

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»
Институт нефтепереработки и нефтехимии ФГБОУ ВО УГНТУ в г. Салавате
Кафедра «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий»

Электротехника и электроника

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

ЭАПП-15.03.04-01.02.02 Р

Исполнитель:

студент гр. БАТсз-22-21

В.Д. Якушев

Преподаватель:

ассистент

К.В. Чернов

Салават

2023

Оглавление

Задача ЭЦ-1. Расчет линейной электрической цепи постоянного тока.....	3
Задача ЭЦ-2. Расчет электрической цепи однофазного переменного тока.....	10
Задача ЭЦ-3. Расчет трехфазной цепи.....	15
Задача МЦ-1. Расчет характеристик силовых трансформаторов.....	22
Задача ЭМ-1. Расчет характеристик асинхронных двигателей.....	29
Список используемой литературы.....	33

Задача ЭЦ-1. Расчет линейной электрической цепи постоянного тока

Задание:

1. Определить токи в ветвях с помощью уравнений, составленных по законам Кирхгофа.
2. Составить уравнение баланса мощностей.
3. Определить показания вольтметра.
4. Определить ток I_I в ветви с сопротивлением R_I по методу эквивалентного генератора и построить график зависимости $I_I = f(R)$ при изменении $R < R_I < 10R$.

Схема цепи представлена на рисунке 1. Значения параметров цепи указаны в таблице 1.

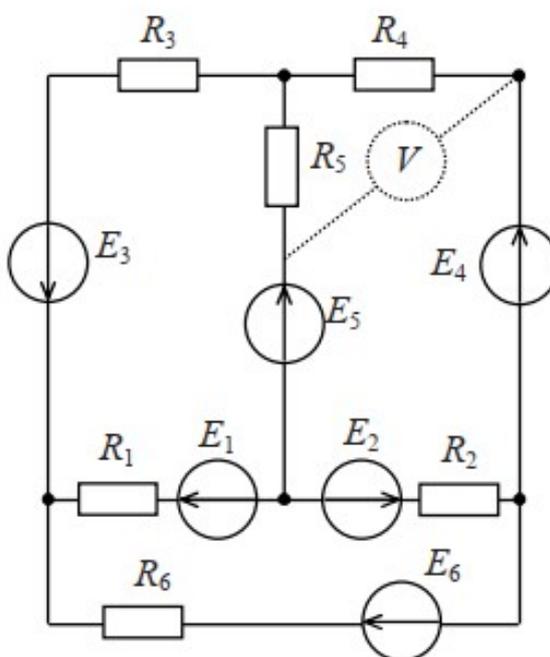


Рисунок 1 – Схема электрической цепи

Таблица 1 – Исходные данные

$E_3, \text{В}$	$E_4, \text{В}$	$E_5, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$	$R_5, \text{Ом}$	$R_6, \text{Ом}$
54	10	19	39	43	34	91	26	79

Решение:

1. Определим токи в ветвях с помощью уравнений, составленных по законам Кирхгофа.

Для определения токов в ветвях цепи по законам Кирхгофа необходимо составить $n - 1 = 3$ уравнение по первому закону, где n – количество узлов в цепи; $m = 3$ уравнения по второму закону, где m – количество независимых контуров. Выберем условно-положительные направления токов в ветвях цепи (см. рис. 2).

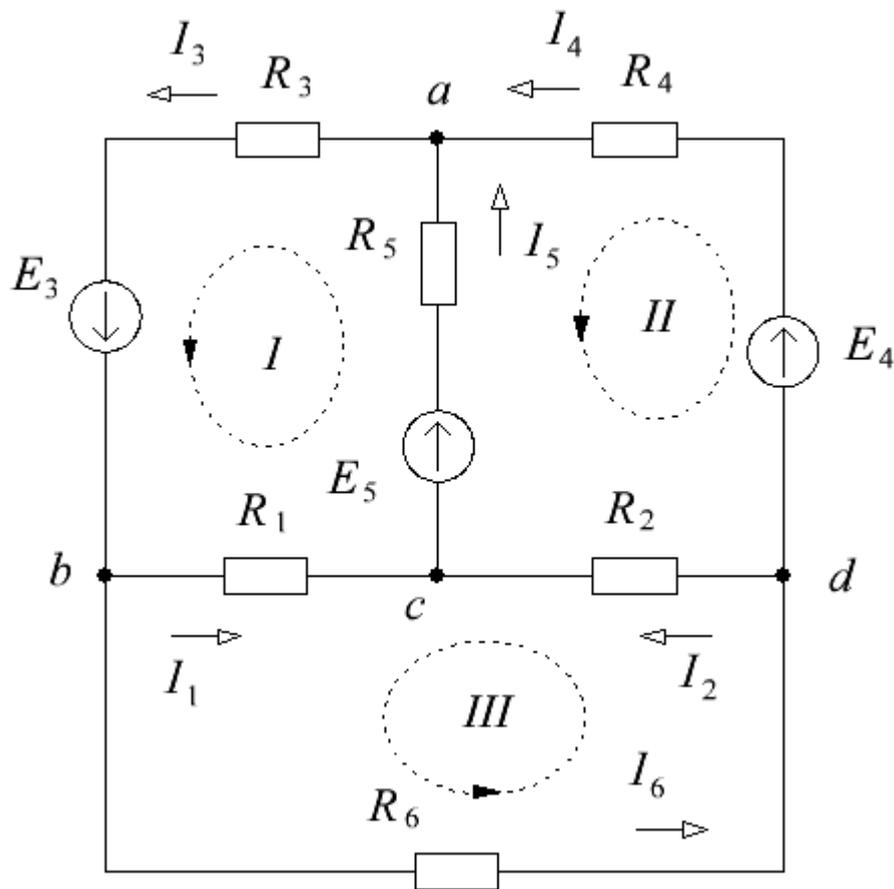


Рисунок 2 – Расчетная схема электрической цепи

Уравнение по первому закону Кирхгофа составляем для узлов a , b и c . Обход контуров производим в направлении, показанном на рисунке 2.

$$\left\{ \begin{array}{l} - I_3 + I_4 + I_5 = 0, \\ - I_1 + I_3 - I_6 = 0, \\ I_1 + I_2 - I_5 = 0, \\ I_1 R_1 + I_3 R_3 + I_5 R_5 = E_3 + E_5, \\ - I_2 R_2 + I_4 R_4 - I_5 R_5 = E_4 - E_5, \\ - I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_6 R_6 = 0. \end{array} \right.$$

Подставляем числовые значения сопротивлений и ЭДС. В результате получим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} - I_3 + I_4 + I_5 = 0, \\ - I_1 + I_3 - I_6 = 0, \\ I_1 + I_2 - I_5 = 0, \\ 39I_1 + 34I_3 + 26I_5 = 73, \\ - 43I_2 + 91I_4 - 26I_5 = -9, \\ - 39I_1 + 43I_2 + 79I_6 = 0. \end{array} \right.$$

В результате решения данной системы уравнений, получим следующие значения токов в ветвях:

$$I_1 = 0,624 \text{ A},$$

$$I_2 = 0,099 \text{ A},$$

$$I_3 = 0,878 \text{ A},$$

$$I_4 = 0,155 \text{ A},$$

$$I_5 = 0,723 \text{ A},$$

$$I_6 = 0,254 \text{ A}.$$

2. Составим баланс мощностей в расчетной схеме.

Согласно закону сохранения энергии мощность, вырабатываемая источниками энергии, равна суммарной мощности приемников электрической энергии. Уравнение баланса мощностей имеет вид:

$$\sum_{k=1}^n P_{ист} = \sum_{k=1}^n P_{пр}.$$

Мощность источников ЭДС:

$$P_{ист} = E_3 I_3 + E_4 I_4 + E_5 I_5 = 54 \cdot 0,878 + 10 \cdot 0,155 + 19 \cdot 0,723 = 62,707 \text{ Вт}.$$

Суммарная мощность приемников:

$$\sum_{k=1}^n P_{np} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 = 0,624^2 \cdot 39 + 0,099^2 \cdot 43 + \\ + 0,878^2 \cdot 34 + 0,155^2 \cdot 91 + 0,723^2 \cdot 26 + 0,254^2 \cdot 79 = 62,707 \text{ Вт.}$$

Баланс мощностей выполняется:

$$\sum_{k=1}^n P_{ист} = \sum_{k=1}^n P_{np} \text{ или } 62,707 \text{ Вт} = 62,707 \text{ Вт.}$$

3. Определим показание вольтметра из уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа:

$$U_V = I_5 R_5 - I_4 R_4 = 0,723 \cdot 26 - 0,155 \cdot 91 = 4,729 \text{ В.}$$

4. Определим ток I_1 в ветви с сопротивлением R_1 по методу эквивалентного генератора.

Ток I_1 по методу эквивалентного генератора может быть выражен следующим образом:

$$I_1 = \frac{U_{xx}}{R_{вх} + R_1}.$$

Определим напряжение холостого хода и входное сопротивление.

Изобразим схему электрической цепи без первой ветви и обозначим на ней токи в ветвях (см. рис. 3).

