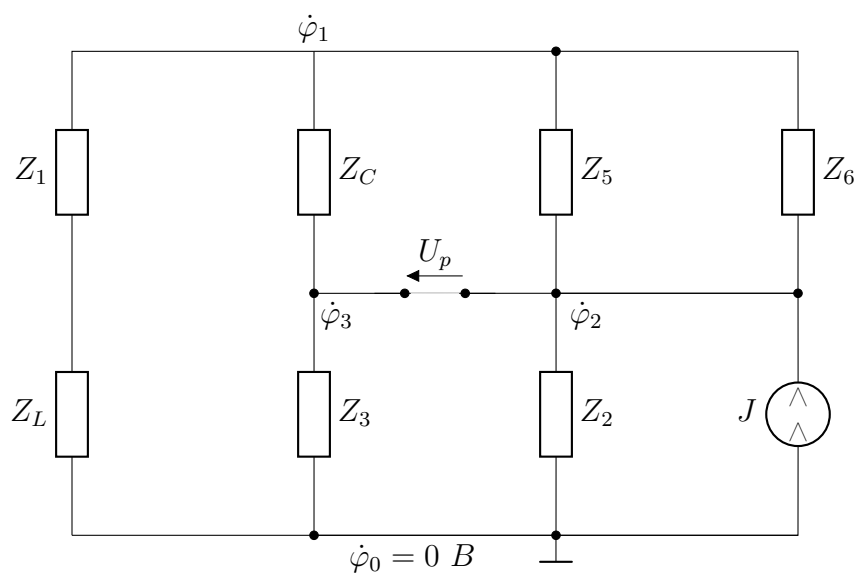


Рис. 16: Электрическая цепь

Уберем источник тока для расчета $Z_{\text{эКВ}}$:

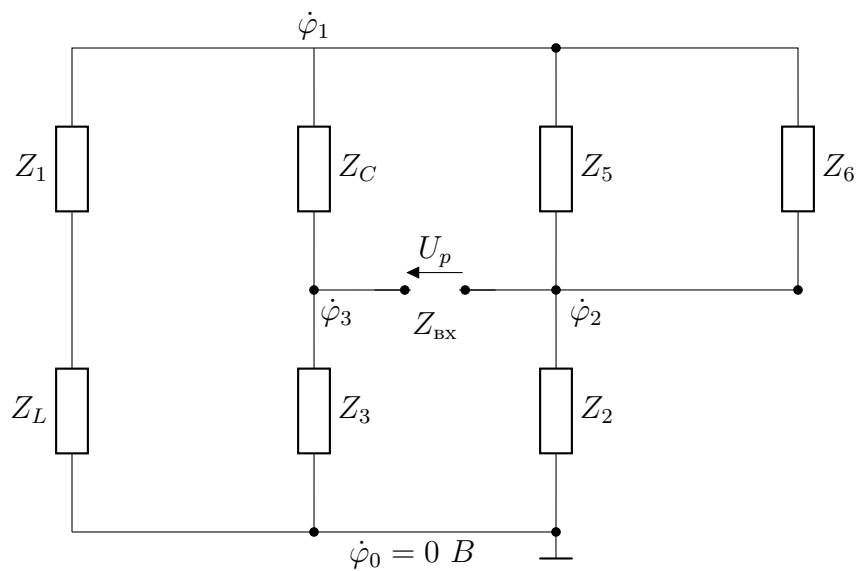


Рис. 17: Электрическая цепь

Перерисуем схему, чтобы можно было удобней найти $Z_{\text{вх}}$:

$$Z_{1L} = Z_1 + Z_L = R_1 + jX_L = 179 + 78.52j \text{ Ом}$$

$$Z_{56} = \frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6} = \frac{212 \cdot 212}{212 + 212} = 106 \text{ Ом}$$

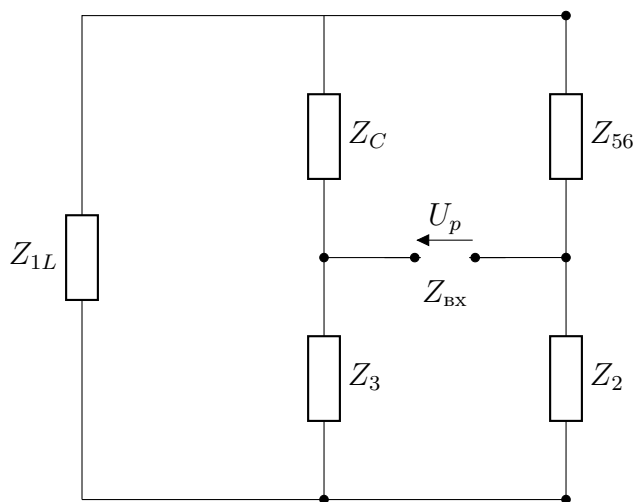


Рис. 18: Электрическая цепь

Преобразуем схему:

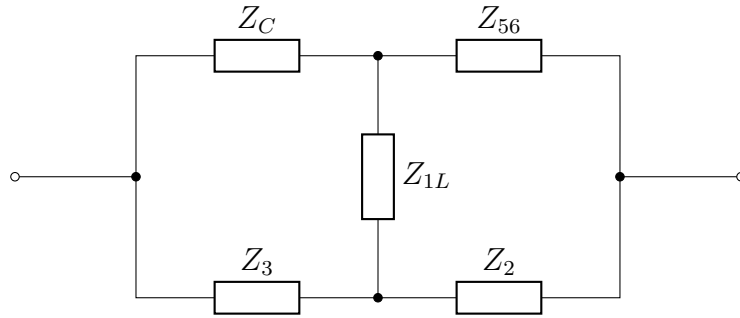


Рис. 19: Электрическая цепь

Сопротивление Z_{1L} , Z_2 , Z_3 подключены звездой, это подключение можно преобразовать в треугольник с сопротивлениями Z_{12L} , Z_{13L} , Z_{23} , где

$$Z_{12L} = Z_{1L} + Z_2 + \frac{Z_{1L} \cdot Z_2}{Z_3} = 179 + 78.52j + 250 + \frac{(179+78.52j) \cdot 250}{229} = 624.41 + 164.24j \text{ Ом}$$

$$Z_{13L} = Z_{1L} + Z_3 + \frac{Z_{1L} \cdot Z_3}{Z_2} = 179 + 78.52j + 229 + \frac{(179+78.52j) \cdot 229}{250} = 571.96 + 150.44j \text{ Ом}$$

$$Z_{23} = Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_{1L}} = 250 + 229 + \frac{250 \cdot 229}{179+78.52j} = 747.221 - 117.657j \text{ Ом}$$

Перерисуем схему с учетом этих сопротивлений:

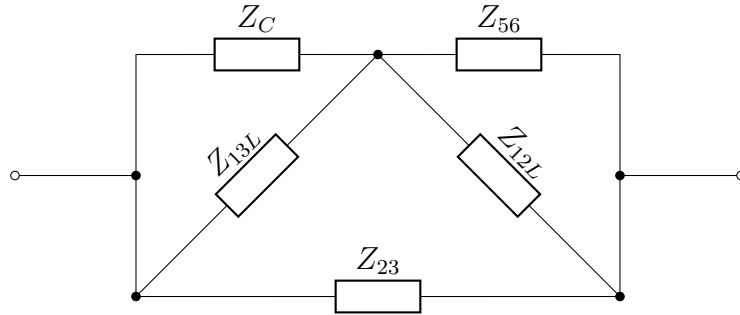


Рис. 20: Электрическая цепь

Перерисуем схему, В итоге получаем следующую цепь:

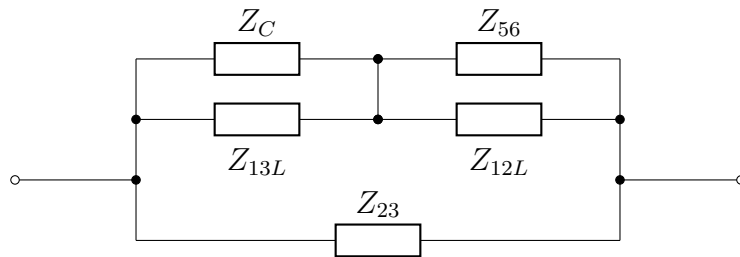


Рис. 21: Электрическая цепь

Резисторы Z_C , Z_{13L} подключены параллельно, их общее сопротивление Z_{13CL} равно:

$$Z_{13CL} = \frac{Z_C \cdot Z_{13L}}{Z_C + Z_{13L}} = \frac{-92.68j \cdot (571.96 + 150.44j)}{-92.68j + (571.96 + 150.44j)} = 14.866 - 94.181j \text{ Ом}$$

Резисторы Z_{56} , Z_{12L} подключены параллельно, их общее сопротивление Z_{1256L} равно:

$$Z_{1256L} = \frac{106 \cdot (624.41 + 164.24j)}{106 + (624.41 + 164.24j)} = 91.357 + 3.293j \text{ Ом}$$

