

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Е.О. Кулешова, Г.В. Носов, В.А. Колчанова

ЗАДАНИЕ 3

ЛИНЕЙНЫЕ ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ С ГАРМОНИЧЕСКИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ТОКАМИ

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2013

УДК 621.3.11(075.8)

ББК 31.211я73

К901

Кулешова Е.О.

К901

Теоретические основы электротехники. Часть 1: учебное пособие / Е.О. Кулешова, Г.В. Носов, В.А. Колчанова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 208 с.

В пособии рассмотрены основные положения теории линейных электрических цепей и их свойства; приведены методы решения задач по следующим разделам: цепи постоянного тока, цепи однофазного синусоидального и трехфазного токов. Теоретический материал закрепляется примерами и контрольными заданиями с методическими указаниями по их выполнению с использованием программно-интегрированной среды MathCAD.

Пособие подготовлено на кафедре электрических сетей и электротехники и предназначено для студентов ИДО, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.3.011

ББК 31.211я73

Рецензенты

Доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
Ф.Ю. Канев

Доктор технических наук, профессор ТПУ
Ю.П. Усов

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2013

© Кулешова Е.О., Носов Г.В.,
Колчанова В.А., 2013

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЗАДАНИЕ № 3	
ЛИНЕЙНЫЕ ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ С	
ГАРМОНИЧЕСКИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ТОКАМИ	4
1.1. Методические указания к заданию № 3	10
1.2. Документ MathCAD	15
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	23

1. ЗАДАНИЕ № 3

Линейные трехфазные цепи

с гармоническими напряжениями и токами

Для заданной схемы с симметричной системой фазных ЭДС, когда

$$e_A(t) = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega t + \alpha), \quad \omega = 314 \text{ рад/с},$$

выполнить следующее:

1. В симметричном режиме до срабатывания ключа К:
 - 1.1. Определить комплексы действующих значений напряжений и токов на всех элементах схемы.
 - 1.2. Рассчитать балансы активной и реактивной мощностей.
 - 1.3. Построить совмещенные векторные диаграммы токов (лучевую) и напряжений (топографическую) для всех напряжений и токов.
2. В несимметричном режиме после срабатывания ключа К:
 - 2.1. В исходной схеме методом узловых потенциалов определить комплексы действующих значений всех напряжений и токов.
 - 2.2. Составить балансы активной и реактивной мощностей.
 - 2.3. Построить совмещенные векторные диаграммы токов и напряжений.
3. Проанализировать результаты вычислений, сравнить симметричный и несимметричный режимы, сформулировать выводы по работе.

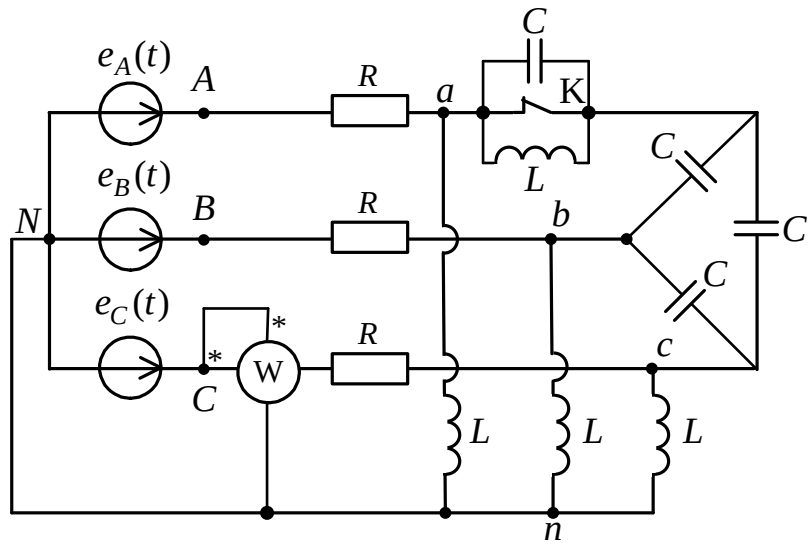
Таблица 1

№	E	α
–	В	град
1	127	0
2	220	30
3	380	45
4	220	60
5	127	90
6	220	180
7	380	–30
8	220	–45
9	127	–60
0	380	–90

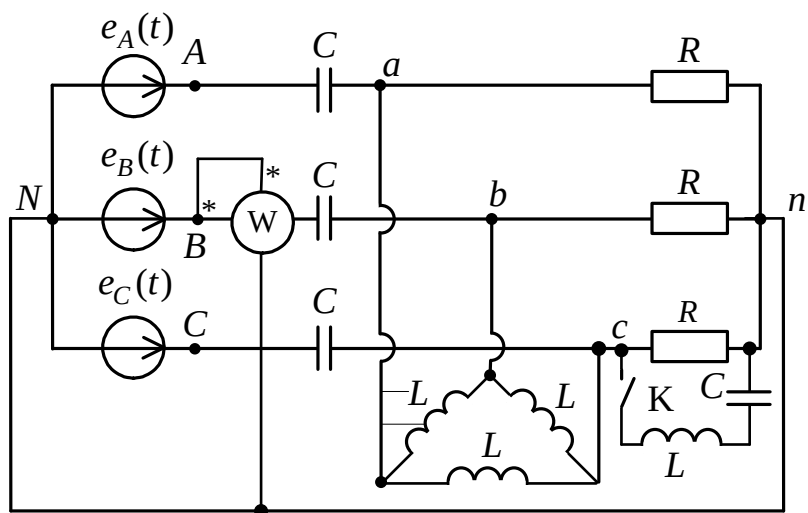
Таблица 2

№	R	L	C
–	Ом	мГн	мкФ
1	100	318,47	31,8
2	90	286,62	35,3
3	80	254,78	39,8
4	70	222,93	45,4
5	60	191,08	53
6	50	159,24	63,6
7	40	127,39	79,6
8	30	95,54	106,1
9	20	63,69	159,2
0	10	31,85	318,4

