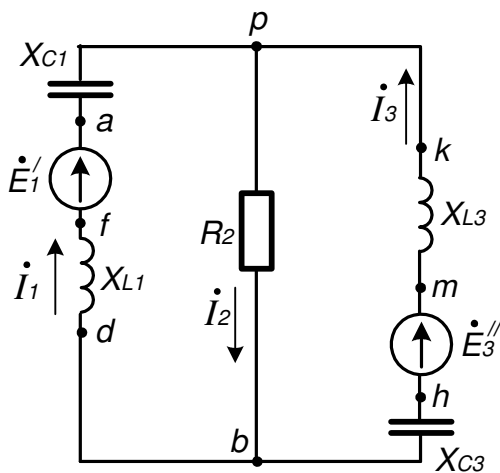
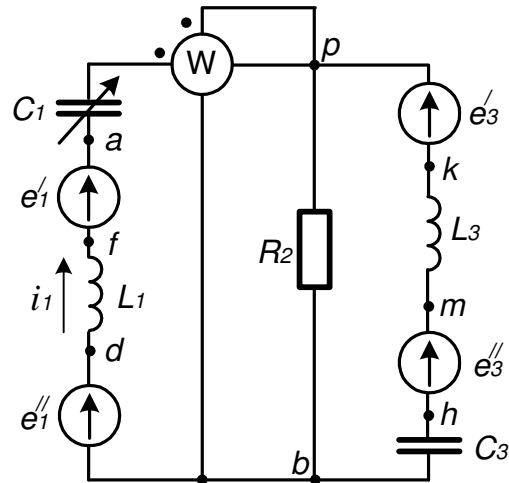


**Дано:**

- $L_1 = 1,36 \text{ мГн}$
- $L_3 = 10,9 \text{ мГн}$
- $C_1 = 3,25 \text{ мкФ}$
- $C_3 = 9,46 \text{ мкФ}$
- $R_2 = 65 \text{ Ом}$
- $f = 700 \text{ Гц}$
- $e'_1 = 141 \cos(\omega t - 90^\circ), \text{ В}$
- $e''_1 = 0$
- $e'_3 = 0$
- $e''_3 = 282 \sin(\omega t - 50^\circ), \text{ В}$



Т.к.  $e''_1 = 0$ ,  $e'_3 = 0$ , то схему можно упростить исключив из нее эти элементы.

Угловая частота:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 700 \approx 4398,23 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Сопротивления реактивных элементов в схеме:

$$X_{L1} = \omega L_1 = 4398,23 \cdot 1,36 \times 10^{-3} \approx 5,98 \text{ Ом}$$

$$X_{L3} = \omega L_3 = 4398,23 \cdot 10,9 \times 10^{-3} \approx 47,94 \text{ Ом}$$

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{4398,23 \cdot 3,25 \times 10^{-6}} \approx 69,96 \text{ Ом}$$

$$X_{C3} = \frac{1}{\omega C_3} = \frac{1}{4398,23 \cdot 9,46 \times 10^{-6}} \approx 24,03 \text{ Ом}$$

**1) На основании законов Кирхгофа составим в общем виде систему уравнений для расчета токов во всех ветвях цепи, записав ее в двух формах:**

**а) дифференциальной:**

$$\begin{cases} i_1 - i_2 + i_3 = 0 \\ L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + R_2 i_2 = e'_1 \\ R_2 i_2 + L_3 \frac{di_3}{dt} + \frac{1}{C_3} \int i_3 dt = e''_3 \end{cases}$$

**б) символической:**

$$\begin{cases} \dot{I}_1 - \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0 \\ j(X_{L1} - X_{C1})\dot{I}_1 + R_2 \dot{I}_2 = \dot{E}'_1 \\ R_2 \dot{I}_2 + j(X_{L3} - X_{C3})\dot{I}_3 = \dot{E}''_3 \end{cases}$$