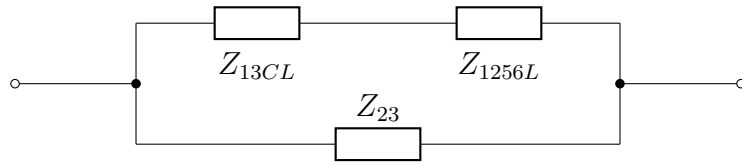


Рис. 22: Электрическая цепь

Между собой резисторы Z_{13CL} и Z_{1256L} подключены последовательно с общим сопротивлением $Z_{12356CL} = Z_{13CL} + Z_{1256L} = 14.866 - 94.181j + 91.357 + 3.293j = 106.223 - 90.888j$ Ом

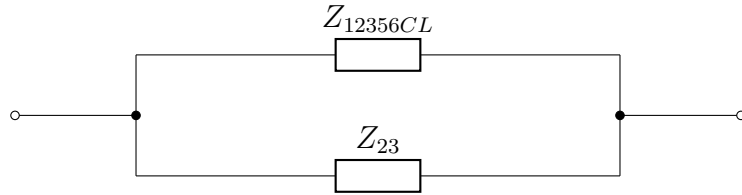


Рис. 23: Электрическая цепь

Сопротивление Z_{23} подключено к резистору $Z_{12356CL}$ параллельно и общее сопротивление $Z_{общ} = Z_{вх}$ всей цепи равняется:

$$Z_{вх} = \frac{Z_{23} \cdot Z_{12356CL}}{Z_{23} + Z_{12356CL}} = \frac{(106.223 - 90.888j) \cdot (747.221 - 117.657j)}{(106.223 - 90.888j) + (747.221 - 117.657j)} = 97.66 - 70.355j \text{ Ом}$$

Вернемся обратно к искомой цепи:

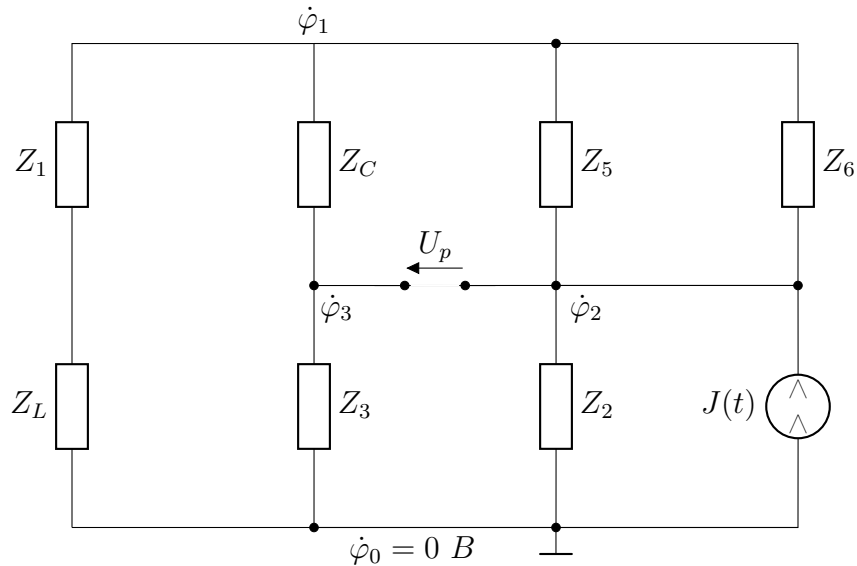


Рис. 24: Электрическая цепь

Преобразуем сопротивление Z_5 и Z_6 в одно сопротивление (параллельное подключение):

$$Z_{56} = \frac{Z_5 \cdot Z_6}{Z_5 + Z_6} = \frac{212 \cdot 212}{212 + 212} = 106 \text{ Ом}$$

Преобразуем сопротивления Z_1 и Z_L в одно сопротивление:

$$Z_{1L} = Z_1 + Z_L = 179 + 78.52j \text{ Ом}$$

Найдем действующее комплексное значение источника тока $J(t)$:

$$J(t) = J_m \sin(\omega t + \alpha_i), \alpha_i = 0 \implies J(t) = J_m \sin(\omega t)$$

$$\dot{J} = J_m / \sqrt{2} = 197.99 / \sqrt{2} = 140 \angle 0^\circ \text{ мА}$$

Сделаем эквивалентную замену источника тока J и сопротивления Z_2 (проводимость $Y_2 = 1/Z_2 = 1/250 = 4 \text{ мСм}$) на источник напряжения e :

$$e = \frac{J}{Y_2} = \frac{140}{4} = 35$$

Рассчитаем проводимости для каждой ветви:

$$Y_{1L} = \frac{1}{Z_{1L}} = \frac{1}{179 + 78.52j} = 4.69 - 2.06j \text{ мСм}$$

$$Y_C = \frac{1}{Z_C} = \frac{1}{-92.68j} = 10.79j \text{ мСм}$$

$$Y_{3C} = \frac{1}{Z_C + Z_3} = \frac{1}{229 - 92.68j} = 3.75 + 1.52j \text{ мСм}$$

$$Y_2 = \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{250} = 4 \text{ мСм}$$

$$Y_{56} = \frac{1}{Z_{56}} = \frac{1}{106} = 9.43 \text{ мСм}$$

$$Y_{256} = \frac{1}{Z_{56} + Z_2} = \frac{1}{106 + 250} = 2.8 \text{ мСм}$$

Перерисуем итоговую схему, обозначим направления токов и потенциалы:

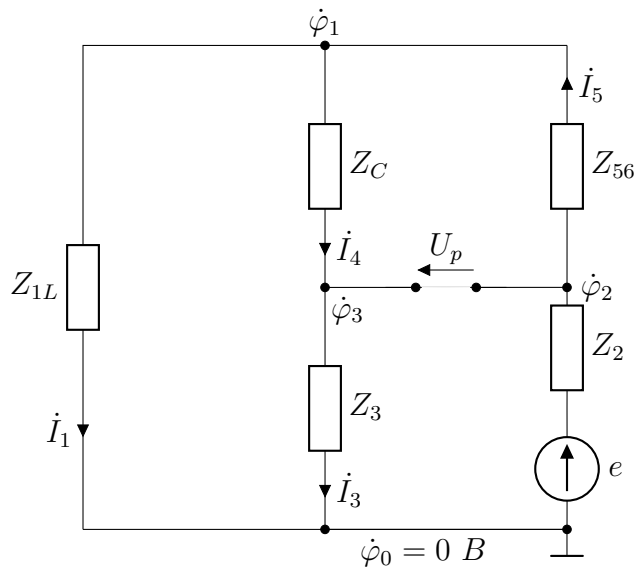


Рис. 25: Электрическая цепь

Получили схему с двумя узлами, рассчитаем потенциал $\dot{\varphi}_1$ по формуле двух узлов:

$$\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_0 = \frac{\sum E \cdot Y_k}{\sum Y_n}$$

$$\dot{\varphi}_1 - 0 = \frac{e \cdot Y_{256}}{Y_{256} + Y_{3C} + Y_{1L}} = \frac{35 \cdot 1/(106+250)}{1/(106+250) + 1/(-92.68j) + 1/(179+78.52j)} = 8.72 + 0.416j \text{ В}$$

Вернемся к исходной схеме:

Рассчитаем ток $\dot{I}_3 = \dot{I}_4$ для расчета $\dot{\varphi}_3$ по закону Ома:

$$\dot{I}_3 = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_0) \cdot Y_{3C} = (8.7 + 0.41j) \cdot (3.75 + 1.52j) = 32 + 14.76j \text{ мА}$$

$$\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3 = \dot{I}_3 \cdot Z_C \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \dot{\varphi}_3 = \dot{\varphi}_1 - \dot{I}_3 \cdot Z_C = (8.7 + 0.41j) - (32 + 14.76j) \cdot 10^{-3} \cdot 229 =$$

Запишем для этой схемы первое правило Кирхгофа для узлов $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_0 = 0 \text{ В}$ и закон Ома для каждого тока:

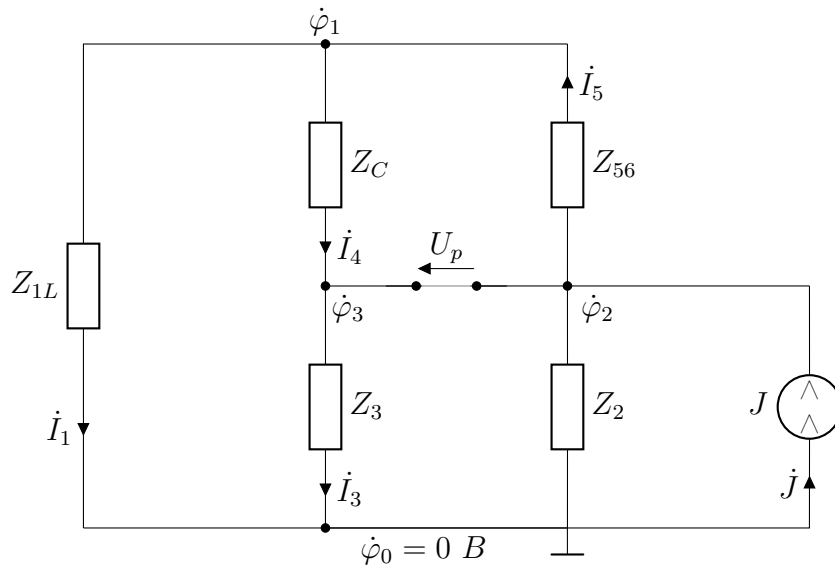


Рис. 26: Электрическая цепь

$$\begin{cases} \dot{I}_1 + \dot{I}_4 - \dot{I}_5 = 0 \\ J - \dot{I}_2 - \dot{I}_5 = 0 \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 - J = 0 \\ \dot{I}_1 = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_0) \cdot Y_{1L} \\ \dot{I}_2 = (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_0) \cdot Y_2 \\ \dot{I}_3 = \dot{I}_4 = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_0) \cdot Y_{3C} \\ \dot{I}_4 = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3) \cdot Y_C \\ \dot{I}_5 = (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) \cdot Y_{56} \end{cases}$$

