

ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Факультет приборостроения, информационных
технологий и электроники**

Кафедра «Электроэнергетики и электротехники»

**Пояснительная записка
к курсовой работе**

по дисциплине «Теоретические основы электротехники»

на тему «Расчет трехфазных цепей в установившемся и переходном режиме»

ПГУ 1.130302.200.003 ПЗ

Студент : _____ **Иванов И.И.**

Группа: _____ **13ЕЭ1**

Руководитель:
к.т.н., доцент _____ **Регеда О.Н.**

Работа защищена с оценкой _____

Преподаватель _____

Дата защиты _____

Пенза 2015

Содержание

Задание	2
Содержание	3
Введение.....	4
1 Расчет трехфазной сети с первым и вторым потребителем без компенсатора (1-5 п.п. задания).....	4
2 Расчет трехфазной сети с первым и вторым потребителем с компенсатором (6-13 п.п. задания).....	
3 Расчет переходного процесса.....	
Заключение	
Список литературы	
Приложение. Результаты моделирования цепей в среде Electronics Workbench(17 п. задания).....	

					ПГУ 1.130302.200.003 ПЗ			
Изм	Лист	№ документа	Подпись	Дата	Содержание	Литера	Лист	Листов
Разраб.		Иванов И.И.						
Пров.		Регеда О.Н.					3	
						Каф. ЭиЭ, группа 13ЕЭ1(2)		
Н. конт.								
Утв.								

Введение

Системой электроснабжения называется совокупность устройств, служащих для передачи, преобразования и распределения электрической энергии. Система электроснабжения промышленного предприятия предназначена для снабжения электроэнергией приемников, к которым относятся электродвигатели различных производственных механизмов, электрические печи, установки электрической сварки, осветительные, электролизные установки и т. п.

Наибольшее распространение в современной электроэнергетике получили трехфазные цепи, которые являются основой сетей и систем энергоснабжения. Трёхфазная система была предложена М. О. Доливо-Добровольским, который разработал все основные звенья этой системы – генераторы, трансформаторы, линии передачи и двигатели трёхфазного тока.

В трёхфазной системе электроснабжения действуют созданные общим источником синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые друг относительно друга во времени на определённый фазовый угол равный 120° . Каждую отдельную цепь такой системы коротко называют ее фазой, а систему трех сдвинутых по фазе переменных токов в таких цепях называют просто трехфазным током. Практическое применение имеют электрически связанные трёхфазные системы, образованные фазными обмотками трёхфазного генератора, соединительными (линейными) проводами и тремя приёмниками электроэнергии (фазами нагрузки), соединенными по схеме «звезда» или «треугольник». При соединении нагрузки по схеме «звезда» кроме линейных проводов, можно включать нейтральный (нулевой) провод, соединяющий нейтральные точки генератора и нагрузки, что уменьшает взаимное влияние режимов работы фаз трёхфазной цепи и обеспечивает возможность подключения к трёхфазной цепи однофазной нагрузки.

Трёхфазные сети обладают рядом преимуществ как перед другими многофазными цепями, так и в отношении однофазных цепей переменного тока. Из них можно отметить следующие: экономичность передачи энергии по сравнению с однофазными цепями; возможность сравнительно простого получения кругового вращающегося магнитного поля, необходимого для трёхфазного асинхронного двигателя одного из самых распространенных двигателей переменного тока; возможность получения в одной

установке двух эксплуатационных напряжений – фазного и линейного; уравниваемость системы, что приводит к равномерной механической нагрузке на энергогенерирующую установку и значительно увеличивает срок её службы.

При расчеты трехфазных цепей необходимо учитывать режимы ее работы.

В общем случае в быту в качестве нагрузки трехфазной цепи используются электрические установки и аппараты, которые являются приемниками практически резистивного характера с коэффициентом мощности близким к единице. При этом нагрузка трехфазной сети принципиально несимметричная, но наличие нейтрального провода обеспечивает симметричный режим работы для нагрузки.

На промышленных предприятиях нагрузка в трехфазной сети распределена более равномерно в основном из-за наличия большого количества трехфазных электрических машин и из-за лучшей организации подключения к сети других элементов потребления. Однако электрические машины часто работают в недогруженном режиме, при низком значении коэффициента мощности, что снижает эффективность работы электростанции. Одним из способов улучшения коэффициента мощности является использование устройств компенсации реактивной мощности, в качестве которых можно использовать конденсаторы, требуемой мощности.

При работе систем электроснабжения имеют место переходные процессы при подключении и отключении мощных потребителей, а также при возникновении аварийных режимов работы сети, что необходимо учитывать во избежании перенапряжений и перегрузок по току.

1 Расчет трехфазной сети с первым и вторым потребителем без компенсатора

На рисунке 1 представлена эквивалентная схема рассчитываемой трехфазной сети при отключенном компенсаторе.

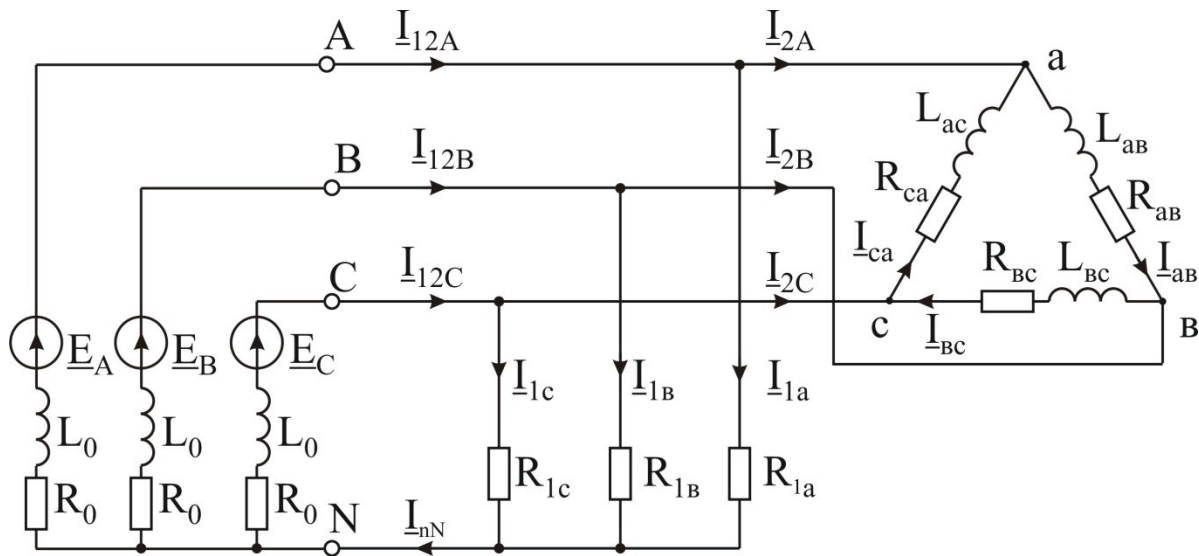


Рисунок 1

Начальные условия для варианта 200

Источник трехфазного напряжения представляет собой генератор, обмотки которого соединены «звездой» с нулевым проводом с линейным напряжением $U = 660$ В и внутренним фазным сопротивлением $R_0 = 0,081$ Ом; $X_0 = 0,6$ Ом.

Потребитель 1 представляет собой резистивную несимметричную нагрузку по схеме «звезда» с нулевым проводом, мощности фаз которого составляют $P_{1a} = 8100$ Вт; $P_{1b} = 6600$ Вт; $P_{1c} = 6000$ Вт.

Потребитель 2 является симметричной нагрузкой по схеме «треугольник» с активной мощностью $P_2 = 54000$ Вт и коэффициентом мощности $\cos\varphi_2 = 0,6$ активно-индуктивного характера.