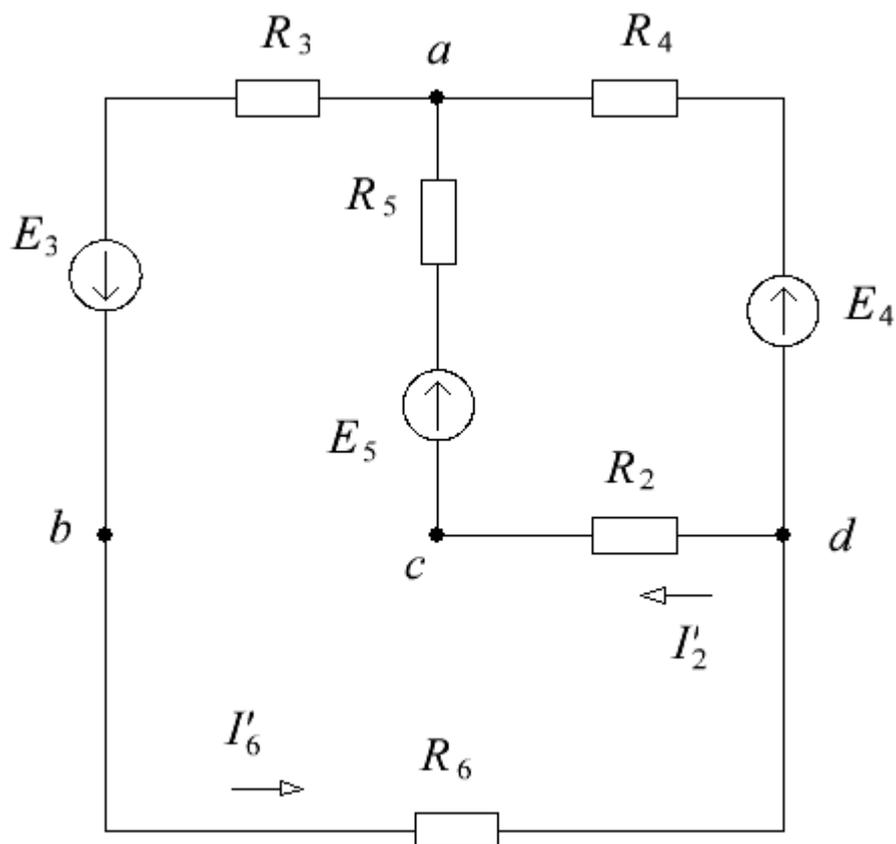


Рисунок 3 – Схема эквивалентного генератора

Определим токи в ветвях, применив метод двух узлов:

$$U_{ad} = \frac{-E_3 G_{36} + E_4 G_4 + E_5 G_{25}}{G_{36} + G_4 + G_{25}} = \frac{-54 \cdot 0,00885 + 10 \cdot 0,01099 + 19 \cdot 0,01449}{0,0085 + 0,01099 + 0,01449} = -2,698 \text{ В},$$

где проводимости ветвей:

$$G_{25} = \frac{1}{R_2 + R_5} = \frac{1}{43 + 26} = 0,01449 \text{ См},$$

$$G_{36} = \frac{1}{R_3 + R_6} = \frac{1}{34 + 79} = 0,00885 \text{ См},$$

$$G_4 = \frac{1}{R_4} = \frac{1}{91} = 0,01099 \text{ См}.$$

Определим токи в ветвях:

$$I'_2 = (E_5 - U_{ad}) \cdot G_{25} = (19 - (-2,698)) \cdot 0,01449 = 0,314 \text{ А},$$

$$I'_6 = (E_3 + U_{ad}) \cdot G_{36} = (54 + (-2,698)) \cdot 0,00885 = 0,454 \text{ А}.$$

Напряжение холостого хода определяем из уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа для второго контура:

$$U_{xx} = I'_2 R_2 + I'_6 R_6 = 0,314 \cdot 43 + 0,454 \cdot 79 = 49,388 \text{ В.}$$

Определим входное сопротивление генератора. Исключим из цепи все источники ЭДС и определим сопротивление относительно узлов c и b . Заменяем треугольник сопротивлений $R_2 R_4 R_5$ эквивалентной звездой (см. рис. 4):

$$R_{24} = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_2 + R_4 + R_5} = \frac{43 \cdot 91}{43 + 91 + 26} = 24,456 \text{ Ом,}$$

$$R_{25} = \frac{R_2 \cdot R_5}{R_2 + R_4 + R_5} = \frac{43 \cdot 26}{43 + 91 + 26} = 6,987 \text{ Ом,}$$

$$R_{45} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_2 + R_4 + R_5} = \frac{91 \cdot 26}{43 + 91 + 26} = 14,787 \text{ Ом.}$$

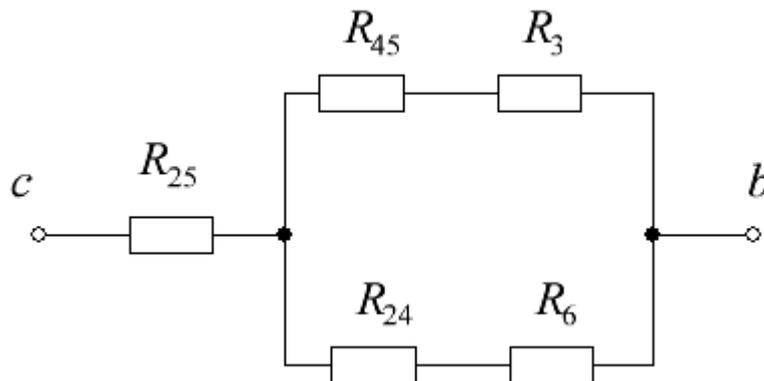


Рисунок 4 – Схема для определения входного сопротивления

$$R_{вх} = R_{25} + \frac{(R_{45} + R_3) \cdot (R_{24} + R_6)}{(R_{45} + R_3) + (R_{24} + R_6)} = 6,987 + \frac{(14,787 + 34) \cdot (24,456 + 79)}{(14,787 + 34) + (24,456 + 79)} = 40,141 \text{ Ом.}$$

Ток I_1 по методу эквивалентного генератора:

$$I_1 = \frac{49,388}{40,11 + 39} = 0,624 \text{ А.}$$

5. Построим график зависимости $I_1 = f(R)$ при изменении $R < R_1 < 10R$.

В п. 4 была получена зависимость $I_1 = f(R)$:

$$I_1(R_1) = \frac{U_{xx}}{R_{6x} + R_1} = \frac{49,388}{40,141 + R_1}.$$

Задаваясь значениями сопротивления R_1 в диапазоне от 0 до $10R_1$ Ом, построим график зависимости (см. рис. 5).

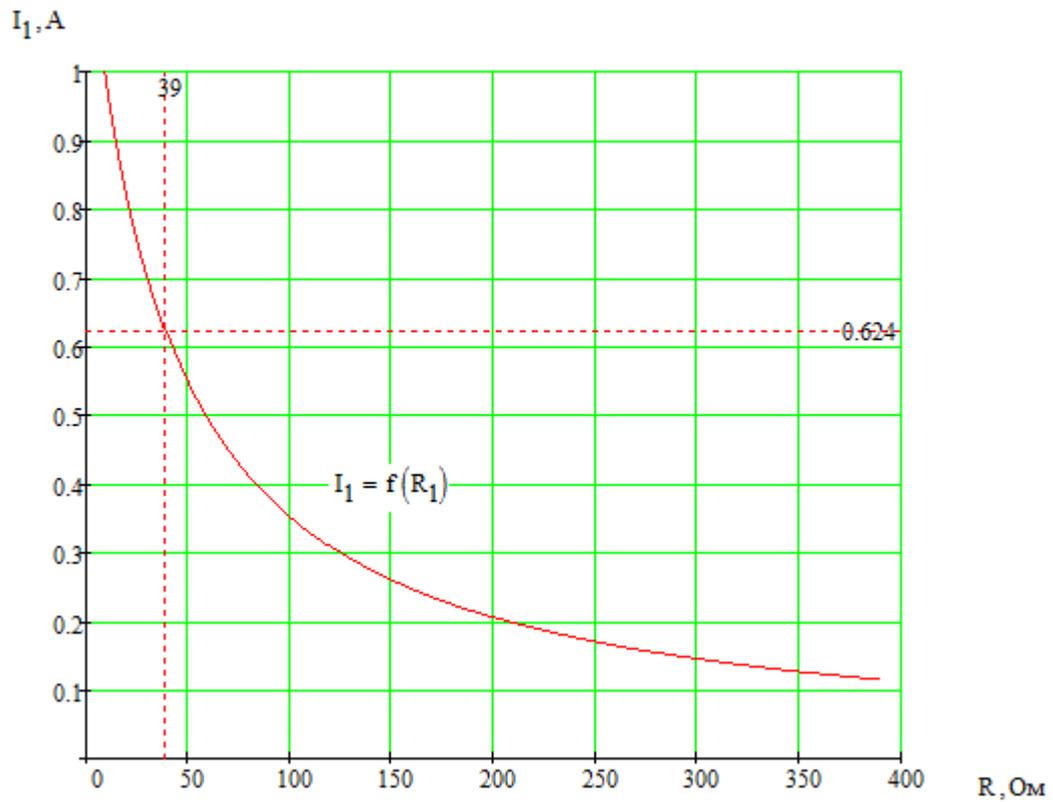


Рисунок 5 – График зависимости

Задача ЭЦ-2. Расчет электрической цепи однофазного переменного тока

Задание:

В сеть включены по приведенной схеме две ветви, требуется:

- 1) Определить показания приборов.
- 2) Вычислить полную комплексную мощность цепи.
- 3) Рассчитать параметры элемента X (индуктивности или емкости), при включении которого в цепи наступит резонанс токов.
- 4) Построить векторные диаграммы токов и напряжений для режимов до и после подключения компенсирующего элемента.

Исходные данные приведены в таблице 2. Схема электрической цепи изображена на рисунке 6.

Таблица 2 – Исходные данные

R_1 , Ом	L_1 , мГн	C_2 , мкФ	U , В	f , Гц
10	440	43	220	70

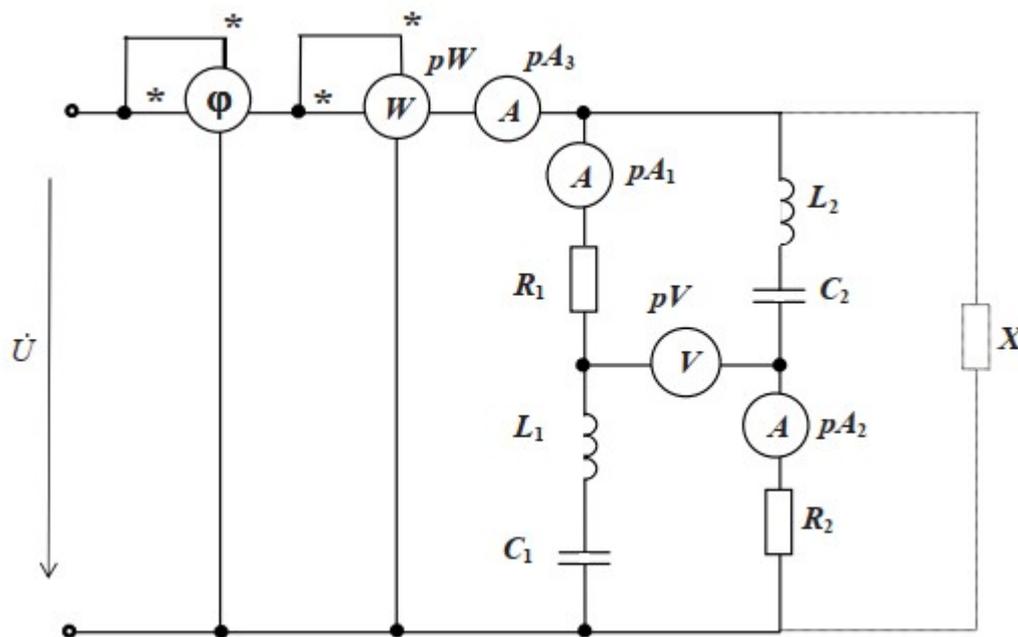


Рисунок 6 – Схема электрической цепи

Решение:

1. Изобразим схему электрической цепи без измерительных приборов и покажем на ней произвольно выбранные направления токов в ветвях (см. рис. 7).