**2) Рассчитаем комплексы действующих значений токов во всех ветвях, воспользовавшись методом узловых потенциалов.**

В первую очередь, необходимо от мгновенных значений ЭДС перейти к комплексам действующих значений ЭДС. Переход осуществляется только от положительной синусоиды.

$$e'_1 = 141 \cos(\omega t - 90^\circ) = 141 \sin(\omega t), B \Rightarrow \dot{E}'_1 = \frac{141}{\sqrt{2}} e^{j0^\circ} \approx 99,7 B$$

$$e''_3 = 282 \sin(\omega t - 50^\circ), B \Rightarrow \dot{E}''_3 = \frac{282}{\sqrt{2}} e^{-j50^\circ} \approx 199,4 e^{-j50^\circ} \approx (128,17 - j152,75) B$$

Любой узел схемы можно заземлить. Токораспределение при этом не изменится.

Комплексные сопротивления ветвей:

$$\underline{Z}_1 = j(X_{L1} - X_{C1}) = j(5,98 - 69,96) = -j63,98 \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 = 65 \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_3 = j(X_{L3} - X_{C3}) = j(47,94 - 24,03) = j23,91 \text{ Ом}$$

Соответственно комплексные проводимости ветвей:

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{1}{-j63,98} \approx j0,01563 \text{ См}$$

$$\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{65} \approx 0,015385 \text{ См}$$

$$\underline{Y}_3 = \frac{1}{\underline{Z}_3} = \frac{1}{j23,91} \approx -j0,041824 \text{ См}$$

Пусть  $\phi_b = 0$  тогда по методу узловых потенциалов имеем

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_p &= \frac{\dot{E}'_1 \underline{Y}_1 + \dot{E}''_3 \underline{Y}_2}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3} = \frac{99,7 \cdot j0,01563 + (128,17 - j152,75)(-j0,041824)}{j0,01563 + 0,015385 - j0,041824} \approx \\ &\approx \frac{-6,388616 - j3,802271}{0,015385 - j0,026194} \approx \frac{7,434493 e^{-j149,24^\circ}}{0,030378 e^{-j59,57^\circ}} = 244,73 e^{-j89,67^\circ} \approx (1,41 - j244,73) B \end{aligned}$$

Токи в ветвях далее находятся по обобщенному закону Ома.

$$\dot{i}_1 = \frac{-\dot{\phi}_p + \dot{E}'_1}{\underline{Z}_1} = \frac{-1,41 + j244,73 + 99,7}{-j63,98} \approx \frac{263,73 e^{j68,12^\circ}}{63,98 e^{-j90^\circ}} \approx 4,1221 e^{j158,12^\circ} \approx (-3,8252 + j1,5362) A$$

$$\dot{i}_2 = \frac{\dot{\phi}_p}{\underline{Z}_2} = \frac{244,73 e^{-j89,67^\circ}}{65} \approx 3,7651 e^{-j89,67^\circ} \approx (0,0217 - j3,765) A$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_3 &= \frac{-\dot{\phi}_p + \dot{E}''_3}{\underline{Z}_3} = \frac{-1,41 + j244,73 + 128,17 - j152,75}{j23,91} \approx \frac{156,616 e^{j35,97^\circ}}{23,91 e^{j90^\circ}} \approx \\ &\approx 6,5502 e^{-j54,03^\circ} \approx (3,8473 - j5,3012) A \end{aligned}$$

3) По результатам, полученным в п. 2, определить показание ваттметра.

$$P_W = \operatorname{Re} \left[ \dot{U}_{bp} I_1^* \right] = \operatorname{Re} \left[ (\dot{\phi}_b - \dot{\phi}_p) \cdot I_1^* \right] = \operatorname{Re} \left[ \left( 0 - 244,73 e^{-j89,67^\circ} \right) \cdot 4,1221 e^{-j158,12^\circ} \right] \approx$$
$$\approx \operatorname{Re} \left[ 1008,8 \cdot e^{-j67,79^\circ} \right] \approx \operatorname{Re} [381,33 - j933,95] = 381,33 \text{ Вт}$$

, где  $I_1^*$  - сопряженный комплекс тока  $\dot{I}_1$

4) Построить топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов, потенциал точки  $a$ , указанной на схеме, примем равным нулю.