Расчет проводится в среде MathCAD, поэтому в приведенных фрагментах программ из MathCAD комплексные величины приведены в отчете без подчеркивания.

$$U_{\phi} := \frac{U}{\sqrt{3}} = 381.051 \text{ V}$$

1.1 Фазное напряжение генератора в вольтах равно

Проведем расчет модулей действующих значений фазных токов I_{1a} , I_{1b} , I_{1c} :

$$I_{1a} := \frac{P_{1a}}{U_{\phi}} = 21.257 \text{ A} \quad I_{1b} := \frac{P_{1b}}{U_{\phi}} = 17.321 \text{ A} \quad I_{1c} := \frac{P_{1c}}{U_{\phi}} = 15.746 \text{ A}$$

Так как напряжение и ток на резисторе совпадают по фазе, то комплексы действующих значений фазных токов \underline{I}_{1a} , \underline{I}_{1b} , \underline{I}_{1c} равны

$$\begin{aligned}\underline{I}_{1a} &:= \underline{I}_{1a} \cdot e^{j \cdot 0^\circ} = 21.257 \text{ A} \\ \underline{I}_{1b} &:= \underline{I}_{1b} \cdot e^{-j \cdot 120^\circ} = (-8.66 - 15i) \text{ A} \\ \underline{I}_{1c} &:= \underline{I}_{1c} \cdot e^{j \cdot 120^\circ} = (-7.873 + 13.636i) \text{ A}\end{aligned}$$

Ток в нейтральном проводе по первому закону Кирхгофа равен $\underline{I}_{nN} = \underline{I}_{1a} + \underline{I}_{1b} + \underline{I}_{1c}$. Так как нагрузка несимметричная, то \underline{I}_{nN} будет отличен от нуля и равен:

$$\underline{I}_{nN} := \underline{I}_{1a} + \underline{I}_{1b} + \underline{I}_{1c} = (4.724 - 1.364i) \text{ A}$$

1.2 Полная мощность в ваттах, потребляемая вторым приемником, равна

$$S_2 := \frac{P_2}{\cos \varphi_2} = (9 \cdot 10^4) \text{ W}$$

. Так как второй приемник является симметричной нагрузкой, то

$$S_{2\phi} := \frac{S_2}{3} = (3 \cdot 10^4) \text{ W}$$

полная мощность в ваттах для каждой фазы равна

$$I_{2\phi} := \frac{S_{2\phi}}{U} = 45.455 \text{ A}$$

амперах второго приемника по модулю равны

По заданному коэффициенту мощности второго приемника $\cos \varphi_2 = 0,6$ найдем для него сдвиг по фазе между фазным напряжением и током φ_2 в градусах как

$$\varphi_2 := \arccos(\cos \varphi_2) \cdot \frac{180}{\pi} = 53.13$$

С учетом известных начальных фаз линейных напряжений в трехфазной цепи найдем комплексы действующих значений фазных токов \underline{I}_{ab} , \underline{I}_{bc} , \underline{I}_{ca} в амперах:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{ab} &:= I_{2\phi} \cdot e^{j \cdot (30 - \varphi_2)^\circ} = (41.801 - 17.855i) \text{ A} \\ \underline{I}_{bc} &:= I_{2\phi} \cdot e^{j \cdot (-90 - \varphi_2)^\circ} = (-36.364 - 27.273i) \text{ A} \\ \underline{I}_{ca} &:= I_{2\phi} \cdot e^{j \cdot (150 - \varphi_2)^\circ} = (-5.437 + 45.128i) \text{ A}\end{aligned}$$

Для нахождения линейных токов второго потребителя \underline{I}_{2A} , \underline{I}_{2B} , \underline{I}_{2C} составим для каждого узла «треугольника» уравнения по первому закону Кирхгофа, откуда получим

$$\begin{aligned}I_{2A} &:= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = (47.238 - 62.984i) \text{ A} \\ I_{2B} &:= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = (-78.164 - 9.417i) \text{ A} \\ I_{2C} &:= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = (30.927 + 72.401i) \text{ A}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}|\underline{I}_{2A}| &= 78.73 \text{ A} \\ |\underline{I}_{2B}| &= 78.73 \text{ A} \\ |\underline{I}_{2C}| &= 78.73 \text{ A}\end{aligned}$$

(1)

Фазные токи источника I_{12A} , I_{12B} , I_{12C} найдем как сумму линейных токов каждого из приемников

$$\begin{aligned} I_{12A} &:= I_{1a} + I_{2A} = (68.495 - 62.984i) \text{ A} & |I_{12A}| &= 93.051 \text{ A} \\ I_{12B} &:= I_{1b} + I_{2B} = (-86.825 - 24.417i) \text{ A} & |I_{12B}| &= 90.193 \text{ A} \\ I_{12C} &:= I_{1c} + I_{2C} = (23.054 + 86.037i) \text{ A} & |I_{12C}| &= 89.072 \text{ A} \end{aligned} \quad (2)$$

1.3 Суммарная активная мощность в ваттах [Вт] двух приемников равна

$$P_{\text{сети}} := P_{1a} + P_{1b} + P_{1c} + P_2 = (7.47 \cdot 10^4).$$

Суммарная реактивная мощность в [ВАр] второго приемника равна

$$Q_2 := S_2 \cdot \sin(\varphi_2^\circ) = (7.2 \cdot 10^4).$$

Суммарная полная мощность в [ВА] двух приемников равна

$$S_{\text{сети}} := \sqrt{P_{\text{сети}}^2 + Q_2^2} = (1.038 \cdot 10^5).$$

Коэффициент мощности сети найдем как

$$\cos \varphi_{\text{сети}} := \frac{P_{\text{сети}}}{\sqrt{P_{\text{сети}}^2 + Q_2^2}} = 0.72$$

По коэффициенту мощности сети $\cos \varphi_{\text{сети}} = 0,72$ найдем для него сдвиг по фазе между фазным напряжением и током генератора $\varphi_{\text{сети}}$ в градусах как

$$\varphi_{\text{сети}} := \arccos(\cos \varphi_{\text{сети}}) \cdot \frac{180}{\pi} = 43.946$$

1.4 Рассчитаем параметров развернутой схемы трехфазной сети с отключенным компенсатором:

– фазные сопротивления первого потребителя R_{1a} , R_{1b} , R_{1c} в омах равны

$$R_{1a} := \frac{U_{\phi}^2}{P_{1a}} = 17.926 \text{ } \Omega \quad R_{1b} := \frac{U_{\phi}^2}{P_{1b}} = 22 \text{ } \Omega \quad R_{1c} := \frac{U_{\phi}^2}{P_{1c}} = 24.2 \text{ } \Omega ;$$

– фазные сопротивления второго потребителя Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} в омах равны между собой, т.к. нагрузка симметричная и определяются как

$$\begin{aligned} R_{\phi} &:= \frac{P_2}{3 \cdot I_{2\phi}^2} = 8.712 \text{ } \Omega & X_{\phi} &:= \frac{S_2 \cdot \sin(\varphi_2^\circ)}{3 \cdot I_{2\phi}^2} = 11.616 \text{ } \Omega \\ Z_{ab} &:= R_{\phi} + j \cdot X_{\phi} = (8.712 + 11.616i) \text{ } \Omega & Z_{bc} &:= Z_{ab} & Z_{ca} &:= Z_{ab} ; \end{aligned}$$

– по реактивному фазному сопротивлению найдем фазную индуктивность в

генриях как
$$L_{\phi} := \frac{X_{\phi}}{2 \cdot \pi \cdot f} = 0.037 \text{ H}$$
.

1.5 На рисунке 2 приведена векторная диаграмма фазных токов \underline{I}_{1a} , \underline{I}_{1b} , \underline{I}_{1c} и напряжений \underline{U}_{1a} , \underline{U}_{1b} , \underline{U}_{1c} для первого потребителя. Из которой видно, что сдвиг по фазе между фазными напряжениями и токами при чисто резистивной нагрузке отсутствует.

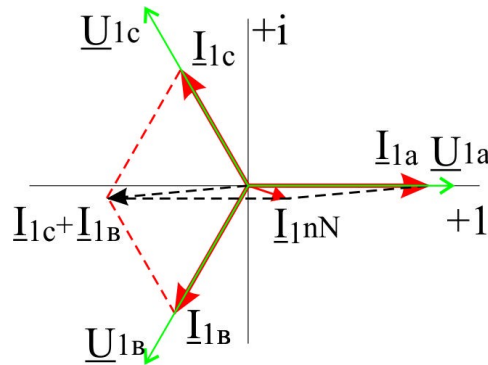


Рисунок 2 – Масштаб: 1 см = 10 А, 1см = 140 В

Векторная сумма фазных напряжений, совпадает с расчетным значение тока в нейтрали \underline{I}_{nN} , что свидетельствует о выполнении первого закона Кирхгофа.

1.4 На рисунке 3 приведена векторная диаграмма фазных токов \underline{I}_{2a} , \underline{I}_{2b} , \underline{I}_{2c} и напряжений \underline{U}_{2a} , \underline{U}_{2b} , \underline{U}_{2c} второго потребителя. Из которой видно, что сдвиг по фазе между фазными напряжениями и токами φ_2 составляет примерно 53° , что соответствует расчетному значению для резистивно-индуктивной нагрузки второго приемника.