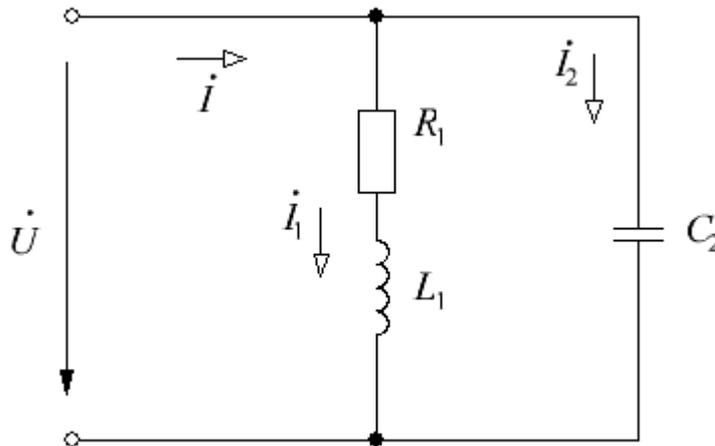


Рисунок 7 – Расчетная схема электрической цепи

2. Определим сопротивления реактивных элементов цепи:

$$X_{L1} = 2\pi f L_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 70 \cdot 440 \times 10^{-3} = 193,522 \text{ Ом},$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi f C_2} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 70 \cdot 43 \times 10^{-6}} = 52,875 \text{ Ом}.$$

3. Определим сопротивление ветвей цепи в комплексном виде (см. рис. 8):

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{L1} = 10 + j193,522 = 193,78e^{j87^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_2 = -jX_{C2} = -j52,875 = 52,875e^{-j90^\circ} \text{ Ом}.$$

4. Определение действующих значений токов в ветвях.

Для определения токов в параллельных ветвях цепи используем закон Ома:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_1} = \frac{220}{193,78e^{j87^\circ}} = 1,135e^{-j87^\circ} = 0,059 - j1,134 \text{ А},$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_2} = \frac{220}{52,875e^{-j90^\circ}} = 4,161e^{j90^\circ} = j4,161 \text{ А}.$$

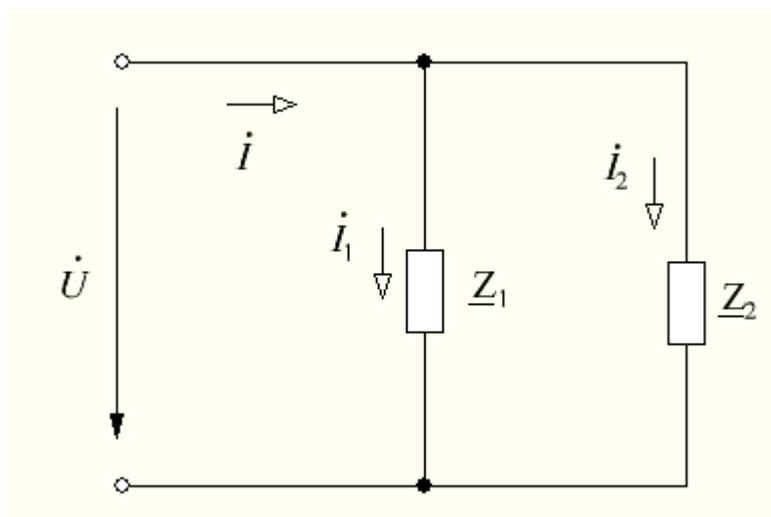


Рисунок 8 – Схема замещения электрической цепи

Ток в неразветвленной части цепи определяем по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0,059 - j1,134 + j4,161 = 0,059 + j3,027 = 3,027e^{j88,9^\circ} \text{ А.}$$

5. Определим напряжения на отдельных элементах цепи:

$$\dot{U}_{R1} = \dot{I}_1 \cdot R_1 = 1,135e^{-j87^\circ} \cdot 10 = 11,35e^{-j87^\circ} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{L1} = \dot{I}_1 \cdot jX_{L1} = 1,135e^{-j87^\circ} \cdot 193,522e^{j90^\circ} = 219,707e^{j3^\circ} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{C2} = \dot{U} = 220 \text{ В.}$$

6. Вычислим полную комплексную мощность цепи:

$$\tilde{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = 220 \cdot 3,027e^{-j88,9^\circ} = 666,05e^{-j88,9^\circ} = 12,889 - j665,925 \text{ ВА,}$$

где \dot{I}^* – комплексно-сопряженный ток.

7. Построим на комплексной плоскости векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений (см. рис. 9).

8. Определим показания измерительных приборов.

Амперметры покажут действующие значения токов в ветвях:

$$PA_1 = |\dot{I}_1| = 1,1335 \text{ А, } PA_2 = |\dot{I}_2| = 4,161 \text{ А, } PA_3 = |\dot{I}| = 3,027 \text{ А.}$$

Вольтметр покажет действующее значение напряжения на индуктивности:

$$PV = U_{L1} = 219,707 \text{ В.}$$

Ваттметр покажет активную мощность, потребляемую цепью:

$$PW = \operatorname{Re}(S) = 12,889 \text{ Вт.}$$

Фазометр покажет угол сдвига фаз между током и напряжением на входе цепи:

$$P\varphi = \arccos\left(\frac{\operatorname{Re}(Z_{12})}{|Z_{12}|}\right) = \arccos\left(\frac{1,406}{72,667}\right) = 88,9 \text{ град.}$$

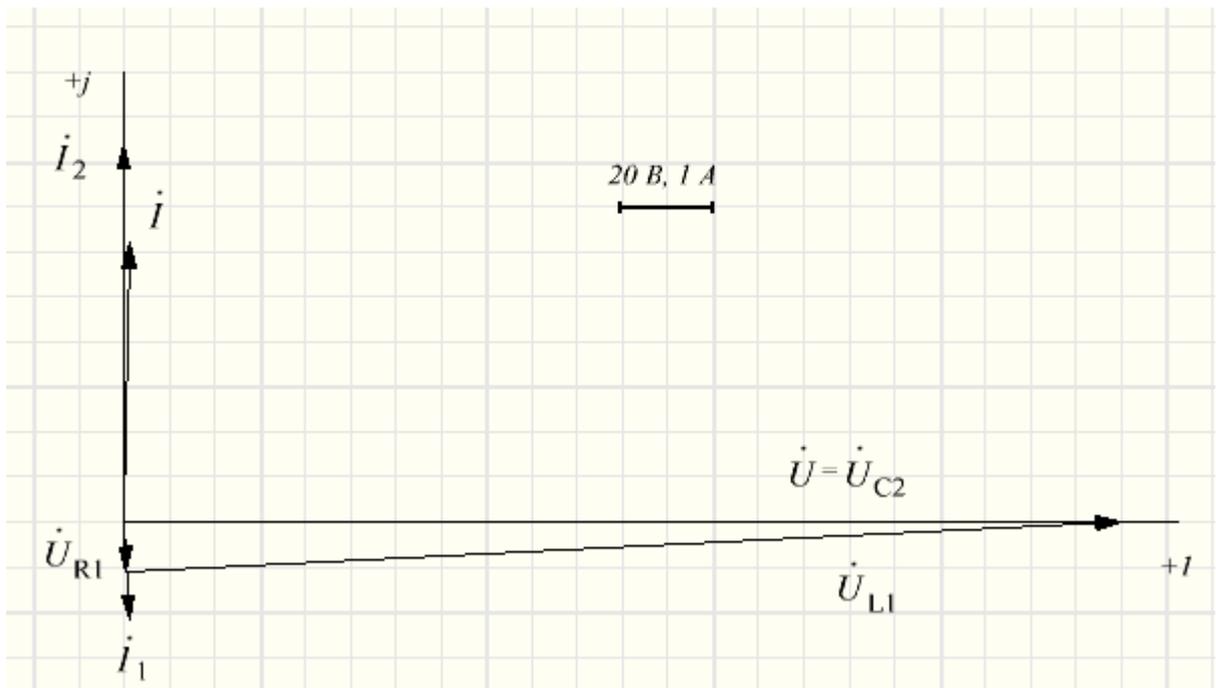


Рисунок 9 – Векторная диаграмма токов и напряжений

9. Определим параметры компенсирующего элемента

Определим общее сопротивление параллельных ветвей

$$\underline{Z}_{12} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{193,78e^{j87^\circ} \cdot 52,875e^{-j90^\circ}}{10 + j193,522 + (-j52,875)} = 72,667e^{-j88,9^\circ} = 1,406 - j72,654 \text{ Ом.}$$

Определим общую проводимость:

$$\underline{Y}_{12} = \frac{1}{\underline{Z}_{12}} = \frac{1}{72,667e^{-j88,9^\circ}} = 0,01376e^{j88,9^\circ} = 0,00027 + j0,01376 \text{ См.}$$

Таким образом, для получения резонанса токов в цепи необходимо подключить индуктивность с реактивной проводимостью $b = 0,01376 \text{ См.}$

Определим сопротивление компенсирующего элемента:

$$X = \frac{1}{b} = \frac{1}{0,01376} = 72,681 \text{ Ом.}$$

Ток в неразветвленной части цепи при резонансе:

$$\dot{i} = 0,059 \text{ A.}$$

Построим векторную диаграмму токов и напряжений при резонансе (см. рис. 10).