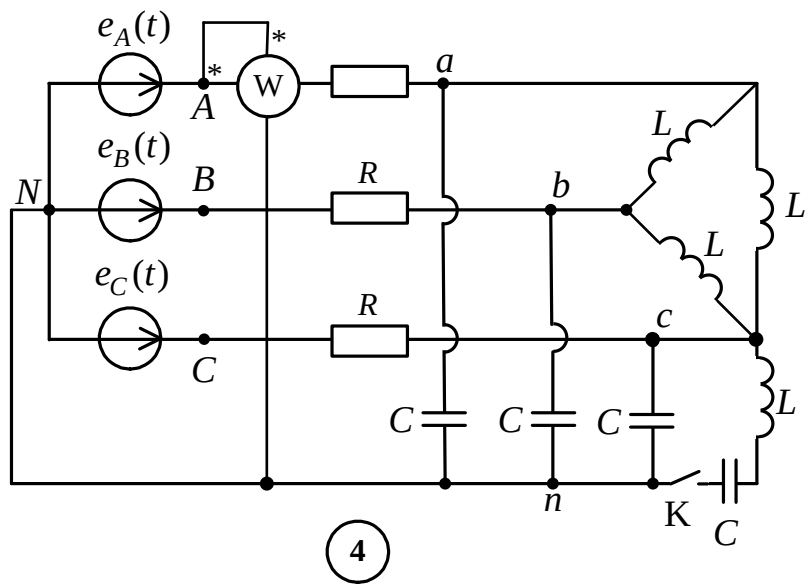
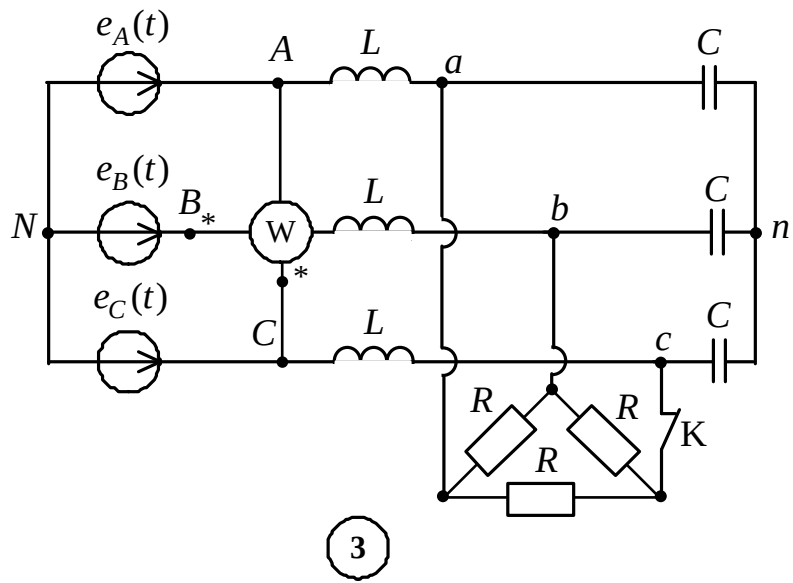
Схемы для задания 3