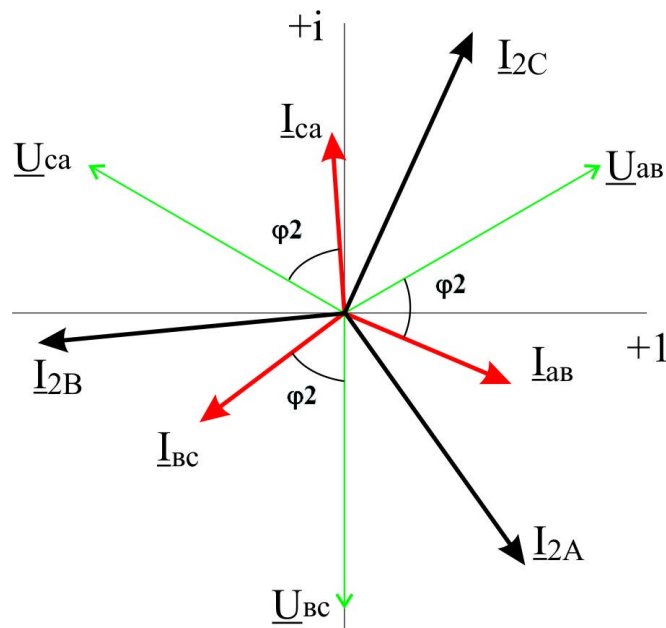


Рисунок 3 – Масштаб: 1 см = 20 А, 1см = 175 В

Линейные токи второго приемника \underline{I}_{2A} , \underline{I}_{2B} , \underline{I}_{2C} можно найти как векторную разность его фазных токов в соответствии с выражением (1). Полученные значения совпадают с расчетными значениями.

1.5 На рисунке 4 приведена векторная диаграмма линейных токов для первого и второго потребителя. Линейные токи источника питания \underline{I}_{12A} , \underline{I}_{12B} , \underline{I}_{12C} построены как векторная сумма линейных токов каждого из приемников в соответствии с выражением (2) и совпадают с расчетными значениями. Сдвиг по фазе между фазным напряжением и током генератора $\varphi_{\text{сети}}$ равен примерно 44° .

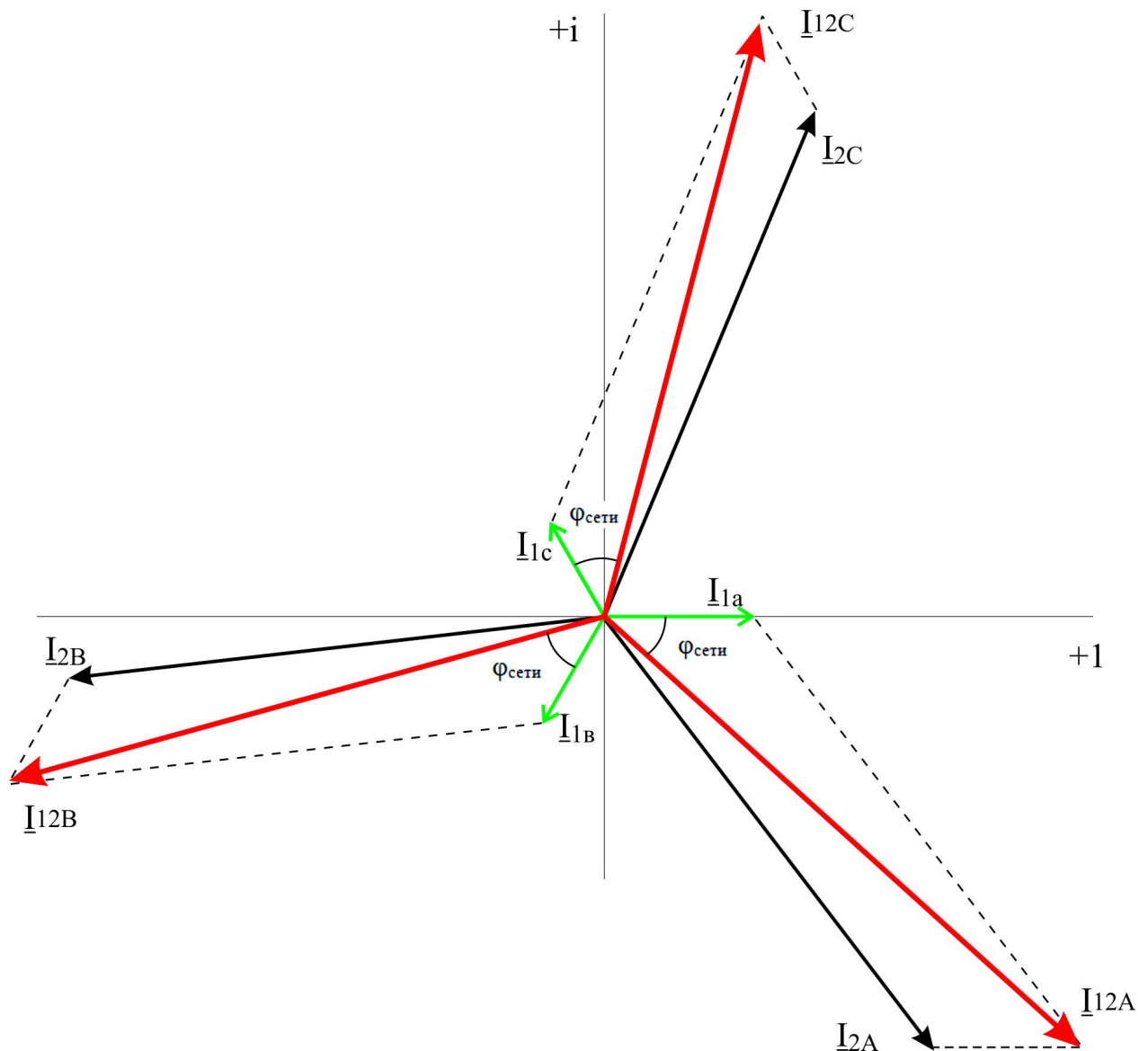


Рисунок 4 Масштаб: 1 см = 10 А

1.6 Расчитаем ЭДС фазы С генератора с учетом его внутреннего сопротивления \mathbf{R}_0 , \mathbf{X}_0 как

$$E_C := Z_0 \cdot I_{12C} + U_\phi \cdot e^{j \cdot 120^\circ} = (-240.281 + 350.801i) .$$

$$|EC| = 425.201 \quad \varphi_{EC} := \arg(EC) \cdot \frac{180}{\pi} = 124.409$$

2 Расчет трехфазной сети с первым и вторым потребителем с компенсатором

2.1 Вычислим эквивалентные параметры компенсатора R_K и C_K из условия улучшения коэффициента мощности второго приемника до значения $\cos \varphi_{2K} = 0,99$ с учетом потерь компенсатора $P_K = 450$ Вт.

$$P_K := 450 \text{ W} \quad \cos \varphi_{2K} := 0.99 \quad \varphi_{2K} := \arccos(\cos \varphi_{2K}) \quad \arccos(\cos \varphi_{2K}) \cdot \frac{180}{\pi} = 8.11$$

$$Q_2 := S_2 \cdot \sin(\varphi_2^\circ) = (7.2 \cdot 10^4) \text{ W} \quad P_{2K} := P_2 + P_K = (5.445 \cdot 10^4) \text{ W}$$

Допустимое значение коэффициента мощности второго потребителя с компенсатором равно $\cos \varphi_{2K} = \frac{P_{2K}}{\sqrt{P_{2K}^2 + Q_{2K}^2}} = 0,99$.

Из последнего выражения найдем выражение для реактивной мощности второго приемника с компенсатором в ваттах

$$Q_{2K} := \sqrt{\left(\frac{P_{2K}}{\cos \varphi_{2K}}\right)^2 - P_{2K}^2} = (7.759 \cdot 10^3) \text{ W}$$

Откуда найдем реактивную мощность компенсатора как

$$Q_K := Q_{2K} - Q_2 = -6.424 \cdot 10^4 \text{ W}$$

Таким образом, комплекс полной мощности компенсатора равен

$$S_K := P_K + j \cdot Q_K = (450 - 6.424i \cdot 10^4) \text{ W}$$

Исходя из заданной мощности потерь компенсатора P_K и найденной реактивной мощности Q_K найдем параметры последовательных схем замещения фазных компенсаторов (C_K, R_K), соединенных по схеме «звезда» (рисунок 5).

С учетом того, что комплекс полной мощности цепи равен $\underline{S}_K = \underline{U} \underline{I}^*$ найдем выражение для комплекса полной мощности, например, в фазе А трехфазной цепи с компенсатором как $\underline{S}_{KA} = \underline{U}_A \underline{I}_A^*$. Откуда получим выражение для комплексно сопряженной полной мощности в фазе А как $\underline{S}_{KA}^* = \underline{U}_A \underline{I}_A = \underline{U}_A^2 / \underline{Z}_K = 1/3 \underline{S}_K^*$.