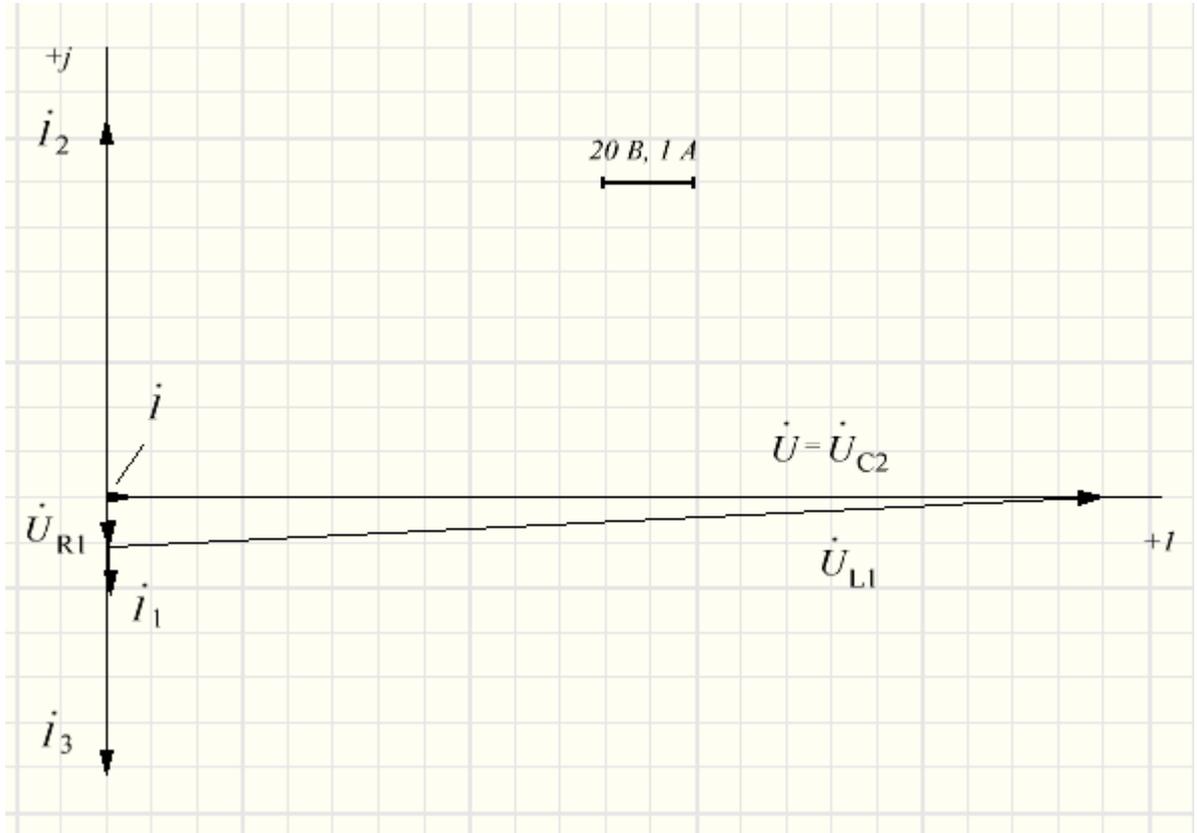


Рисунок 10 – Векторная диаграмма токов и напряжений в цепи при наличии компенсирующего устройства

Задача ЭЦ-3. Расчет трехфазной цепи

В трехфазную сеть включены однофазные приемники, которые образуют симметричную и несимметричную нагрузки (см. рис. 11).

При заданном напряжении сети и параметрах приемников требуется:

- 1) Составить схему включения приемников.
- 2) Определить линейные и фазные токи в каждом трехфазном приемнике.
- 3) Построить векторные диаграммы токов и напряжений каждого приемника.
- 4) Определить активную и реактивную мощности каждого приемника.
- 5) Составить схему включения ваттметров для измерения активной мощности каждого трехфазного приемника.

Таблица 3 – Исходные данные

	Сх.	$U_{Л},$ В	$R_1,$ Ом	$L_1,$ мГн	$C_1,$ мкФ	$R_2,$ Ом	$L_2,$ мГн	$C_2,$ мкФ	$R_3,$ Ом	$L_3,$ мГн	$C_3,$ мкФ
симметр.	Y	220	91	-	43	-	-	-	-	-	-
несимметр.	Δ		91	790	-	77	-	69	10	440	-

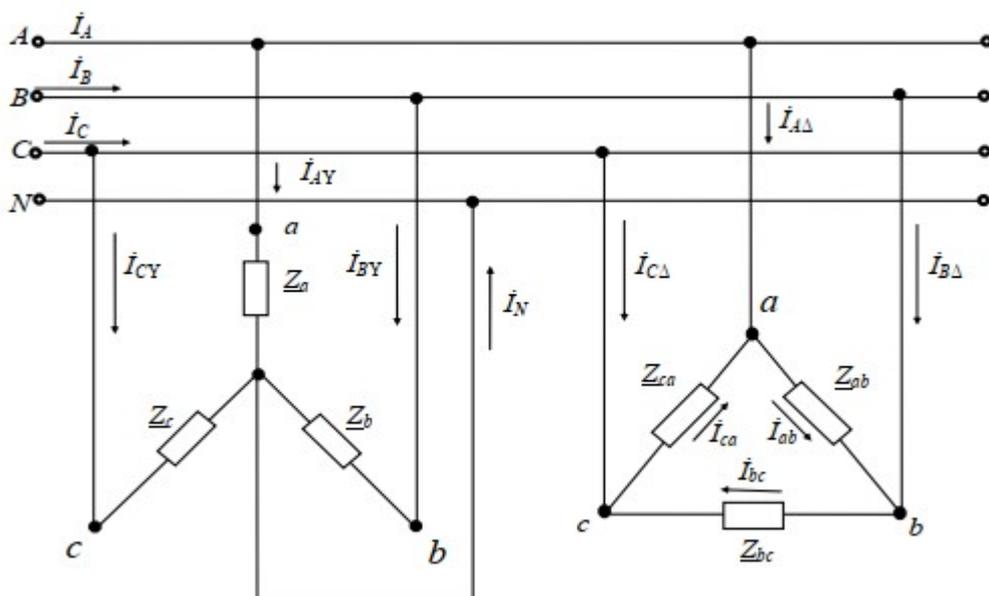


Рисунок 11 – Схема электрической цепи

Решение:

1. Составим согласно исходных данных схему электрической цепи (см. рис. 12).

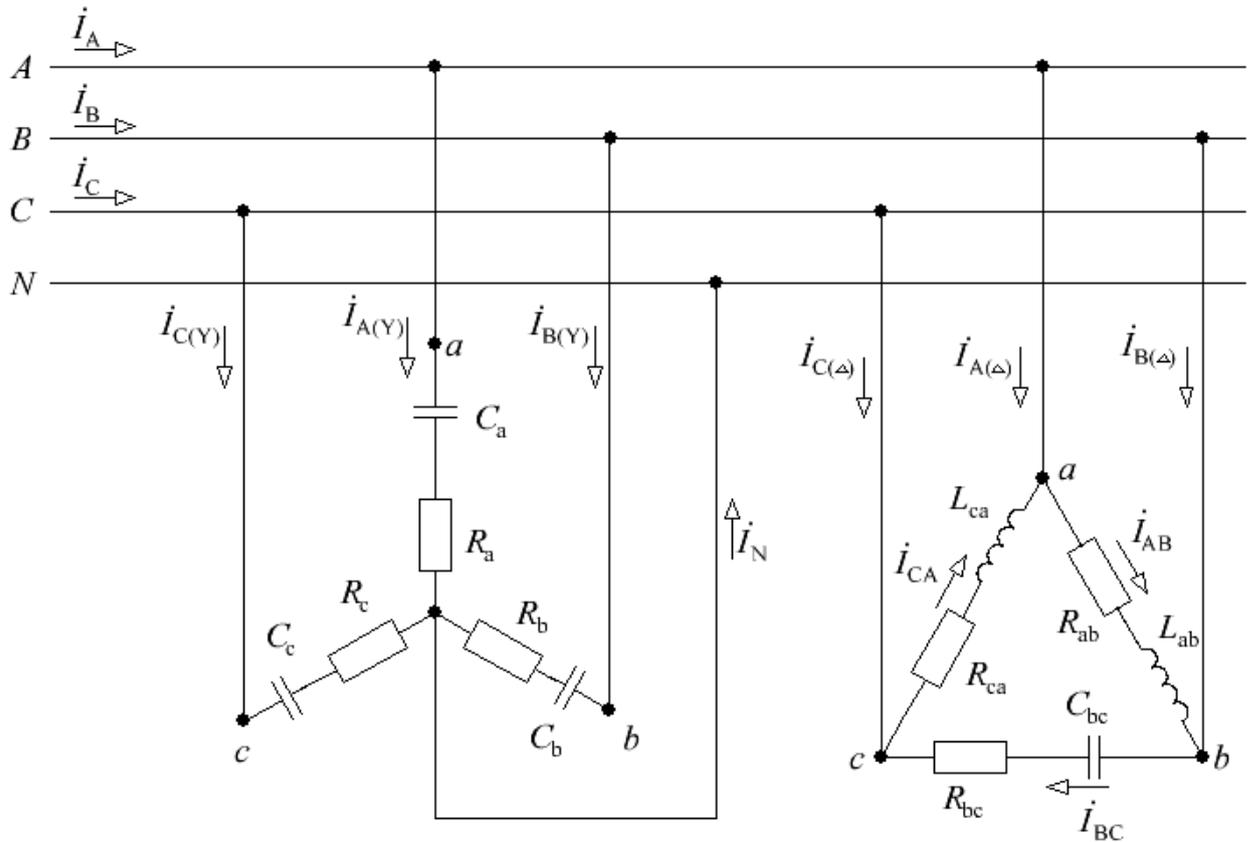


Рисунок 12 – Схема электрической цепи

2. Группа потребителей, соединенных по схеме «звезда» (симметричная нагрузка).

Так как цепь симметрична, то расчет напряжений и токов выполняем только для одной фазы, напряжения и токи в других фазах сдвинуты на угол 120 градусов.