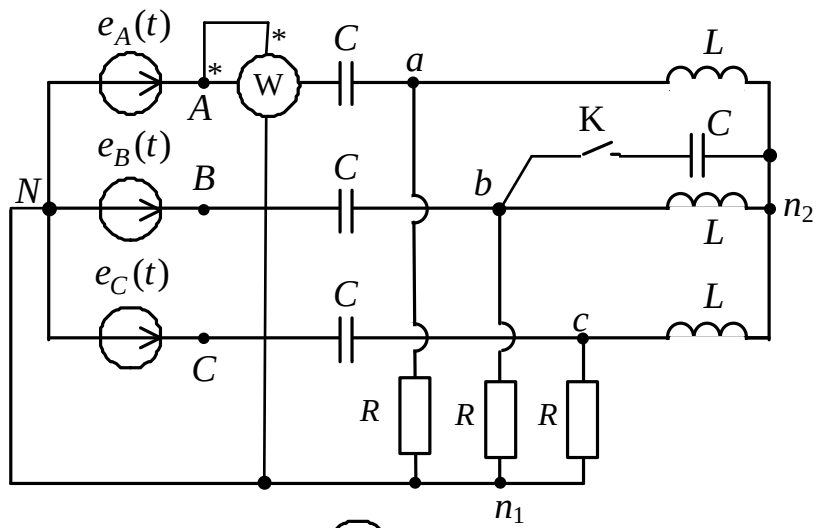


1

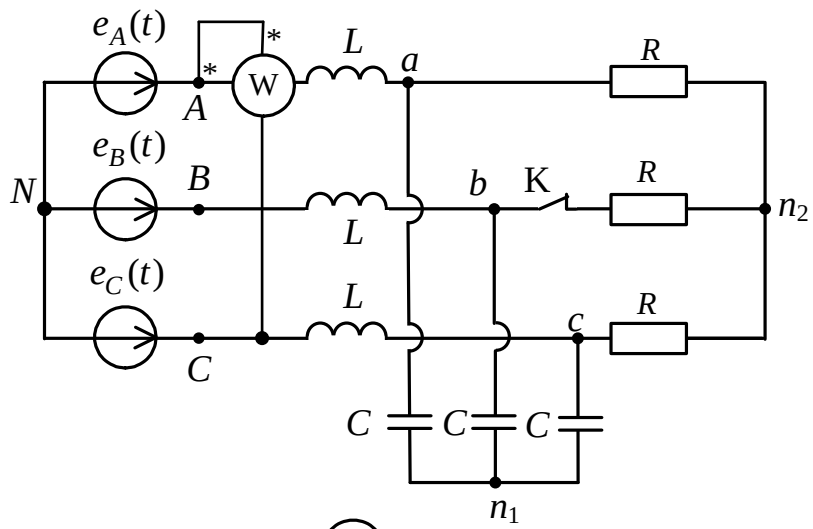


2

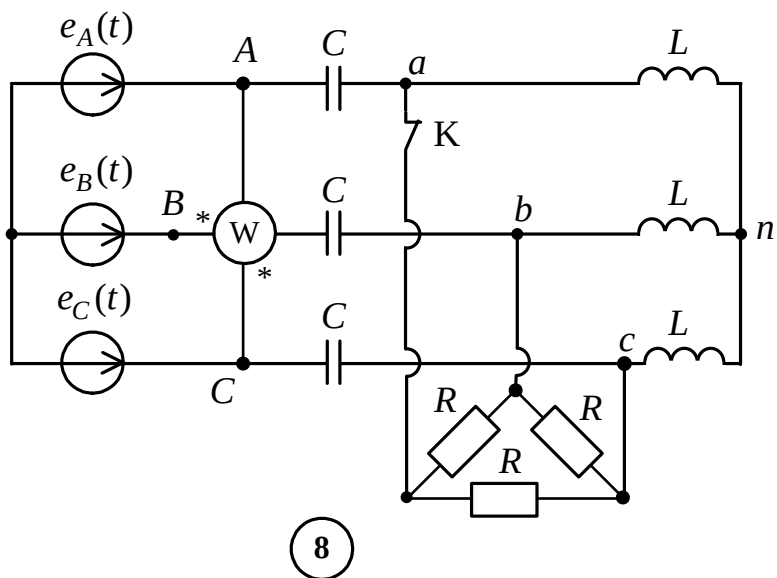
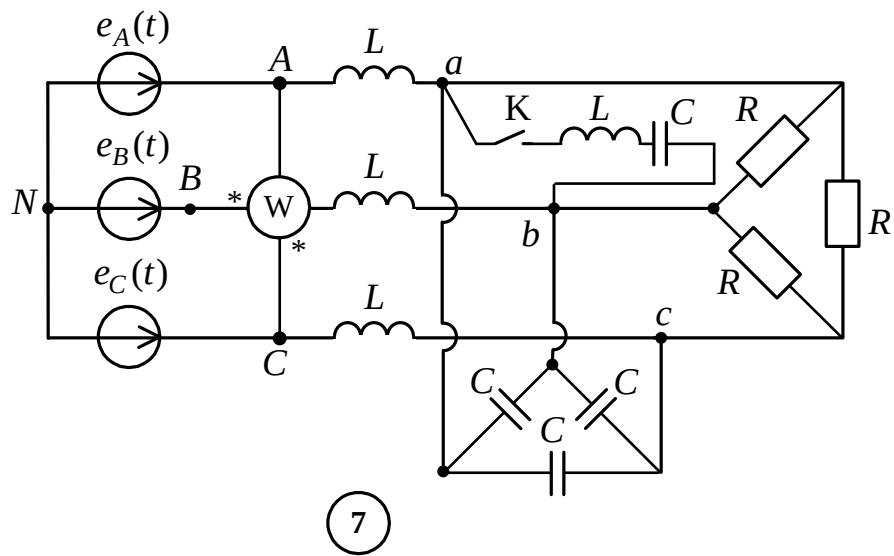


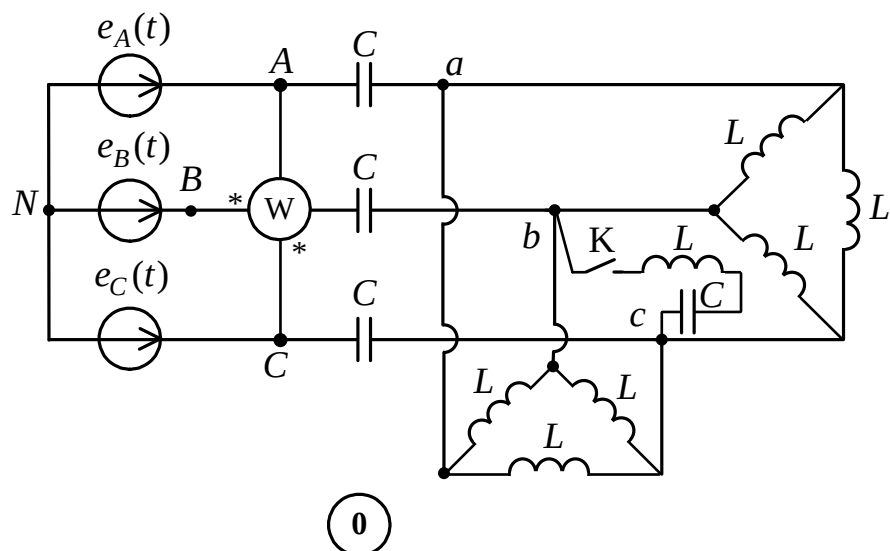
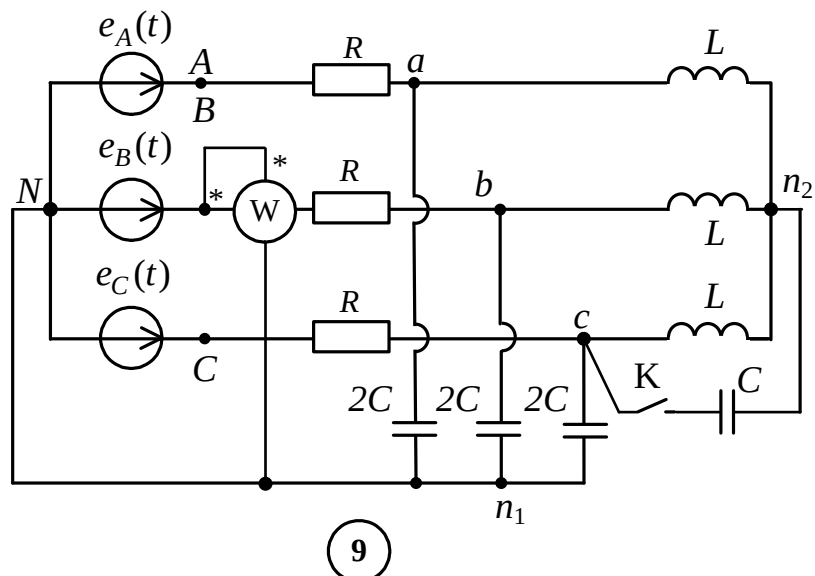


5



6





Примечание: объем задания определяет лектор;

1-я цифра номера задания – номер строки в табл. 1;

2-я цифра номера задания – номер строки в табл. 2;

3-я цифра номера задания – номер схемы.