Подставим значение проводимости и силы тока источника в систему уравнение:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 + \dot{I}_4 - \dot{I}_5 = 0 \\ 140 - \dot{I}_2 - \dot{I}_5 = 0 \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 - 140 = 0 \\ \dot{I}_1 = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_0) \cdot (4.69 - 2.06j) \\ \dot{I}_2 = (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_0) \cdot (4) \\ \dot{I}_3 = \dot{I}_4 = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_0) \cdot (3.75 + 1.52j) \\ \dot{I}_4 = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3) \cdot (10.79j) \\ \dot{I}_5 = (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) \cdot (9.43) \end{cases}$$

Введем данные в WolframAlpha и получим решение:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = 41.7541 - 15.998j \text{ mA} \\ \dot{I}_2 = 66.1861 + 1.17558j \text{ mA} \\ \dot{I}_3 = 32.0598 + 14.8224j \text{ mA} \\ \dot{I}_4 = 32.0598 + 14.8224j \text{ mA} \\ \dot{I}_5 = 73.8139 - 1.17558j \text{ mA} \\ \dot{\varphi}_1 = 8.71895 + 0.41856j \text{ B} \\ \dot{\varphi}_2 = 16.5465 + 0.293896j \text{ B} \\ \dot{\varphi}_3 = 7.34523 + 3.38982j \text{ B} \\ \dot{\varphi}_0 = 0 + 0j \text{ B} \end{cases}$$

Найдем U_p :

$$\dot{U}_p = \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3 = (16.5465 + 0.293896j) - (7.34523 + 3.38982j) = 9.2 - 3.1j \text{ B}$$

Найдем I_p :

$$\dot{I}_p = \dot{I}_H = \frac{U_p}{Z_H + Z_{BX}} = \frac{9.2 - 3.1j}{(97.668 - 70.354j) + 235} = 28.36 - 3.32j \text{ mA}$$

$I_H = 28.36 - 3.32j \text{ mA}$

3.1 Расчет узлов с помощью OrCad

С помощью OrCad рассчитаем потенциалы узлов φ_1 , φ_2 и φ_3 :

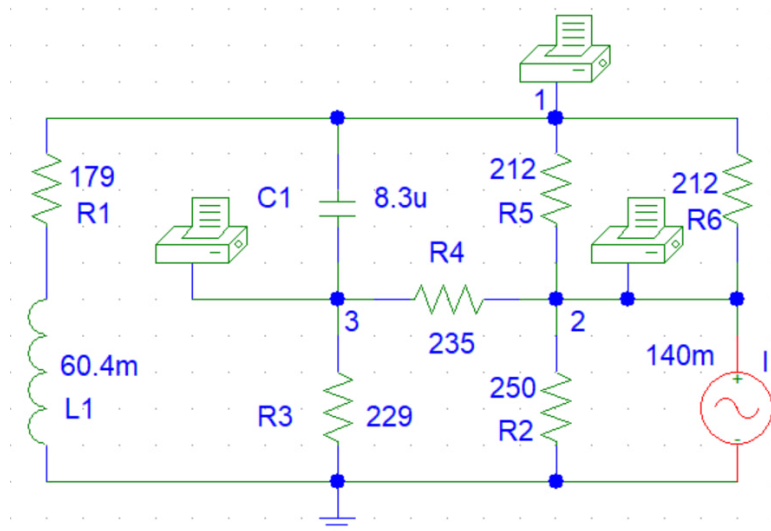


Рис. 27: Электрическая цепь, OrCad

Запустим симуляцию цепи, заранее выбрав в AC Sweep частоту $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1300}{2\pi} = 207$ Гц, для расчета потенциалов в узлах.

Получим отчет в текстовом формате:

```
FREQ      VM(3)      VP(3)      VR(3)      VI(3)
2.070E+02  8.321E+00  1.333E+01  8.097E+00  1.918E+00
***** 11/01/23 20:29:30 ***** PSpice 9.2 (Mar 2000) ***** ID# 1 *****
* C:\Users\zelle\Documents\last_kursach.sch

****      AC ANALYSIS              TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****

FREQ      VM(2)      VP(2)      VR(2)      VI(2)
2.070E+02  1.480E+01  4.410E+00  1.476E+01  1.138E+00
***** 11/01/23 20:29:30 ***** PSpice 9.2 (Mar 2000) ***** ID# 1 *****
* C:\Users\zelle\Documents\last_kursach.sch

****      AC ANALYSIS              TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****

FREQ      VM(1)      VP(1)      VR(1)      VI(1)
2.070E+02  9.267E+00  7.869E+00  9.180E+00  1.269E+00
```

Рис. 28: Расчет потенциалов в OrCad

Расшифруем данные:

$FREQ = f = 2.070e + 02 = 207 \text{ Гц}$ - частота

$VM(1) = V_{\varphi_1} = 9.267 \text{ В}$ – амплитуда потенциала первого узла

$VP(1) = \alpha_1 = 7.869^\circ$ – фаза потенциала первого узла

$VR(1) = Re[\varphi_1] = 9.18 \text{ В}$ – действительная часть потенциала первого узла

$VI(1) = Im[\varphi_1] = 1.269 \text{ В}$ – мнимая часть потенциала первого узла

$$\dot{\varphi}_1 = 9.267e^{j7.869^\circ} = 9.18 + 1.269j \text{ В}$$

$VM(2) = V_{\varphi_2} = 14.8 \text{ В}$ – амплитуда потенциала второго узла

$VP(2) = \alpha_2 = 4.41^\circ$ – фаза потенциала второго узла

$VR(2) = Re[\varphi_2] = 14.76 \text{ В}$ – действительная часть потенциала второго узла

$VI(2) = Im[\varphi_2] = 1.138 \text{ В}$ – мнимая часть потенциала второго узла

$$\dot{\varphi}_2 = 14.8e^{j4.41^\circ} = 14.76 + 1.138j \text{ В}$$

$VM(3) = V_{\varphi_3} = 8.32 \text{ В}$ – амплитуда потенциала третьего узла

$VP(3) = \alpha_3 = 13.33^\circ$ – фаза потенциала третьего узла

$VR(3) = Re[\varphi_3] = 8.097 \text{ В}$ – действительная часть потенциала третьего узла

$VI(3) = Im[\varphi_3] = 1.918 \text{ В}$ – мнимая часть потенциала третьего узла

$$\dot{\varphi}_3 = 8.32e^{j13.33^\circ} = 8.097 + 1.918j \text{ В}$$

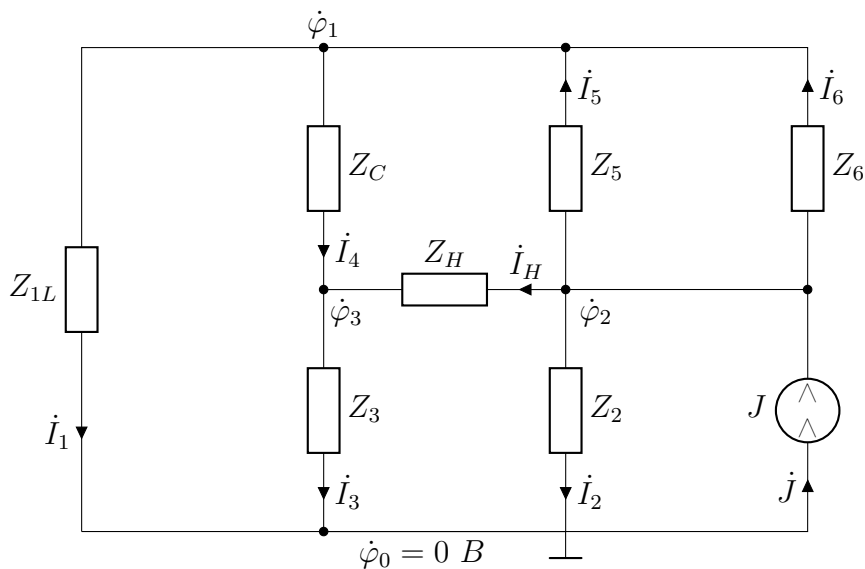


Рис. 29: Электрическая цепь

Рассчитаем токи в цепи с помощью полученных потенциалов.