2.1. Определим сопротивления реактивных элементов:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 43 \times 10^{-6}} = 74,026 \text{ Ом.}$$

2.2. Определим комплексные сопротивления каждой фазы потребителей:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = R - jX_C = 91 - j74,026 = 117,306e^{-j39,1^\circ} \text{ Ом.}$$

2.3. Определим фазные напряжения потребителей:

$$\dot{U}_a = \frac{U_{\Delta} e^{j0^\circ}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127,017 \text{ В},$$

$$\dot{U}_b = U_a e^{-j120^\circ} = 127,017 e^{-j120^\circ} = -36,662 - j63,5 \text{ В},$$

$$\dot{U}_c = U_a e^{j120^\circ} = 73,323 e^{j120^\circ} = -36,662 + j63,5 \text{ В}.$$

2.4. Определим фазные (линейные) токи потребителей:

$$\dot{I}_a^Y = \frac{\dot{U}_a}{Z_a} = \frac{127,017}{117,306 e^{-j39,1^\circ}} = 1,083 e^{j39,1^\circ} = 0,84 + j0,683 \text{ А},$$

$$\dot{I}_b^Y = 1,083 e^{-j80,9^\circ} = 0,172 - j1,069 \text{ А},$$

$$\dot{I}_c^Y = 1,083 e^{j159,1^\circ} = -1,012 + j0,386 \text{ А}.$$

2.5. Так как нагрузка симметрична, ток в нулевом проводе равен нулю:

$$\dot{I}_N = 0 \text{ А}.$$

2.6. Определим активную и реактивную мощности:

$$P = P_a + P_b + P_c = 3P_a = 3I_a^2 R = 3 \cdot 1,083^2 \cdot 91 = 320,069 \text{ Вт},$$

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = 3Q_a = 3I_a^2 (-X_C) = 3 \cdot 1,083^2 \cdot (-74,026) = -260,366 \text{ вар}.$$

2.7. Построим векторную диаграмму для группы потребителей, соединенных по схеме «звезда» (см. рис. 13):

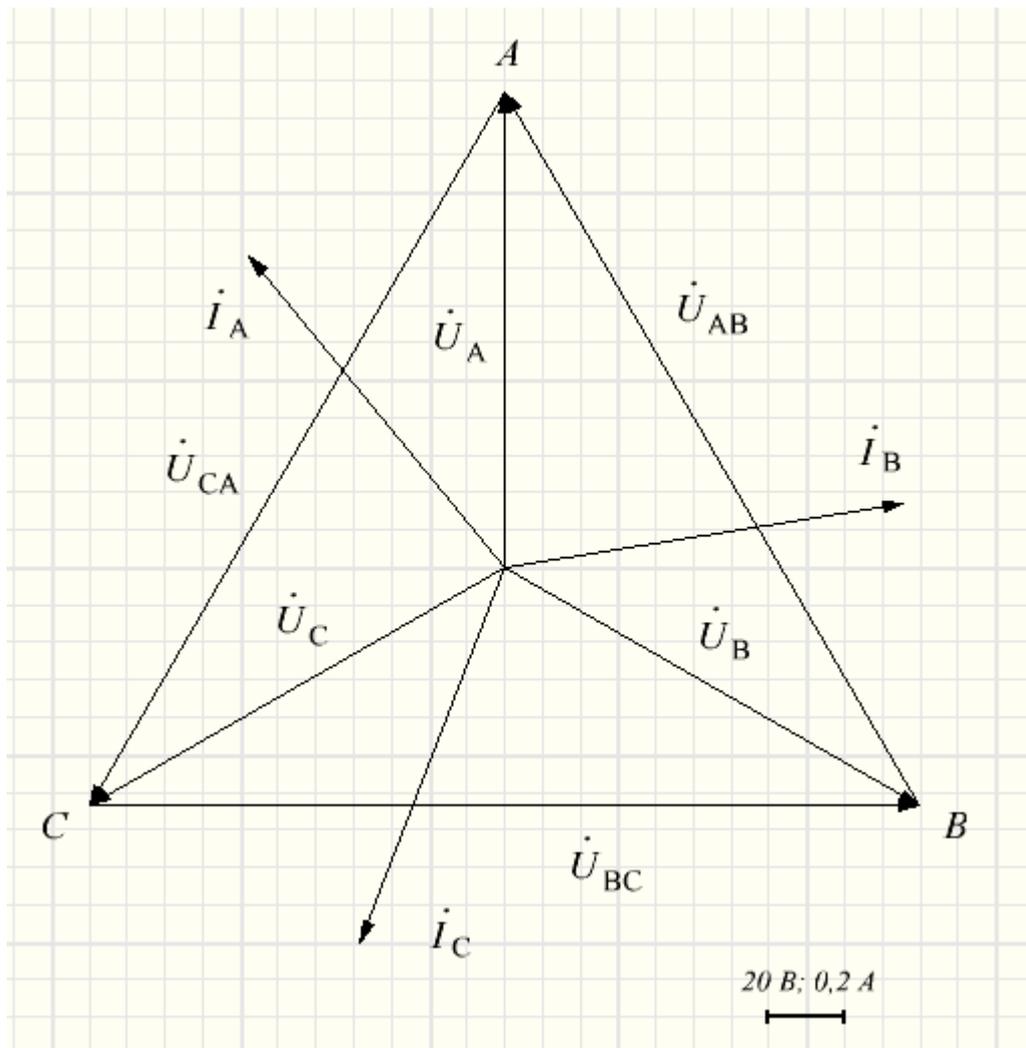


Рисунок 13 – Векторная диаграмма токов и напряжений симметричного приемника, соединенного по схеме «звезда»

3. Группа потребителей, соединенных по схеме «треугольник» (несимметричная нагрузка).

3.1. Определим сопротивления реактивных элементов:

$$X_{Lab} = 2\pi f L_{ab} = 2\pi \cdot 50 \cdot 790 \times 10^{-3} = 248,186 \text{ Ом},$$

$$X_{Cbc} = \frac{1}{2\pi f C_{bc}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 69 \times 10^{-6}} = 46,132 \text{ Ом},$$

$$X_{Lcc} = 2\pi f L_{ca} = 2\pi \cdot 50 \cdot 440 \times 10^{-3} = 138,23 \text{ Ом}.$$

3.2. Определим комплексные сопротивления каждой фазы потребителей:

$$\underline{Z}_{ab} = R_{ab} + jX_{Lab} = 91 + j248,186 = 264,343e^{j69,9^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_{bc} = R_{bc} - jX_{Cbc} = 77 - j46,132 = 89,762e^{-j30,9^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_{ca} = R_{ca} + jX_{Lca} = 91 + j138,23 = 138,591e^{j85,9^\circ} \text{ Ом}.$$

3.3. Определим фазные напряжения потребителей:

$$\dot{U}_{ab} = U_{\text{л}} e^{j30^\circ} = 220e^{j30^\circ} = 190,526 + j110 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{bc} = U_{\text{л}} e^{-j90^\circ} = 220e^{-j90^\circ} = -j220 \text{ В},$$

$$\dot{U}_{ca} = U_{\text{л}} e^{j150^\circ} = 220e^{j150^\circ} = -190,526 + j110 \text{ В}.$$

3.4. Определим фазные токи потребителей:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{220e^{j30^\circ}}{264,343e^{j69,9^\circ}} = 0,832e^{-j39,9^\circ} = 0,639 - j0,533 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{220e^{-j90^\circ}}{89,762e^{-j30,9^\circ}} = 2,451e^{-j59,1^\circ} = 1,26 - j2,102 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{220e^{j150^\circ}}{138,591e^{j85,9^\circ}} = 1,587e^{j64,1^\circ} = 0,692 + j1,428 \text{ А}.$$

3.5. Определим линейные токи группы потребителей, соединенных «треугольником»:

$$\dot{I}_A^\Delta = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 0,639 - j0,533 - (0,692 + j1,428) = -0,054 - j1,962 = 1,963e^{-j91,6^\circ} \text{ А},$$

$$\dot{I}_B^\Delta = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = 1,26 - j2,102 - (0,639 - j0,533) = 0,621 - j1,569 = 1,687e^{-j68,4^\circ} \text{ А},$$

$$\dot{I}_C^\Delta = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 0,692 + j1,428 - (1,26 - j2,102) = -0,567 + j3,531 = 3,576e^{j99,1^\circ} \text{ А}.$$

3.6. Определим активную и реактивную мощности:

$$P = I_{ab}^2 R_{ab} + I_{bc}^2 R_{bc} + I_{ca}^2 R_{ca} = 0,832^2 \cdot 91 + 2,451^2 \cdot 77 + 1,587^2 \cdot 10 = 550,775 \text{ Вт},$$

$$Q = I_{ab}^2 X_{Lab} + I_{bc}^2 (-X_{Cbc}) + I_{ca}^2 X_{Lca} = 0,832^2 \cdot 248,186 + 2,451^2 \cdot (-46,132) + 1,587^2 \cdot 138,23 = 243,104 \text{ вар}.$$

3.7. Построим векторную диаграмму для группы потребителей, соединенных по схеме «треугольник» (см. рис. 14):

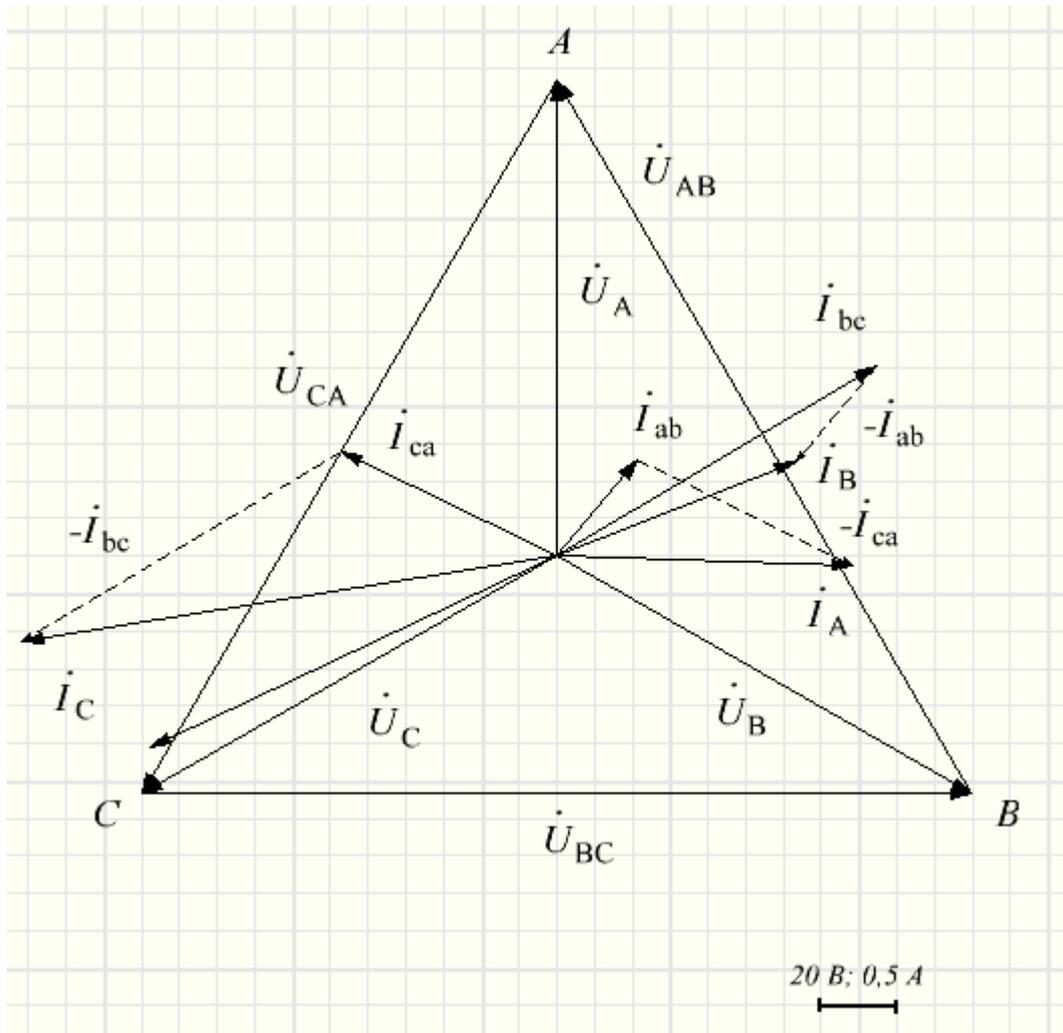


Рисунок 14 – Векторная диаграмма токов и напряжений несимметричного приемника, соединенного по схеме «треугольник»

4. Составим схему включения ваттметров для измерения активной мощности каждого трехфазного приемника (см. рис. 15).

