

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования

ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет приборостроения, информационных технологий и электроники

Кафедра «Электроэнергетика и электротехника»

КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине: «Теоретические основы электротехники»
на тему: «Исследование режимов работы трехфазной цепи
и анализ переходных процессов»

Выполнил: студент гр. 14ПЭ2

Чернобаев Е. С.

Проверил: зав. кафедрой,
к.т.н., профессор

Ашанин В.Н.

12.05.2016

Реферат

Трехфазные электрические цепи являются основой сетей и систем энергоснабжения, обеспечивающих энергией промышленные предприятия и жилые районы, которые, с точки зрения электроэнергетики, являются потребителями различного характера.

На промышленных предприятиях в трехфазную сеть включаются различные станки и аппараты, в преобладающей части которых электрическая энергия преобразуется в механическую и тепловую. Нагрузка по фазам распределена более равномерно в основном из-за наличия большого количества трехфазных электрических машин, представляющие для сети симметричную нагрузку, и из-за лучшей организации подключения к сети других элементов потребления.

Электрические машины часто работают в недогруженном режиме, при котором коэффициент мощности достаточно низок.

Это снижает эффективность работы электростанций и линий передачи электрической энергии. Для улучшения коэффициента мощности на практике используются как автоматические системы, так и электромашинные компенсаторы реактивного тока или реактивной мощности. Такие устройства устанавливаются в местах ввода фидеров электропитания на предприятия, что позволяет контролировать коэффициент мощности перед компенсатором и после.

При эксплуатации сетей и систем электроснабжения нередки случаи подключения и отключения от промышленной сети мощных потребителей. Не удастся избежать и аварийных режимов работы сети, в частности, связанных с появлением неисправностей в электромашинных установках, вызванных короткими замыканиями в обмотках. Это приводит к переходу работы электрической сети из одного в другой устойчивый энергетический режим.

Возникающий переходный процесс необходимо анализировать как для правильного проектирования устройств защиты, так и для определения законов изменения токов и напряжений в сети, поскольку переходный процесс может привести к перенапряжениям и перегрузкам по току. Это может привести к выводу из строя дорогостоящего оборудования.

Задание

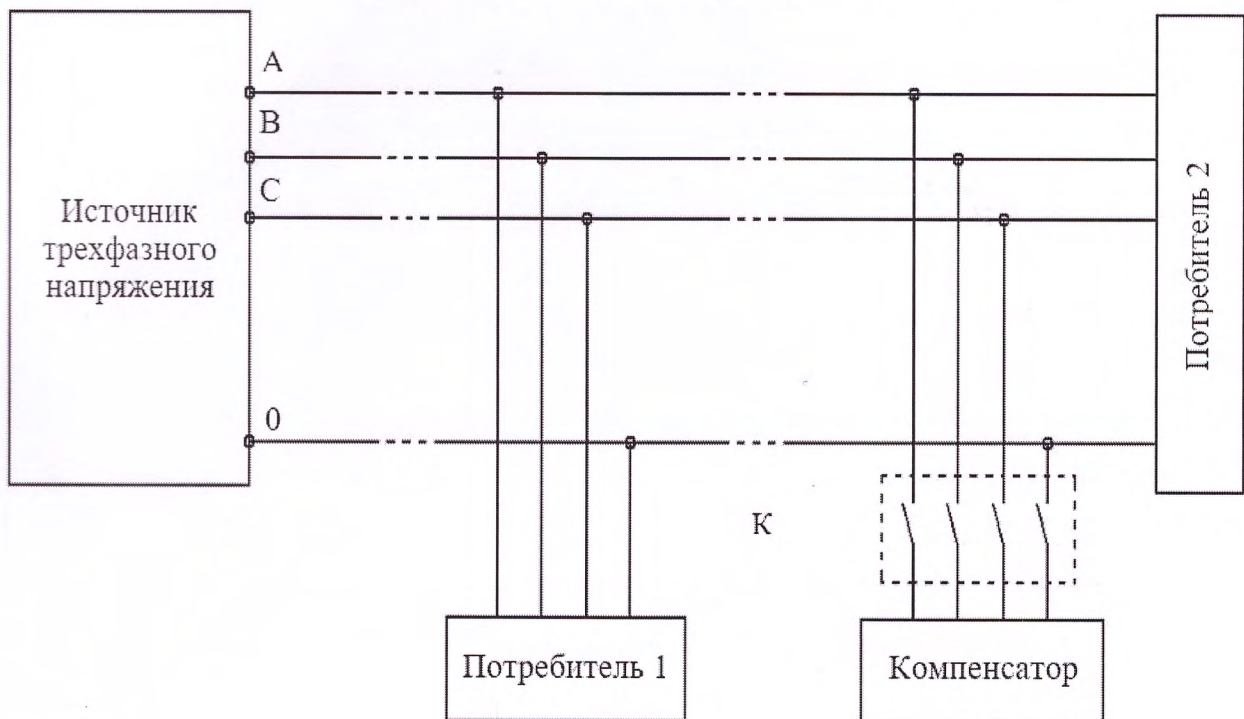
Вариант 218

Начальные условия:

В трехфазную сеть (Рис. 1) напряжением $U_n = 127$ В (50 Гц) включены два потребителя 1 и 2. Первый потребитель представляет собой резистивную несимметричную нагрузку, мощности фаз которой составляют $P_{A1} = 5,6$ кВт; $P_{B1} = 4,6$ кВт; $P_{C1} = 8,5$ кВт. Нагрузка при этом соединена "звездой" с нулевым проводом.

Второй потребитель является симметричной нагрузкой с общей активной мощностью $P_2 = 52$ кВт и коэффициентом мощности $\cos\varphi_2 = 0,48$ активно-индуктивного характера. Фазы второй нагрузки соединены "треугольником". Для улучшения коэффициента мощности второго потребителя до $\cos\varphi_{2K} = 0,99$ в сеть может быть включен компенсатор, обладающий потерями активной мощности $P_K = 0,8$ кВт. Источник трехфазного напряжения представляет собой генератор, обмотка которого соединена "звездой" с нулевым проводом с внутренним фазным сопротивлением $R_0 = 38 \cdot 10^{-3}$ Ом и $X_0 = 16 \cdot 10^{-2}$ Ом.

Структурная схема трёхфазной сети



Для заданного варианта трёхфазной сети:

1. Рассчитать токи и напряжения на элементах при отключенном компенсаторе, мощности потребителей и общую мощность всей сети. Вычислить результирующий коэффициент мощности всей сети.

Примечание 1. При расчете трехфазной цепи рекомендуется принять 45° начальную фазу линейного напряжения U_{AB} . Сопротивление линейных проводов принять равными нулю.

2. По полученным результатам расчета построить векторные диаграммы токов и напряжений, потребителей и источника питания.

3. Начертить развернутую схему цепи с указанием эквивалентных сопротивлений и индуктивностей в фазах приемников и источника.

4. Вычислить эквивалентные параметры компенсатора из условия улучшения коэффициента мощности второго приемника до значения $\cos\varphi_{2K}$. В расчетах учесть мощность потерь в компенсаторе P_K .

5. Рассчитать трехфазную сеть при включенном компенсаторе, т.е. определить токи фаз компенсатора и линейные токи источника питающего два потребителя и компенсатор.

6. Построить векторные диаграммы токов и напряжений источника и приемников при подключенном компенсаторе.

7. Вычислить результирующий коэффициент мощности всей трехфазной сети работающей с компенсатором.

8. Вычислить ЭДС фазы C генератора из условия реальной нагрузки при наличии внутреннего сопротивления генератора.

9. В фазе C трехфазной цепи определить закон изменения токов при переходном процессе при подключении приемников и компенсатора к источнику трехфазного напряжения

10. Построить в масштабе временную диаграмму найденной величины.

11. Проанализировать расчеты и сделать выводы о режиме работы цепи без компенсатора, о назначении компенсатора; о распределении нагрузки и о переходных процессах в цепи.

Примечание 2. Для расчета переходного процесса в одной из фаз рекомендуется при необходимости заменить соединение «треугольником» приемника 2 эквивалентным соединением «звезда» с нулевым проводом на частоте 50 Гц.

Содержание

Реферат.....	2
Задание.....	3
Содержание.....	5
Расчет.....	6
1. Расчёт токов и напряжений на элементах при отключенном компенсаторе, мощностей потребителей и общей мощности всей сети. Вычисление результирующего коэффициента мощности всей сети.....	6
2. Построение векторных диаграмм напряжений и токов источника и приёмников.....	8
3. Развёрнутая схема цепи с указанием эквивалентных сопротивлений и индуктивностей в фазах приёмника и источника.....	11
4. Вычисление эквивалентных параметров компенсатора из условия улучшения коэффициента мощности второго приёмника до значения $\cos\varphi_{2K}$	14
5. Расчёт трехфазной сети при включённом компенсаторе.....	15
6. Построение векторной диаграммы токов и напряжений источника и приёмников при включенном компенсаторе.....	16
7. Вычисление результирующего коэффициента мощности всей трёхфазной цепи, работающей с компенсатором.....	19
8. Вычисление ЭДС фаз генератора из условия реальной нагрузки при наличии внутреннего сопротивления генератора	19
9. Расчёт переходного процесса в трёхфазной цепи.....	20
10. Построение в масштабе временной диаграммы найденной величины.....	25
11. Анализ расчётов и выводов о режиме работы цепи без компенсатора, о назначении компенсатора; о распределении нагрузки и о переходных процессах в цепи.....	26
Список литературы.....	27

1. Расчет токов и напряжений на элементах при отключенном компенсаторе, мощностей потребителей и общей мощности всей сети. Вычисление результирующего коэффициента мощности всей сети.

Примечание: при расчете трехфазной цепи рекомендуется принять равной 45° начальную фазу линейного напряжения U_{AB} . Сопротивления линейных проводов принять равными нулю.

Расчет первого потребителя. Нагрузка первого приемника соединена «звездой», и имеет активный характер, $\varphi = 0$, $\cos\varphi = 1$. Для вычисления фазных токов первого приемника необходимо использовать мощности соответствующих фаз.