Составим уравнения с помощью закона Ома:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_0) \cdot Y_{1L} \\ \dot{I}_2 = (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_0) \cdot Y_2 \\ \dot{I}_3 = (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_0) \cdot Y_3 \\ \dot{I}_4 = (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) \cdot Y_C \\ \dot{I}_5 = \dot{I}_6 = (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) \cdot Y_5 \\ \dot{I}_H = (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) \cdot Y_H \end{cases}$$

Рассчитаем проводимости для каждой ветви:

$$Y_{1L} = \frac{1}{Z_{1L}} = \frac{1}{179 + 78.52j} = 4.69 - 2.06j \text{ мСм}$$

$$Y_C = \frac{1}{Z_C} = \frac{1}{-92.68j} = 10.79j \text{ мСм}$$

$$Y_2 = \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{250} = 4 \text{ мСм}$$

$$Y_3 = \frac{1}{Z_3} = \frac{1}{229} = 4.37 \text{ мСм}$$

$$Y_5 = Y_6 = \frac{1}{Z_5} = \frac{1}{212} = 4.72 \text{ мСм}$$

$$Y_H = \frac{1}{Z_H} = \frac{1}{235} = 4.26 \text{ мСм}$$

Подставим алгебраические комплексные значения потенциалов и проводимости:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = (9.18 + 1.269j - 0) \cdot (4.69 - 2.06j) = 45.66834 - 12.95919j = 47.47e^{-j15.84^\circ} \text{ мА} \\ \dot{I}_2 = (14.76 + 1.138j - 0) \cdot 4 = 59.04 + 4.552j = 59.215e^{j4.41^\circ} \text{ мА} \\ \dot{I}_3 = (8.097 + 1.918j - 0) \cdot 4.37 = 35.38389 + 8.38166j = 36.36e^{j13.33^\circ} \text{ мА} \\ \dot{I}_4 = (9.18 + 1.269j - (8.097 + 1.918j)) \cdot 10.79j = 7.00271 + 11.6855j = 13.623e^{j59.06^\circ} \text{ мА} \\ \dot{I}_5 = \dot{I}_6 = (14.76 + 1.138j - (9.18 + 1.269j)) \cdot 4.72 = 26.3376 - 0.61832j = 26.34e^{-j1.34^\circ} \text{ мА} \\ \dot{I}_H = (14.76 + 1.138j - (8.097 + 1.918j)) \cdot 4.26 = 28.38438 - 3.3228j = 28.578e^{-j6.677^\circ} \text{ мА} \end{cases}$$

Приведем эти данные в таблицу с действительными комплексными значениями и мгновенными, домножив амплитуду на $\sqrt{2}$ и записав в фазу аргумент указанный в степени значения.

Ток	действительный комплекс, мА	мгновенное значение, мА
I_1	$45.67 - 12.96j$	$67.13\sin(1300t - 15.84^\circ)$
I_2	$59.04 + 4.55j$	$83.74\sin(1300t + 4.41^\circ)$
I_3	$35.38 + 8.38j$	$51.42\sin(1300t + 13.33^\circ)$
I_4	$7 + 11.69j$	$19.26\sin(1300t + 59.06^\circ)$
I_5	$26.34 - 0.62j$	$37.25\sin(1300t - 1.34^\circ)$
I_6	$26.34 - 0.62j$	$37.25\sin(1300t - 1.34^\circ)$
I_H	$28.38 - 3.32j$	$40.42\sin(1300t - 6.677^\circ)$

Таблица 1: Действующие комплексные и мгновенные значения тока

3.2 Проверка токов первым законом Кирхгофа

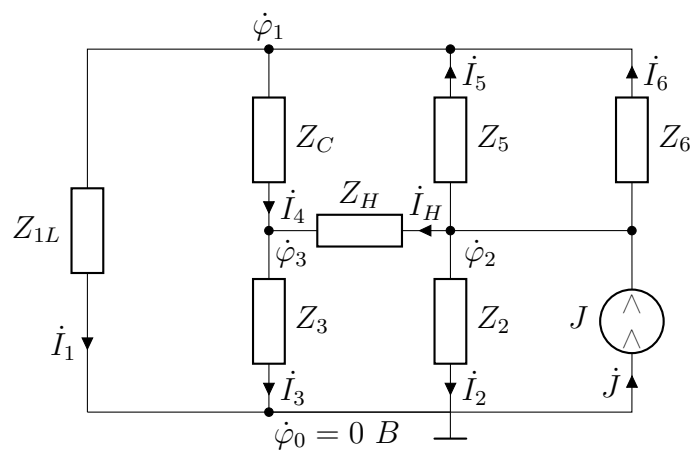


Рис. 30: Электрическая цепь

Для начала запишем уравнения Кирхгофа для нашей цепи:

Для узла $\dot{\varphi}_1$: $I_1 + I_4 = I_5 + I_6$

Для узла $\dot{\varphi}_2$: $J = I_2 + I_5 + I_6 + I_H$

Для узла $\dot{\varphi}_3$: $I_4 + I_H = I_3$

Для узла $\dot{\varphi}_0$: $I_1 + I_2 + I_3 = J$

Подставим значения:

Для узла $\dot{\varphi}_1$:

$$45.67 - 12.96j + 7 + 11.69j = 26.34 - 0.62j + 26.34 - 0.62j$$

$$52.67 - 1.27j = 52.68 - 1.24j$$

$$\delta < 1\%$$

Для узла $\dot{\varphi}_2$:

$$140 = 59.04 + 4.55j + 26.34 - 0.62j + 26.34 - 0.62j + 28.38 - 3.32j$$

$$140 + 0j = 140.1 - 0.01j$$

$$\delta < 1\%$$

Для узла $\dot{\varphi}_3$:

$$7 + 11.69j + 28.38 - 3.32j = 35.38 + 8.38j$$

$$35.38 + 8.37j = 35.38 + 8.38j$$

$$\delta < 1\%$$

Для узла $\dot{\varphi}_0$:

$$45.67 - 12.96j + 59.04 + 4.55j + 35.38 + 8.38j = 140$$

$$140.09 - 0.03j = 140 + 0j$$

$$\delta < 1\%$$

Сравнив данные между собой с помощью первого закона Кирхгофа, можно утверждать, что они верны, так как погрешность измерений во всех случаях составляет менее $< 1\%$.

4 Расчет линейных электрических цепей с синусоидальными переодическими источниками к-ой гармоники

Так как расчет проводится с частотой 3ω , то разорвем источник тока, потому что у него нет данной частоты.

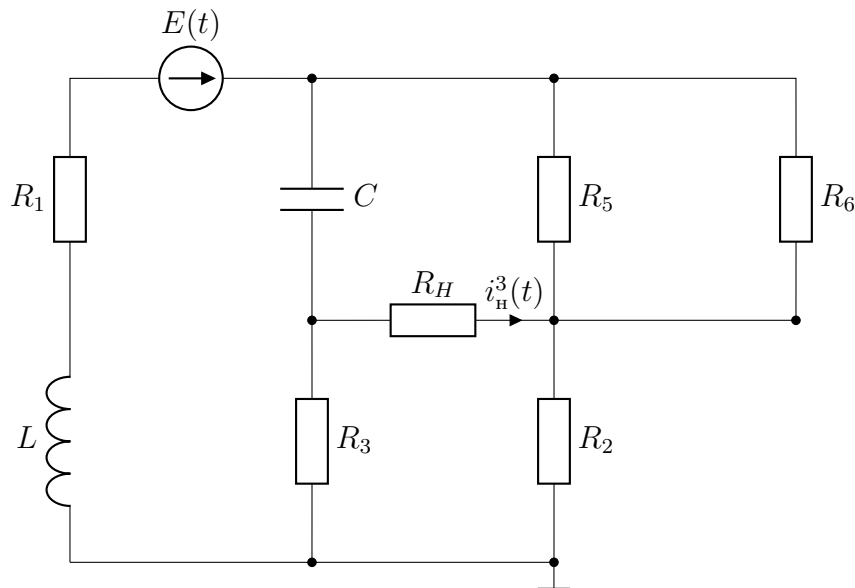


Рис. 31: Электрическая цепь

4.1 Определение тока $i_H^3(t)$ в нагрузке

Рассчитаем ток в нагрузке $i_H^3(t)$ при действии синусоидального источника и 3-ей гармоникой циклической частоты $\omega = 3900 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ с помощью метода эквивалентного генератора.