Таким образом, комплекс полного фазного сопротивления компенсатора равен

$$\underline{Z}_K := \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{P_K - j \cdot Q_K} = (0.047 - 6.78i) \Omega$$

Т.к. компенсатор представляет собой симметричную нагрузку, то фазные сопротивления R_K в омах и емкость C_K компенсатора будут одинаковые и равны

$$R_K := \operatorname{Re}(Z_K) = 0.047 \, \Omega \quad f := 50 \, \text{Hz} \quad C_K := \left| \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \operatorname{Im}(Z_K)} \right| = (4.695 \cdot 10^{-4}) \, \text{F}$$

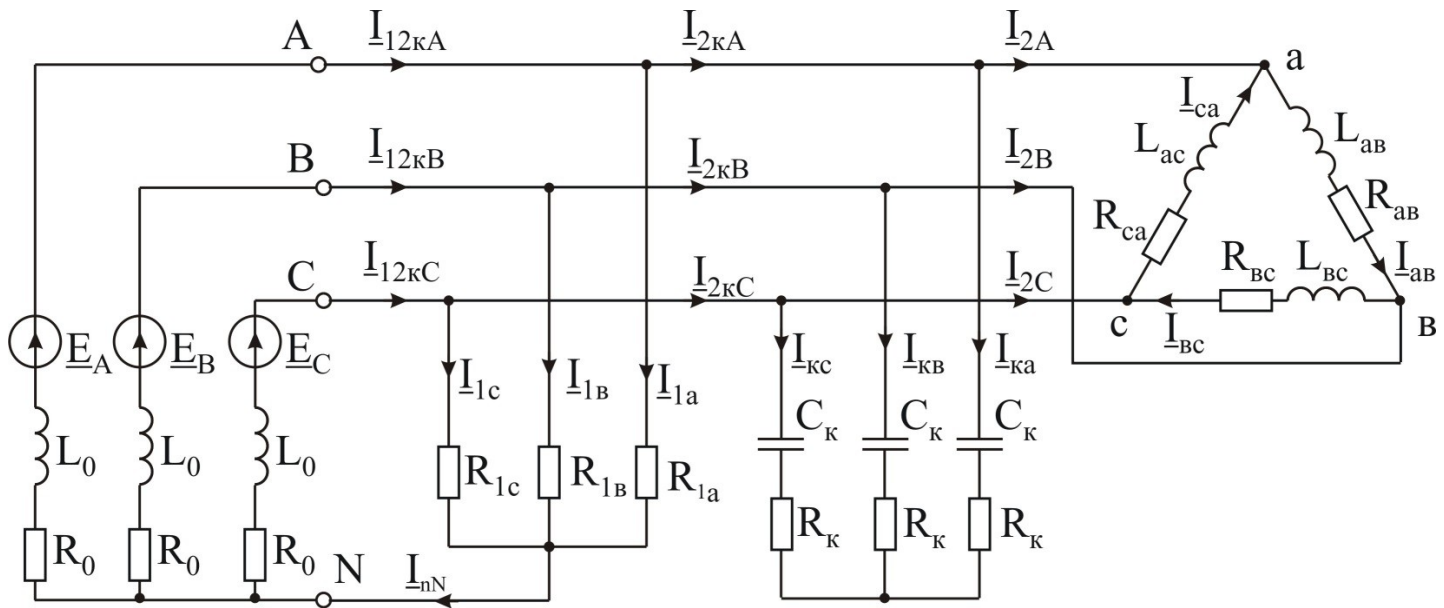


Рисунок 5

2.2 Фазные токи компенсатора I_{Ka} , I_{Kb} , I_{Kc} будут равны

$$\begin{aligned} I_{Ka*} &:= \frac{P_K + j \cdot Q_K}{3 \cdot U_\phi} = (0.394 - 56.197i) \, \text{A} & I_{Ka} &:= \frac{U_\phi}{Z_K} = (0.394 + 56.197i) \, \text{A} \\ I_{Kb*} &:= \frac{P_K + j \cdot Q_K}{3 \cdot U_\phi \cdot e^{-j \cdot 120^\circ}} = (48.471 + 28.439i) \, \text{A} & I_{Kb} &:= \frac{U_\phi \cdot e^{-j \cdot 120^\circ}}{Z_K} = (48.471 - 28.439i) \, \text{A} \\ I_{Kc*} &:= \frac{P_K + j \cdot Q_K}{3 \cdot U_\phi \cdot e^{j \cdot 120^\circ}} = (-48.864 + 27.757i) \, \text{A} & I_{Kc} &:= \frac{U_\phi \cdot e^{j \cdot 120^\circ}}{Z_K} = (-48.864 - 27.757i) \, \text{A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |I_{Ka}| &= 56.198 \, \text{A} & \varphi_{Ka} &:= \arg(I_{Ka}) \cdot \frac{180}{\pi} = 89.599 \\ |I_{Kb}| &= 56.198 \, \text{A} & \varphi_{Kb} &:= \arg(I_{Kb}) \cdot \frac{180}{\pi} = -30.401 \\ |I_{Kc}| &= 56.198 \, \text{A} & \varphi_{Kc} &:= \arg(I_{Kc}) \cdot \frac{180}{\pi} = -150.401 \end{aligned}$$

Линейные токи второго потребителя с включенным компенсатором I_{2kA} , I_{2kB} , I_{2kC} найдем как сумму найденных ранее токов второго потребителя и компенсатора.

$$\begin{aligned} I_{2kA} &:= I_{2A} + I_{Ka} = (47.631 - 6.787i) \, \text{A} \\ I_{2kB} &:= I_{2B} + I_{Kb} = (-29.694 - 37.856i) \, \text{A} \\ I_{2kC} &:= I_{2C} + I_{Kc} = (-17.938 + 44.644i) \, \text{A} \end{aligned}$$

(3)

$\varphi_{2kA} := \arg(I_{2kA}) \cdot \frac{180}{\pi} = -8.11$	$ I_{2kA} = 48.113 \text{ A}$	+
$\varphi_{2kB} := \arg(I_{2kB}) \cdot \frac{180}{\pi} = -128.11$	$ I_{2kB} = 48.113 \text{ A}$	
$\varphi_{2kC} := \arg(I_{2kC}) \cdot \frac{180}{\pi} = 111.89$	$ I_{2kC} = 48.113 \text{ A}$	
$\varphi_{2k} := (\arg(U_\phi) - \arg(I_{2kA})) \cdot \frac{180}{\pi} = 8.11$		

2.3 На рисунке 6 приведена векторная диаграмма фазных напряжений генератора \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C , а также линейных токов \underline{I}_{2A} , \underline{I}_{2B} , \underline{I}_{2C} второго потребителя и фазных токов компенсатора \underline{I}_{ka} , \underline{I}_{kb} , \underline{I}_{kc} . Линейные токи второго потребителя с компенсатором \underline{I}_{2kA} , \underline{I}_{2kB} , \underline{I}_{2kC} построены как векторная сумма в соответствии с выражением (3) и совпадают с расчетными значениями.

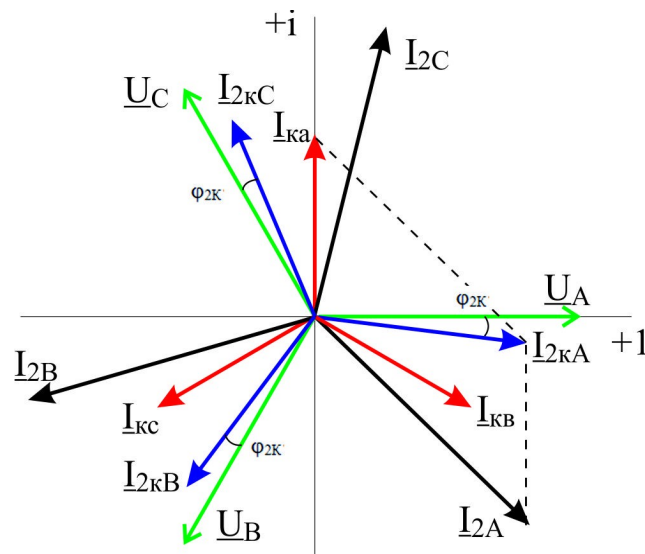


Рисунок 6 – Масштаб: 1 см = 20 А, 1см = 100 В

Сдвиг по фазе между фазными токами второго потребителя с компенсатором и фазными напряжениями генератора φ_{2k} равен примерно 8° , что соответствует расчетному значению.