$\dot{\phi}_a = 0$ ; Найдем потенциалы других точек схемы;

$$\dot{\phi}_p = \dot{\phi}_a + jX_{C1} \dot{I}_1 = 0 + j69,96 \cdot (-3,8252 + j1,5362) \approx (-107,473 - j267,611) \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_m = \dot{\phi}_p + jX_{L3} \dot{I}_3 = -107,473 - j267,611 + j47,94 \cdot (3,8473 - j5,3012) \approx (146,667 - j83,171) \text{ В}$$

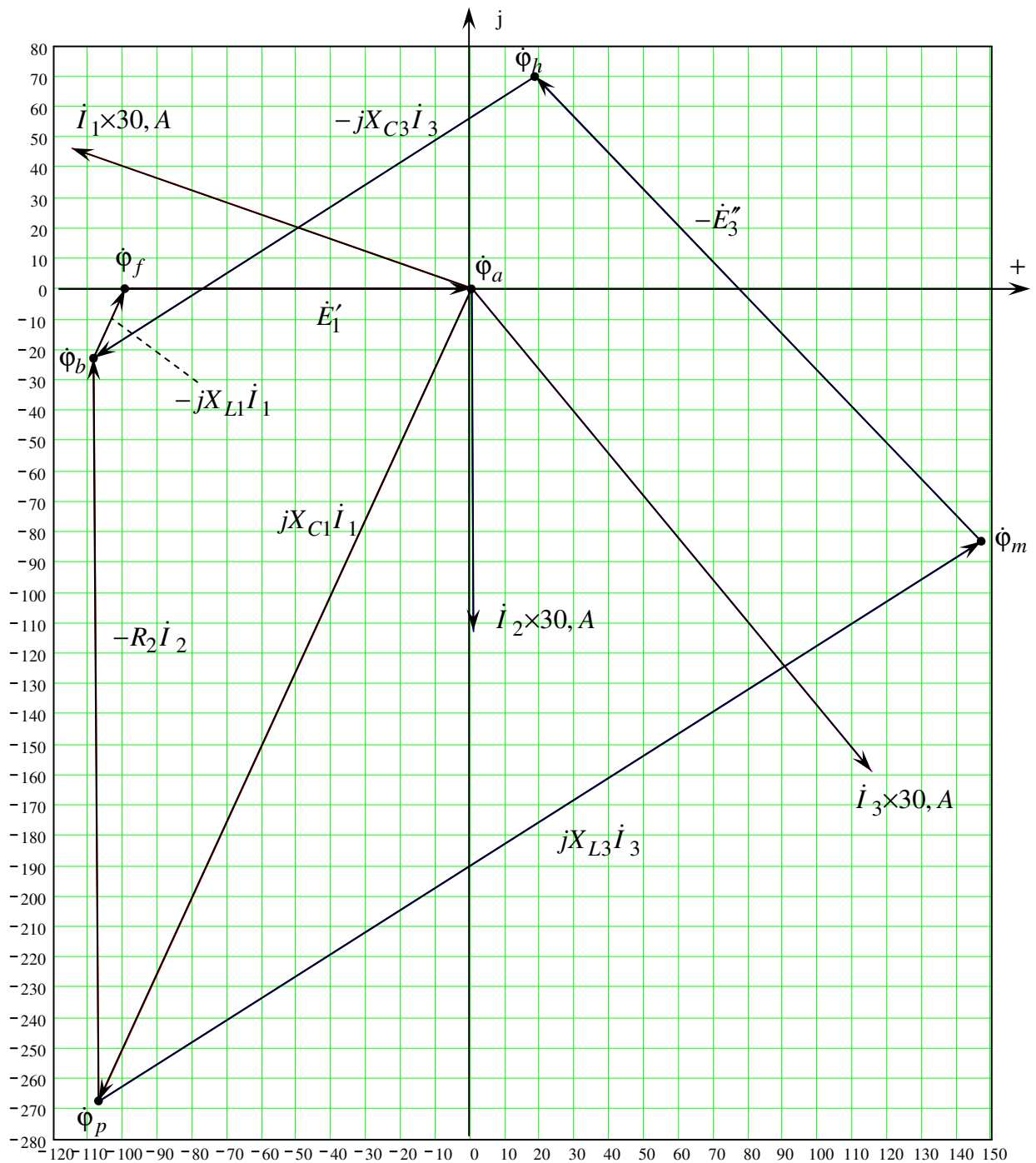
$$\dot{\phi}_h = \dot{\phi}_m - \dot{E}_3'' = 146,667 - j83,171 - (128,17 - j152,75) = (18,497 + j69,579) \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_b = \dot{\phi}_h - jX_{C3} \dot{I}_3 = 18,497 + j69,579 - j24,03 \cdot (3,8473 - j5,3012) \approx (-108,891 - j22,872) \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_f = \dot{\phi}_b - jX_{L1} \dot{I}_1 = -108,891 - j22,872 - j5,98 \cdot (-3,8252 + j1,5362) \approx (-99,705 + j0,003) \text{ В}$$