Определим реактивные сопротивления:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{3900 \cdot 8.3 \cdot 10^{-6}} = 30.8989 \text{ Ом}$$

$$X_L = \omega \cdot L = 3900 \cdot 60.4 \cdot 10^{-3} = 235.56 \text{ Ом}$$

Заменяем конденсатор и катушку на резисторы с соответственными сопротивлениями

$$Z_C = -jX_C = -j30.9 \text{ Ом}$$

$$Z_L = jX_L = j235.56 \text{ Ом}$$

Заменяем R_1 и Z_L на эквивалентный резистор Z_{1L} :

$$Z_{1L} = R_1 + Z_L = 179 + j235.56 \text{ Ом}$$

Заменяем R_5 и R_6 на эквивалентный резистор R_{56} :

$$R_{56} = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6} = \frac{212 \cdot 212}{212 + 212} = 106 \text{ Ом}$$

Переобозначим активные сопротивления:

$$Z_1 = R_1 = 179 \text{ Ом}$$

$$Z_2 = R_2 = 250 \text{ Ом}$$

$$Z_3 = R_3 = 229 \text{ Ом}$$

$$Z_{56} = R_{56} = 106 \text{ Ом}$$

$$Z_H = R_H = 235 \text{ Ом}$$

Перерисуем схему для действующих комплексных значений токов и напряжений:

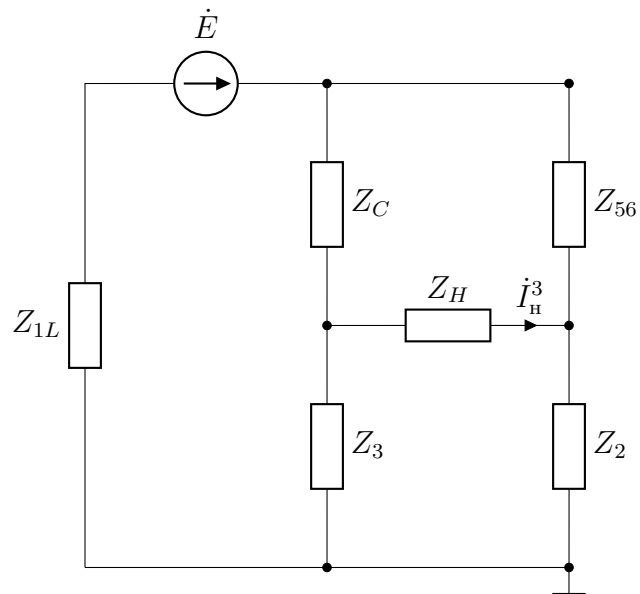


Рис. 32: Электрическая цепь

Перерисуем схему с U_p вместо резистора R_H для расчета тока \dot{I}_H^3 :

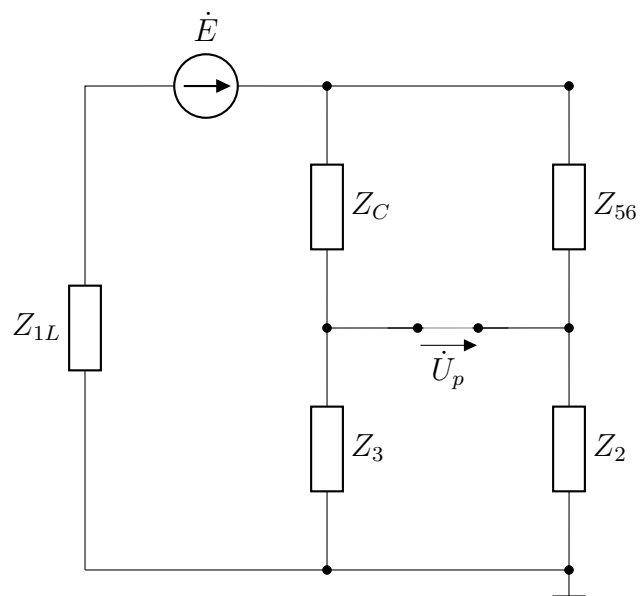


Рис. 33: Электрическая цепь

Уберем источник напряжения \dot{E} Для расчета входного сопротивления $Z_{\text{вх}}$:

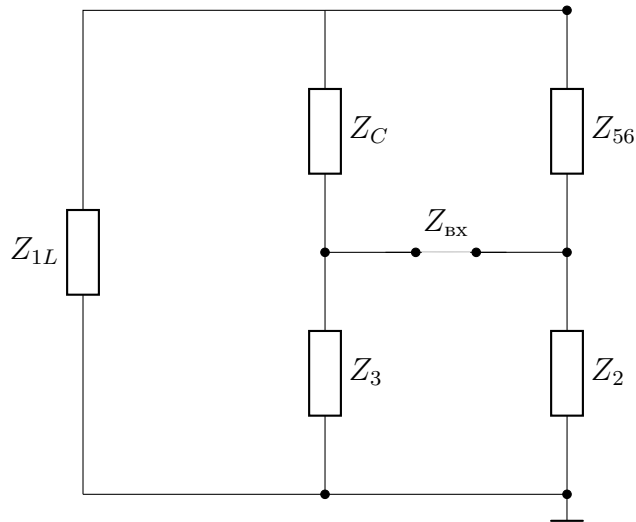


Рис. 34: Электрическая цепь

Перерисуем схему для более удобного расчета:

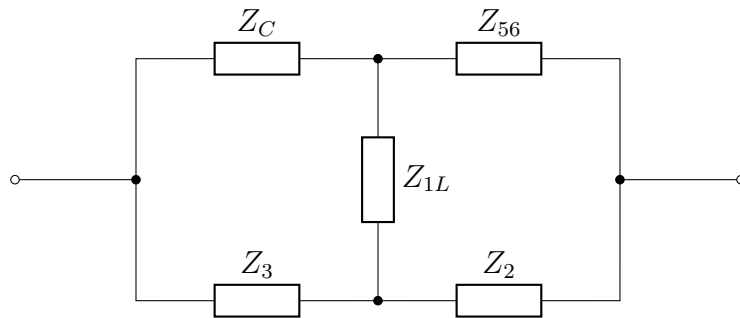


Рис. 35: Электрическая цепь

Сопротивление Z_{1L}, Z_2, Z_3 подключены звездой, это подключение можно преобразовать в треугольник с сопротивлениями Z_{12L}, Z_{13L}, Z_{23} , где

$$Z_{12L} = Z_{1L} + Z_2 + \frac{Z_{1L} \cdot Z_2}{Z_3} = 179 + 235.56j + 250 + \frac{(179+235.56j) \cdot 250}{229} = 624.41 + 492.72j \text{ Ом}$$

$$Z_{13L} = Z_{1L} + Z_3 + \frac{Z_{1L} \cdot Z_3}{Z_2} = 179 + 235.56j + 229 + \frac{(179+235.56j) \cdot 229}{250} = 571.96 + 451.33j \text{ Ом}$$

$$Z_{23} = Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_{1L}} = 250 + 229 + \frac{250 \cdot 229}{179+235.56j} = 596.078 - 154.072j \text{ Ом}$$

Перерисуем схему с учетом этих сопротивлений:

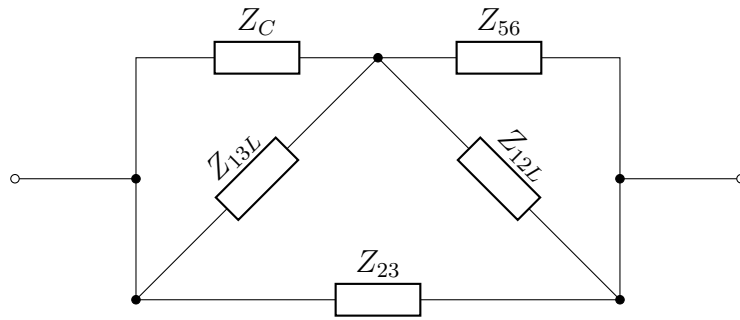


Рис. 36: Электрическая цепь

Перерисуем схему, В итоге получаем следующую цепь:

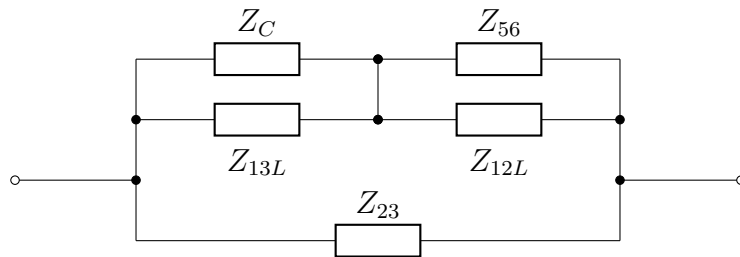


Рис. 37: Электрическая цепь

Резисторы Z_C , Z_{13L} подключены параллельно, их общее сопротивление Z_{13CL} равно:

$$Z_{13CL} = \frac{Z_C \cdot Z_{13L}}{Z_C + Z_{13L}} = \frac{-30.9j \cdot (571.96 + 451.33j)}{-30.9j + (571.96 + 451.33j)} = 1.084 - 31.697j \text{ Ом}$$

Резисторы Z_{56} , Z_{12L} подключены параллельно, их общее сопротивление Z_{1256L} равно:

$$Z_{1256L} = \frac{Z_{56} \cdot Z_{12L}}{Z_{56} + Z_{12L}} = \frac{106 \cdot (624.41 + 492.72j)}{106 + (624.41 + 492.72j)} = 95.43 + 7.13j \text{ Ом}$$

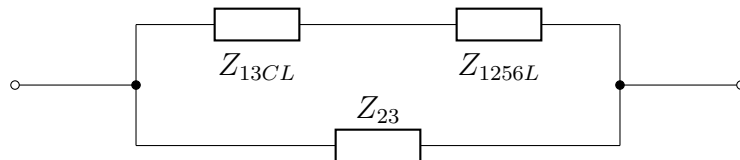


Рис. 38: Электрическая цепь

Между собой резисторы Z_{13CL} и Z_{1256L} подключены последовательно с общим сопротивлением $Z_{12356CL} = Z_{13CL} + Z_{1256L} = 1.084 - 31.697j + 95.43 + 7.13j = 96.514 - 24.57j \text{ Ом}$

Сопротивление Z_{23} подключено к резистору $Z_{12356CL}$ параллельно и общее сопротивление $Z_{\text{общ}} = Z_{\text{вх}}$ всей цепи равняется:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z_{23} \cdot Z_{12356CL}}{Z_{23} + Z_{12356CL}} = \frac{(596.078154.072j) \cdot (96.514 - 24.57j)}{(596.078154.072j) + (96.514 - 24.57j)} = 83.06 - 21.19j \text{ Ом}$$