2.4 Определим линейные токи источника трехфазного напряжения для двух потребителей и компенсатора \underline{I}_{12kA} , \underline{I}_{12kB} , \underline{I}_{12kC} как

$I_{12kA} := I_{2kA} + I_{1a} = (68.888 - 6.787i) \text{ A}$	$ I_{12kA} = 69.222 \text{ A}$
$I_{12kB} := I_{2kB} + I_{1b} = (-38.354 - 52.856i) \text{ A}$	$ I_{12kB} = 65.306 \text{ A}$
$I_{12kC} := I_{2kC} + I_{1c} = (-25.811 + 58.28i) \text{ A}$	$ I_{12kC} = 63.74 \text{ A}$

При этом сдвиг по фазе между фазными токами и напряжениями источника трехфазного напряжения найдем как

$$\varphi_A := (\arg(U_\phi) - \arg(I_{12кA})) \cdot \frac{180}{\pi} = 5.627$$

$$\varphi_B := (\arg(U_\phi \cdot e^{-j \cdot 120^\circ}) - \arg(I_{12кB})) \cdot \frac{180}{\pi} = 5.965$$

$$\varphi_C := (\arg(U_\phi \cdot e^{j \cdot 120^\circ}) - \arg(I_{12кC})) \cdot \frac{180}{\pi} = 6.113$$

2.5 Вычислить результирующий коэффициент мощности всей трехфазной сети, работающей с компенсатором $\cos(\varphi)$.

$$\text{Полная мощность источника}$$

$$S_{\text{сетиК}} := P_{1a} + P_{1b} + P_{1c} + P_2 + P_k + j \cdot Q_{2к} = (7.515 \cdot 10^4 + 7.759i \cdot 10^3) \text{ W}$$

$$\varphi := \arg(S_{\text{сетиК}}) = 0.103$$

$$\text{Результирующий коэффициент мощности} \quad \cos(\varphi) = 0.995$$

$$\varphi := \arccos(\cos(\varphi)) \cdot \frac{180}{\pi} = 5.894$$

2.6 На рисунке 7 приведена векторная диаграмма фазных напряжений генератора \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C , а также линейных токов второго потребителя с компенсатором $\underline{I}_{2кA}$, $\underline{I}_{2кB}$, $\underline{I}_{2кC}$ и первого потребителя \underline{I}_{1a} , \underline{I}_{1b} , \underline{I}_{1c} . С помощью векторной диаграммы найдены векторы суммарных линейных токов источника трехфазного напряжения для двух потребителей и компенсатора $\underline{I}_{12кA}$, $\underline{I}_{12кB}$, $\underline{I}_{12кC}$. Полученные векторы совпадают с расчетными значениями выводы. На векторной диаграмме показаны углы $\varphi_{2к}$ и φ_A , φ_B , φ_C , которые совпадают с расчетными значениями.

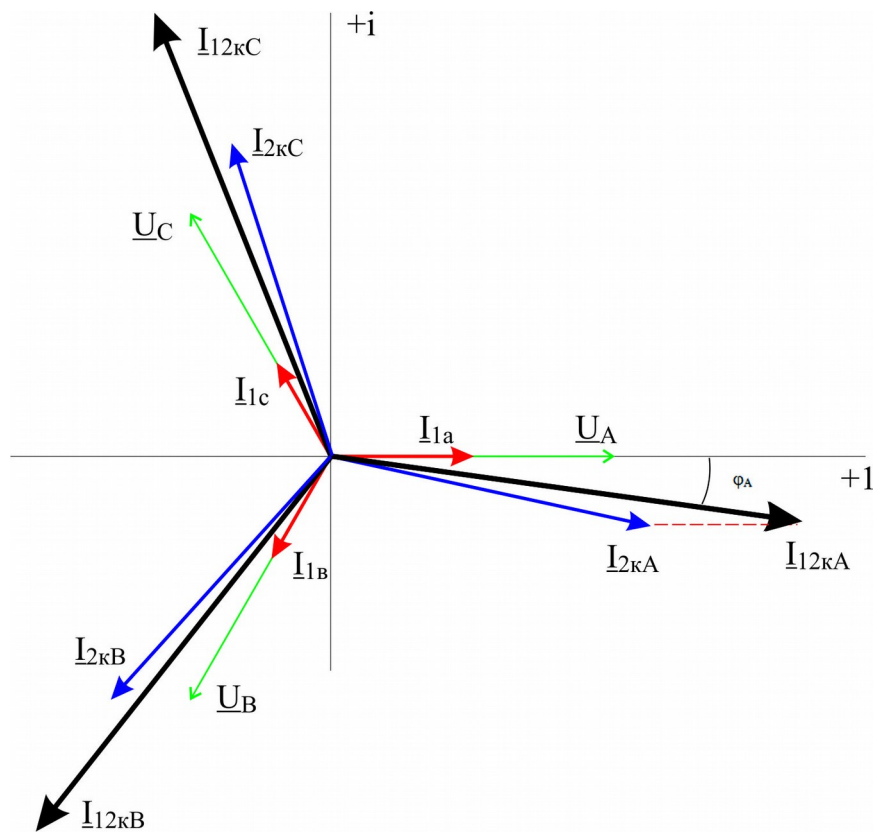


Рисунок 7 – Масштаб: 1 см = 10 А, 1 см = 100 В

2.7 На рисунке 8 приведена векторная диаграмма фазного напряжения и всех линейных токов для фазы А. На векторной диаграмме показаны углы φ_2 и φ_A , которые совпадают с расчетными значениями.

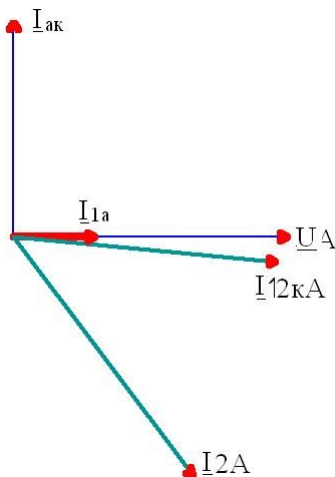


Рисунок 8 – Масштаб: 1 см = 10 А, 1 см = 100 В

2.8 Вычисление результирующего коэффициента мощности всей цепи с подключенным компенсатором.

Полная мощность источника, отдаваемая в сеть с двумя приемниками и компенсатором равна

$S_{\text{сетиК}} := P1a + P1b + P1c + P2 + P_k + j \cdot Q2k = (7.515 \cdot 10^4 + 7.759i \cdot 10^3) \text{ W}$		
$\varphi := \arg(S_{\text{сетиК}}) = 0.103$	Резльтирующий коэффициент мощности	$\cos(\varphi) = 0.995$

2.9 Вычисление фазной ЭДС генератора в фазе А с учетом внутреннего сопротивления генератора R_0 , X_0 при подключенном компенсаторе второго потребителя.

С учетом внутреннего сопротивления генератора, заданного как	
активное сопротивление	$R0 := 0.081 \text{ }\Omega$
и реактивное сопротивление	$X0 := 0.6 \text{ }\Omega$
Комплекс полного сопротивления для фазы А равен:	$Z0 := R0 + j \cdot X0 = (0.081 + 0.6i) \text{ }\Omega$

При отсутствии компенсации второго приемника в соответствии со вторым законом Кирхгофа для фазы А можно записать

$$E_A := U_A + I_{12A} \cdot Z_0 = 426.173 + 37.935i \text{ (В)}.$$

При наличии компенсации второго приемника в соответствии со вторым законом Кирхгофа для фазы А можно записать

$$E_A := U_A + I_{12kA} \cdot Z_0 = 390.896 + 42.734i$$

3 Расчет переходного процесса

Расчитаем переходный процесс в фазе А трехфазной цепи с реальным источником ЭДС при подключении к нему первого и второго потребителя без компенсатора (рисунок 10). То есть найдем закон изменения тока $i_{12A}(t)$.

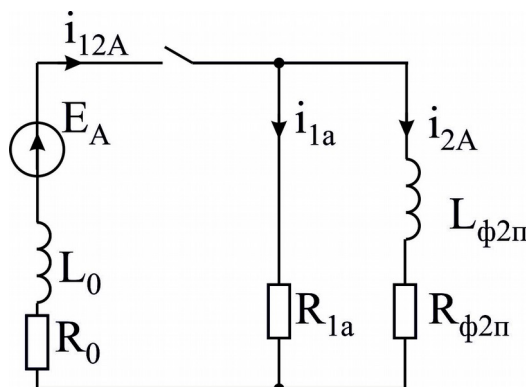


Рисунок 10

Исходные данные для расчета возьмем из раздела 1.

$X_0 := 0.6$	$R_0 := 0.081$	$X_{\phi 2\pi} := 11.616$	$R_{1a} := 17.926$	$R_{\phi 2\pi} := 8.712$
$L_0 := \frac{X_0}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.002$	$L_{\phi 2\pi} := \frac{X_{\phi 2\pi}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.037$	$I_{12A} := 68.495 - 62.984i$		
$E_A := I_{12A} \cdot (R_0 + j \cdot X_0) + \frac{660}{\sqrt{3}} = 424.39 + 35.995i$				$\varphi_{E_A} := \arg(E_A) \cdot \frac{180}{\pi} = 4.848$
$ E_A = 425.913$				

Мгновенные значения фазной ЭДС и тока равны

$$e_A(t) = |E_A| \cdot \sqrt{2} \sin(\arg(E_A)) = 425,913 \sqrt{2} \sin(314t + 4,848^\circ) \text{ В},$$

$$i_{12A}(t) = |I_{12A}| \cdot \sqrt{2} \sin(\arg(I_{12A})) = 93,051 \sqrt{2} \sin(314t - 42,6^\circ) \text{ А}.$$

3.1 Так как до коммутации цепь была отключена от источника ЭДС, то независимые начальные условия (ННУ) в рассматриваемой цепи $i_{12A}(0) = 0$ и $i_{2A}(0) = 0$.