1.1. Методические указания к заданию № 3

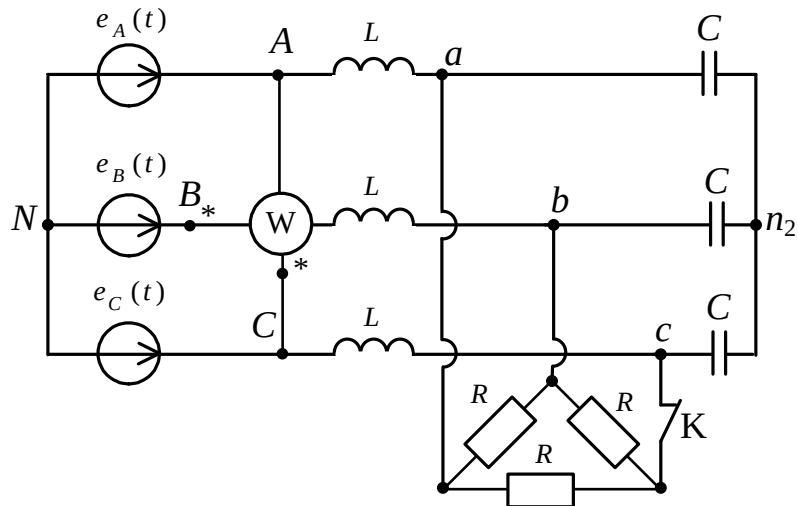
Для заданной схемы дано:

E	α
В	град
220	45

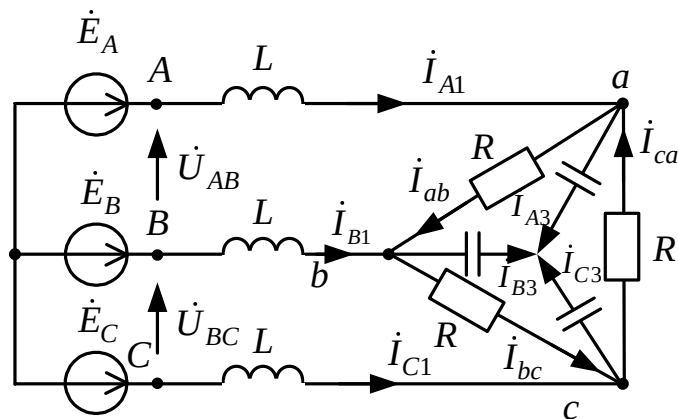
R	L	C
Ом	мГн	мкФ
300	127,39	31,8

Следовательно, $e_A(t) = \sqrt{2} \cdot 220 \sin(\omega t + 45^\circ)$, В.

Схема электрической цепи.



1. Расчёт симметричного режима трёхфазной цепи



Генератор симметричен, фазные ЭДС генератора:

$$\dot{E}_A = 220e^{j45^\circ} \text{ В}; \quad \dot{E}_B = a^2 \cdot 220e^{j45^\circ} = 220e^{-j75^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{E}_C = a \cdot 220e^{j45^\circ} = 220e^{j165^\circ} \text{ В}.$$

1.1. Определяем сопротивления реактивных элементов:

$$X_L = \omega L = 314 \cdot 127,39 \cdot 10^{-3} = 40 \text{ Ом};$$

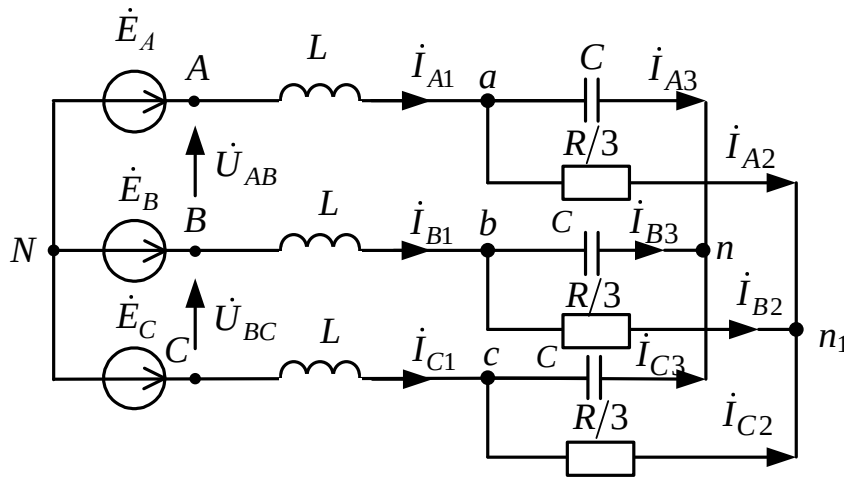
$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 31,8 \cdot 10^{-6}} = 100 \text{ Ом}.$$

Обозначим сопротивления ветвей схемы:

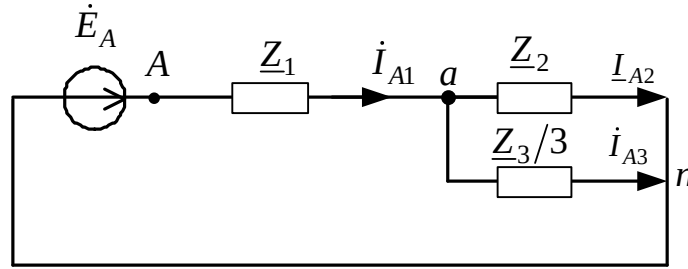
$$\underline{Z}_1 = jX_L = j40 \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_2 = -jX_C = -j100 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = R = 300 \text{ Ом}.$$

Преобразуем «треугольник» сопротивлений $\underline{Z}_3$ в эквивалентную «звезду» с сопротивлениями $\underline{Z}_3/3$.



Поскольку в симметричной цепи потенциалы нулевых точек (N, n, n_1) одинаковы, соединение этих точек нулевым проводом не нарушит режима цепи. Выделяем вместе с нулевым проводом одну фазу, например A , и сводим расчёт трёхфазной цепи к расчёту однофазной. Токи и напряжения других фаз определяем с помощью фазового оператора.



Суммарное *комплексное* сопротивление фазы *A*

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 / 3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 / 3} = -j40 + \frac{-j100 \cdot 100}{-j100 + 100} = 50 - j10 \text{ Ом.}$$

1.2. Комплексные значения токов в ветвях фазы *A* по закону Ома:

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{E}_A}{\underline{Z}_A} = \frac{220e^{j45^\circ}}{50 - j10} = 2,391 + j3,584 = 4,308e^{j56,293^\circ} \text{ А.}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A2} &= \dot{I}_{A1} \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 / 3} = 4,308e^{j56,293^\circ} \frac{100}{-j100 + 100} = \\ &= 2,989 + j0,599 = 3,044e^{j101,336^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A3} &= \dot{I}_{A1} - \dot{I}_{A2} = (2,391 + j3,584) - (2,989 + j0,599) = \\ &= 2,989 + j0,599 = 3,049e^{j11,336^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