$$\dot{\phi}_a = \dot{\phi}_f + \dot{E}_1' = -99,705 + j0,003 + 99,7 = (-0,005 + j0,003) \approx 0$$

Теперь по найденным потенциалам и заданной схеме построим топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов:



## 5) Построение круговой диаграммы тока

Расчет для построения круговой диаграммы ведем по методу эквивалентного генератора.

Разрываем ветвь с изменяющимся сопротивлением  $x_{C1}$  и определяем напряжение в месте разрыва – напряжение холостого хода  $U_{xx}$ .

$$\dot{U}_{xx} = \dot{E}'_1 - \dot{U}'_{pb} \quad (5.1)$$

где  $\dot{U}'_{pb}$  – напряжение на узлах  $p$  и  $b$  при разомкнутой ветви 1.

$\dot{U}'_{pb}$  определяем при  $\underline{Y}_1 = 0$ .

$$\begin{aligned} \dot{U}'_{pb} &= \frac{\dot{E}'_1 \underline{Y}_1 + \dot{E}'_3 \underline{Y}_2}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3} = \frac{\dot{E}'_3 \underline{Y}_2}{\underline{Y}_2 + \underline{Y}_3} = \frac{199,4e^{-j50^\circ} (-j0,041824)}{0,015385 - j0,041824} \approx \\ &\approx \frac{199,4e^{-j50^\circ} \cdot 0,041824e^{-j90^\circ}}{0,044564e^{-j69,8^\circ}} = 187,14e^{-j70,2^\circ} \approx (63,39 - j176,08) \end{aligned}$$

Тогда согласно (5.1)

$$\dot{U}_{xx} = \dot{E}'_1 - \dot{U}'_{pb} = 99,7 - (63,39 - j176,08) = (36,31 + j176,08) \approx 179,78e^{j78,35^\circ} \text{ В}$$

Сопротивление эквивалентного генератора  $\underline{Z}_{\text{экв}}$  представляет собой сопротивление параллельно включенных комплексных сопротивлений  $\underline{Z}_2$  и  $\underline{Z}_3$  и последовательно включенного с ними сопротивления  $jX_{L1}$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{экв}} &= jX_{L1} + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = j5,98 + \frac{65 \cdot j23,91}{65 + j23,91} \approx j5,98 + \frac{65 \cdot 23,91e^{j90^\circ}}{69,258e^{j20,2^\circ}} \approx \\ &\approx j5,98 + 22,44 \cdot e^{j69,8^\circ} \approx j5,98 + 7,748 + j21,06 \approx (7,748 + j27,04) \approx 28,128e^{j74,01^\circ} \text{ Ом} \end{aligned}$$