Вернемся обратно к искомой цепи и обозначим направление токов и потенциалы на схеме ($\dot{\varphi}_0 = 0B$):

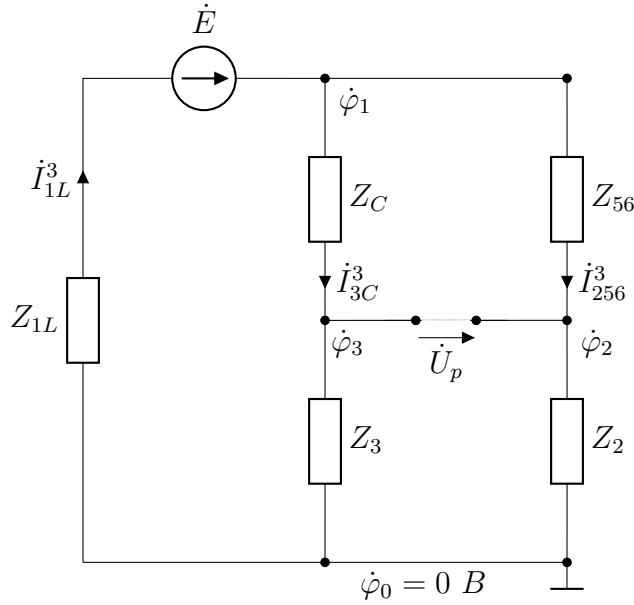


Рис. 39: Электрическая цепь

Рассчитаем потенциал $\dot{\varphi}_1$ с помощью формулы двух узлов:

$$\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_0 = \frac{\dot{E} \cdot Y_{1L}}{Y_{1L} + Y_{3C} + Y_{256}}$$

Посчитаем проводимости:

$$Y_{1L} = \frac{1}{Z_{1L}} = \frac{1}{179 + 235.56j} = 2.05 - 2.7j \text{ мСм}$$

$$Y_{3C} = \frac{1}{Z_{3C}} = \frac{1}{Z_3 + Z_C} = \frac{1}{229 - 30.9j} = 4.29 + 0.58j \text{ мСм}$$

$$Y_{256} = \frac{1}{Z_{256}} = \frac{1}{Z_2 + Z_{56}} = \frac{1}{250 + 106} = 2.8 \text{ мСм}$$

В итоге $\dot{\varphi}_1$ равен:

$$\dot{\varphi}_1 - 0 = \frac{\dot{E} \cdot Y_{1L}}{Y_{1L} + Y_{3C} + Y_{256}} = \frac{10.3 \cdot (2.05 - 2.7j)}{2.05 - 2.7j + 4.29 + 0.58j + 2.8} = 2.86 - 2.37j \text{ В}$$

Рассчитаем \dot{U}_p :

$$\dot{U}_p = \dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2$$

$$\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3 = \dot{I}_{3C}^3 \cdot Z_C$$

$$\dot{\varphi}_3 = \dot{\varphi}_1 - \dot{I}_{3C}^3 \cdot Z_C$$

$$\dot{I}_{3C}^3 = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_0) \cdot Y_{3C} = (2.86 - 2.37j) \cdot (4.29 + 0.58j) = 13.644 - 8.51j \text{ мА}$$

$$\dot{\varphi}_3 = (2.86 - 2.37j) - (13.644 - 8.51j) \cdot (-30.9j) \cdot 10^{-3} = 3.12 - 1.95j \text{ В}$$

$$\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2 = \dot{I}_{256}^3 \cdot Z_{56}$$

$$\dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_1 - \dot{I}_{256}^3 \cdot Z_{56}$$

$$\dot{I}_{256}^3 = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_0) \cdot Y_{256} = (2.86 - 2.37j) \cdot 2.8 = 8.008 - 6.64j \text{ мА}$$

$$\dot{\varphi}_2 = (2.86 - 2.37j) - (8.008 - 6.64j) \cdot (106) \cdot 10^{-3} = 2.011 - 1.667j \text{ В}$$

$$\dot{U}_p = \dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2 = (3.12 - 1.95j) - (2.011 - 1.667j) = 1.109 - 0.283j \text{ В}$$

Найдем ток \dot{I}_H^3 :

$$\dot{U}_p = 1.109 - 0.283j \text{ В}$$

$$Z_{\text{вх}} = 83.06 - 21.19j \text{ Ом}$$

$$\dot{I}_H^3 = \frac{\dot{U}_p}{Z_{\text{вх}} + Z_H} = \frac{1.109 - 0.283j}{235 + (83.06 - 21.19j)} = 3.5 - 0.65j \text{ мА}$$

4.2 Расчет узлов с помощью OrCAD

С помощью OrCad рассчитаем потенциалы узлов $\dot{\varphi}_1$, $\dot{\varphi}_2$ и $\dot{\varphi}_3$:

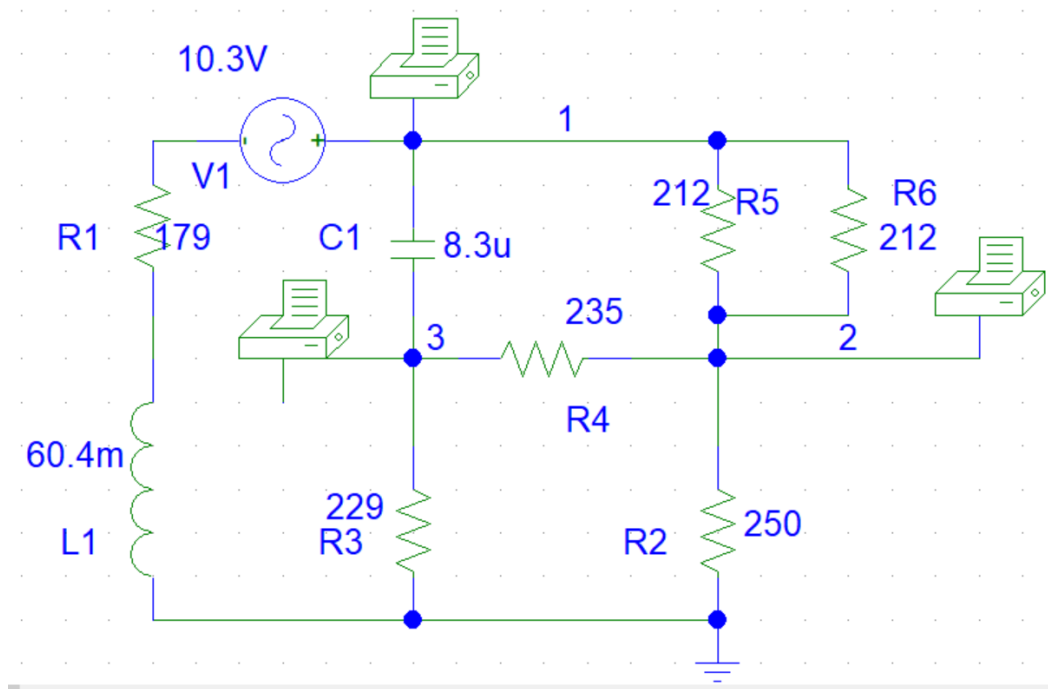


Рис. 40: Электрическая цепь, OrCad

Запустим симуляцию цепи, заранее выбрав в AC Sweep частоту $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{3900}{2\pi} = 620.7$ Гц, для расчета потенциалов в узлах.

Получим отчет в текстовом формате:

```

FREQ      VM(3)      VP(3)      VR(3)      VI(3)
6.207E+02  3.578E+00  -3.228E+01  3.025E+00  -1.911E+00
^
*** 12/02/23 15:55:42 ***** PSpice 9.2 (Mar 2000) ***** ID# 1 *****
* C:\Users\zelle\Documents\Kursach_Part3.sch

****      AC ANALYSIS              TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****

FREQ      VM(2)      VP(2)      VR(2)      VI(2)
6.207E+02  2.808E+00  -3.867E+01  2.193E+00  -1.755E+00
^
*** 12/02/23 15:55:42 ***** PSpice 9.2 (Mar 2000) ***** ID# 1 *****
* C:\Users\zelle\Documents\Kursach_Part3.sch

****      AC ANALYSIS              TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****

FREQ      VM(1)      VP(1)      VR(1)      VI(1)
6.207E+02  3.666E+00  -4.148E+01  2.747E+00  -2.428E+00

```

Рис. 41: Расчет потенциалов в OrCad

Расшифруем данные:

$FREQ = f = 6.2070e + 02 = 620.7$ Гц - частота

$VM(1) = V_{\dot{\varphi}_1} = 3.666$ В – амплитуда потенциала первого узла

$VP(1) = \alpha_1 = -41.48^\circ$ – фаза потенциала первого узла

$VR(1) = Re[\dot{\varphi}_1] = 2.747$ В – действительная часть потенциала первого узла

$VI(1) = Im[\dot{\varphi}_1] = -2.428$ В – мнимая часть потенциала первого узла

$$\dot{\varphi}_1 = 3.666e^{-j41.48^\circ} = 2.747 - 2.428j \text{ В}$$

$VM(2) = V_{\dot{\varphi}_2} = 2.808$ В – амплитуда потенциала второго узла

$VP(2) = \alpha_2 = -38.67^\circ$ – фаза потенциала второго узла

$VR(2) = Re[\dot{\varphi}_2] = 2.193$ В – действительная часть потенциала второго узла