При симметричной нагрузке достаточно одного ваттметра, при несимметричной – два ваттметра.

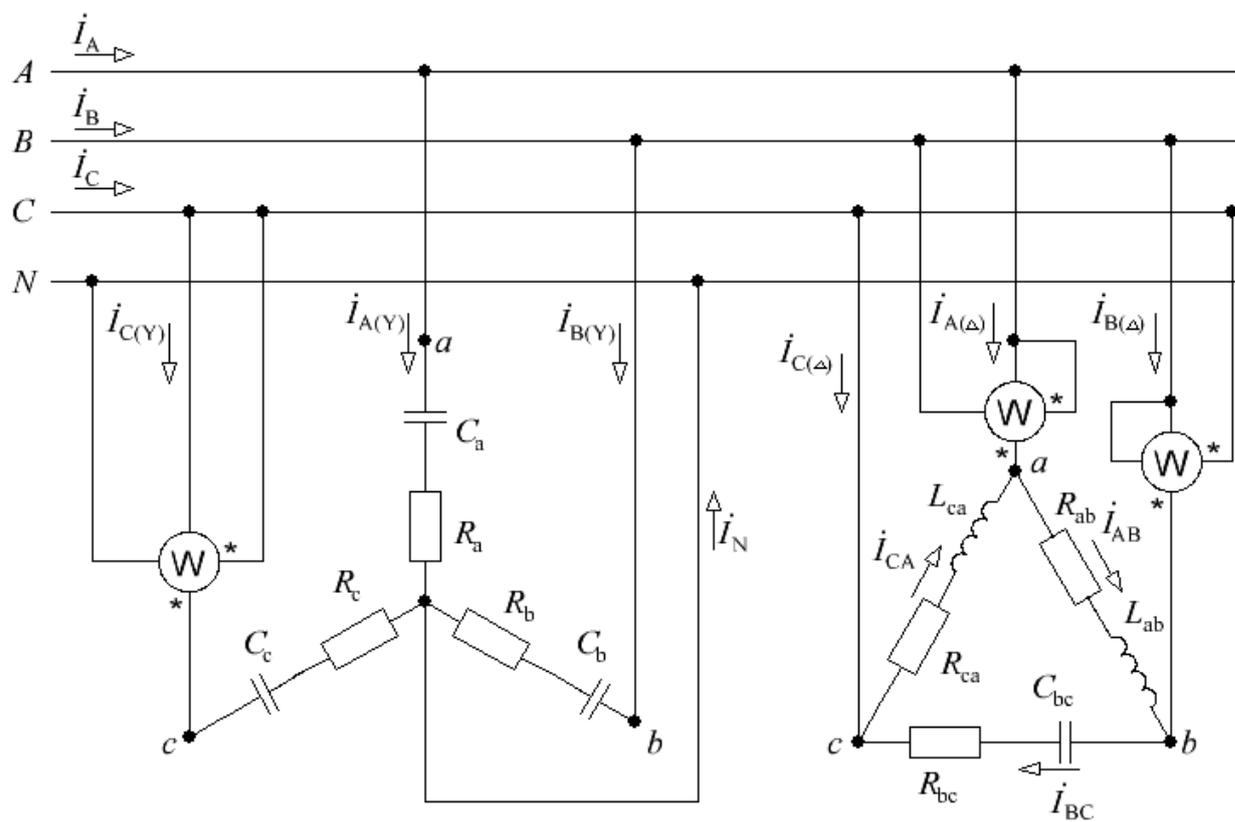


Рисунок 15 –Схема включения ваттметров

Задача МЦ-1. Расчет характеристик силовых трансформаторов

По техническим данным трехфазного двухобмоточного трансформатора (см. таблицу 4) требуется:

1. Рассчитать и изобразить Т-образную схему замещения одной фазы.
При коэффициентах нагрузки $\beta = 0,05; 0,2; 0,4; 0,8; 1,0; 1,2$;
2. Построить внешнюю характеристику $U_2 = f(\beta)$;
3. Определить и построить зависимости:
 - а) КПД $\eta = f(\beta)$;
 - б) отклонение напряжения $\Delta U_2 = f(\beta)$;
4. Построить векторную диаграмму трансформатора.

Характер нагрузки – RL , коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,9$.

Таблица 4 – Исходные данные для расчёта

Тип трансформатора	Схема соединения обмоток	$S_{ном},$ кВ·А	$U_{1ном},$ кВ	$U_{2ном},$ кВ	$\Delta P_x,$ кВт	$\Delta P_k,$ кВт	$i_x,$ %	$u_k,$ %
ТМ-40/10	Y/Y _n -0	40	6,3	0,4	0,240	0,88	4,5	4,5

Решение:

1. Составим Т-образную схему замещения трансформатора (см. рис. 16).

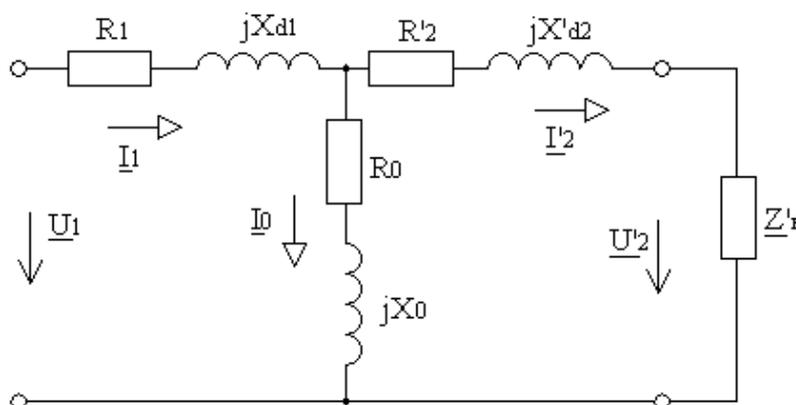


Рисунок 16 – Т-образная схема замещения трансформатора

2. Определим параметры Т-образной схемы замещения и сопротивления обмоток R_1 , X_{d1} , R_2 и X_{d2} .

2.1. Номинальные фазные (линейные) токи первичной и вторичной обмоток:

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{1ном}} = \frac{40 \times 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \times 10^3} = 3,666 \text{ А,}$$

$$I_{2ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{2ном}} = \frac{40 \times 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \times 10^3} = 57,735 \text{ А.}$$

2.2. Номинальные фазные напряжения при схеме соединения обмоток трансформатора по схеме «звезда-звезда»:

$$U_{1ф.н} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3}} = \frac{6,3 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 3637,307 \text{ В,}$$

$$U_{2ф.н} = \frac{U_{2ном}}{\sqrt{3}} = \frac{0,4 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 230,94 \text{ В.}$$

2.3. Коэффициент трансформации трансформатора:

$$k = \frac{U_{1ф.н}}{U_{2ф.н}} = \frac{3637,307}{230,94} = 15,75.$$

2.4. Ток холостого хода:

$$I_{10} = \frac{4,5\%}{100\%} I_{1н} = 0,045 \cdot 3,666 = 0,165 \text{ А.}$$

2.5. Расчетные сопротивления (сопротивления ветви намагничивания):

$$Z_0 = \frac{U_{1ф.н}}{I_{10}} = \frac{3637,307}{0,165} = 22050 \text{ Ом,}$$

$$R_0 = \frac{\Delta P_x}{3I_{10}^2} = \frac{0,24 \times 10^3}{3 \cdot 0,165^2} = 2940 \text{ Ом,}$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{22050^2 - 2940^2} = 21853,121 \text{ Ом.}$$

2.6. Коэффициент мощности холостого хода:

$$\cos \varphi_0 = \frac{R_0}{Z_0} = \frac{2940}{22050} = 0,133.$$

2.7. Угол магнитных потерь:

$$\delta = 90^\circ - \varphi_0 = 90^\circ - 72,3^\circ = 7,7^\circ,$$

где $\varphi_0 = \arccos(0,133) \approx 82,3^\circ$.

2.8. Напряжение короткого замыкания:

$$U_K = \frac{u_K}{100\%} U_{1\phi.n} = \frac{4,5}{100} \cdot 3637,307 = 163,679 \text{ В.}$$

2.9. Сопротивления короткого замыкания:

$$Z_K = \frac{U_K}{I_{ном}} = \frac{163,679}{3,666} = 44,651 \text{ Ом,}$$

$$R_K = \frac{\Delta P_K}{3 I_{ном}^2} = \frac{0,88 \times 10^3}{3 \cdot 3,666^2} = 38,951 \text{ Ом,}$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{44,651^2 - 38,951^2} = 38,951 \text{ Ом.}$$

2.10. Коэффициент мощности короткого замыкания:

$$\cos \varphi_K = \frac{R_K}{Z_K} = \frac{21,829}{44,651} = 0,489,$$

$$\varphi_K = 60,7^\circ.$$

2.11. Сопротивления первичной обмотки и приведенные сопротивления вторичной обмотки:

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_K}{2} = \frac{21,829}{2} = 10,915 \text{ Ом,}$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_K}{2} = \frac{38,951}{2} = 19,476 \text{ Ом.}$$

2.12. Сопротивления вторичной обмотки:

$$R_2 = \frac{R'_2}{k^2} = \frac{10,915}{15,75^2} = 0,044 \text{ Ом,}$$

$$X_2 = \frac{X'_2}{k^2} = \frac{19,476}{15,75^2} = 0,079 \text{ Ом.}$$

3. Построим внешнюю характеристику $U_2 = f(\beta)$.