Ток короткого замыкания

$$\dot{I}_{1кз} = \frac{\dot{U}_{xx}}{\underline{Z}_{\text{экв}}} = \frac{179,78e^{j78,35^\circ}}{28,128e^{j74,01^\circ}} \approx 6,3915 \cdot e^{j4,34^\circ} \approx (6,3732 + j0,4837) \text{ А}$$

Ток в ветви 1 определяется по формуле

$$\dot{I}_1(x_{C1}) = \frac{\dot{E}'_{\text{экв}}}{\underline{Z}_{\text{экв}} - jX_{C1}} \quad (5.2)$$

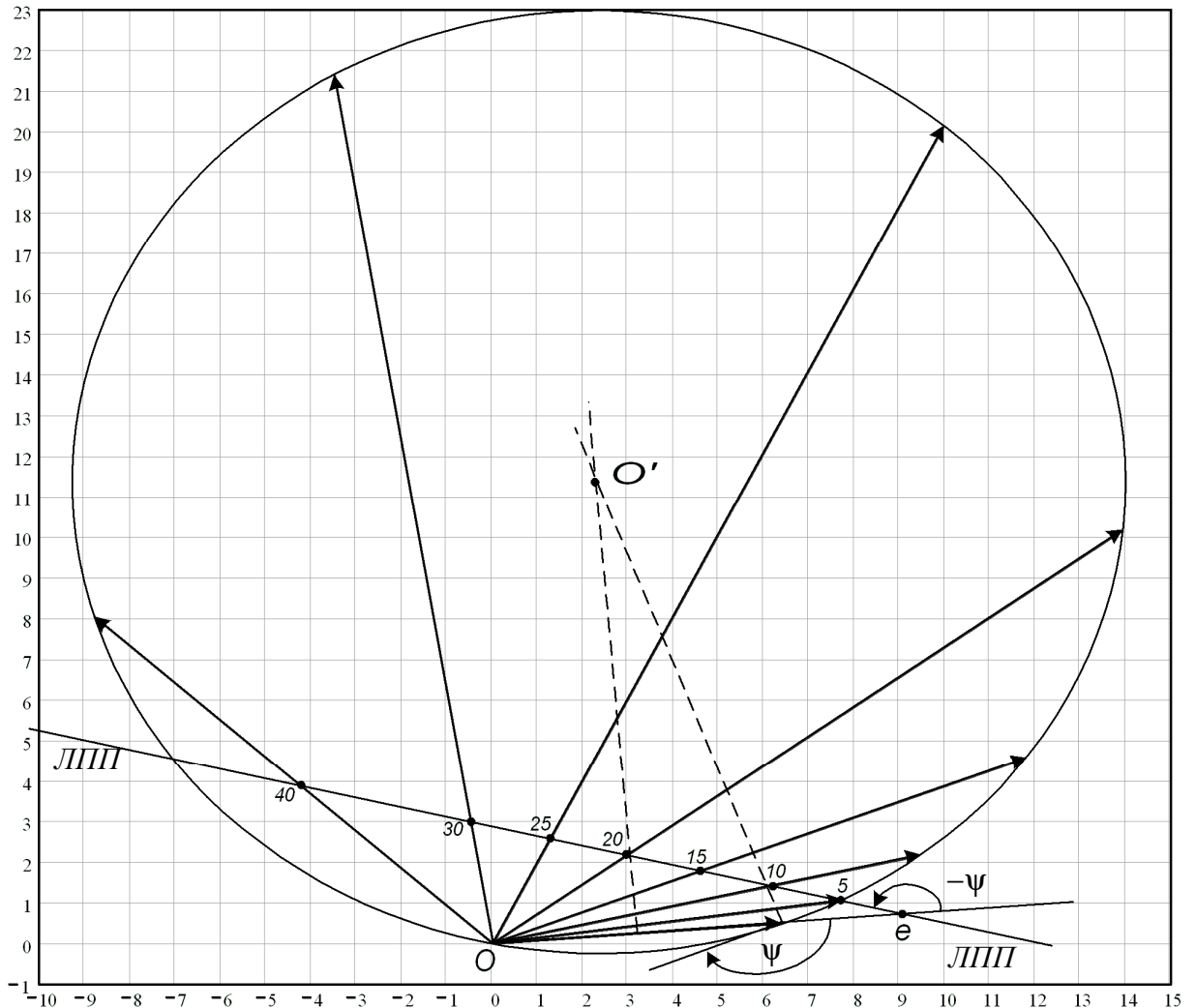
Для построения круговой диаграммы рассчитаем угол  $\psi$