$VI(2) = Im[\dot{\varphi}_2] = -1.755$ В – мнимая часть потенциала второго узла

$$\dot{\varphi}_2 = 2.808e^{-j38.67^\circ} = 2.193 - 1.755j \text{ В}$$

$VM(3) = V_{\dot{\varphi}_3} = 3.578$ В – амплитуда потенциала третьего узла

$VP(3) = \alpha_3 = -32.28^\circ$ – фаза потенциала третьего узла

$VR(3) = Re[\dot{\varphi}_3] = 3.025$ В – действительная часть потенциала третьего узла

$VI(3) = Im[\dot{\varphi}_3] = -1.911$ В – мнимая часть потенциала третьего узла

$$\dot{\varphi}_3 = 3.578e^{-j32.28^\circ} = 3.025 - 1.911j \text{ В}$$

Нарисуем схему и укажем направления токов:

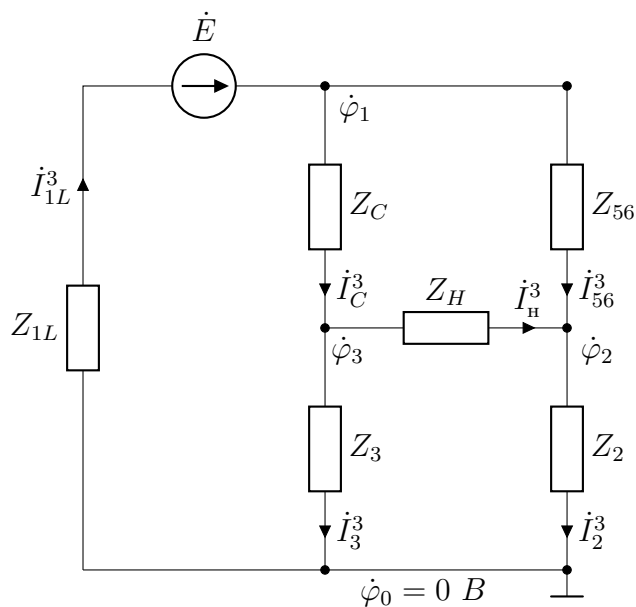


Рис. 42: Электрическая цепь

По полученным потенциалам рассчитаем значения всех токов 3-ей гармоники в цепи:

$$\dot{I}_1^3 = \dot{I}_L^3 = \dot{I}_{1L}^3 = \frac{(\dot{\varphi}_0 - \dot{\varphi}_1) + \dot{E}}{Z_{1L}} = \frac{(0 - (2.7472.428j)) + 10.3}{179 + 235.56j} = 21.98 - 15.36j \text{ мА} = 26.82e^{-j34.95^\circ} \text{ мА}$$

$$\dot{I}_2^3 = \frac{(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_0)}{Z_2} = \frac{(2.1931.755j) - 0}{250} = 8.772 - 7.02j \text{ мА} = 11.24e^{-j38.67^\circ} \text{ мА}$$

$$\dot{I}_3^3 = \frac{(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_0)}{Z_3} = \frac{(3.0251.911j) - 0}{229} = 13.21 - 8.34j \text{ мА} = 15.62e^{-j32.28^\circ} \text{ мА}$$

$$\dot{I}_5^3 = \dot{I}_6^3 = \frac{\dot{I}_{56}^3}{2} = \frac{(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2)}{2 \cdot Z_{56}} = \frac{(2.7472.428j) - (2.1931.755j)}{2 \cdot 106} = 2.61 - 3.17j \text{ мА} = 4.11e^{-j50.54^\circ} \text{ мА}$$

$$\dot{I}_C^3 = \frac{(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3)}{Z_C} = \frac{(2.7472.428j) - (3.0251.911j)}{-30.9j} = 16.73 - 9j \text{ мА} = 19e^{-j28.27^\circ} \text{ мА}$$

$$\dot{I}_H^3 = \frac{(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2)}{Z_H} = \frac{(3.0251.911j) - (2.1931.755j)}{235} = 3.5 - 0.66j \text{ мА} = 3.602e^{-j10.62^\circ} \text{ мА}$$

Приведем эти данные в таблицу с действительными комплексными значениями и мгновенными, домножив амплитуду на $\sqrt{2}$ и записав в фазу аргумент указанный в степени значения.

Ток	действительный комплекс, мА	мгновенное значение, мА
\dot{I}_1^3	$21.98 - 15.36j$	$37.929\sin(3900t - 34.95^\circ)$
\dot{I}_2^3	$8.772 - 7.02j$	$15.9\sin(3900t - 38.67^\circ)$
\dot{I}_3^3	$13.21 - 8.34j$	$22.09\sin(3900t - 32.28^\circ)$
\dot{I}_C^3	$16.73 - 9j$	$26.87\sin(3900t - 28.27^\circ)$
\dot{I}_5^3	$2.61 - 3.17j$	$5.81\sin(3900t - 5.54^\circ)$
\dot{I}_6^3	$2.61 - 3.17j$	$5.81\sin(3900t - 5.54^\circ)$
\dot{I}_H^3	$3.5 - 0.66j$	$5.094\sin(3900t - 10.62^\circ)$

Таблица 2: Действующие комплексные и мгновенные значения тока

Сравним рассчитанное \dot{I}_H^3 и полученное в OrCAD:

$$\begin{aligned} \dot{I}_H^3 \text{ рассчитанное} &= 3.5 - 0.65j \text{ мА} \\ \dot{I}_H^3 \text{ OrCAD} &= 3.5 - 0.66j \text{ мА} \\ 3.5 - 0.65j &\approx 3.5 - 0.66j - \text{Расчеты верны и точны.} \end{aligned}$$

4.3 Баланс мощностей

Мощность источника:

$$\dot{S}_{\dot{E}} = \dot{E} \cdot \dot{I}_1^3 = 10.3 \cdot (21.98 - 15.36j) = 226.394 - 158.208j \text{ мВА} = 276.196e^{-j34.95^\circ} \text{ мВА}$$

$$\dot{P}_{\dot{E}} = 226.394 \text{ мВт}$$

$$\dot{Q}_{\dot{E}} = 158.208 \text{ мВАР}$$

Мощность приемников:

$$\dot{S}_{1L} = (\dot{I}_1^3)^2 \cdot Z_{1L} = (21.9815.36j)^2 \cdot (179 + 235.56j) \cdot 10^{-6} = 203.303 - 62.6371j \text{ мВА}$$

$$\dot{S}_2 = (\dot{I}_2^3)^2 \cdot Z_2 = (8.7727.02j)^2 \cdot 250 \cdot 10^{-6} = 6.9169 - 30.7897j \text{ мВА}$$

$$\dot{S}_3 = (\dot{I}_3^3)^2 \cdot Z_3 = (13.218.34j)^2 \cdot 229 \cdot 10^{-6} = 24.0332 - 50.4585j \text{ мВА}$$

$$\dot{S}_5 = (\dot{I}_5^3)^2 \cdot Z_5 = (2.613.17)^2 \cdot 212 \cdot 10^{-6} = -0.686202 - 3.50805j \text{ мВА}$$

$$\dot{S}_6 = (\dot{I}_6^3)^2 \cdot Z_6 = (2.613.17)^2 \cdot 212 \cdot 10^{-6} = -0.686202 - 3.50805j \text{ мВА}$$

$$\dot{S}_C = (\dot{I}_C^3)^2 \cdot Z_C = (16.739j)^2 \cdot (-30.9j) \cdot 10^{-6} = -9.30523 - 6.14579j \text{ мВА}$$

$$\dot{S}_H = (\dot{I}_H^3)^2 \cdot Z_H = (3.50.66j)^2 \cdot 235 \cdot 10^{-6} = 2.77 - 1.0857j \text{ мВА}$$

Просуммируем мощности:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\text{пр}} &= \dot{S}_1 + \dot{S}_2 + \dot{S}_3 + \dot{S}_5 + \dot{S}_6 + \dot{S}_C + \dot{S}_H = 203.303 - 62.6371j + 6.9169 - 30.7897j + 24.0332 - \\ &50.4585j + (-0.686202 - 3.50805j) + (-0.686202 - 3.50805j) + (-9.30523 - 6.14579j) + (2.77 - \\ &1.0857j) = 226.345 + 158.133j \text{ мВА} = 276.118e^{-j34.94^\circ} \text{ мВА} \end{aligned}$$

$$\dot{P}_{\text{пр}} = 226.325 \text{ мВт}$$

$$\dot{Q}_{\text{пр}} = 158.133 \text{ мВАР}$$

Сравним мощность источника и приемников

$$\dot{P}_{\dot{E}} = 226.394 \text{ мВт} \approx \dot{P}_{\text{пр}} = 226.325 \text{ мВт}$$

$$\dot{Q}_{\dot{E}} = 158.208 \text{ мВАР} \approx \dot{Q}_{\text{пр}} = 158.133 \text{ мВАР}$$

Погрешность измерений менее $< 1\%$, что показывает нам верность всех расчетов.