1.3. Определяем токи *треугольника* исходной схемы:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{I}_{A3} e^{j30^\circ}}{\sqrt{3}} = \frac{3,049e^{j11,336^\circ} e^{j30^\circ}}{\sqrt{3}} = 1,758e^{j41,336^\circ} \text{ А;}$$

$$\dot{I}_{bc} = a^2 \dot{I}_{ab} = 1,758e^{-j78,664^\circ} \text{ А;}$$

$$\dot{I}_{ca} = a \dot{I}_{ab} = 1,758e^{j161,336^\circ} \text{ А.}$$

1.4. Комплексные значения токов в ветвях фазы B :

$$\dot{I}_{B1} = a^2 \dot{I}_{A1} = e^{-j120} \cdot 4,308 e^{j56,293} = 4,308 e^{-j63,707} \text{ А};$$

$$\dot{I}_{B2} = a^2 \dot{I}_{A2} = e^{-j120} 3,044 e^{j101,336} = 3,049 e^{-j18,664} \text{ А}.$$

1.5. Комплексные значения токов в ветвях фазы C :

$$\dot{I}_{C1} = a \dot{I}_{A1} = e^{j120} 4,308 e^{j56,293} = 4,308 e^{-j176,293} \text{ А};$$

$$\dot{I}_{C2} = a \dot{I}_{A2} = e^{j120} 3,044 e^{j101,336} = 3,049 e^{-j138,664} \text{ А}.$$

1.6. Составим баланс активной и реактивной мощностей для проверки правильности расчётов. Очевидно, что мощности фаз одинаковы, а для вычисления потребляемой мощности всей цепи нужно каждую из них утроить.

1.6.1. Полная вырабатываемая трёхфазным генератором мощность

$$\begin{aligned} \underline{S}_B &= 3 \cdot \dot{E}_A \dot{I}_{A1}^* = 3 \cdot 220 e^{j45^\circ} \cdot 4,308 e^{-j56,293^\circ} = \\ &= 2788,506 - j556,848 \text{ ВА}, \end{aligned}$$

где $\dot{I}_{A1}^* = 4,308 e^{-j56,293^\circ}$ А – сопряженное значение тока.

1.6.2. Активная потребляемая мощность

$$\begin{aligned} P_{\Pi} &= 3P_{\Phi} = 3 \cdot (|\dot{I}_{A1}|^2 \cdot \operatorname{Re}(\underline{Z}_1) + |\dot{I}_{A2}|^2 \cdot \operatorname{Re}(\underline{Z}_2) + |\dot{I}_{ab}|^2 \cdot \operatorname{Re}(\underline{Z}_3)) = \\ &= (1,76)^2 300 = 2788,506 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

1.6.3. Реактивная потребляемая мощность

$$\begin{aligned} Q_{\Pi} &= 3Q_{\Phi} = |\dot{I}_{A1}|^2 \cdot \operatorname{Im}(\underline{Z}_2) + |\dot{I}_{A2}|^2 \cdot \operatorname{Im}(\underline{Z}_2) + |\dot{I}_{ab}|^2 \cdot \operatorname{Im}(\underline{Z}_{ab}) = \\ &= 4,308^2 40 - 3,044^2 100 = -556,848 \text{ ВАр}. \end{aligned}$$

1.7. Погрешности расчетов

1.7.1. По активной мощности

$$\delta_P(\%) = \frac{|P_B - P_{\Pi}|}{P_B} \cdot 100 = 0 \leq 3 \text{ \%}.$$

1.7.2. По реактивной мощности

$$\delta_Q(\%) = \frac{|Q_B - Q_{\Pi}|}{Q_B} \cdot 100 = 0 \leq 3 \text{ \%}.$$

1.8. Используя данные расчётов, строим векторную диаграмму токов и совмещённую диаграмму напряжений. Векторы токов исходят из одной точки нулевого потенциала (в данном случае это может быть любая нулевая точка: N, n, n_1). При построении лучевых диаграмм необходимо учитывать, чтобы выполнялся первый закон Кирхгофа для любого узла.

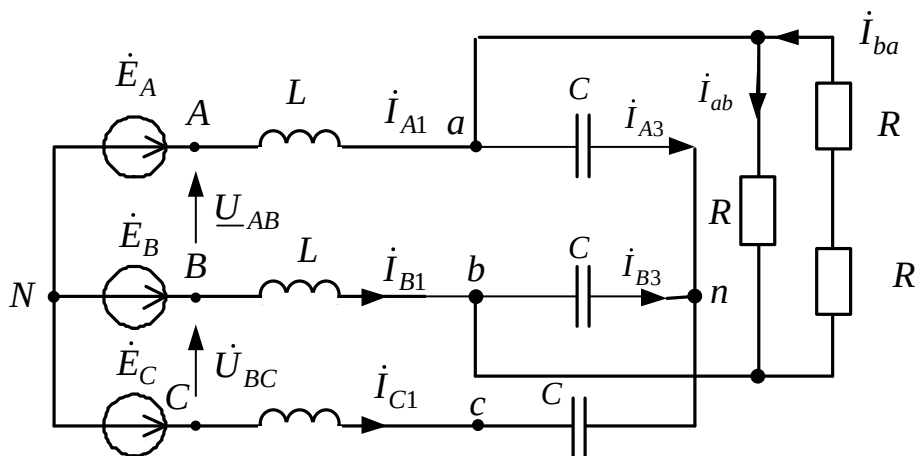
Построение топографической диаграммы начнём с построения напряжений фазных ЭДС генератора. Рассчитаем предварительно напряжения на отдельных участках цепи. Векторы напряжений на сопротивлениях нагрузки направлены на диаграмме в сторону повышения потенциала (если смотреть по схеме, то против направления токов).

Векторную диаграмму также можно построить, используя пакет *MathCAD*. Для этого необходимо определить потенциалы узлов схемы. Сформировать столбцовые матрицы так, чтобы потенциалы в них располагались в том порядке, как они расположены на схеме – последовательно по обходу контура. В шаблоне для построения графиков по оси ординат отложить мнимые части сформированных матриц, а по оси абсцисс соответственно вещественные части. Для совмещения с лучевой диаграммой токов можно ввести коэффициент k , так чтобы вектора напряжений и токов были в равных масштабах.

Полученную диаграмму можно скопировать в любой графический редактор и обозначить напряжения и токи исследуемой схемы.

2. Расчёт несимметричного режима трёхфазной цепи после срабатывания ключа К.