Определение значений фазных напряжений:

$$U_\phi = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3}} = \frac{127}{\sqrt{3}} = 73 \text{ В.}$$

Определение комплексов фазных напряжений первого приёмника:

$$\underline{U}_{1A} = 73 \cdot e^{j0} = 73 \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{1B} = 73 \cdot e^{-j120} = -36,5 - j63 \text{ В;}$$

$$\underline{U}_{1C} = 73 \cdot e^{j120} = -36,5 + j63 \text{ В.}$$

Определение значений комплексов фазных токов первого приёмника:

$$\underline{I}_{1A}^* = \frac{P_A}{\underline{U}_{1A}} = \frac{5600 \cdot e^{j0}}{73 \cdot e^{j0}} = 76,7 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{1B}^* = \frac{P_B}{\underline{U}_{1B}} = \frac{4600 \cdot e^{j0}}{73 \cdot e^{-j120}} = 63 \cdot e^{j120} \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{1C}^* = \frac{P_C}{\underline{U}_{1C}} = \frac{8500 \cdot e^{j0}}{73 \cdot e^{j120}} = 116,4 \cdot e^{-j120} \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{1A} = 76,7 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{1B} = 63 \cdot e^{-j120} = -31,5 - j54,5 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_{1C} = 116,4 \cdot e^{j120} = -58,2 + j100,8 \text{ А.}$$

Определение тока нулевого провода:

$$\underline{I}_{nN} = \underline{I}_{1A} + \underline{I}_{1B} + \underline{I}_{1C} = 76,7 - 31,5 - j54,5 - 58,2 + j100,8 = -13 + j46,3 = 48 \cdot e^{j105} \text{ А.}$$

Расчёт второго потребителя. Второй потребитель представляет собой симметричную нагрузку «треугольником». Нам задана суммарная активная мощность $P_2 = 52 \text{ кВт}$ и $\cos \varphi_2 = 0,48$.

$$\cos \varphi_2 = 0,48 \Rightarrow \varphi_2 = 61^\circ$$

$$\sin \varphi_2 = 0,87;$$

$$S_2 = \frac{P_2}{\cos \varphi_2} = \frac{52000}{0,48} = 108333 \text{ ВА};$$

$$Q_2 = S_2 \cdot \sin \varphi_2 = 108333 \cdot 0,87 = 94249 \text{ ВАр};$$

$$S_{2ав} = S_{2св} = S_{2са} = \frac{1}{3} S_2 = \frac{108333}{3} = 36111 \text{ ВА}.$$

Токи в фазах второго потребителя:

$$\underline{I}_{2ав}^* = \frac{S_{2ав}}{\underline{U}_{ав}} = \frac{36111 \cdot e^{j61}}{127 \cdot e^{j45}} = 284,3 \cdot e^{j16} \text{ А}; \quad \underline{I}_{2ав} = 284,3 \cdot e^{-j16} = 273 - j78 \text{ А};$$

$$\underline{I}_{2св}^* = \frac{S_{2св}}{\underline{U}_{св}} = \frac{36111 \cdot e^{j61}}{127 \cdot e^{-j75}} = 284,3 \cdot e^{j136} \text{ А}; \quad \underline{I}_{2св} = 284,3 \cdot e^{-j136} = -204,5 - j197,5 \text{ А};$$

$$\underline{I}_{2са}^* = \frac{S_{2са}}{\underline{U}_{са}} = \frac{36111 \cdot e^{j61}}{127 \cdot e^{j165}} = 284,3 \cdot e^{-j104} \text{ А}; \quad \underline{I}_{2са} = 284,3 \cdot e^{j104} = -69 + j276 \text{ А}.$$

Линейные токи второго потребителя:

$$\underline{I}_{2А} = \underline{I}_{2ав} - \underline{I}_{2са} = 273 - j78 + 69 - j276 = 342 - j354 = 492 \cdot e^{-j46} \text{ А};$$

$$\underline{I}_{2В} = \underline{I}_{2св} - \underline{I}_{2ав} = -204,5 - j197,5 - 273 + j78 = -477,5 - j119,5 = 492 \cdot e^{-j166} \text{ А};$$

$$\underline{I}_{2С} = \underline{I}_{2са} - \underline{I}_{2св} = -69 + j276 + 204,5 + j197,5 = 135,5 + j473,5 = 492,5 \cdot e^{j74} \text{ А}.$$

Токи фаз источника:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{2А} + \underline{I}_{1А} = 342 - j354 + 76,7 = 418,7 - j354 = 548 \cdot e^{-j40} \text{ А};$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{2В} + \underline{I}_{1В} = -477,5 - j119,5 - 31,5 - j54,5 = -509 - j174 = 538 \cdot e^{-j161} \text{ А};$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{2С} + \underline{I}_{1С} = 135,5 + j473,5 - 58,2 + j100,8 = 77,3 + j574,3 = 579 \cdot e^{j82} \text{ А}.$$

Расчёт результирующего коэффициента мощности всей сети:

$$\cos \varphi_C = \frac{\sum P_C}{\sqrt{(\sum P_C)^2 + (\sum Q_C)^2}};$$

$$\sum P_C = P_A + P_B + P_C + P_2 = 5600 + 4600 + 8500 + 52000 = 70700 \text{ Вт};$$

$$\sum Q_C = Q_2 = \frac{P_2}{\cos \varphi_2} \cdot \sin \varphi_2 = \frac{52000}{0,48} \cdot 0,87 = 94249 \text{ ВАр};$$