1) Независимые начальные условия	$i_{12A0} := 0$	$i_{2A0} := 0$
----------------------------------	-----------------	----------------

Зависимые начальные условия (ЗНУ) найдем из системы уравнений по законам Кирхгофа, для цепи после коммутации с учетом найденных ННУ

$$\left[\begin{array}{l} 1 \dot{i} - i_{12A} + i_{1a} + i_{2A} = 0 \\ \\ \dot{i} e \dot{i}_A = i_{12A} R_0 + L_0 \frac{d i_{12A}}{dt} + i_{1a} R_{1a} \end{array} \right.$$

$$3) -i_{1a}R_{1a} + i_{2A}R_{\phi 2n} + L_{\phi 2n} \frac{di_{2a}}{dt} = 0$$

Сразу же после коммутации при $t = 0$ с учетом ННУ:

– из уравнения 1) следует, что $i_{1a}(0) = 0$.

– из уравнения 2) следует, что $e_A(0) = L_0 \frac{di_{12A}}{dt}(0) + i_{1a}(0)R_{1a}$

Подставим во второе уравнение значение $i_{1a}(0) = 0$, в результате получим

$$e_A(0) = L_0 \frac{di_{12A}}{dt}(0).$$

Откуда следует что ЗНН для данной цепи равно

$$\frac{di_{12A}}{dt}(0) = \frac{e_A}{L_0}(0). \quad (4)$$

2) Зависимые начальные условия	$di_{12A}0 := \frac{ EA \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\arg(EA))}{L_0} = 2.665 \cdot 10^4$
$i_{1a}0 := 0$	

3.2 Запишем операторное сопротивление цепи и с помощью символьной функции **solve** получим корни характеристического уравнения p_1 и p_2 как

3) Операторное сопротивление	$Z(p) := R_0 + p \cdot L_0 + \frac{1}{\frac{1}{R_{1a}} + \frac{1}{R_{\phi 2n} + p \cdot L_{\phi 2n}}}$
$Z(p) \xrightarrow{\text{solve}} \begin{bmatrix} -9922.9282139889882485 \\ -225.95007170066934518 \end{bmatrix}$	
$p_1 := -9922.9282139889882485$	$p_2 := -225.95007170066934518$

3.3 Так как корни характеристического уравнения действительные разные, то свободная составляющая тока равна $i_{12Ac} = A_2 e^{p_2 t} + A_1 e^{p_1 t}$.

3.4 На рисунке 11 приведена эквивалентная схема электрической цепи в установившемся режиме. Принужденную составляющую тока $i_{12Anp}(t)$ найдем по рассчитанному в разделе 1 комплексу действующего значения $I_{12A} = 68,495 - i62,984$ А как

$$i_{12Anp}(t) = 93,051 \sqrt{2} \sin(314t - 42,6^\circ + \varphi_0) \quad (5)$$

где φ_0 – начальная фаза, учитывающая момент включения по отношению к начальной фазе принужденного тока. Для $\varphi_0 = 0$ получим:

4) Принужденная составляющая равна $I_{12Am} := |I_{12A}| \cdot \sqrt{2} = 131.594$ $\varphi_0 := 0$
 $i_{12Aпр}(t) := I_{12Am} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t + \arg(I_{12A}) + \varphi_0)$ +
 $i_{12Aпр}(0) = -89.073$

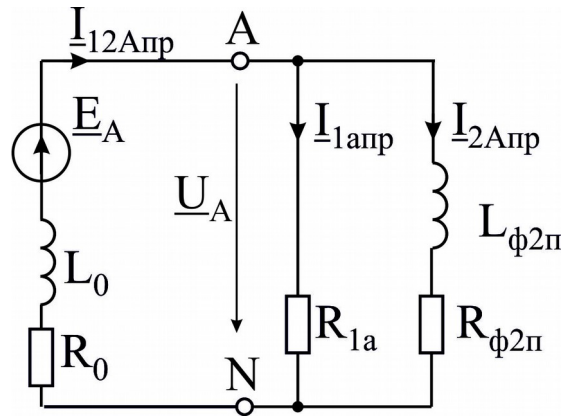


Рисунок 11

Найдем производную от $i_{12Aпр}(t)$ как

$$\frac{di_{12Aпр}}{dt} = 93,051 \sqrt{2} \cdot 314 \cdot \cos(314t - 42,6^\circ + \varphi_0) \quad (6)$$

Для $\varphi_0 = 0$ получим:

Найдем производную от принужденной составляющей как

$$di_{12Aпр}(t) := I_{12Am} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t + \arg(I_{12A}) + \varphi_0)$$

$$di_{12Aпр}(0) = 3.043 \cdot 10^4$$

3.5 Общий ток $i_{12A}(t)$ найдем как сумму свободной и принужденной составляющих

как
$$i_{12A}(t) = i_{12Aпр}(t) + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (7)$$

3.6 Для нахождения постоянных интегрирования в выражении (7) составим систему уравнений в момент времени $t = 0$

$$\begin{aligned} A_1 + A_2 &= i_{12A}(0) - i_{12Aпр}(0) \\ p_1 A_1 + p_2 A_2 &= \frac{di_{12A}(0)}{dt} - \frac{di_{12Aпр}(0)}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом найденных в п.3.1 нулевых ННУ для искомого тока $i_{12A}(0)$ и ЗНУ в выражения (4) для $\frac{di_{12A}}{dt}(0)$, а также выражений (5, 6) составим матрицу коэффициентов M и матрицу свободных членов V как

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ p1 & p2 \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} i_{12A}(0) - i_{12A_{np}}(0) \\ \frac{di_{12A}(0)}{dt} - \frac{di_{12A_{np}}(0)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 - i_{12A_{np}}(0) \\ \frac{e_A(0)}{L_0} - \frac{di_{12A_{np}}(0)}{dt} \end{bmatrix}.$$

Решение системы (8) найдем с помощью функции **solve**

6) Определение постоянных интегрирования ORIGIN := 1

$$M := \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ p1 & p2 \end{bmatrix} \quad V := \begin{bmatrix} i_{12A0} - i_{12A_{np}}(0) \\ di_{12A0} - di_{12A_{np}}(0) \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} 89.073 \\ -3.778 \cdot 10^3 \end{bmatrix}$$

$$A := \text{lsolve}(M, V) = \begin{bmatrix} -1.686 \\ 90.759 \end{bmatrix} \quad A_1 = -1.686 \quad A_2 = 90.759$$

Таким образом, закон изменения тока источника в фазе А равен

$$i_{12A}(t) = 131,594 \sin(314t - 42,6^\circ + \varphi_0) - 1,686 e^{-9923t} + 90,759 e^{-226t} \text{ А}.$$

Построим графики зависимости тока $i_{12A}(t)$ и его составляющих в соответствии с выражением (7) в интервале от нуля до 6τ , где τ равно постоянной времени, соответствующей корню $p2$.

$$\tau := \frac{1}{-p2} = 0.004 \quad t := 0, \frac{\tau}{10} .. 6 \cdot \tau \quad i_{12A}(t) := i_{12A_{np}}(t) + A_1 \cdot e^{p1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{p2 \cdot t}$$

На рисунке 12-16 приводятся временные диаграммы для различных значений начальной фазы, учитывающей момент включения φ_0 . **Обратите внимание, что при**

$\varphi_0 := -\arg(I_{12A})$ **переходного процесса вообще не будет в схеме!!!!**