4.4 Итоговое значение $i_H^3(t)$ при включении всех источников

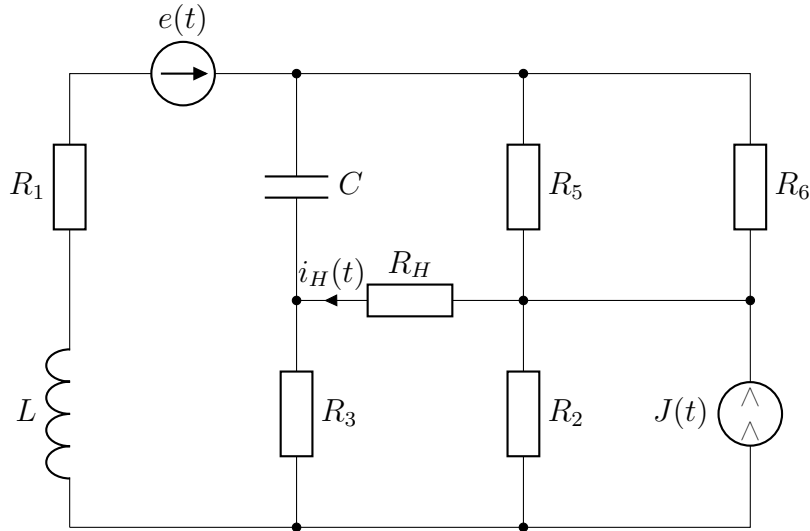


Рис. 43: Электрическая цепь

Для расчета общей силы тока в резисторе R_H , по принципу суперпозиции требуется сложить все токи, подсчитанные ранее. Так как сила тока 3-ей гармоники была изначально направлена в другую сторону, то она войдет со знаком минус:

$$i_H(t) = i_{H0} + i_H^1(t) - i_H^3(t) = 39.27 + 40.42\sin(1300t - 6.677^\circ) - 5.094\sin(3900t - 10.62^\circ) \text{ мА}$$

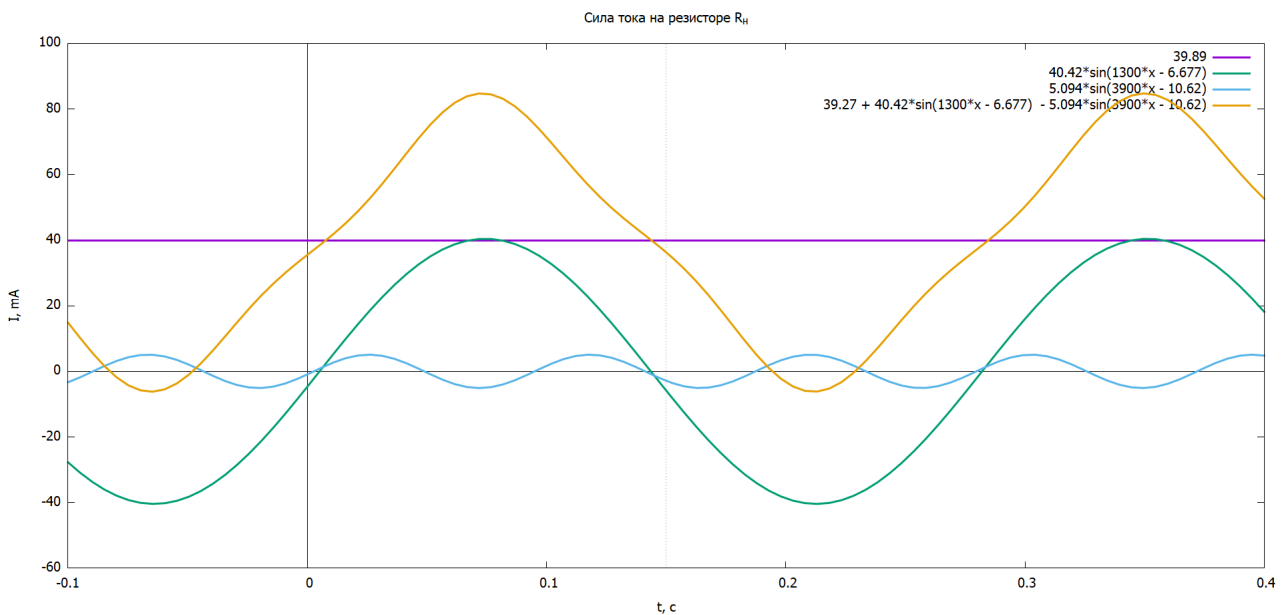


Рис. 44: Итоговая сила тока на резисторе R_H

Посчитаем действующее значение силы тока $i_H(t)$:

$$i_H = \sqrt{39.27^2 + 28.581^2 + 3.602^2} = 48.703 \text{ мА}$$

4.5 Полная система уравнений Кирхгофа во временной и частотной области для 3-ей гармоники

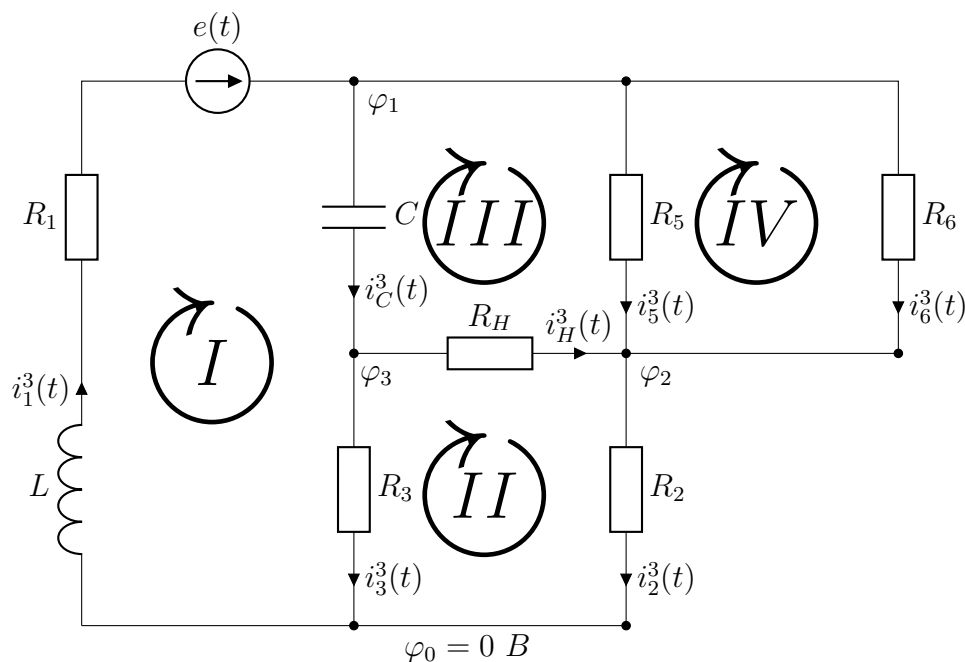


Рис. 45: Электрическая цепь

Запишем I -й и II -й законы Кирхгофа во временной и частотной области для узлов $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ и для контуров I, II, III, IV :

Первый закон Кирхгофа:

Временная область

$$\varphi_1 : i_1^3(t) = i_C^3(t) + i_5^3(t) + i_6^3(t)$$

$$\varphi_2 : i_5^3(t) + i_6^3(t) + i_H^3(t) = i_2^3(t)$$

$$\varphi_3 : i_C^3(t) = i_3^3(t) + i_H^3(t)$$

$$\varphi_0 : i_2^3(t) + i_3^3(t) = i_1^3(t)$$

Частотная область

$$\varphi_1 : \dot{I}_1^3 = \dot{I}_G^3 + \dot{I}_5^3 + \dot{I}_6^3$$

$$\varphi_2: \dot{I}_5^3 + \dot{I}_6^3 + \dot{I}_H^3 = \dot{I}_2^3$$

$$\varphi_3 : \dot{I}_C^3 = \dot{I}_3^3 + \dot{I}_H^3$$

$$\varphi_0 : \dot{I}_2^3 + \dot{I}_3^3 \dot{I} = \dot{I}_1^3$$

Второй закон Кирхгофа:

Временная область

$$I : i_1^3(t) \cdot R_1 + L \cdot \frac{di_1^3(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i_C^3(t) dt + i_3^3(t) \cdot R_3 = E(t)$$

$$II : i_H^3(t) \cdot R_H + i_2^3(t) \cdot R_2 - i_3^3(t) \cdot R_3 = 0$$

$$III : i_5^3(t) \cdot R_5 - i_H^3(t) \cdot R_H - \frac{1}{C} \int i_C^3(t) dt = 0$$

$$IV : i_5^3(t) \cdot R_5 - i_6^3(t) \cdot R_6 = 0$$

Частотная область

$$I : \dot{I}_1^3 \cdot (R_1 + jX_L) + \dot{I}_C^3 \cdot (-jX_C) + \dot{I}_3^3 \cdot R_3 = \dot{E}$$

$$II : \dot{I}_H^3 \cdot R_H + \dot{I}_2^3 \cdot R_2 - \dot{I}_3^3 \cdot R_3 = 0$$

$$III : \dot{I}_5^3 \cdot R_5 - \dot{I}_H^3 \cdot R_H - \dot{I}_C^3 \cdot (-jX_C) = 0$$

$$IV : \dot{I}_5^3 \cdot R_5 - \dot{I}_6^3 \cdot R_6 = 0$$