$$\cos \varphi_C = \frac{70700}{\sqrt{4998490000 + 8882874001}} = 0,6;$$

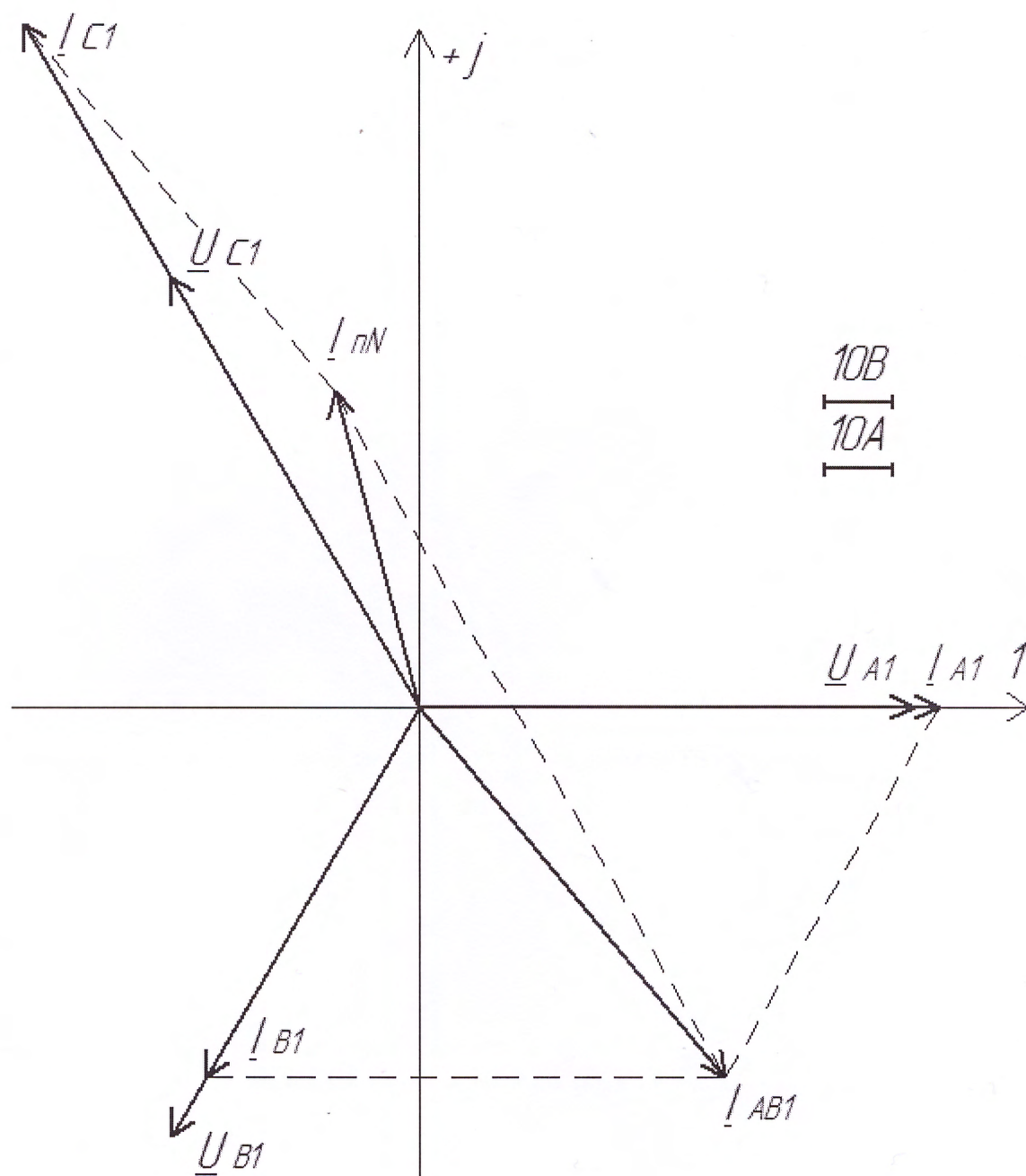
$$\varphi_C = 53^\circ$$

$$S_C = \sqrt{(\sum P_C)^2 + (\sum Q_C)^2} = 117819 \text{ ВА};$$

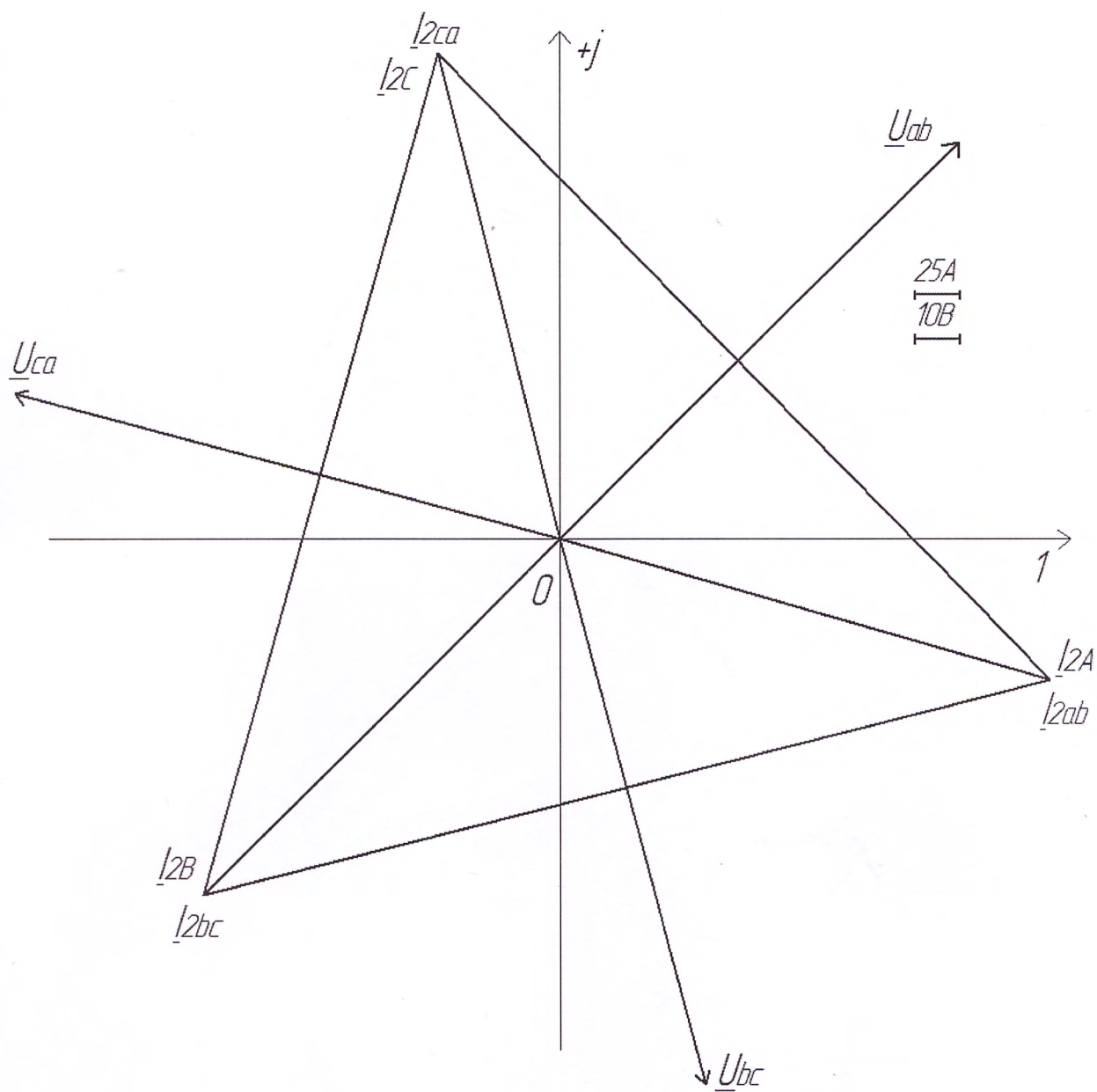
$$\underline{S}_C = \sum P_C + j \sum Q_C = 70700 + j94249 \text{ ВА}.$$

2. Построение векторных диаграмм напряжений и токов источника и приёмников.

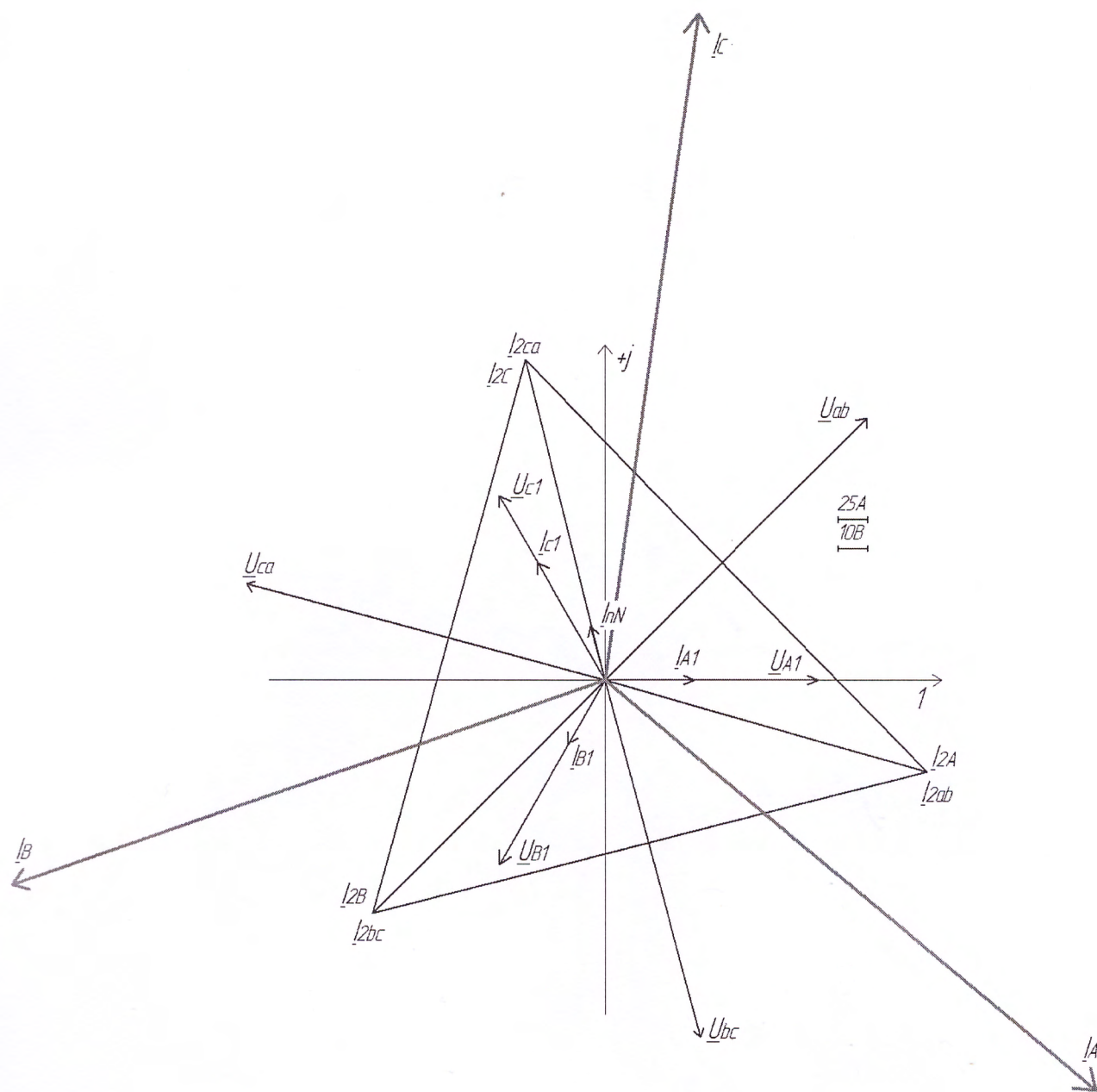
а). Векторная диаграмма для первого приёмника.



б). Векторная диаграмма для второго приёмника.



в). Общая векторная диаграмма токов и напряжений.



3. Развёрнутая схема цепи с указанием эквивалентных сопротивлений и индуктивностей в фазах приёмника и источника.

Вычисление параметров первого приёмника:

$$R_{1a} = \frac{P_A}{I_{1A}^2} = \frac{5600}{76,7^2} = 0,95 \text{ Ом};$$

$$R_{1b} = \frac{P_B}{I_{1B}^2} = \frac{4600}{63^2} = 1,16 \text{ Ом};$$

$$R_{1c} = \frac{P_C}{I_{1C}^2} = \frac{8500}{116,4^2} = 0,64 \text{ Ом}.$$

Вычисление параметров второго приёмника:

$$R_{2ab} = \frac{P_2}{3 \cdot I_{2av}^2} = \frac{52000}{3 \cdot 284^2} = 0,21 \text{ Ом};$$

$$R_{2ab} = R_{2bc} = R_{2ca} = 0,21 \text{ Ом};$$

$$X_L = \frac{Q_2}{3 \cdot I_{2av}^2} = \frac{94249}{3 \cdot 284^2} = 0,39 \text{ Ом};$$

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,39}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 1,25 \text{ мГн}.$$

Вычисление параметров источника:

$$X_0 = 16 \cdot 10^{-2} \text{ Ом};$$

$$R_0 = 38 \cdot 10^{-3} \text{ Ом};$$

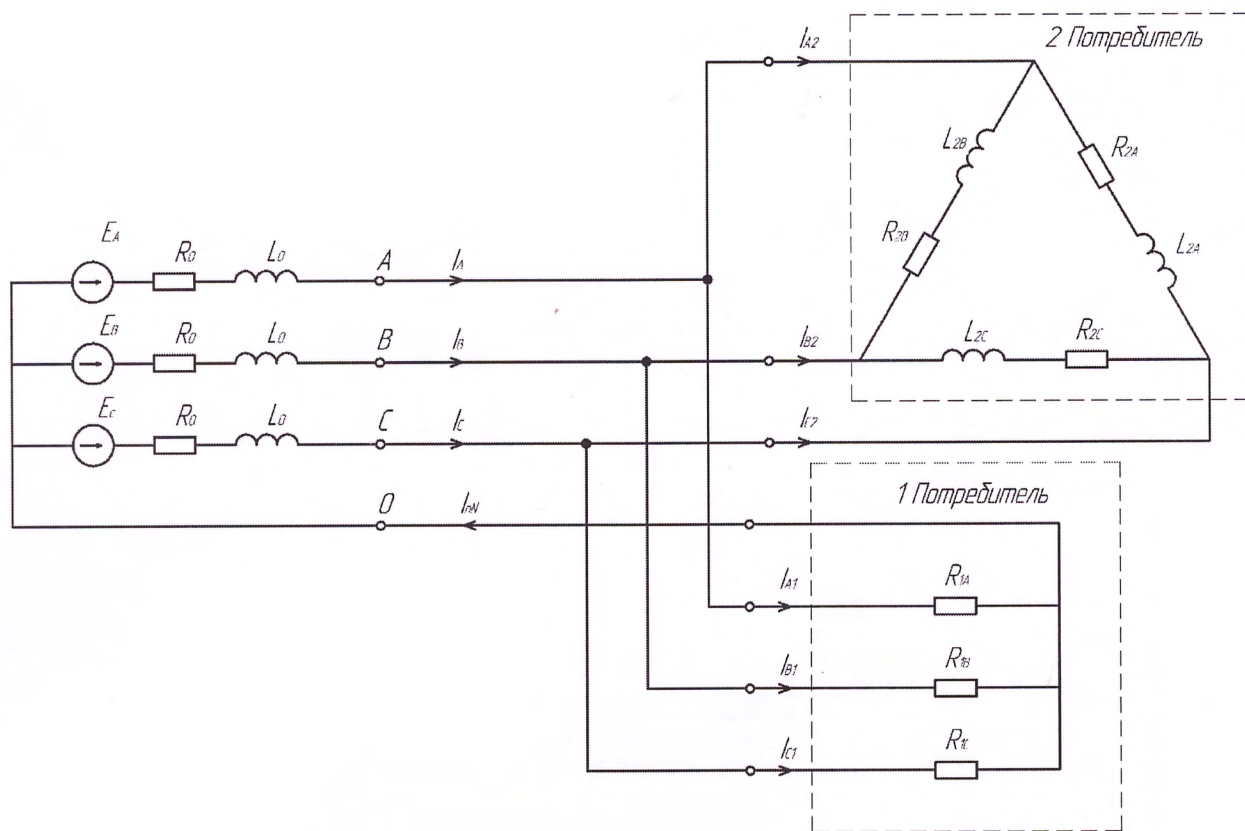
$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0 = 0,038 + j0,16 = 0,164 \cdot e^{j76} \text{ Ом}.$$