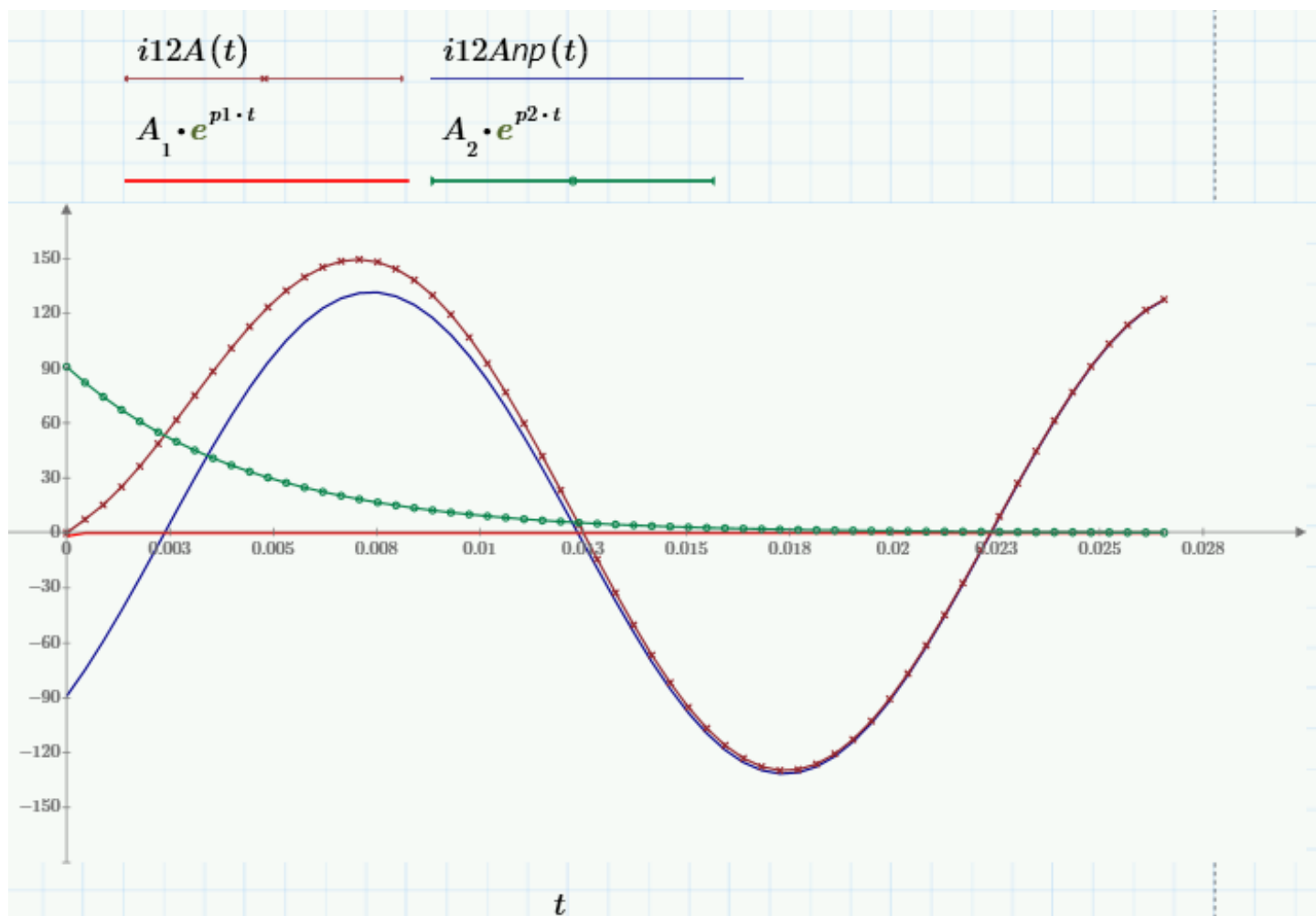


Рисунок 12 – При $\varphi_0 := 0$

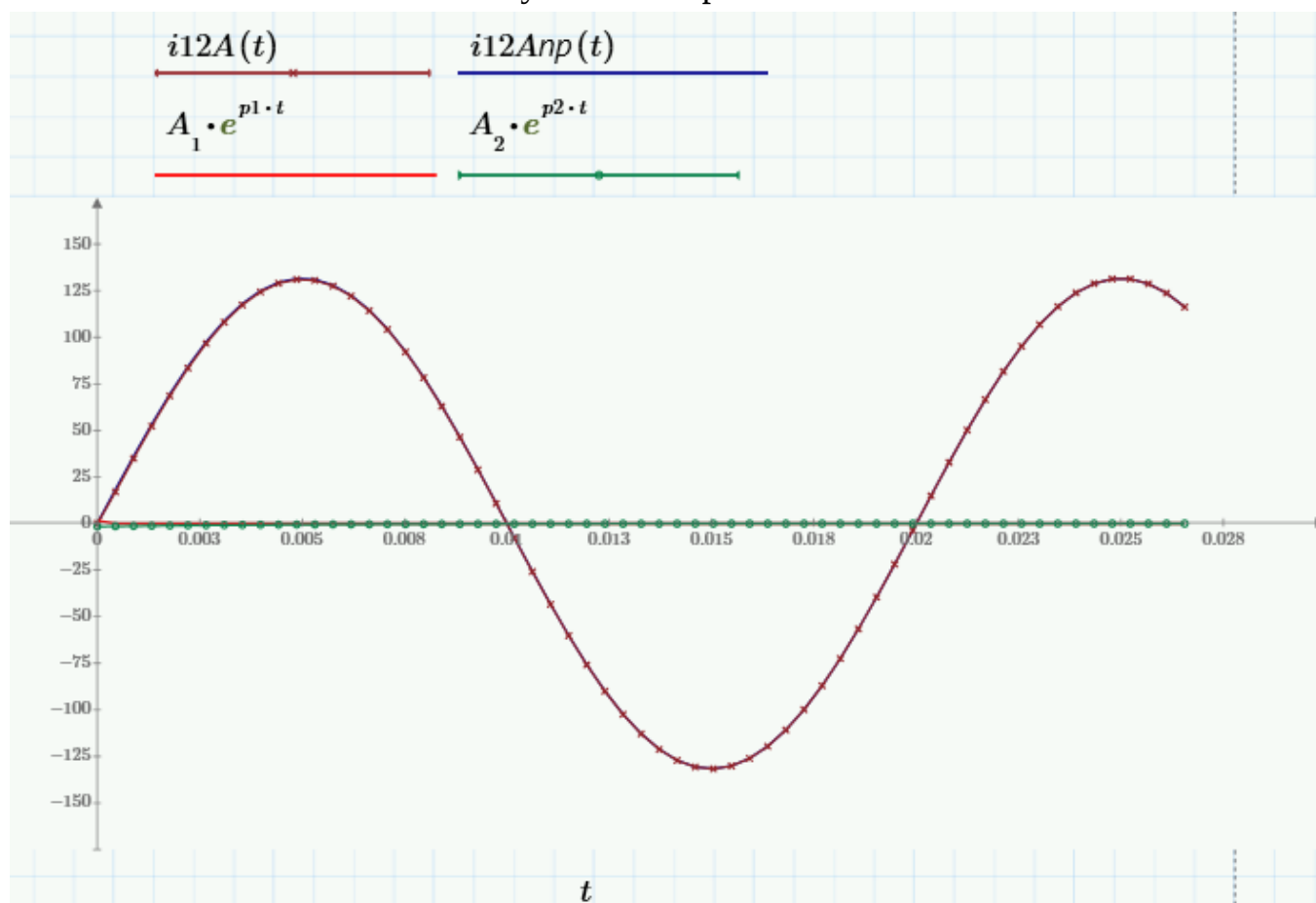


Рисунок 13 – При $\varphi_0 := -\arg(I_{12A})$

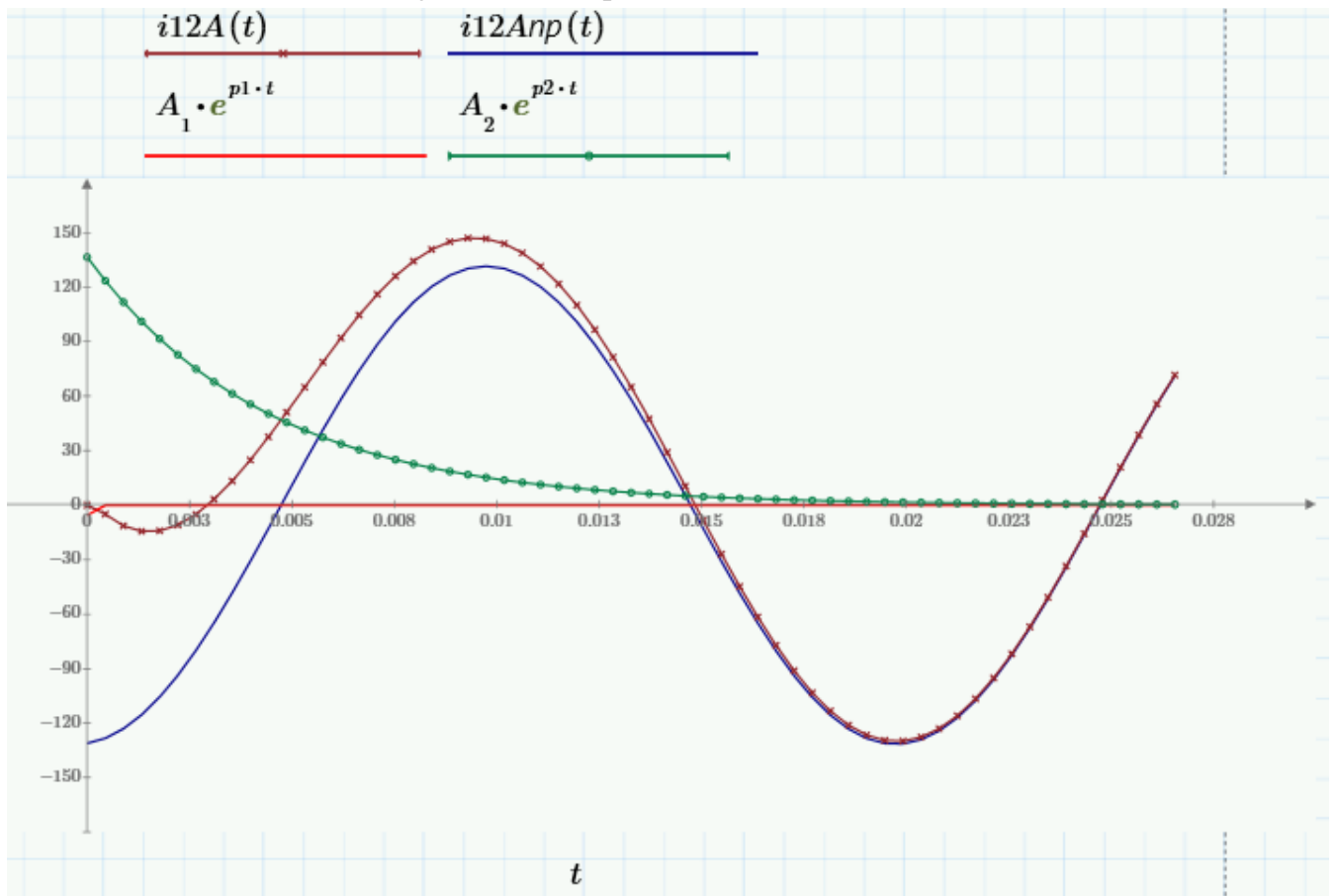