Для активно-индуктивного характера нагрузки:

$$\cos \varphi_2 = 0,9,$$

$$\sin \varphi_2 = \sqrt{1 - (\cos \varphi_2)^2} = \sqrt{1 - 0,9^2} = 0,436.$$

$$\varphi_2 = 25,8^\circ.$$

Изменение напряжения в режиме нагрузки:

$$\Delta u_2 \% = \beta u_k \cos(\varphi_2 - \varphi_k).$$

Отклонение напряжения описывается выражением:

$$\Delta U_2 = U_{2\text{ном}} \cdot \frac{\Delta u \%}{100}.$$

Внешняя характеристика:

$$U_2 = U_{2\text{ном}} - \Delta U_2.$$

КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + \beta^2 \Delta P_k + \Delta P_x}.$$

Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 5 – Результаты расчета

β	$\Delta u_2, \%$	$\Delta U_2, B$	U_2, B	η
0	0	0	400	0
0,05	0,185	0,738	399,262	0,959
0,2	0,738	2,953	397,047	0,971
0,4	1,476	5,906	394,094	0,972
0,8	2,953	11,812	388,188	0,97
1,0	3,691	14,764	385,236	0,966
1,2	4,429	17,717	382,283	0,962

Внешняя характеристика $U_2 = f(\beta)$ для активно-индуктивного характера нагрузки изображена на рисунке 17, характеристики $\Delta U_2 = f(\beta)$ и $\eta = f(\beta)$ – на рисунках 18 и 19 соответственно.

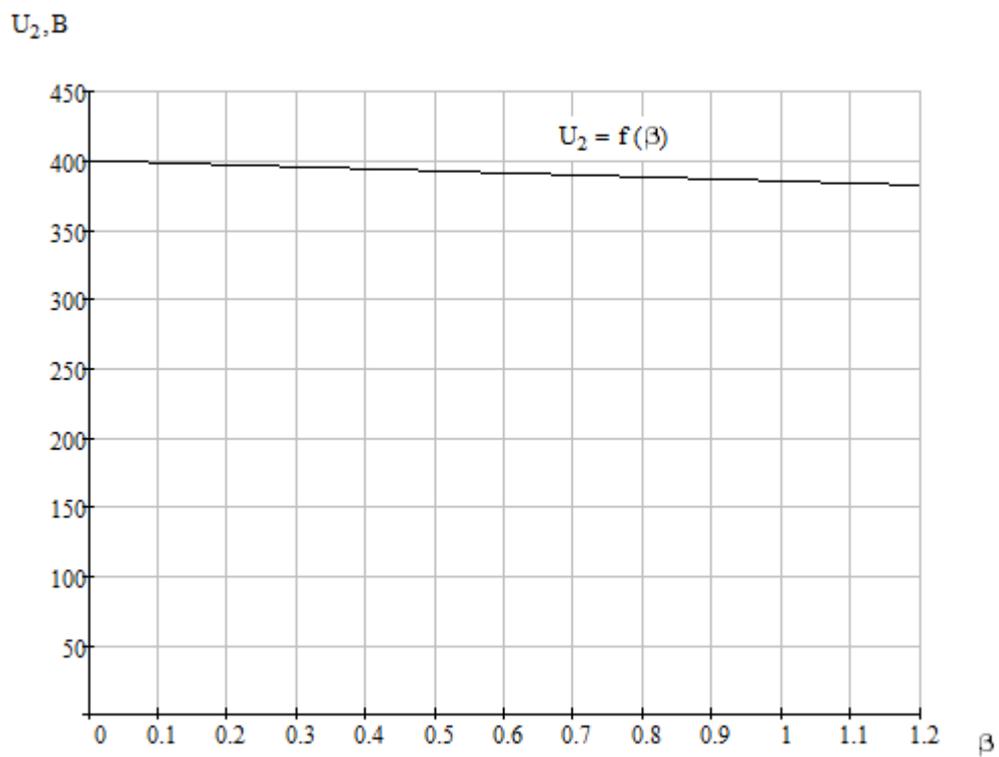


Рисунок 17 – Внешняя характеристика трансформатора

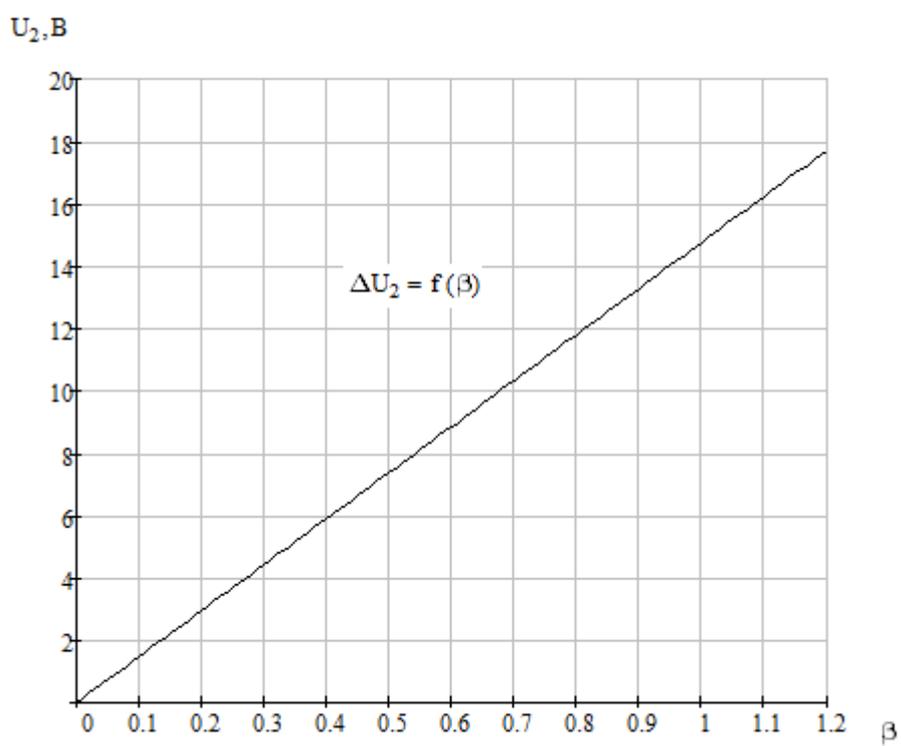


Рисунок 18 – Зависимость $\Delta U_2 = f(\beta)$

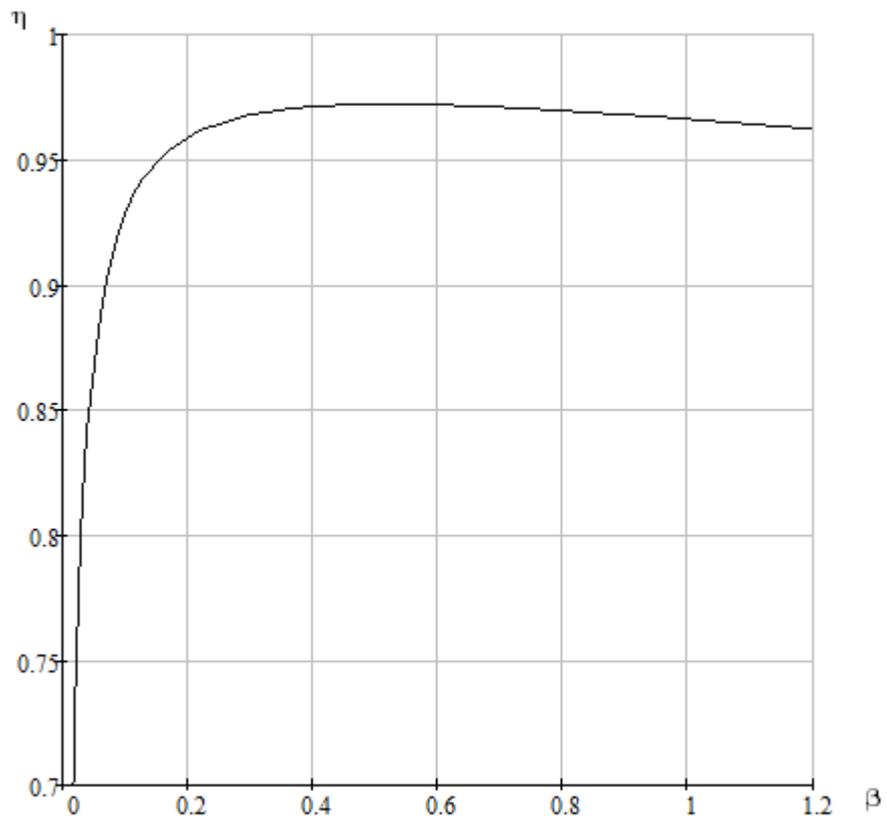


Рисунок 19 – Зависимость $\eta = f(\beta)$

4. Построим векторную диаграмму трансформатора в общем виде (см. рис. 20).

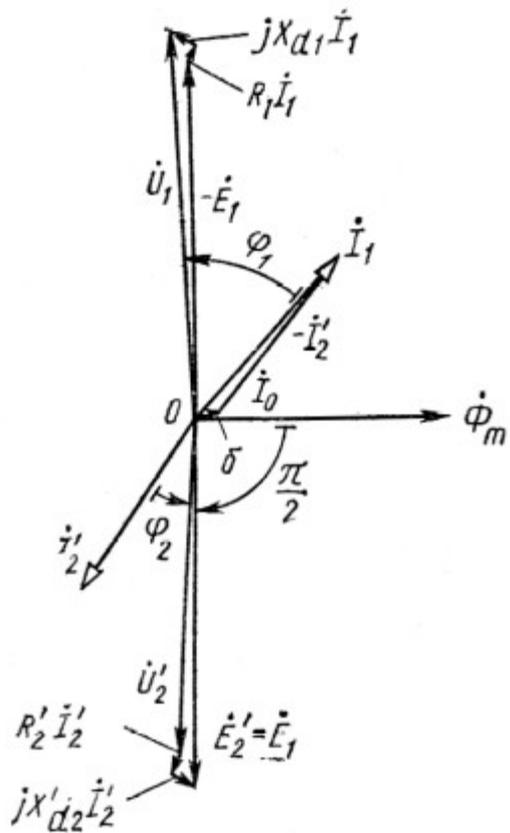


Рисунок 20 – Векторная диаграмма трансформатора

Задача ЭМ-1. Расчет характеристик асинхронных двигателей

По заданным параметрам асинхронного двигателя (см. таблицу 6):

- 1) определить схему включения обмотки статора;
- 2) рассчитать и построить механическую характеристику $n_2 = f(M)$ и характеристику "момент - скольжение" $M = f(s)$;
- 3) рассчитать значение пускового тока;
- 4) определить, возможен ли запуск электродвигателя при аварийном пониженном напряжении сети на $\Delta U, \%$;
- 5) рассчитать сечение токоподводящих проводов, приняв плотность тока 3 А/мм^2 .