$$\begin{aligned} \underline{E}_A &= \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_0 + \underline{U}_{1A} = 548 \cdot e^{-j40} \cdot 0,164 \cdot e^{j76} + 73 = 89,9 \cdot e^{j36} + 73 = \\ &= 73 + j53 + 73 = 146 + j53 = 155 \cdot e^{j20} \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{E}_B &= \underline{I}_B \cdot \underline{Z}_0 + \underline{U}_{1B} = 538 \cdot e^{-j161} \cdot 0,164 \cdot e^{j76} + 73 \cdot e^{-j120} = 88 \cdot e^{-j85} + 73 \cdot e^{-j120} = \\ &= 7,6 - j87 - 36,5 - j63 = -28,9 - j150 = 153 \cdot e^{-j101} \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{E}_C &= \underline{I}_C \cdot \underline{Z}_0 + \underline{U}_{1C} = 579 \cdot e^{j82} \cdot 0,164 \cdot e^{j76} + 73 \cdot e^{j120} = 95 \cdot e^{j158} + 73 \cdot e^{j120} = \\ &= -88 + j35,6 - 36,5 + j63 = -124,5 + j98,6 = 159 \cdot e^{j141} \text{ В}. \end{aligned}$$

Принципиальная схема, где второй потребитель соединён «треугольником».



Замена треугольника эквивалентной звездой:

$$\underline{Z}_2 = R_{2ab} + jX_{L2} = 0.21 + j0.39 \text{ Ом};$$

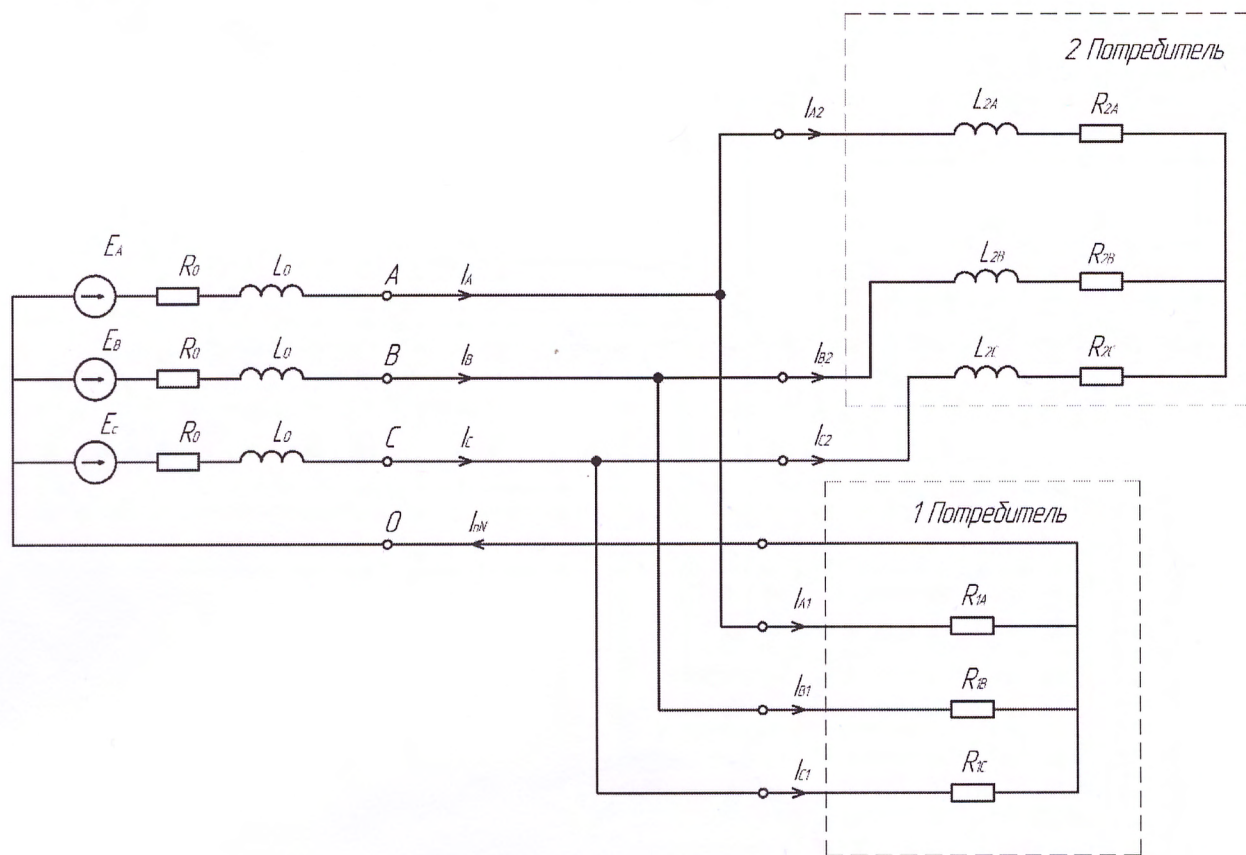
$$\underline{Z}'_2 = \frac{(0.21 + j0.39)}{3} = 0.07 + j0.13 \text{ Ом};$$

$$R'_2 = 0.07 \text{ Ом};$$

$$X'_L = 0.13 \text{ Ом};$$

$$L' = \frac{X'_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0.13}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.4 \text{ мГн.}$$

Принципиальная схема, где второй потребитель соединён «звездой».



4. Вычисление эквивалентных параметров компенсатора из условия улучшения коэффициента мощности второго приёмника до значения $\cos\varphi_{2K}$.

$$P_2 = 52000 \text{ Вт};$$

$$Q_2 = 94249 \text{ ВАр};$$

$$P_K = 800 \text{ Вт};$$

$$\cos\varphi_{2K} = 0,99;$$

$$\sin\varphi_{2K} = 0,14.$$

$$P_{2K} = P_K + P_2 = 800 + 52000 = 52800 \text{ Вт};$$

$$Q_{2K} = Q_K + Q_2$$

$$Q_{2K} = \frac{P_{2K}}{\cos\varphi_{2K}} \cdot \sin\varphi_{2K} = \frac{52800}{0,99} \cdot 0,14 = 7466 \text{ ВАр};$$

$$Q_K = Q_{2K} - Q_2 = 7466 - 94249 = -86783 \text{ ВАр};$$

$$\underline{S}_K = P_K + jQ_K = 800 - j86783 = 86786 \cdot e^{-j89} \text{ ВА};$$

$$\underline{S}_K^* = 86786 \cdot e^{j89} \text{ ВА}.$$

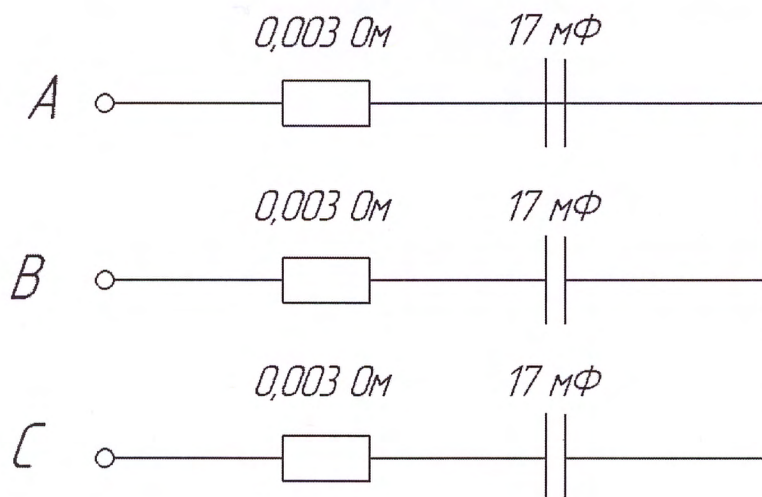
Полное сопротивление компенсатора:

$$\underline{Z}_{Ka} = \underline{Z}_{Kb} = \underline{Z}_{Kc} = \frac{3 \cdot \underline{U}_A^2}{\underline{S}_K^*} = \frac{3 \cdot 73^2 \cdot e^{j0}}{86786 \cdot e^{j89}} = 0,18 \cdot e^{-j89} = 0,003 - j0,18 \text{ Ом};$$

$$R_K = 0,003 \text{ Ом};$$

$$X_{CK} = 0,18 \text{ Ом} \Rightarrow C_K = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_{CK}} = 0,017 \text{ Ф}.$$

Эквивалентная схема компенсатора



5. Расчёт трехфазной сети при включённом компенсаторе.

Из практики известно, что компенсаторы включаются параллельно с той нагрузкой, характер которой и требует его подключения. В этой ситуации подключение компенсатора не окажет влияния на токи самого второго потребителя. Тем более такое подключение не скажется на режиме работы первого потребителя.