$$\psi = \varphi_{X_{C1}} - \varphi_{Z_{\text{экв}}} = -90^\circ - 74,01^\circ \approx -164,01^\circ.$$

Теперь построим круговую диаграмму:

- 1) Нанесем на комплексную плоскость вектор  $\dot{I}_{1кз}$ , он будет хордой окружности.  
Точка  $O$  – будет в начале вектора  $\dot{I}_{1кз}$
- 2) Под углом  $\psi$  к нему построим луч касательный к окружности.
- 3) На пересечении перпендикуляров к касательной в конце вектора  $\dot{I}_{1кз}$  и к середине вектора  $\dot{I}_{1кз}$  будет точка  $O'$  – центр окружности.
- 4) На отрезок « $Oe$ » отложим  $Z_{\text{экв}}$  в масштабе сопротивлений, точка « $e$ » будет в конце отрезка.
- 5) Под углом  $-\psi$  из точки « $e$ » начертим ЛПП, нанеся на нее значения переменного сопротивления, соблюдая масштаб

Для нахождения интересующего нас тока, необходимо соединить точку «О» и отмеченное сопротивление на ЛПП. Вектор от точки «О» до окружности – модуль искомого тока  $\dot{I}_1$ , а угол с осью абсцисс – аргумент.



### б) Построение зависимости $I_1(X_{C1})$

Выразим аналитически зависимость модуля тока  $I_1$  от  $X_{C1}$ .

$$I_1(x_{C1}) = \left| \frac{\dot{E}_{\text{экв}}}{\underline{Z}_{\text{экв}} - jX_{C1}} \right| = \frac{E_{\text{экв}}}{\sqrt{\text{Re}(\underline{Z}_{\text{экв}})^2 + (\text{Im}(\underline{Z}_{\text{экв}}) - X_{C1})^2}}$$

График  $I_1(X_{C1})$  представлен на рис:



Ток  $I_1(X_{C1})$  достигает максимального значения при

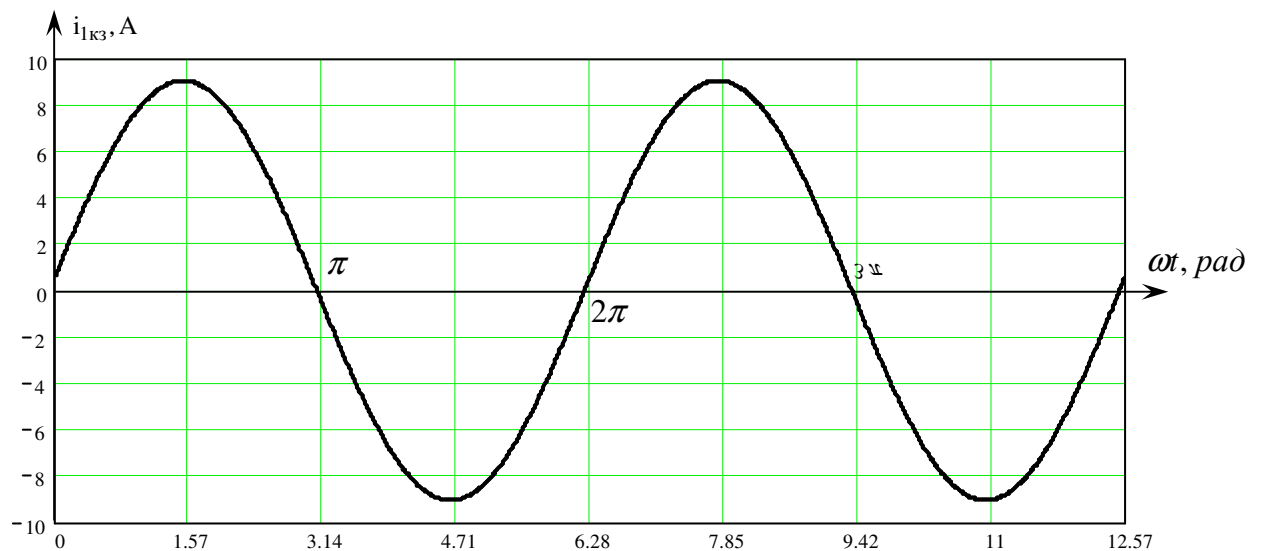
$$X_{C1} = \text{Im}(Z_{\text{экв}}) = 27,04 \text{ Ом}.$$

**7) Используя данные расчетов, полученных в пп. 2, запишем выражение для мгновенного значения тока  $i_{1КЗ}$ . Построим график зависимости указанной величины от  $\omega t$ .**

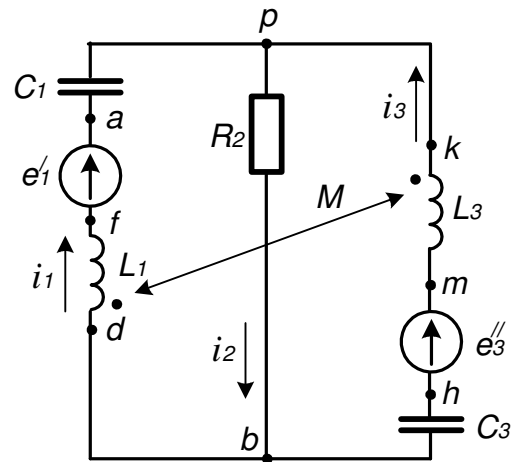
$$\dot{I}_{1КЗ} = 6,3915 \cdot e^{j4,34^\circ} \text{ A} \Rightarrow$$

$$i_{1КЗ}(\omega t) = 6,3915\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 4,34^\circ) \approx 9,039 \cdot \sin(\omega t + 4,34^\circ), \text{ A}$$

Построим график:



8) Полагая, что между двумя любыми индуктивными катушкам расположенными в различных ветвях заданной схемы, имеется магнитная связь при взаимной индуктивности, равной  $M$ , составить в общем виде систему уравнений по законам Кирхгофа для расчета токов во всех ветвях схемы, записав ее в двух формах:



а) дифференциальной:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 + i_3 = 0 \\ L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_3}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + R_2 i_2 = e'_1 \\ R_2 i_2 + L_3 \frac{di_3}{dt} - M \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_3} \int i_3 dt = e''_3 \end{cases}$$

б) символической:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 - \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0 \\ j(X_{L1} - X_{C1})\dot{I}_1 + R_2 \dot{I}_2 - jX_M \dot{I}_3 = \dot{E}'_1 \\ -jX_M \dot{I}_1 + R_2 \dot{I}_2 + j(X_{L3} - X_{C3})\dot{I}_3 = \dot{E}''_3 \end{cases}$$