Таблица 6 – Исходные данные

Тип двигателя	P_n , кВт	$U_{ном}$, В	$U_{сети}$, В	n_n , об/мин	η , %	$\cos \varphi_n$	α	β	λ	ΔU , %
RA200L8	15	380	380	730	88,0	0,8	5,7	2,0	2,5	7

Решение:

1. При подключении к сети напряжением 380 В обмотки трехфазного асинхронного двигателя с номинальным напряжением 380 соединяют по схеме «треугольник».

2. Число пар полюсов определяется из условного обозначения типа электродвигателя, в котором указывается число полюсов, следовательно, число пар полюсов:

$$2p = 4.$$

3. Определим синхронную частоту вращения магнитного поля статора:

$$n_0 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ об/мин}.$$

4. Определим номинальное скольжение ротора:

$$s_{ном} = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_0} = \frac{750 - 730}{750} = 0,027.$$

5. Определим номинальный момент на валу ротора:

$$M_{ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{ном}}{n_{ном}} = 9,55 \cdot \frac{15 \times 10^3}{730} = 196,233 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

6. Определим максимальный и пусковой моменты:

$$M_{max} = \lambda \cdot M_{ном} = 2,5 \cdot 196,233 = 490,582 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{пуск} = \beta \cdot M_{ном} = 2 \cdot 196,233 = 392,466 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

7. Определим критическое скольжение:

$$s_{кр} = s_H \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,027 \cdot (2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1}) = 0,128.$$

8. Задаваясь значениями скольжения, определим вращающий момент двигателя по формуле Клосса:

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}$$

и частоту вращения ротора двигателя по формуле:

$$n = n_0 \cdot (1 - s).$$

Результаты расчета сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты расчета точек механической характеристики

s	$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	$n, \text{об} / \text{мин}$
0	0	$n_0 = 750$
$s_H = 0,027$	$M_{ном} = 196,233$	$n_{ном} = 730$
0,1	476,213	675
$s_{кр} = 0,128$	$M_{max} = 490,582$	596,3
1	$M_{пуск} = 392,466$	0

Характеристики двигателя вида $n_2 = f(M)$ и $M = f(s)$ изображены на рисунках 21 и 22.

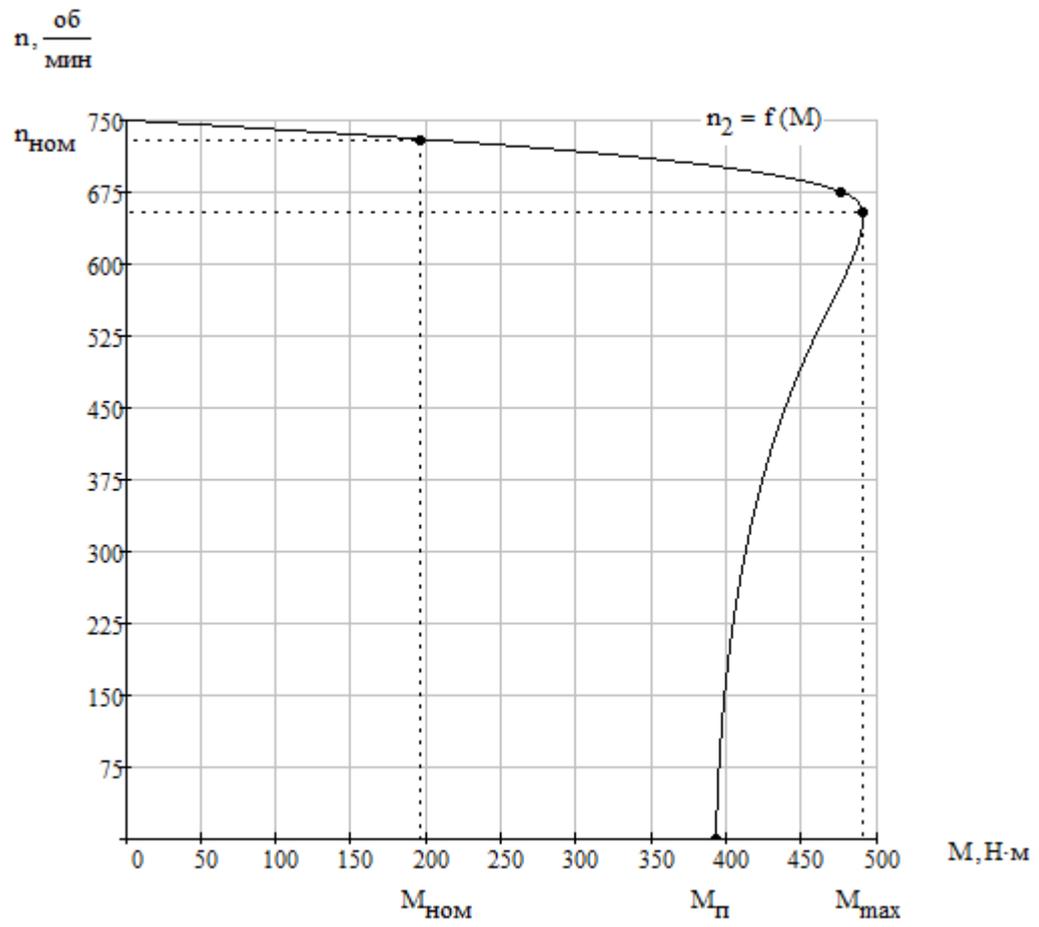


Рисунок 21 – Механическая характеристика двигателя $n_2 = f(M)$

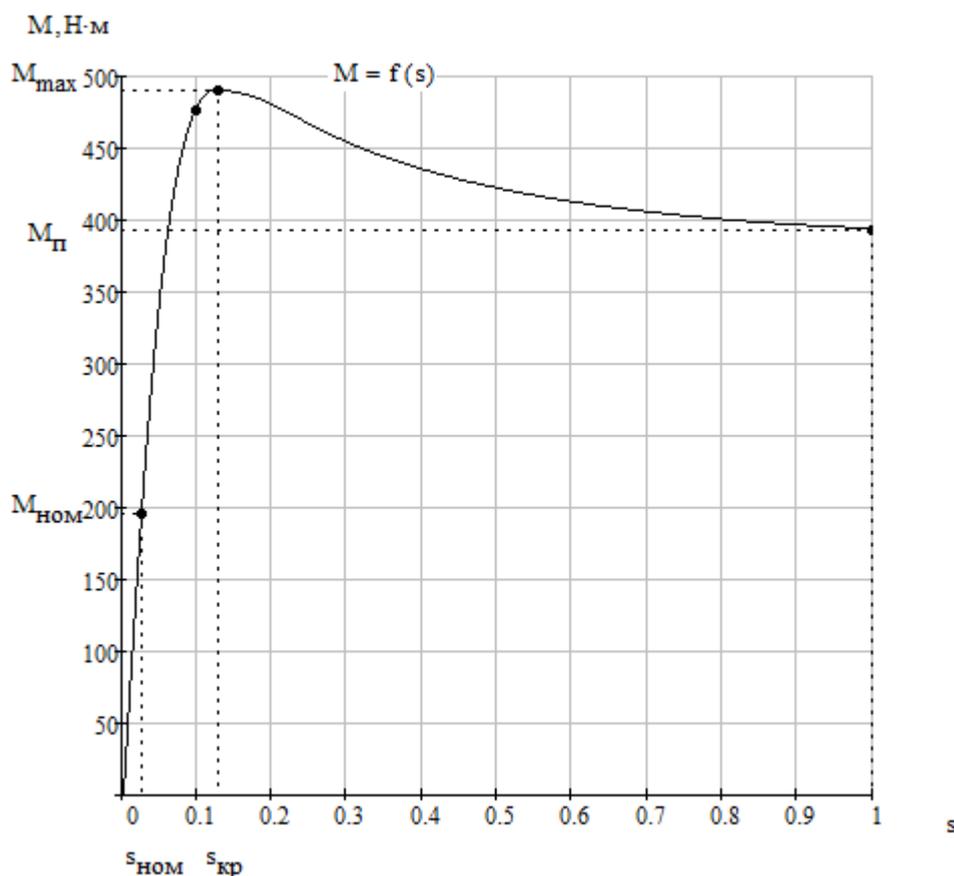


Рисунок 22 – Механическая характеристика двигателя $M = f(s)$

9. Определим номинальный и пусковой токи:

$$I_{1н} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3}U_{ном}\eta \cos \varphi_n} = \frac{15 \times 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,88 \cdot 0,8} = 32,372 \text{ А},$$

$$I_{1пуск} = \alpha \cdot I_{1н} = 5,7 \cdot 32,372 = 184,522 \text{ А}.$$

10. Определим, возможен ли запуск электродвигателя при аварийном пониженном напряжении сети на $\Delta U, \%$.

Вращающий момент при снижении напряжения:

$$M' = \left(1 - \frac{\Delta U \text{ \%}}{100}\right)^2 \cdot M_{ном} = \left(1 - \frac{7}{100}\right)^2 \cdot 196,233 = 169,722 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой момент при снижении напряжения:

$$M'_{пуск} = \beta \cdot M' = 2 \cdot 169,722 = 339,444 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Так как $M'_{пуск} > M_{ном}$, то пуск двигатель возможен.

Список используемой литературы

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники [Текст] / Л. А. Бессонов. - М.: Высш. шк., 1984. - 527 с.
2. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей [Текст] / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. - М. : Энергоатомиздат, 1989. - 529 с.
3. Поливанов, К. М. Теоретические основы электротехники [Текст] / К. М. Поливанов. - М.: Энергия, 1975. - 239 с.
4. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники [Текст] / Г. И. Атабеков. - М. : Энергия, 1978. - 245 с.