Токи первого потребителя:

$$\underline{I}_{1A} = 76,7 \text{ A};$$

$$\underline{I}_{1B} = 63 \cdot e^{-j120} = -31,5 - j54,5 \text{ A};$$

$$\underline{I}_{1C} = 116,4 \cdot e^{j120} = -58,2 + j100,8 \text{ A}.$$

Токи второго потребителя без компенсатора:

$$\underline{I}_{2A} = 342 - j354 = 492 \cdot e^{-j46} \text{ A};$$

$$\underline{I}_{2B} = -477 - j119,5 = 492 \cdot e^{-j166} \text{ A};$$

$$\underline{I}_{2C} = 135,5 + j473,5 = 492,5 \cdot e^{j74} \text{ A}.$$

Токи в компенсаторе:

$$\underline{I}_{KA}^* = \frac{\underline{S}_K}{3 \cdot \underline{U}_A} = \frac{86786 \cdot e^{-j89^\circ}}{3 \cdot 73 \cdot e^{j0^\circ}} = 396 \cdot e^{-j89} \text{ A};$$

$$\underline{I}_{KA} = 396 \cdot e^{j89} = 6,9 + j396 \text{ A};$$

$$\underline{I}_{KB}^* = \frac{\underline{S}_K}{3 \cdot \underline{U}_B} = \frac{86786 \cdot e^{-j89}}{3 \cdot 73 \cdot e^{-j120}} = 396 \cdot e^{j31} \text{ A};$$

$$\underline{I}_{KB} = 396 \cdot e^{-j31} = 339,4 - j204 \text{ A};$$

$$\underline{I}_{KC}^* = \frac{\underline{S}_K}{3 \cdot \underline{U}_C} = \frac{86786 \cdot e^{-j89}}{3 \cdot 73 \cdot e^{j120}} = 396 \cdot e^{-j209} \text{ A};$$

$$\underline{I}_{KC} = 396 \cdot e^{j209} = -346 - j192 \text{ A}.$$

Токи второго потребителя при включенном компенсаторе:

$$\underline{I}_{2KA} = \underline{I}_{2A} + \underline{I}_{KA} = 342 - j354 + 6,9 + j396 = 348,9 + j42 = 351,4 \cdot e^{j7} \text{ A};$$

$$\underline{I}_{2KB} = \underline{I}_{2B} + \underline{I}_{KB} = -477 - j119,5 + 339,4 - j204 = -137,6 - j323,5 = 351,5 \cdot e^{-j113} \text{ A};$$

$$\underline{I}_{2KC} = \underline{I}_{2C} + \underline{I}_{KC} = 135,5 + j473,5 - 346 - j192 = -210,5 + j281,5 = 351,5 \cdot e^{j127} \text{ A}.$$

Результирующие токи при подключенном компенсаторе:

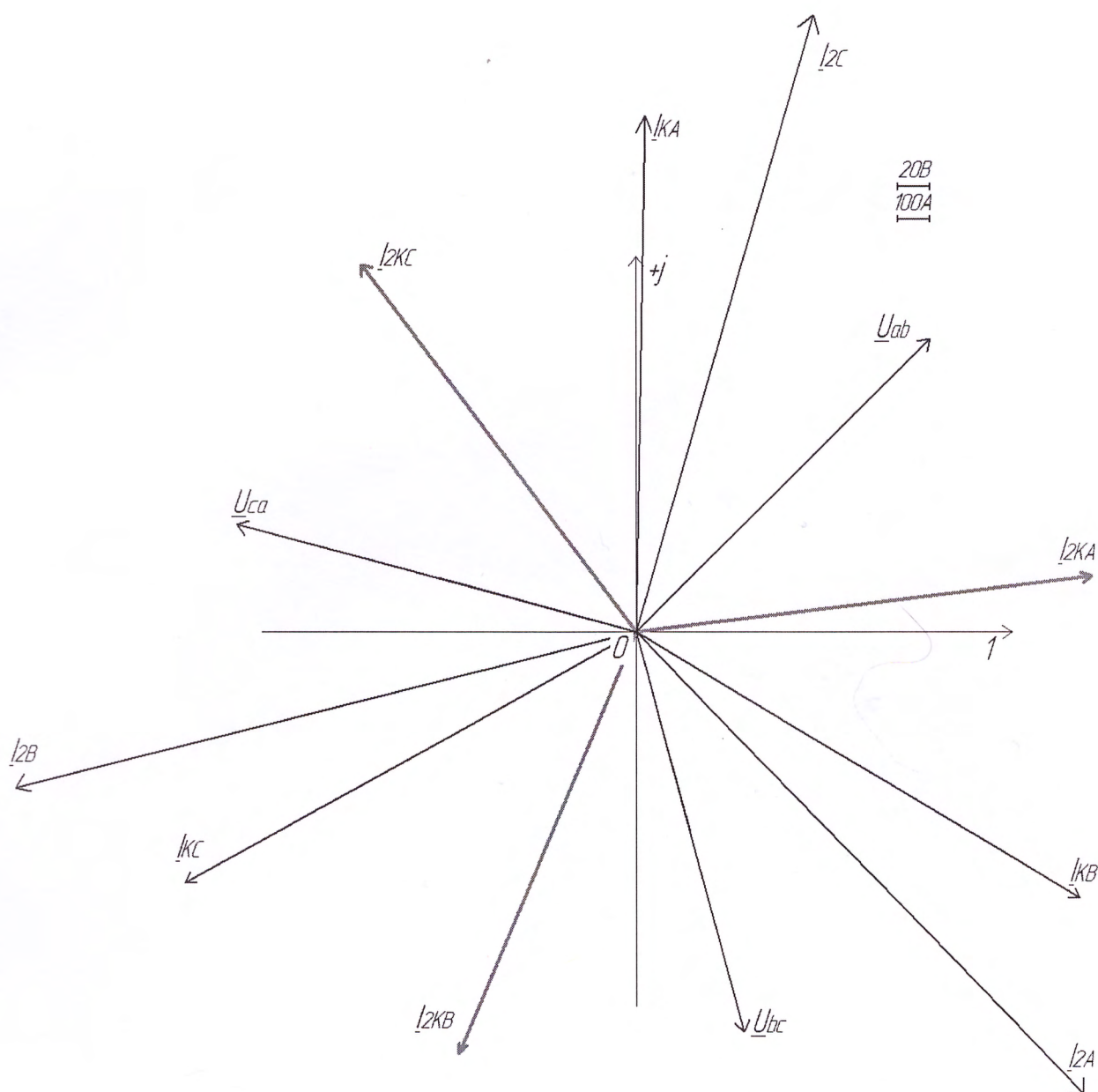
$$\underline{I}'_A = \underline{I}_{2KA} + \underline{I}_{1A} = 348,9 + j42 + 76,7 = 425,6 + j42 = 427,7 \cdot e^{j5} \text{ A};$$

$$\underline{I}'_B = \underline{I}_{2KB} + \underline{I}_{1B} = -137,6 - j323,5 - 31,5 - j54,5 = -169,1 - j378 = 414 \cdot e^{-j114} \text{ A};$$

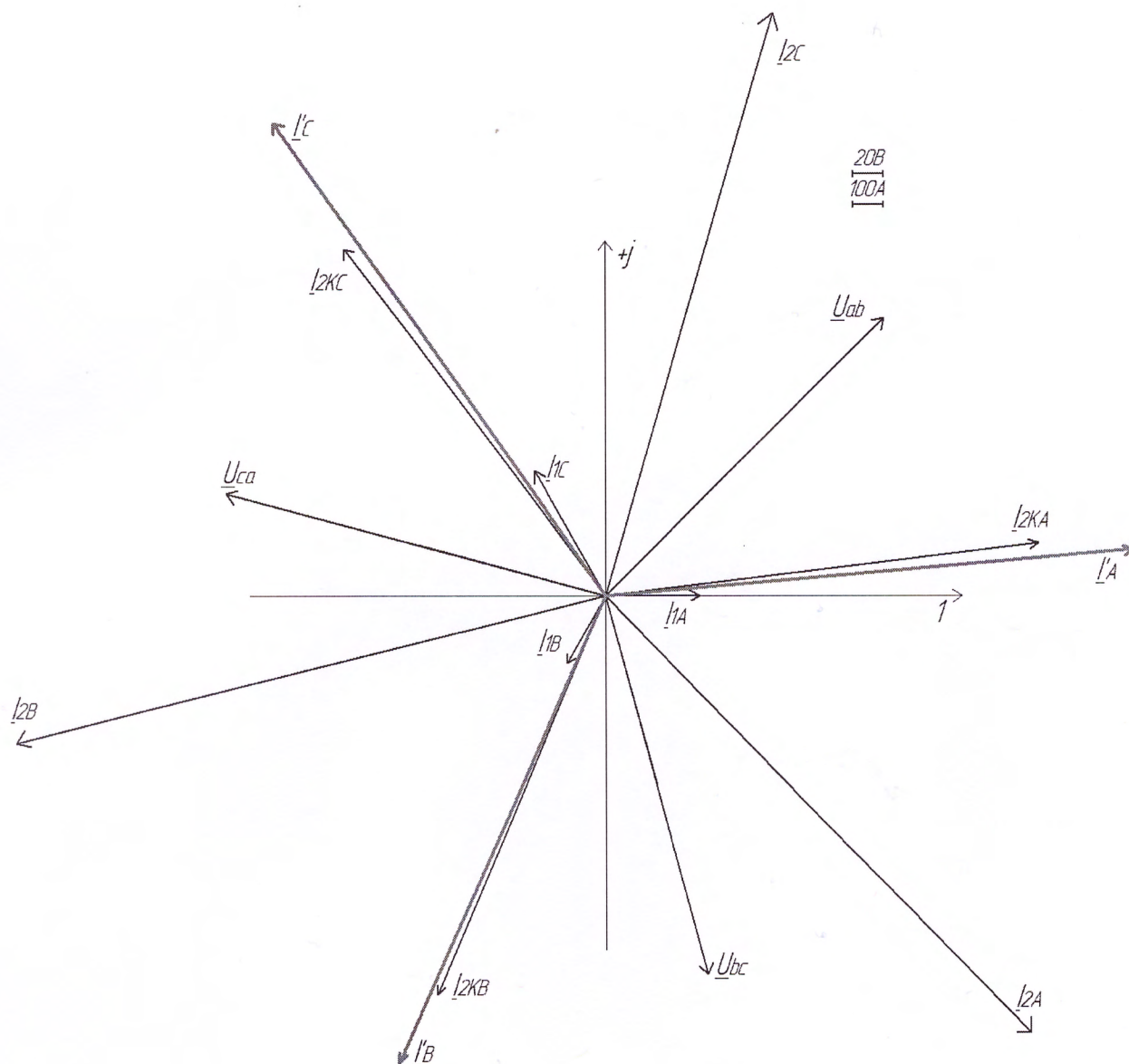
$$\underline{I}'_C = \underline{I}_{2KC} + \underline{I}_{1C} = -210,5 + j281,5 - 58,2 + j100,8 = -268,7 + j382,3 = 467 \cdot e^{j125} \text{ A}.$$

6. Построение векторной диаграммы токов и напряжений источника и приёмников при включенном компенсаторе.