Рисунок 14 – При $\varphi_0 := \arg(I_{12A})$

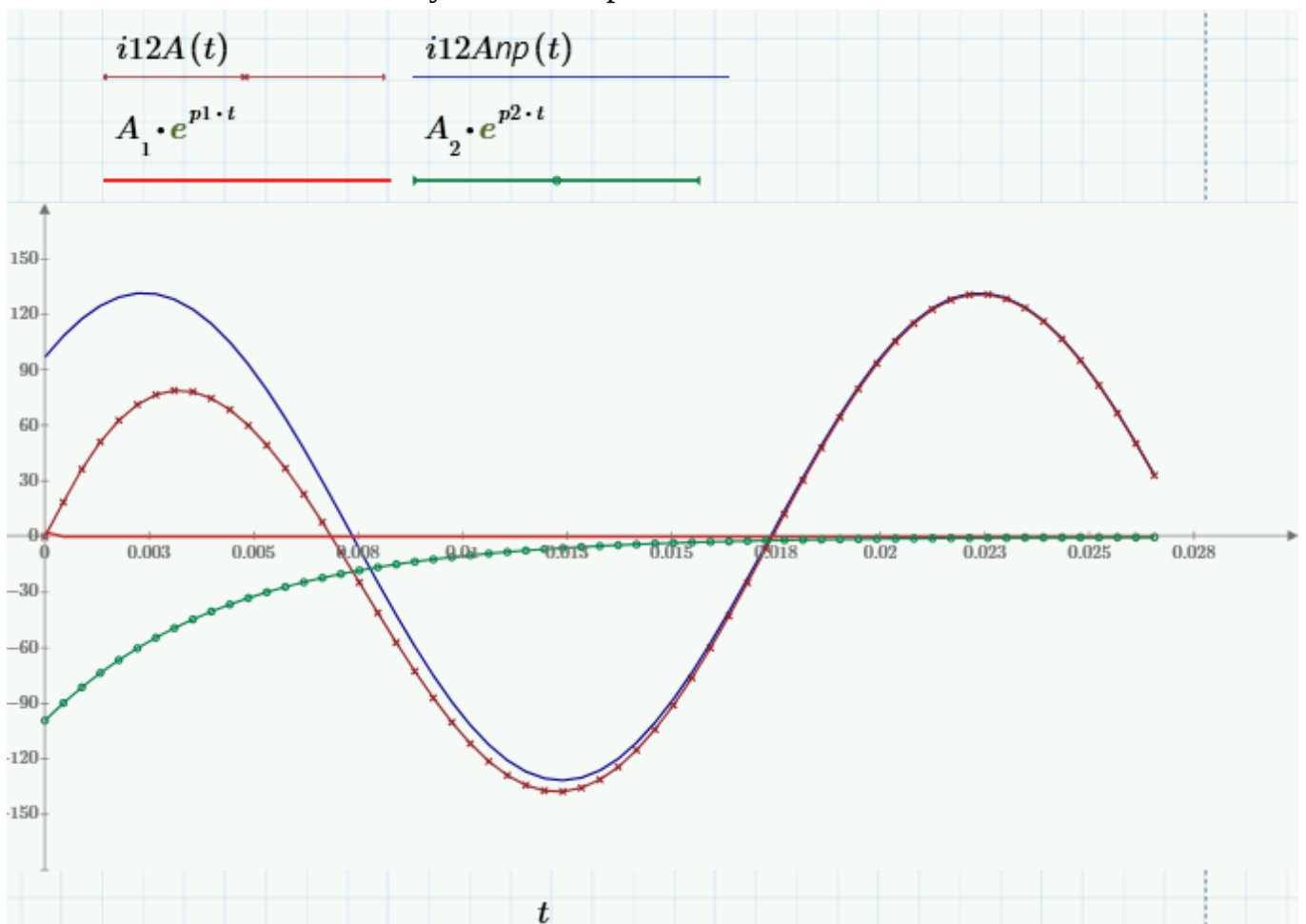


Рисунок 15 – При $\varphi_0 = \pi/2$

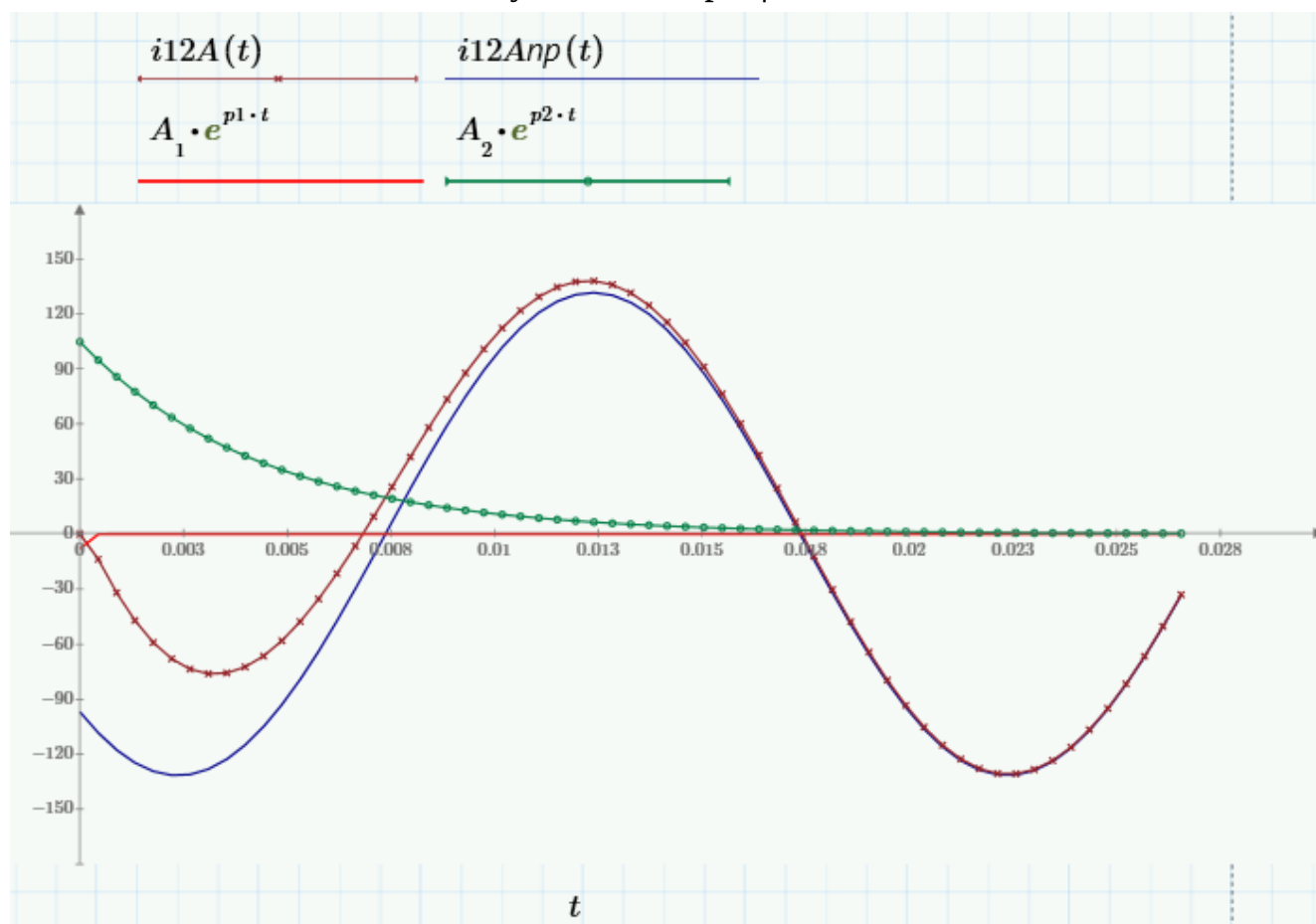


Рисунок 16 – $\varphi_0 = -\pi/2$