Схема электрической цепи.



2.1. Воспользуемся методом узловых потенциалов. Примем потенциал узла N равным нулю, тогда

$$\begin{cases} \dot{\phi}_a(\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3} + \frac{1}{2\underline{Z}_3}) - \dot{\phi}_b(\frac{1}{\underline{Z}_3} + \frac{1}{2\underline{Z}_3}) - \dot{\phi}_n(\frac{1}{\underline{Z}_2}) = \frac{\dot{E}_A}{\underline{Z}_1}; \\ \dot{\phi}_b(\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3} + \frac{1}{2\underline{Z}_3}) - \dot{\phi}_a(\frac{1}{\underline{Z}_3} + \frac{1}{2\underline{Z}_3}) - \dot{\phi}_n(\frac{1}{\underline{Z}_2}) = \frac{\dot{E}_B}{\underline{Z}_1}; \\ \dot{\phi}_n(\frac{1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} + \frac{2}{\underline{Z}_2}) - \dot{\phi}_a(\frac{1}{\underline{Z}_2}) - \dot{\phi}_b(\frac{1}{\underline{Z}_2}) = \frac{\dot{E}_C}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}. \end{cases}$$

Токи в ветвях схемы по обобщённому закону Ома для участка цепи:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1} &= \frac{-\dot{\phi}_a + \dot{E}_A}{\underline{Z}_1}; \quad \dot{I}_{B1} = \frac{-\dot{\phi}_b + \dot{E}_B}{\underline{Z}_1}; \quad \dot{I}_{C1} = \frac{-\dot{\phi}_n + \dot{E}_C}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}; \\ \dot{I}_{ab} &= \frac{\dot{\phi}_a - \dot{\phi}_b}{\underline{Z}_3}; \quad \dot{I}_{ba} = \frac{\dot{\phi}_b - \dot{\phi}_a}{2\underline{Z}_3}; \quad \dot{I}_{A3} = \frac{\dot{\phi}_a - \dot{\phi}_n}{\underline{Z}_2}; \quad \dot{I}_{B3} = \frac{\dot{\phi}_b - \dot{\phi}_n}{\underline{Z}_2}. \end{aligned}$$

2.2. Для проверки правильности расчётов составим баланс активной и реактивной мощностей.

2.2.1. Полная вырабатываемая трёхфазным генератором мощность:

$$\underline{S}_B = \dot{E}_A \dot{I}_{A1}^* + \dot{E}_B \dot{I}_{B1}^* + \dot{E}_C \dot{I}_{C1}^* = 1394,253 - j1485,451 \text{ ВА}.$$

2.2.2. Активная потребляемая мощность:

$$P_{\Pi} = |I_{ab}|^2 \cdot R + |I_{ba}|^2 \cdot 2R = 1394,253 \text{ Вт}.$$

2.2.3. Реактивная потребляемая мощность

$$\begin{aligned} Q_{\Pi} &= j \left(|I_{A1}|^2 X_L + |I_{B1}|^2 X_L + |I_{C1}|^2 X_L - |I_{A3}|^2 X_C - |I_{B3}|^2 X_C - |I_{C1}|^2 X_C \right) = \\ &= -j1485,451 \text{ ВАр}. \end{aligned}$$

1.2. Документ MathCAD

Дано:

$$a := e^{120i \cdot \text{deg}}$$

$$EA := 220 \cdot e^{45i \cdot \text{deg}} \quad Eb := a^2 \cdot EA \quad EC := a \cdot EA$$

$$C := 31.8 \cdot 10^{-6} \quad L := 127.39 \cdot 10^{-3} \quad \omega := 314 \quad r := 300$$

1. Симметричный режим

1.1. Расчет комплексных сопротивлений:

$$x_c := \frac{1}{\omega \cdot C} \quad x_l := \omega \cdot L$$

$$z_1 := i \cdot x_l \quad z_2 := -i \cdot x_c \quad z_3 := r$$

Расчет фазы A:

$$Z_A := z_1 + \frac{z_2 \cdot \frac{z_3}{3}}{z_2 + \frac{z_3}{3}} \quad Z_A = 50.074 - 9.999i$$

$$IA_1 := \frac{EA}{Z_A} \quad IA_1 = 2.391 + 3.584i$$

$$IA_2 := IA_1 \cdot \frac{\frac{z_3}{3}}{z_2 + \frac{z_3}{3}} \quad IA_2 = -0.598 + 2.985i$$

$$IA_3 := IA_1 - IA_2 \quad IA_3 = 2.989 + 0.599i$$

Расчет токов фаз B и C "треугольника":

$$IB_1 := IA_1 \cdot a^2 \quad IC_1 := a \cdot IA_1$$

$$IB_2 := IA_2 \cdot a^2 \quad IC_2 := a \cdot IA_2$$

$$I_{ab} := \frac{IA_3 \cdot e^{30i \cdot \text{deg}}}{\sqrt{3}} \quad I_{ab} = 1.322 + 1.163i$$

$$I_{bc} := I_{ab} \cdot a^2 \quad I_{bc} = 0.346 - 1.726i$$

$$I_{ca} := a \cdot I_{ab} \quad I_{ca} = -1.668 + 0.563i$$

1.2. Баланс мощности

1.2.1. Полная мощность:

$$S := 3 \cdot EA \cdot \overline{IA1} \quad S = 2.789 \times 10^3 - 556.848i$$

1.2.2. Активная мощность:

$$Pa := (|Iab|)^2 \cdot z3$$

$$P := Pa \cdot 3 \quad P = 2.789 \times 10^3$$

1.2.3. Реактивная мощность:

$$Qa := (|IA1|)^2 \cdot z1 + (|IA3|)^2 \cdot z2$$

$$Q := Qa \cdot 3 \quad Q = -565.108i$$

1.3. Векторная диаграмма

1.3.1. Для построения векторной диаграммы определяем потенциалы узлов:

$$fN := 0$$

$$fA := EA \quad fa := fA - IA1 \cdot z1 \quad fn := fa - IA2 \cdot z2 \quad fn = -0i$$

$$fB := EB \quad fb := fB - IB1 \cdot z1 \quad fn1 := fb - IB2 \cdot z2 \quad fn1 = -0$$

$$fC := EC \quad fc := fC - IC1 \cdot z1 \quad fn2 := fc - IC2 \cdot z2 \quad fn2 = 0$$