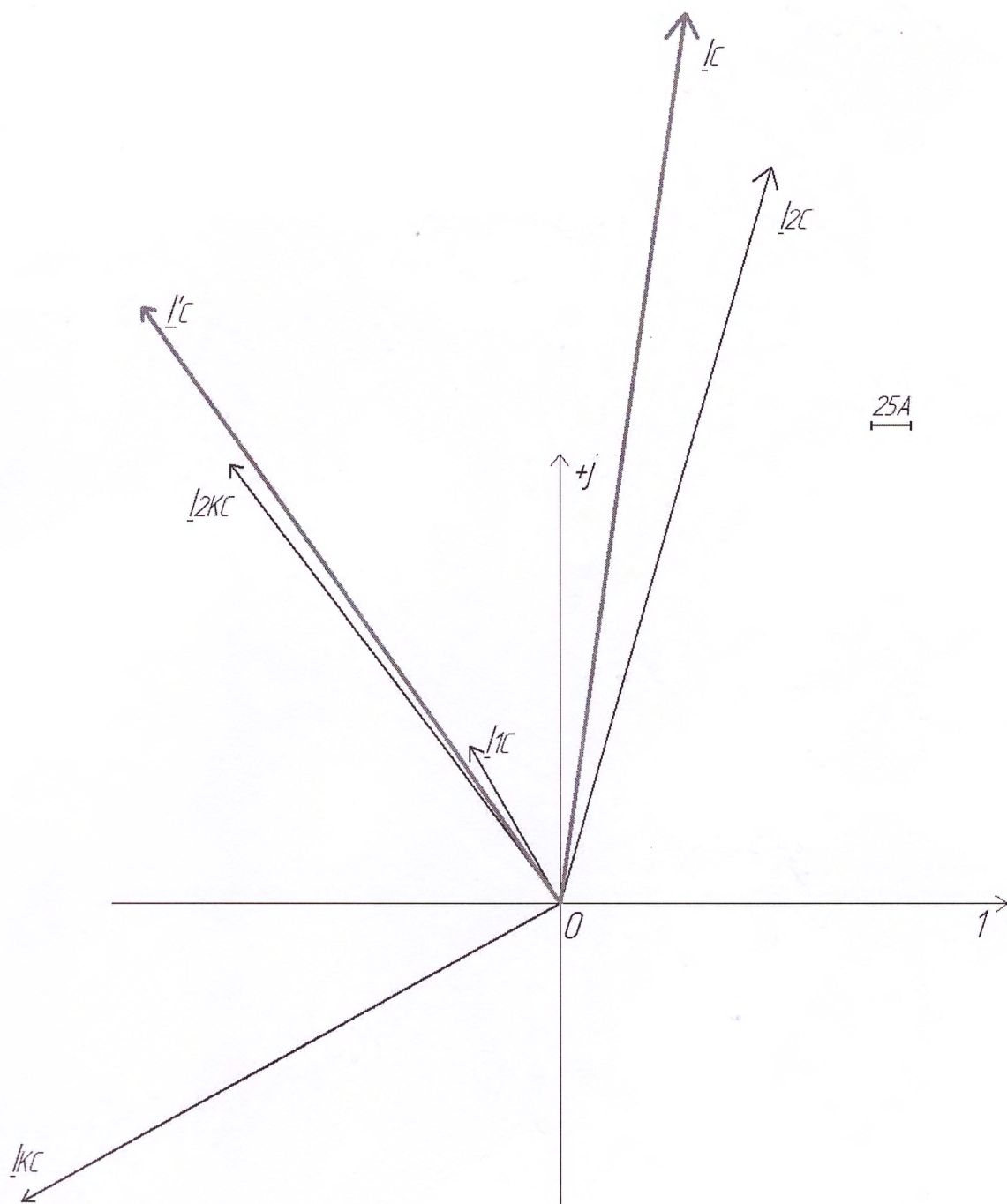
а). Векторная диаграмма токов и напряжений второго потребителя и компенсатора.



б). Векторная диаграмма напряжений и линейных токов источника, первого потребителя и суммарных линейных токов второго потребителя с подключенным компенсатором;



в). Векторная диаграмма линейных токов фазы С.



7. Вычисление результирующего коэффициента мощности всей трёхфазной цепи, работающей с компенсатором.

$$\underline{S} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_K;$$

$$\underline{S}_1 = P_A + P_B + P_C = 5600 + 4600 + 8500 = 18700 \text{ BA};$$

$$\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2 = 52000 + j94249 \text{ BA};$$

$$\underline{S}_K = P_K + jQ_K = 800 - j86783 = 86786 \cdot e^{-j89} \text{ BA};$$

$$\underline{S} = 18700 + 52000 + j94249 + 800 - j86783 = 71500 + j7466 = 71889 \cdot e^{j6} \text{ BA};$$

$$\cos \varphi_c' = 0,994 \quad \sin \varphi_c' = 0,104$$

8. Вычисление ЭДС фаз генератора из условия реальной нагрузки при наличии внутреннего сопротивления генератора.

а). ЭДС генератора с отключенным компенсатором:

$$\underline{E}_A = \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_0 + \underline{U}_{1A} = 548 \cdot e^{-j40} \cdot 0,164 \cdot e^{j76} + 73 = 89,9 \cdot e^{j36} + 73 =$$

$$= 73 + j53 + 73 = 146 + j53 = 155 \cdot e^{j20} \text{ B};$$

$$\underline{E}_B = \underline{I}_B \cdot \underline{Z}_0 + \underline{U}_{1B} = 538 \cdot e^{-j161} \cdot 0,164 \cdot e^{j76} + 73 \cdot e^{-j120} = 88 \cdot e^{-j85} + 73 \cdot e^{-j120} =$$

$$= 7,6 - j87 - 36,5 - j63 = -28,9 - j150 = 153 \cdot e^{-j101} \text{ B};$$

$$\underline{E}_C = \underline{I}_C \cdot \underline{Z}_0 + \underline{U}_{1C} = 579 \cdot e^{j82} \cdot 0,164 \cdot e^{j76} + 73 \cdot e^{j120} = 95 \cdot e^{j158} + 73 \cdot e^{j120} =$$

$$= -88 + j35,6 - 36,5 + j63 = -124,5 + j98,6 = 159 \cdot e^{j141} \text{ B};$$

б). ЭДС генератора с включенным компенсатором:

$$\underline{E}'_A = \underline{I}'_A \cdot \underline{Z}_0 + \underline{U}_{1A} = 427,7 \cdot e^{j5} \cdot 0,164 \cdot e^{j76} + 73 = 70,1 \cdot e^{j81} + 73 =$$

$$= 73 + 11 + j69 = 84 + j69 = 108,7 \cdot e^{j39} \text{ B};$$

$$\underline{E}'_B = \underline{I}'_B \cdot \underline{Z}_0 + \underline{U}_{1B} = 414 \cdot e^{-j114} \cdot 0,164 \cdot e^{j76} + 73 \cdot e^{-j120} = 67,9 \cdot e^{-j38} + 73 \cdot e^{-j120} =$$

$$= 53,5 - j41,8 - 36,5 - j63,2 = 17 - j105 = 106,3 \cdot e^{-j80} \text{ B};$$

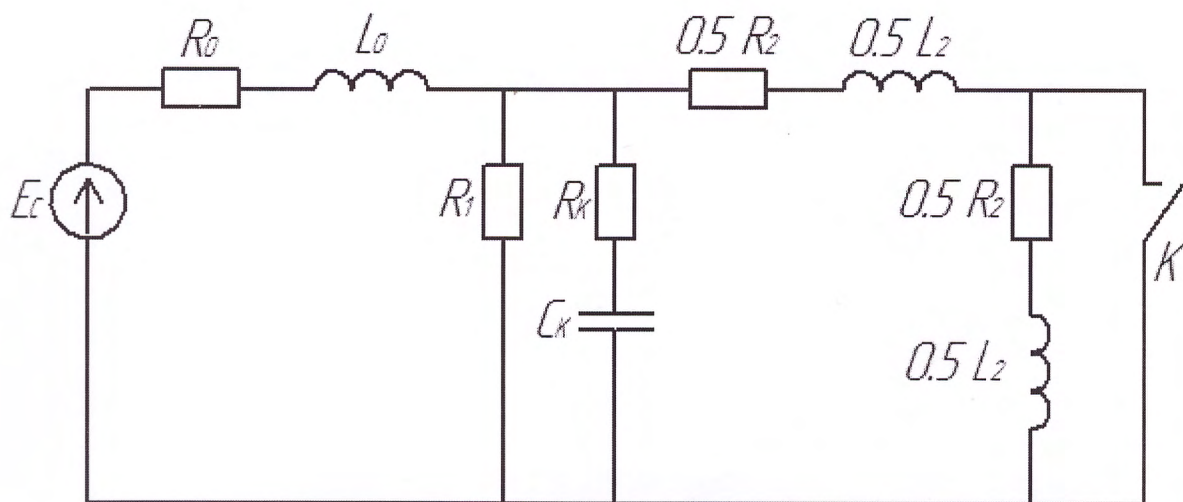
$$\underline{E}'_C = \underline{I}'_C \cdot \underline{Z}_0 + \underline{U}_{1C} = 467 \cdot e^{j125} \cdot 0,164 \cdot e^{j76} + 73 \cdot e^{j120} = 76,6 \cdot e^{j201} + 73 \cdot e^{j120} =$$

$$= -71,5 - j27,4 - 36,5 + j63,2 = -108 + j35,8 = 113,8 \cdot e^{j161} \text{ B};$$

9. Расчёт переходного процесса в трёхфазной цепи.

В фазе С трёхфазной цепи определить закон изменения токов при подключении приемников и компенсатора к источнику трехфазного напряжения;

Схема переходного процесса:



Дано:

$$\underline{E}'_c = -108 + j35,8 = 113,8 \cdot e^{j161} B;$$

$$e_c(t) = 113,8 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314t + 161) B;$$

$$R_0 = 0,038 \text{ Ом};$$

$$L_0 = 0,5 \text{ мГн};$$

$$R_{1c} = 0,64 \text{ Ом};$$

$$R_{2c} = 0,07 \text{ Ом};$$

$$L_{2c} = 0,4 \text{ мГн};$$

$$R_K = 0,003 \text{ Ом};$$

$$C_K = 17 \text{ мФ}.$$

1). Определение зависимых начальных условий $t(0_-)$:

$$i_{L0}(0_-) = 579 \cdot \sqrt{2} \sin(314t + 82) A;$$

$$i_{L2}(0_-) = 492,5 \cdot \sqrt{2} \sin(314t + 74) A;$$

$$u_c(0_-) = 0,18 \cdot 396 \cdot \sqrt{2} \sin(314t + 209) B.$$

2). Определение независимых начальных условий $t(0_+)$:

$$i_{L0}(0_+) = i_{L0}(0_-) = 819 \cdot \sin(314t + 82) A;$$

$$i_{L2}(0_+) = i_{L2}(0_-) = 696 \cdot \sin(314t + 74) A;$$

$$u_c(0_+) = u_c(0_-) = 101 \cdot \sin(314t + 209) B.$$

3). Нахождение корней характеристического уравнения:

$$\underline{Z}_1(p) = \frac{\underline{Z}_{2c} \cdot \underline{Z}_\kappa}{\underline{Z}_{2c} + \underline{Z}_\kappa} = \frac{(0,07 + 0,0004p) \cdot \left(0,003 + \frac{1}{0,017 \cdot p}\right)}{0,07 + 0,0004p + 0,003 + \frac{1}{0,017 \cdot p}} = \frac{(0,07 + 0,0004p) \cdot \left(0,003 + 58,8 \cdot \frac{1}{p}\right)}{0,073 + 0,0004p + 58,8 \cdot \frac{1}{p}} =$$

$$\frac{0,00021 + 4,116 \cdot \frac{1}{p} + 0,0000012p + 0,02352}{0,073 + 0,0004p + 58,8 \cdot \frac{1}{p}} = \frac{0,0000012p^2 + 0,02373p + 4,116}{0,0004p^2 + 0,073p + 58,8}$$

$$\underline{Z}_2(p) = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_{1c}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{1c}} = \frac{\frac{0,0000012p^2 + 0,02373p + 4,116}{0,0004p^2 + 0,073p + 58,8} \cdot 0,64}{\frac{0,0000012p^2 + 0,02373p + 4,116}{0,0004p^2 + 0,073p + 58,8} + 0,64} = \frac{0,000000768p^2 + 0,015188p + 2,634}{0,0002572p^2 + 0,07045p + 41,748}$$

$$\underline{Z}_{\text{экв}}(p) = \underline{Z}_2(p) + \underline{Z}_0(p)$$

$$\frac{0,000000768p^2 + 0,015188p + 2,634}{0,0002572p^2 + 0,07045p + 41,748} + 0,038 + 0,0005p = 0$$

$$\frac{0,00000013p^3 + 0,0000456p^2 + 0,038735p + 4,22}{0,032 \cdot p^2 + 7,53 \cdot p + 3091,6} = 0$$

$$0,00000013p^3 + 0,0000456p^2 + 0,038735p + 4,22 = 0$$

$$p_1 = -120 \text{ c}^{-1};$$

$$p_2 = -115 + j507 \text{ c}^{-1};$$

$$p_3 = -115 - j507 \text{ c}^{-1}.$$

4). Анализ цепи в принуждённом режиме при $t \rightarrow \infty$:

$$i_{\text{np}} = 467 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314t + 125) = 660 \cdot \sin(314t + 125) \text{ A};$$

$$e_c = 113,8 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314 \cdot t + 161) = 161 \cdot \sin(314 \cdot t + 161) \text{ B}.$$

5). Записываем выражение свободной составляющей тока:

$$i_{\text{св}} = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_{\text{св}} t + \varphi) \Rightarrow i_{\text{св}} = A_1 \cdot e^{-120 t} + A_2 \cdot e^{-115 t} \cdot \sin(507 t + \varphi).$$

6). Записываем выражение искомой величины:

$$\begin{aligned}
 i_C(t) &= A_1 \cdot e^{-120t} + A_2 \cdot e^{-115t} \cdot \sin(507t + \varphi) + 660 \cdot \sin(314t + 125^\circ) . \\
 \begin{cases} i_C(t) &= A_1 \cdot e^{-120t} + A_2 \cdot e^{-115t} \cdot \sin(507t + \varphi) + 660 \cdot \sin(314t + 125^\circ) \\ \frac{di_C}{dt} &= -120A_1 \cdot e^{-120t} - 115A_2 \cdot e^{-115t} \sin(507t + \varphi) + A_2 \cdot e^{-115t} \cdot 507 \cdot \cos(507t + \varphi) + \\ &+ 660 \cdot 314 \cdot \cos(314t + 125^\circ) \\ \frac{d^2 i_C}{dt^2} &= 120^2 A_1 \cdot e^{-120t} + 115^2 \cdot A_2 \cdot e^{-115t} \sin(507t + \varphi) + 115 \cdot 507 \cdot A_2 \cdot e^{-115t} \cdot \cos(507t + \varphi) - \\ &- 115 \cdot 507 \cdot A_2 \cdot e^{-115t} \cdot \cos(507t + \varphi) - 507^2 A_2 \cdot e^{-115t} \cdot \sin(507t + \varphi) - 660 \cdot 314^2 \sin(314t + 125^\circ) \end{cases}
 \end{aligned}$$

7). Определяем необходимые начальные условия

Составляем систему уравнений для состояния цепи после коммутации:

$$\begin{cases} i_C - i_{1C} - i_K - i_{2C} = 0 \\ i_C \cdot R_0 + U_{L0} + i_{1C} \cdot R_{1C} = \mathcal{E}_c \\ -i_{1C} \cdot R_{1C} + i_K R_K + \mathcal{U}_C = 0 \\ -i_K \cdot R_K - U_C + 0,5 \cdot i_{2C} R_{2C} + 0,5 \cdot \mathcal{U}_{L2} = 0 \end{cases}$$

Решаем систему при $t = (0_+)$:

$$\begin{cases} 819 \cdot \sin(82^\circ) - i_{1C} - i_K - 696 \cdot \sin(74^\circ) = 0 \\ 0,038 \cdot 819 \cdot \sin(82^\circ) + U_{L0} + 0,64 \cdot i_{1C} = 161 \cdot \sin(161^\circ) \\ -0,64 \cdot i_{1C} + 0,003 \cdot i_K + 101 \cdot \sin(209^\circ) = 0 \\ -0,003 \cdot i_K - 101 \cdot \sin(209^\circ) + 0,5 \cdot 0,07 \cdot 696 \cdot \sin(74^\circ) + 0,5 \cdot \mathcal{U}_{L2} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 819 \cdot \sin(82^\circ) - i_{1C} - i_K - 696 \cdot \sin(74^\circ) = 0 \\ 31,1 \cdot \sin(82^\circ) + U_{L0} + 0,64 \cdot i_{1C} = 161 \cdot \sin(161^\circ) \\ -0,64 \cdot i_{1C} + 0,003 \cdot i_K + 101 \cdot \sin(209^\circ) = 0 \\ -0,003 \cdot i_K - 101 \cdot \sin(209^\circ) + 24,4 \cdot \sin(74^\circ) + 0,5 \cdot \mathcal{U}_{L2} = 0 \end{cases}$$

Составляем матрицы из коэффициентов при неизвестных, из свободных членов, находим неизвестные значения с помощью Mathcad:

$$A := \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0.64 & 0 & 1 & 0 \\ -0.64 & 0.003 & 0 & 0 \\ 0 & -0.003 & 0 & 0.5 \end{pmatrix} \quad B := \begin{pmatrix} -142 \\ 21.6 \\ 49 \\ -72.4 \end{pmatrix}$$

$$X := A^{-1} \cdot B = \begin{pmatrix} -75.543 \\ 217.543 \\ 69.947 \\ -143.495 \end{pmatrix}$$

$$i_{1C} = -75,5 \text{ A};$$

$$i_K = 217,5 \text{ A};$$

$$u_{L0} = 70 \text{ B} \Rightarrow U_{L0}(t) = 70 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314 \cdot t + 82 + 90) \text{ B};$$

$$u_{L2} = -143,5 \text{ B};$$

$$\frac{u_{L0}}{L_0} = \frac{99 \cdot \sin(314 \cdot t + 172)}{0,0005} = 198000 \cdot \sin(314 \cdot t + 172);$$

$$\left(\frac{u_{L0}}{L_0} \right)' = (198000 \cdot \sin(314 \cdot t + 172))' = 198000 \cdot 314 \cdot \cos(314 \cdot t + 172).$$

$$\begin{cases} i_C(0+) = A_1 + A_2 \cdot \sin(\varphi) + 660 \cdot \sin(125^\circ) = 819 \cdot \sin(82^\circ) \\ \frac{di_C(0+)}{dt} = -120 \cdot A_1 - 115 \cdot A_2 \cdot \sin(\varphi) + A_2 \cdot 507 \cdot \cos(\varphi) + 660 \cdot 314 \cdot \cos(125^\circ) = \frac{U_{L0}(0+)}{L_0} \\ \frac{d^2 i_C(0+)}{dt^2} = 120^2 A_1 + 115^2 \cdot A_2 \cdot \sin(\varphi) - 507^2 A_2 \cdot \sin(\varphi) - 660 \cdot 314^2 \cdot \sin(125^\circ) = \left(\frac{U_{L0}(0+)}{L_0} \right)' \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_C(0+) = A_1 + A_2 \cdot \sin(\varphi) + 660 \cdot \sin(125^\circ) = 819 \cdot \sin(82^\circ) \\ \frac{di_C(0+)}{dt} = -120 \cdot A_1 - 115 \cdot A_2 \cdot \sin(\varphi) + A_2 \cdot 507 \cdot \cos(\varphi) + 207240 \cdot \cos(125^\circ) = \frac{U_{L0}(0+)}{L_0} \\ \frac{d^2 i_C(0+)}{dt^2} = 14400 A_1 - 243824 A_2 \cdot \sin(\varphi) - 65073360 \cdot \sin(125^\circ) = \left(\frac{U_{L0}(0+)}{L_0} \right)' \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_1 + A_2 \cdot \sin(\varphi) + 660 \cdot \sin(125^\circ) = 819 \cdot \sin(82^\circ) \\ -120 A_1 - 115 \cdot A_2 \cdot \sin(\varphi) + A_2 \cdot 507 \cdot \cos(\varphi) + 207240 \cdot \cos(125^\circ) = 198000 \cdot \sin(172^\circ) \\ 14400 A_1 - 243824 \cdot A_2 \cdot \sin(\varphi) - 65073360 \cdot \sin(125^\circ) = 62172000 \cdot \sin(172^\circ) \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_1 + A_2 \cdot \sin(\varphi) = 270 \\ -120 \cdot A_1 - 115 \cdot A_2 \cdot \sin(\varphi) + A_2 \cdot 507 \cdot \cos(\varphi) = 146424 \\ 14400A_1 - 243824 \cdot A_2 \cdot \sin(\varphi) = 61957646 \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_2 \cdot \sin(\varphi) = 270 - A_1 \\ -120A_1 - 115A_2 \cdot \sin(\varphi) + 507 \cdot A_2 \cdot \cos(\varphi) = 146424 \\ 14400A_1 - 270 \cdot 243824 + 243824 \cdot A_1 = 61957646 \end{cases}$$