1.3.2 Формируем столбцовые матрицы потенциалов узлов в том порядке, как они изображены на схеме:

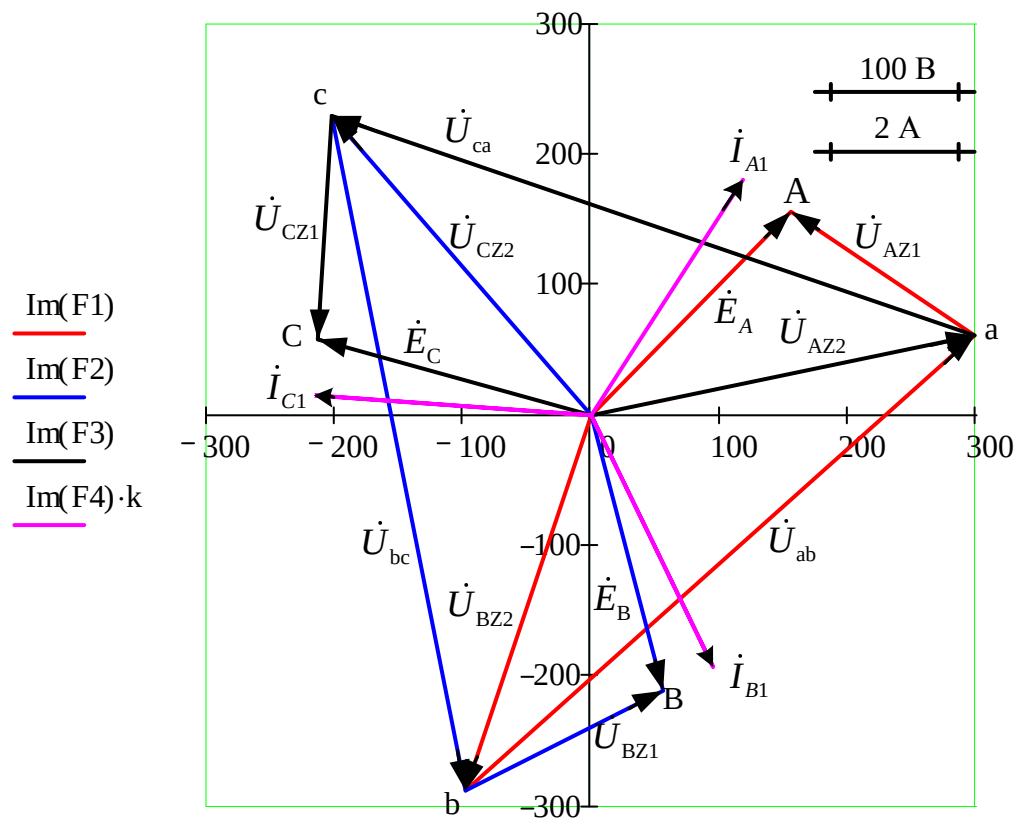
$$F1 := \begin{pmatrix} fN \\ fA \\ fa \\ fb \\ fn \end{pmatrix} \quad F1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 155.563 + 155.563i \\ 298.93 + 59.925i \\ -97.569 - 288.843i \\ -0i \end{pmatrix}$$

$$F2 := \begin{pmatrix} fN \\ fB \\ fb \\ fc \\ fn \end{pmatrix} \quad F2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 56.94 - 212.504i \\ -97.569 - 288.843i \\ -201.361 + 228.919i \\ -0i \end{pmatrix}$$

$$F3 := \begin{pmatrix} fN \\ fC \\ fc \\ fa \\ fn \end{pmatrix} \quad F3 = \begin{pmatrix} 0 \\ -212.504 + 56.94i \\ -201.361 + 228.919i \\ 298.93 + 59.925i \\ -0i \end{pmatrix}$$

1.3.3. Формируем столбцовую матрицу токов для построения лучевой диаграммы токов:

$$F4 := \begin{pmatrix} IA1 \\ 0 \\ IB1 \\ 0 \\ IC1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad k := 50 \quad F4 \cdot k = \begin{pmatrix} 119.547 + 179.206i \\ 0 \\ 95.424 - 193.134i \\ 0 \\ -214.971 + 13.928i \\ 0 \end{pmatrix}$$



$\text{Re}(F1), \text{Re}(F2), \text{Re}(F3), \text{Re}(F4) \cdot k$

ORIGIN := 1

2.1. Методом узловых потенциалов определяем потенциалы узлов:

$$a := \begin{bmatrix} \frac{1}{z1} + \frac{1}{z2} + \frac{1}{z3} + \frac{1}{2 \cdot z3} & -\left(\frac{1}{z3} + \frac{1}{2 \cdot z3}\right) & \frac{-1}{z2} \\ -\left(\frac{1}{z3} + \frac{1}{2 \cdot z3}\right) & \frac{1}{z1} + \frac{1}{z2} + \frac{1}{z3} + \frac{1}{2 \cdot z3} & \frac{-1}{z2} \\ \frac{-1}{z2} & \frac{-1}{z2} & \frac{2}{z2} + \frac{1}{z1 + z2} \end{bmatrix}$$

$$b := \begin{pmatrix} \frac{EA}{z1} \\ \frac{EB}{z1} \\ \frac{EC}{z1 + z2} \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} f &:= a^{-1} \cdot b \\ f_a &:= f_1 \quad f_b := f_2 \quad f_n := f_3 \end{aligned}$$

Токи в ветвях схемы определяем по обобщённому закону Ома для участка цепи:

$$\begin{aligned} IA1 &:= \frac{-fa + EA}{z1} & IA3 &:= \frac{fa - fn}{z2} & Iab &:= \frac{fb - fa}{r} \\ IB1 &:= \frac{-fb + EB}{z1} & IB3 &:= \frac{fb - fn}{z2} & Iba &:= \frac{fb - fa}{r \cdot 2} \\ IC1 &:= \frac{-fn + EC}{z1 + z2} \end{aligned}$$

2.2. Баланс мощности

2.2.1. Полная мощность:

$$S := EA \cdot \overline{IA1} + EB \cdot \overline{IB1} + EC \cdot \overline{IC1} \quad S = 1394.253 - 1485.451i$$

2.2.2. Активная мощность:

$$P1 := (|Iab|)^2 \cdot z3 + (|Iba|)^2 \cdot z3 \cdot 2 \quad P1 = 1.394 \times 10^3$$