$$258224 \cdot A_1 = 127790126$$

$$A_1 = 495$$

$$\begin{cases} A_1 = 495 \\ -120 \cdot A_1 - 115 \cdot A_2 \cdot \sin(\varphi) + 507 \cdot A_2 \cdot \cos(\varphi) = 146424 \\ A_2 \cdot \sin(\varphi) = -225 \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_2 = \frac{-225}{\sin(\varphi)} \\ A_1 = 495 \\ -120 \cdot 495 - 115 \cdot \frac{-225}{\sin(\varphi)} \cdot \sin(\varphi) + 507 \cdot \frac{-225}{\sin(\varphi)} \cdot \cos(\varphi) = 146424 \end{cases}$$

$$-59400 + 25875 - 114075 \cdot \operatorname{ctg}(\varphi) = 146424$$

$$\operatorname{ctg}(\varphi) = -1,58 \Rightarrow \operatorname{tg}(\varphi) = -0,62 \Rightarrow \varphi = -32^\circ$$

$$\begin{cases} A_1 = 495 \\ \varphi = -32^\circ \\ A_2 = 383 \end{cases}$$

8). В результате расчётов получаем:

$$i_c(t) = 495 \cdot e^{-120t} + 383 \cdot e^{-115t} \cdot \sin(507t - 32) + 660 \cdot \sin(314t + 125^\circ) \text{ A.}$$

10. Построение в масштабе временной диаграммы найденной величины.

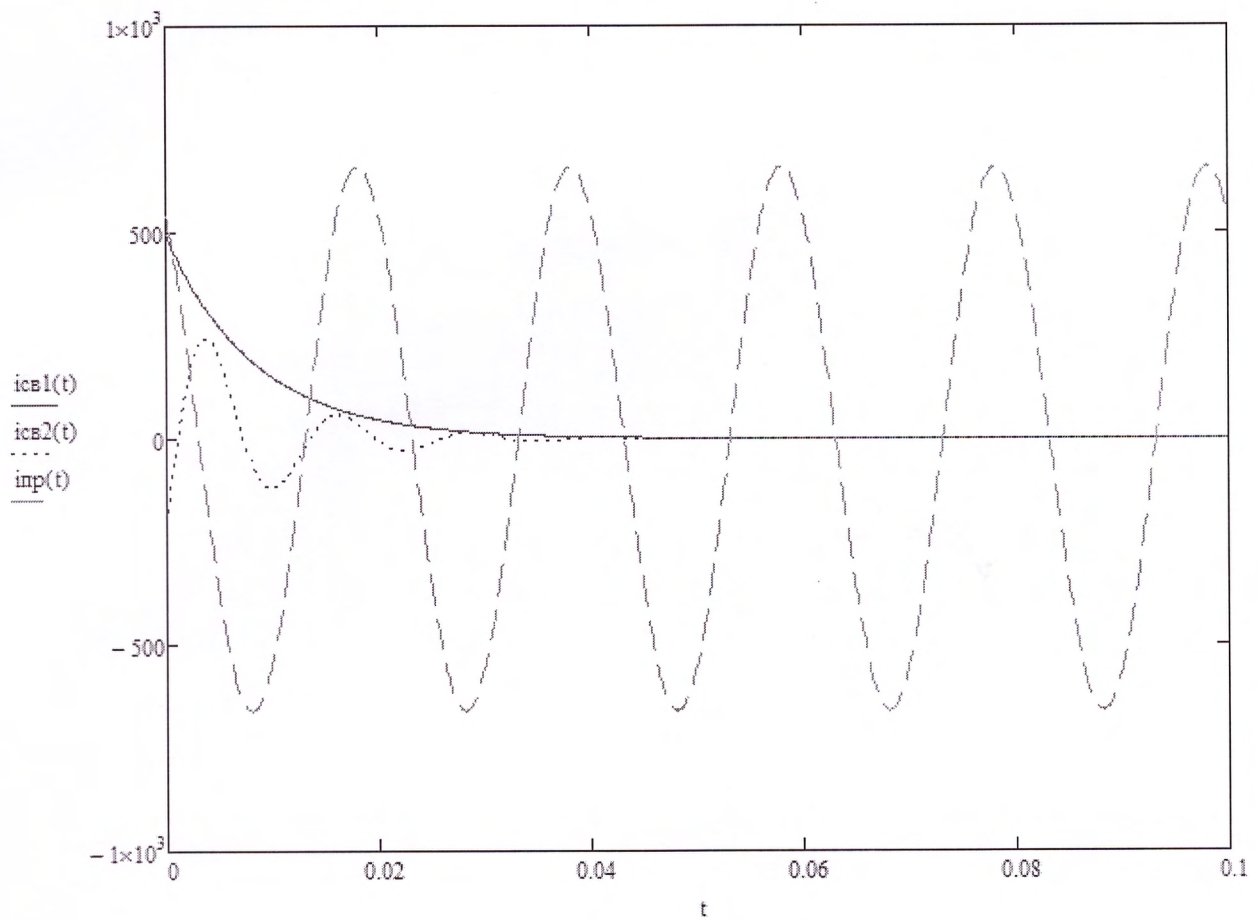
$$t := 0, 0.0001 \dots 0.1$$

$$icv1(t) := 495 \cdot e^{-120t}$$

$$icv2(t) := 383 \cdot e^{-115t} \cdot \sin\left(507t - \frac{32}{180} \cdot \pi\right)$$

$$inp(t) := 660 \cdot \sin\left(314t + \frac{125}{180} \pi\right)$$

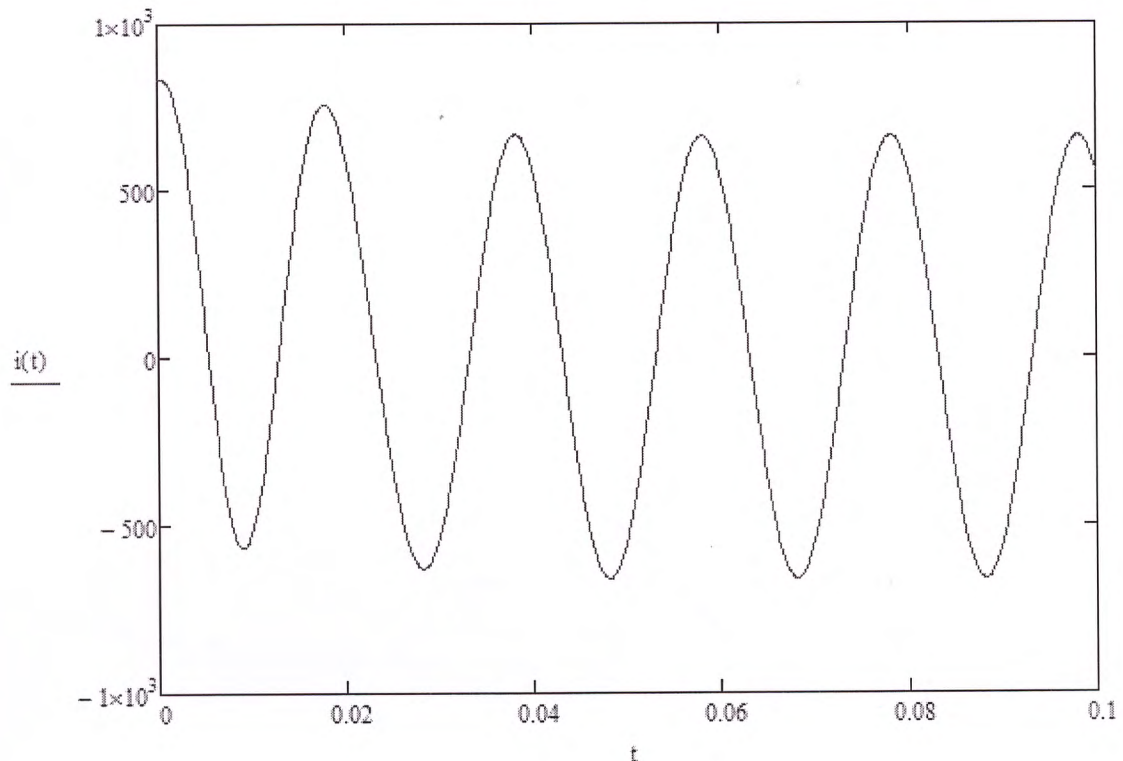
График свободных и принуждённой составляющих:



$t := 0,0001..0.1$

$i(t) := icb1(t) + icb2(t) + imp(t)$

График переходного процесса:



11. Анализ расчётов и выводов о режиме работы цепи без компенсатора, о назначении компенсатора; о распределении нагрузки и о переходных процессах в цепи.

Как правило, нагрузка в сетях имеет активно-индуктивный характер и для уменьшения индуктивной составляющей тока применяют компенсатор, имеющий активно-емкостную нагрузку.

При работе цепи без компенсатора значение $\cos\varphi_C = 0,48$, а при подключении компенсатора оно увеличилось до $\cos\varphi_C' = 0,994$; реактивная мощность Q уменьшилась от значения 94249 ВАр до 7466 Вар, а всё это значит, что повысилась эффективность работы питающего трансформатора.

При рассмотрении графика переходного процесса можно увидеть, что в первый момент после коммутации значение тока больше значения принужденной составляющей тока. Переходной процесс затихает приблизительно за 0,05.

Список литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. - М.: Высшая школа, 1978-528 с.
2. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. - М.: Энергия, 1975.
3. Методические указания к курсовой работе.