2.2.3. Реактивная мощность:

$$\begin{aligned} Q &:= (|IA1|)^2 \cdot z1 + (|IB1|)^2 \cdot z1 + (|IC1|)^2 \cdot z1 + (|IA3|)^2 \cdot z2 + (|IB3|)^2 \cdot z2 + (|IC1|)^2 \cdot z2 \\ Q &= -1.485i \times 10^3 \end{aligned}$$

1.3. Векторная диаграмма:

$$f_N := 0$$

$$f_A := E_A \quad f_a := f_A - I_{A1} \cdot z_1 \quad f_n := f_a - I_{A3} \cdot z_2$$

$$f_B := E_B \quad f_b := f_B - I_{B1} \cdot z_1 \quad f_{n1} := f_b - I_{B3} \cdot z_2$$

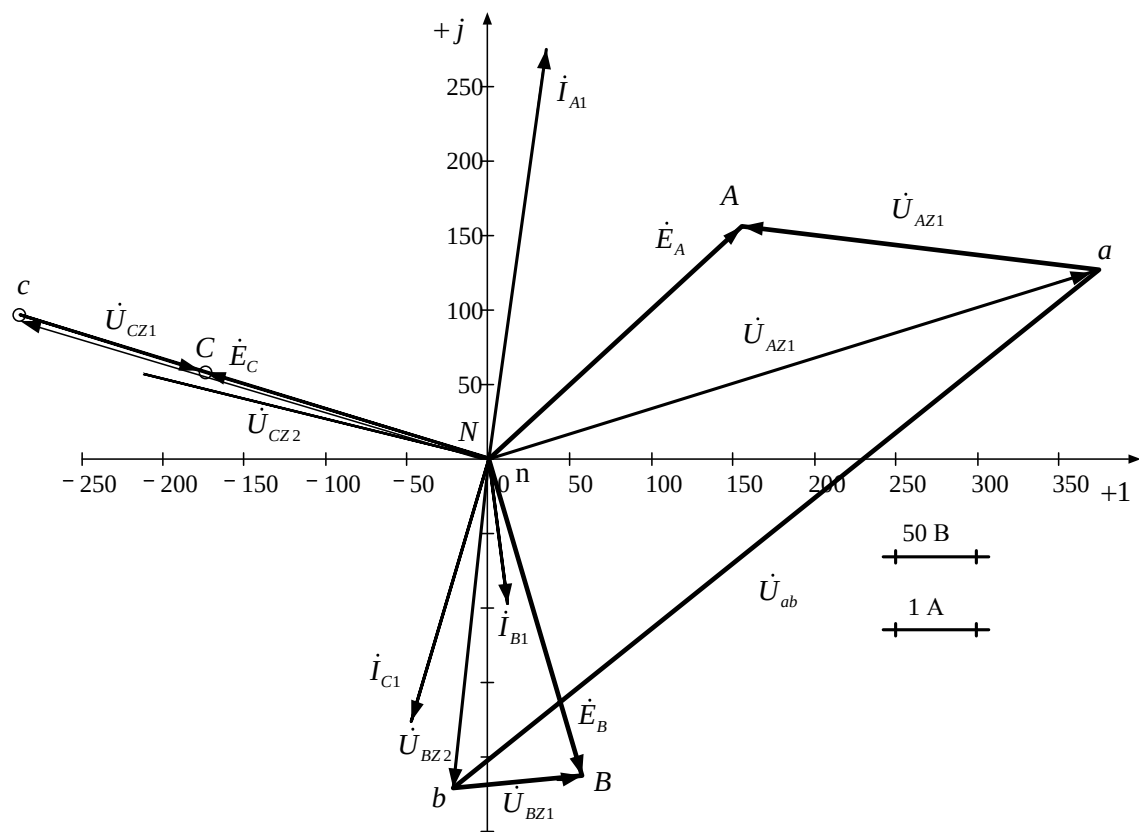
$$f_C := E_C \quad f_c := f_C - I_{C1} \cdot z_1 \quad f_{n1} := f_c - I_{C1} \cdot z_2$$

$$F1 := \begin{pmatrix} f_N \\ f_A \\ f_a \\ f_b \\ f_B \\ 0 \end{pmatrix} \quad F1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 155.563 + 155.563i \\ 375.163 + 126.98i \\ -21.336 - 221.788i \\ 56.94 - 212.504i \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$F2 := \begin{pmatrix} f_N \\ f_B \\ f_b \\ f_n \\ f_a \end{pmatrix} \quad F2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 56.94 - 212.504i \\ -21.336 - 221.788i \\ -0 + 0i \\ 375.163 + 126.98i \end{pmatrix}$$

$$F3 := \begin{pmatrix} f_N \\ f_C \\ f_c \\ f_n \end{pmatrix} \quad F3 = \begin{pmatrix} 0 \\ -212.504 + 56.94i \\ -353.826 + 94.807i \\ -0 + 0i \end{pmatrix}$$

$$F4 := \begin{pmatrix} I_{A1} \\ 0 \\ I_{B1} \\ 0 \\ I_{C1} \\ 0 \end{pmatrix} \quad F4 \cdot 10 = \begin{pmatrix} 7.146 + 54.899i \\ 0 \\ 2.321 - 19.569i \\ 0 \\ -9.467 - 35.33i \\ 0 \end{pmatrix}$$



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л.А. Бессонов. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 1999. – 638 с.
2. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов в 3 т. / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – 4-е изд., доп. – СПб.: Питер, 2003.
3. Основы теории цепей: учеб. пособие / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
4. Гурский Д.А. MathCAD для студентов и школьников / Д.А. Гурский, Е.С. Турбина. – СПб.: Питер, 2005. – 400 с.
5. Кирьянов Д.В. MathCAD 11 / Д.В. Кирьянов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 560 с.

Учебное издание

КУЛЕШОВА Елена Олеговна
НОСОВ Геннадий Васильевич
КОЛЧАНОВА Вероника Андреевна

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Часть 1

Учебное пособие

Научный редактор
Доктор технических наук, профессор
С.А. Новиков

Редактор *Н.Т. Синельникова*

Верстка *Л.А. Егорова*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати Формат 60×84/16.
Бумага «Снегурочка». Печать ХероХ.
Усл. печ.л. 12,09. Уч.-изд. л. 10,95.
Заказ . Тираж экз.



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ.** 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru