

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
“САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИТМО”

ФАКУЛЬТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РОБОТОТЕХНИКИ

Лабораторная работа №4:

**«Исследование трёхфазных
электрических цепей»**

по дисциплине Электротехника
Вариант №12

Выполнил: Студент группы
R3237 Осинина Т. С
Преподаватель: Горшков К.С.

Санкт-Петербург, 2022

1) Цель работы: исследование свойств линейных трёхфазных цепей синусоидального тока при соединении приёмников звездой и треугольником с равномерной и неравномерной нагрузкой.

2) Метод экспериментального исследования:

1. Анализ
2. Лабораторный эксперимент (в программе LTspice)

3) План работы

Часть 1:

Опытная проверка основных соотношений в трёхфазной цепи с нагрузкой, включённой по схеме «звезда», в следующих режимах:

1. Симметричная нагрузка с нулевым проводом.
2. Симметричная нагрузка без нулевого провода.
3. Несимметричная нагрузка с нулевым проводом.
4. Несимметричная нагрузка без нулевого провода.
5. Обрыв линейного провода с нулевым проводом.
6. Обрыв линейного провода без нулевого провода.
7. Короткое замыкание одной фазы нагрузки без нулевого провода.

Часть 2:

Опытная проверка основных соотношений в трёхфазной цепи с нагрузкой, включённой по схеме «треугольник», в следующих режимах:

1. Симметричная нагрузка.
2. Несимметричная нагрузка.
3. Обрыв одной фазы нагрузки.
4. Обрыв двух фаз нагрузки.
5. Обрыв линейного провода с симметричной нагрузкой.
6. Обрыв линейного провода с несимметричной нагрузкой.

4) Формулы для расчета

Выражения для расчётов в схеме «звезда».

Напряжение смещения нейтрали: $\underline{U}_{Nn} = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_a + \underline{E}_B \underline{Y}_b + \underline{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}$, где

$\underline{E}_A = E_A \cdot e^{j0^\circ}$, $\underline{E}_B = E_B \cdot e^{-j120^\circ}$, $\underline{E}_C = E_C \cdot e^{j120^\circ}$, E_A, E_B, E_C - действующие значения ЭДС в фазах источника, $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c$ - комплексные действующие значения проводимостей фаз.

Комплексные действующие значения напряжений в фазах приёмника: $\underline{U}_a = \underline{E}_A - \underline{U}_{Nn}$, $\underline{U}_b = \underline{E}_B - \underline{U}_{Nn}$, $\underline{U}_c = \underline{E}_C - \underline{U}_{Nn}$.

Комплексные действующие значения фазных токов и тока нейтрального провода: $\underline{I}_a = \underline{U}_a \underline{Y}_a$, $\underline{I}_b = \underline{U}_b \underline{Y}_b$, $\underline{I}_c = \underline{U}_c \underline{Y}_c$, $\underline{I}_{Nn} = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c$.

Активная мощность фаз приёмника: $P_a = U_a I_a \cos \varphi_a$, $P_b = U_b I_b \cos \varphi_b$, $P_c = U_c I_c \cos \varphi_c$, где $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ - разности фаз между током и напряжением в фазах приёмника.

Выражения для расчётов в схеме «треугольник».

Комплексные действующие значения напряжений в фазах приёмника: $\underline{U}_{ab} = \underline{E}_A - \underline{E}_B$, $\underline{U}_{bc} = \underline{E}_B - \underline{E}_C$, $\underline{U}_{ca} = \underline{E}_C - \underline{E}_A$.

Комплексные действующие значения токов в фазах приёмника: $\underline{I}_{ab} = \underline{U}_{ab} \underline{Y}_{ab}$, $\underline{I}_{bc} = \underline{U}_{bc} \underline{Y}_{bc}$, $\underline{I}_{ca} = \underline{U}_{ca} \underline{Y}_{ca}$.

Комплексные действующие значения линейных токов: $\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}$, $\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}$, $\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}$.

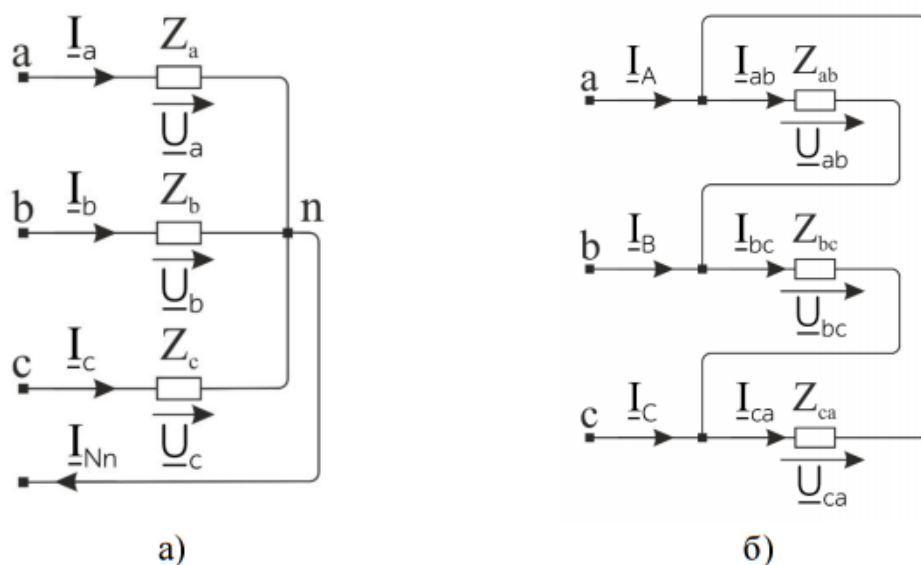


Рисунок 3.3 – Схема замещения нагрузки, соединённой по схеме а) «звезда», б) «треугольник».

5) Значения по варианту

| | | Star-Star | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----------|---------------|-----------|------------|-----------------|-------------|-------------|------------------|------------|------------|--------------------|-------------|-------------|
| RMS value | | Balanced Load | | | Unbalanced Load | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 0 - means absent | | | Inf - means absent | | |
| E [V] | F [Hz] | R [Ohm] | L [mH] | C [mkF] | Ra [Ohm] | Rb [Ohm] | Rc [Ohm] | La [mH] | Lb [mH] | Lc [mH] | Ca [mkF] | Cb [mkF] | Cc [mkF] |
| 164 | 60 | 45 | 281 | Inf | 45 | 27 | 27 | 281 | 365 | 393 | Inf | Inf | Inf |

| Star Exp 5,6 | Star Exp 7 | Delta Exp 3 | Delta Exp 4 | Delta Exp 5, 6 |
|------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| StarLineBreakage | StarPhaseShortCircuit | DeltaPhaseBreakage1 | DeltaPhaseBreakage2 | DeltaLineBreakage |
| B | A | bc | ab & ca | B |

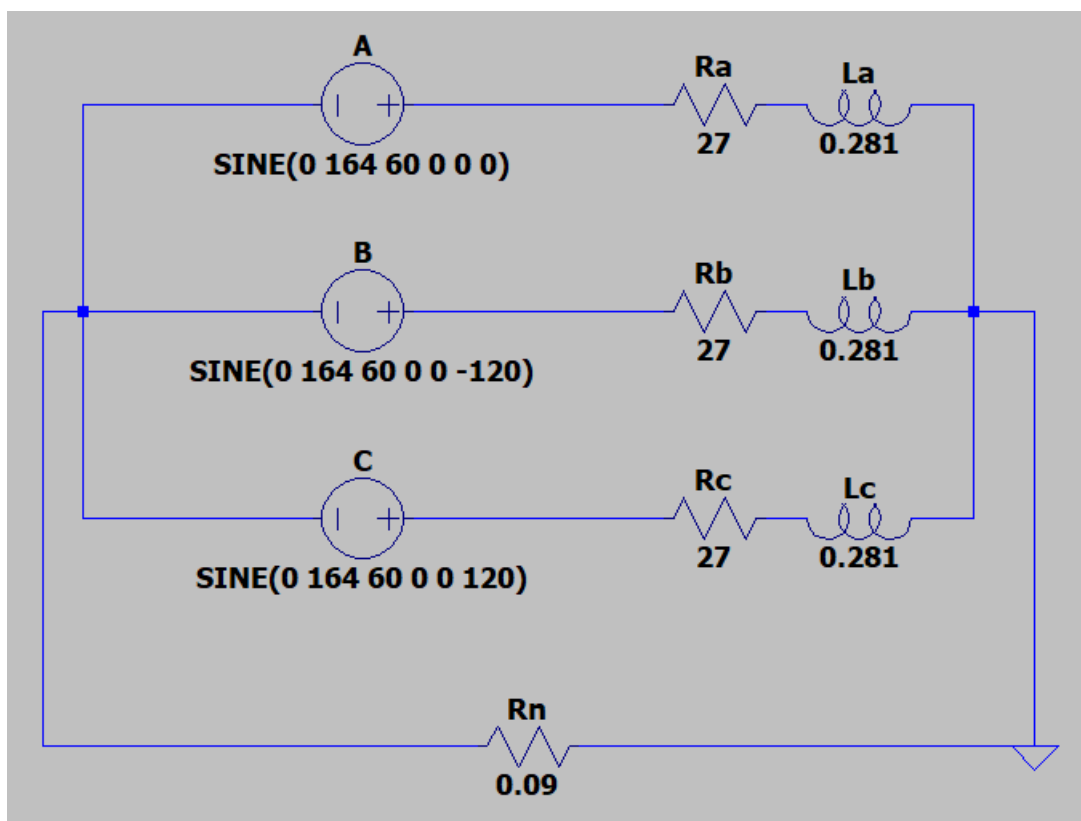
6) Часть 1

$$E_{mA} = E_{mC} = E_{mB} = 164 \text{ В}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 60 = 376,8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$\psi_A = -120^\circ, \psi_B = 0^\circ, \psi_C = 120^\circ$$

$$R_n = 0,09 \text{ Ом}, l = 1 \text{ м}, p = 0.196 \text{ мм}^2$$



1.Схема цепи

Таблица 3.1.

| № | Вид нагрузки | | U _a , В | U _b , В | U _c , В | I _a , А | I _b , А | I _c , А | P _a , Вт | P _b , Вт | P _c , Вт | U _{Nn} , В | I _{Nn} , А | Z _a , Ом | Z _b , Ом | Z _c , Ом |
|---|---|-----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | Симметричная нагрузка с нулевым проводом | Изм | 115,87 | 115,87 | 115,87 | 1,0366 | 1,0435 | 1,0491 | 35,433 | 34,257 | 34,856 | 0 | 0 | 45 | 45 | 45 |
| | | Выч | 115,096 | 115,096 | 115,096 | 1,5002 | 1,5002 | 1,5002 | 60,7635 | 60,7635 | 60,7635 | 0,000 | 0,000 | 45 | 45 | 45 |
| 2 | Симметричная нагрузка без нулевого провода | Изм | 115,86 | 115,86 | 115,86 | 1,0832 | 1,0153 | 1,01 | 50,403 | 56,23 | 53,623 | - | - | 45 | 45 | 45 |
| | | Выч | 115,966 | 115,966 | 115,966 | 1,170 | 1,170 | 1,170 | 61,637 | 61,637 | 61,637 | 0,000 | 0,000 | 45 | 45 | 45 |
| 3 | Несимметричная нагрузка с нулевым проводом | Изм | 115,85 | 115,85 | 115,85 | 1,0325 | 0,839 | 0,808 | 51 | 34,243 | 8,7678 | 0 | 0,254 | 45 | 27 | 27 |
| | | Выч | 115,966 | 115,966 | 115,966 | 1,170 | 0,984 | 0,918 | 61,637 | 26,164 | 22,733 | 0,000 | 0,227 | 45 | 27 | 27 |
| 4 | Несимметричная нагрузка без нулевого провода | Изм | 107,07 | 126,11 | 115,29 | 0,946 | 0,918 | 0,805 | 53,037 | 32,338 | 19,67 | - | - | 45 | 27 | 27 |
| | | Выч | 107,992 | 127,044 | 113,742 | 1,090 | 1,078 | 0,900 | 53,453 | 31,402 | 21,869 | 0,000 | 0,000 | 45 | 27 | 27 |
| 5 | Обрыв линейного провода с нулевым проводом | Изм | 115,76 | 0 | 115,76 | 1,0309 | 0 | 1,5191 | 50,249 | 0 | 52,988 | 0,169 | 1,887 | 45 | ∞ | 27 |
| | | Выч | 115,966 | 0,000 | 115,966 | 1,170 | 0,000 | 0,918 | 61,637 | 0,000 | 22,733 | 0,000 | 1,067 | 45 | ∞ | 27 |
| 6 | Обрыв линейного провода без нулевого провода | Изм | 87,203 | 0 | 114,85 | 0,801 | 0 | 0,801 | 29,81 | 0 | 20,944 | - | - | 45 | ∞ | 27 |
| | | Выч | 88,989 | 0,000 | 113,503 | 0,898 | 0,000 | 0,898 | 36,296 | 0,000 | 21,777 | 0,000 | 0,000 | 45 | ∞ | 27 |
| 7 | Короткое замыкание одной фазы нагрузки без нулевого провода | Изм | 0 | 200,7 | 200,69 | 0 | 2,3488 | 1,682 | 0 | 102,69 | 47,491 | 0 | 0 | 0 | 27 | 27 |
| | | Выч | 0,000 | 136,886 | 203,851 | 0,000 | 1,613 | 1,381 | 0,000 | 85,882 | 70,246 | 0,000 | 0,000 | 0 | 27 | 27 |

Пример расчета для опыта №1.

$$j := \sqrt{-1} = i$$

$$Ea := 164 \cdot \exp(j \cdot 0) = 164$$

$$Eb := 164 \cdot \exp(j \cdot 120) = 133,5257 + 95,2202 \cdot i$$

$$Ec := 164 \cdot \exp(j \cdot (-120)) = 133,5257 - 95,2202 \cdot i$$

$$Ra := 45$$

$$Rb := 45$$

$$Rc := 45$$

$$La := 0,281$$

$$Lb := 0,281$$

$$Lc := 0,281$$

$$f := 60$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f = 376,9911$$

$$Za := \sqrt{Ra^2 + (\omega \cdot La)^2} = 115,0961$$

$$Zb := \sqrt{Rb^2 + (\omega \cdot Lb)^2} = 115,0961$$

$$Zc := \sqrt{Rc^2 + (\omega \cdot Lc)^2} = 115,0961$$

$$\varphi a := \arctg\left(\omega \cdot \frac{La}{Ra}\right) = 1,1691$$

$$\varphi b := \arctg\left(\omega \cdot \frac{Lb}{Rb}\right) = 1,1691$$

$$\varphi c := \arctg\left(\omega \cdot \frac{Lc}{Rc}\right) = 1,1691$$

$$Ya := \frac{1}{Za} = 0,0087$$

$$Yb := \frac{1}{Zb} = 0,0087$$

$$Yc := \frac{1}{Zc} = 0,0087$$

$$Ua := Ea = 164$$

$$Ub := Eb = 133,5257 + 95,2202 \cdot i$$

$$Uc := Ec = 133,5257 - 95,2202 \cdot i$$

$$ya := Ya \cdot \exp(j \cdot \varphi a) = 0,0023 + 0,0089 \cdot i$$

$$|Ua| = 164$$

$$yb := Yb \cdot \exp(j \cdot \varphi b) = 0,0023 + 0,0089 \cdot i$$

$$|Ub| = 164$$

$$yc := Yc \cdot \exp(j \cdot \varphi c) = 0,0023 + 0,0089 \cdot i$$

$$|Uc| = 164$$

$$Ia := Ua \cdot ya = 0,3705 + 1,4537 \cdot i$$

$$Ib := Ub \cdot yb = -0,5424 + 1,3987 \cdot i$$

$$Ic := Uc \cdot yc = 1,1457 + 0,9684 \cdot i$$

$$|Ia| = 1,5002$$

$$|Ic| = 1,5002$$

$$|Ib| = 1,5002$$

$$Pa := Ia \cdot Ua \cdot \cos\left(\arctg\left(\omega \cdot \frac{La}{Ra}\right)\right) = 15,0073 + 58,8811 \cdot i$$

$$Pb := Ib \cdot Ub \cdot \cos\left(\arctg\left(\omega \cdot \frac{Lb}{Rb}\right)\right) = -50,7798 + 33,3709 \cdot i$$

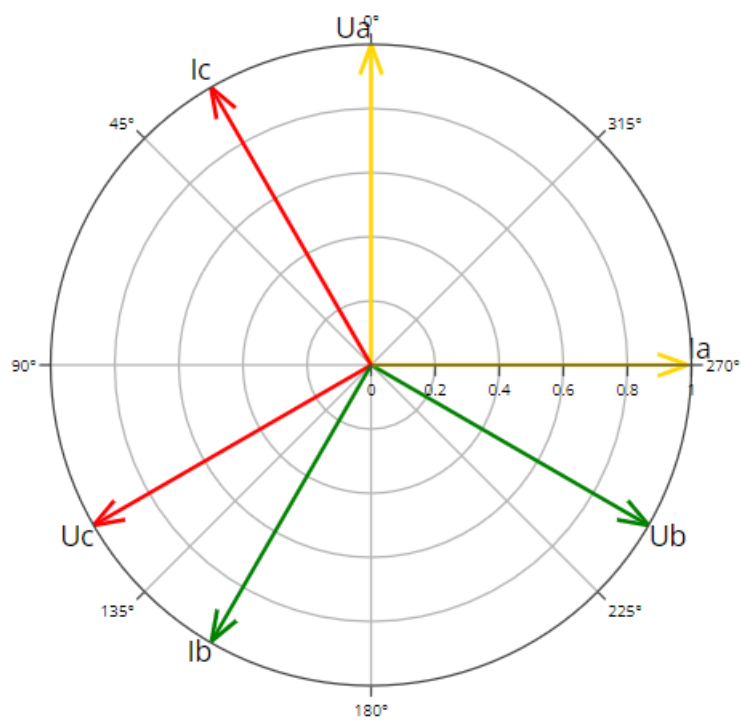
$$Pc := Ic \cdot Uc \cdot \cos\left(\arctg\left(\omega \cdot \frac{Lc}{Rc}\right)\right) = 60,558 + 4,9938 \cdot i$$

$$|Pa| = 60,7635$$

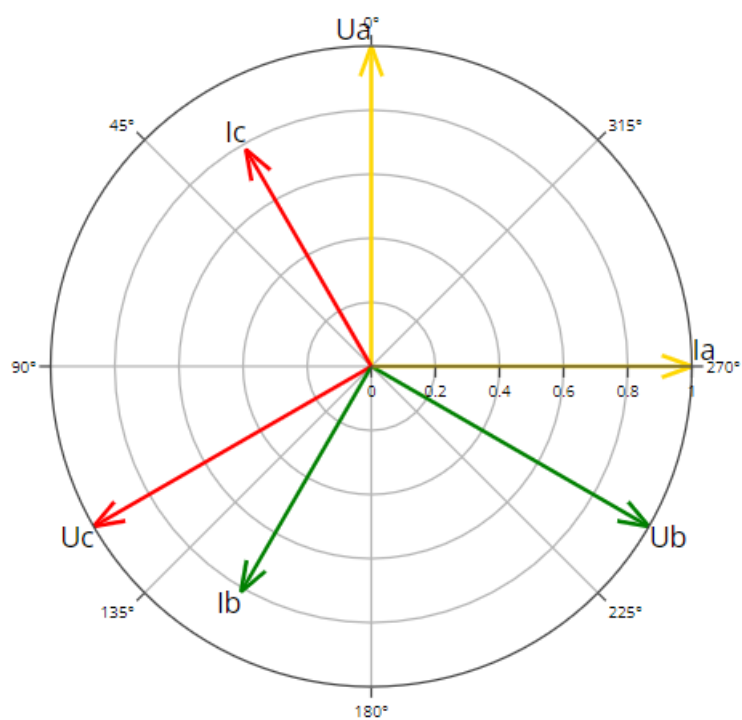
$$|Pc| = 60,7635$$

$$|Pb| = 60,7635$$

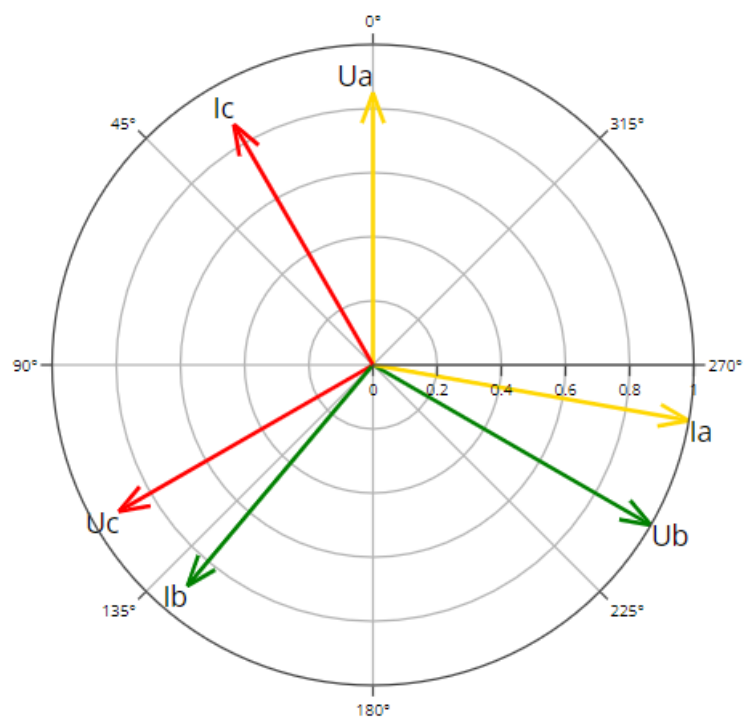
Векторные диаграммы



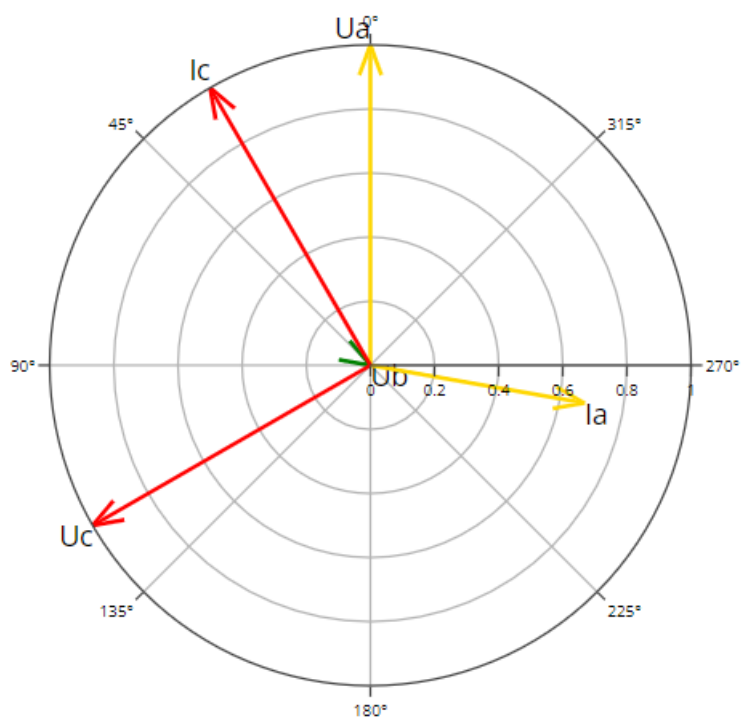
2. Векторная диаграмма для опыта №1 и №2



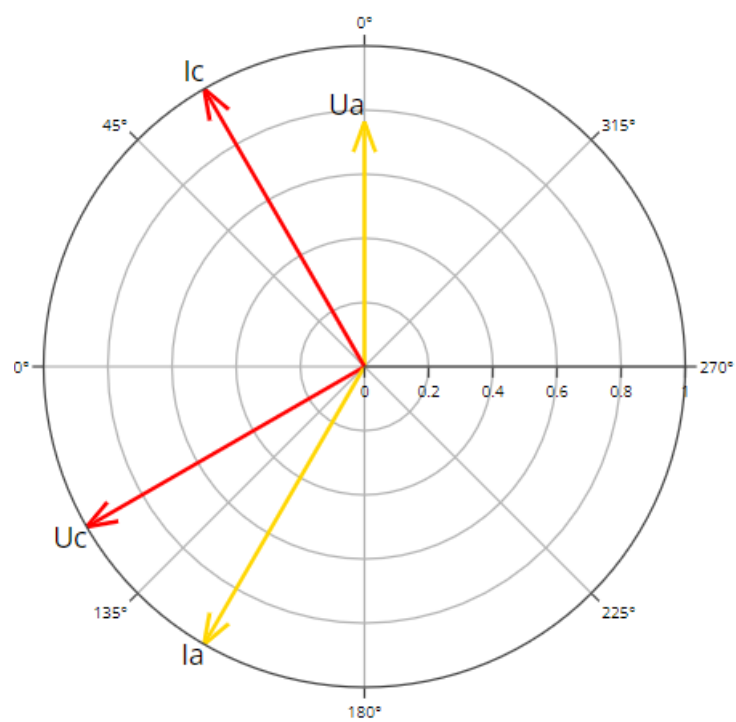
3. Векторная диаграмма для опыта №3



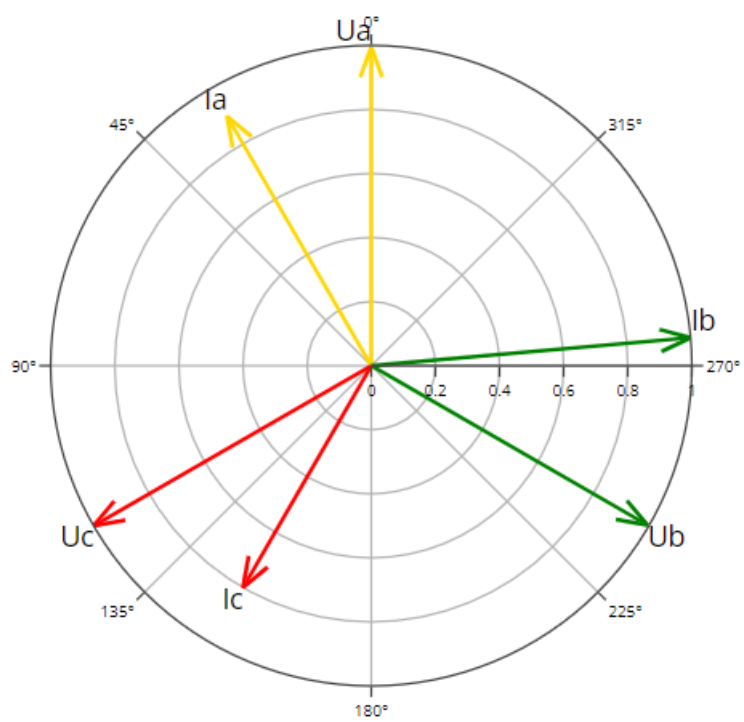
4. Векторная диаграмма для опыта №4



5. Векторная диаграмма для опыта №5

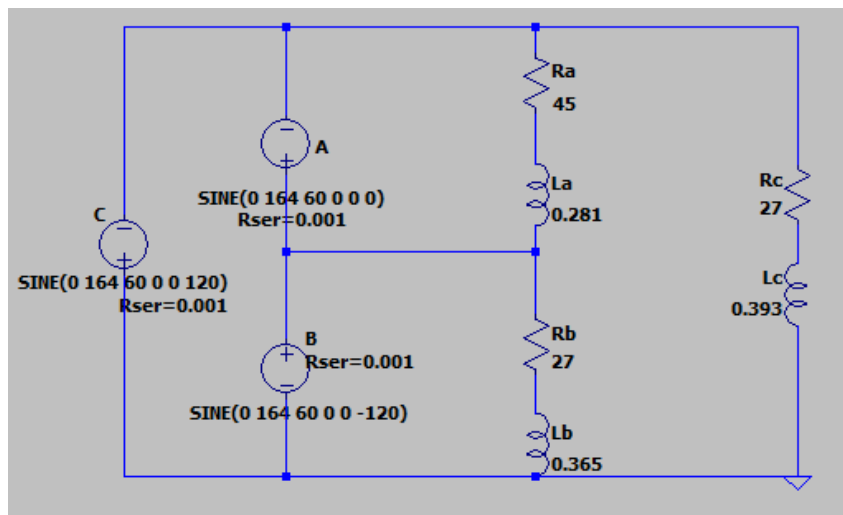


6. Векторная диаграмма для опыта №6



7. Векторная диаграмма опыта №7

7) Часть 2



8. Схема цепи

Таблица 3.2.

| № | Вид нагрузки | | Ia, А | Ib, А | Ic, А | Iab, А | Ibc, А | Ica, А | Pab, Вт | Pbc, Вт | Pca, Вт | Zab, Ом | Zbc, Ом | Zca, Ом |
|---|--|-----|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | Симметричная нагрузка | Изм | 1.63 | 1.63 | 1.63 | 0,891 | 0,891 | 0,891 | 45.175 | 45.175 | 45.175 | 45 | 45 | 45 |
| | | Выч | 1.737 | 1.737 | 1.737 | 0.8686 | 0.8686 | 0.8686 | 47,854 | 47,85 | 47,85 | 45 | 45 | 45 |
| 2 | Несимметричная нагрузка | Изм | 1,69 | 1,81 | 1,55 | 0,891 | 0,819 | 0,7 | 44.336 | 19,22 | 13.66 | 45 | 27 | 27 |
| | | Выч | 1,563 | 1,611 | 1,420 | 1,009 | 0,849 | 0,791 | 45,813 | 19,45 | 16,9 | 45 | 27 | 27 |
| 3 | Обрыв одной фазы нагрузки | Изм | 1,57 | 1,761 | 1,0 | 0 | 1.697 | 0,6 | 0 | 18,5 | 16,22 | 45 | 27 | 27 |
| | | Выч | 1,563 | 1,611 | 1,420 | 0,000 | 0,849 | 0,791 | 0,000 | 19,45 | 16,9 | 45 | 27 | 27 |
| 4 | Обрыв двух фаз нагрузки | Изм | 0,962 | 1,0 | 0 | 0,809 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 45 | 27 | 27 |
| | | Выч | 1,009 | 1,009 | 0,000 | 1,009 | 0,000 | 0,000 | 45,813 | 0,000 | 0,000 | 45 | 27 | 27 |
| 5 | Обрыв линейного провода с симметричной нагрузкой | Изм | 0 | 1,1 | 1,08 | 0,257 | 0,79 | 0,326 | 6,97 | 27,8 | 6,9 | 45 | 45 | 45 |
| | | Выч | 0,000 | 1,041 | 1,041 | 0,393 | 0,787 | 0,393 | 6,961 | 27,844 | 6,961 | 45 | 45 | 45 |
| 6 | Обрыв линейного провода с несимметричной нагрузкой | Изм | 0,000 | 0,832 | 0,965 | 0,085 | 0,532 | 0,425 | 0,67 | 9,7 | 6,5 | 45 | 27 | 27 |
| | | Выч | 0,000 | 0,736 | 1,021 | 0,131 | 0,662 | 0,514 | 0,770 | 11,819 | 7,137 | 45 | 27 | 27 |

Пример расчета для опыта №1.

$$j := \sqrt{-1} = i$$

$$Ea := 164 \cdot \exp(j \cdot (-120)) = 133,5257 - 95,2202 \cdot i$$

$$Eb := 164 \cdot \exp(j \cdot 0) = 164$$

$$Ec := 164 \cdot \exp(j \cdot (120)) = 133,5257 + 95,2202 \cdot i$$

$$f := 60$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f = 376,9911$$

$$Ra := 45$$

$$La := 0,281$$

$$Rb := 45$$

$$Lb := 0,281$$

$$Rc := 45$$

$$Lc := 0,281$$

$$Uab := Ea - Eb = -30,4743 - 95,2202 \cdot i$$

$$Ubc := Eb - Ec = 30,4743 - 95,2202 \cdot i$$

$$Uca := Eb - Ea = 30,4743 + 95,2202 \cdot i$$

$$Za := \sqrt{Ra^2 + (\omega \cdot La)^2} = 115,0961$$

$$\varphi a := \arctg\left(\omega \cdot \frac{La}{Ra}\right) = 1,1691$$

$$Zb := \sqrt{Rb^2 + (\omega \cdot Lb)^2} = 115,0961$$

$$\varphi b := \arctg\left(\omega \cdot \frac{Lb}{Rb}\right) = 1,1691$$

$$Zc := \sqrt{Rc^2 + (\omega \cdot Lc)^2} = 115,0961$$

$$\varphi c := \arctg\left(\omega \cdot \frac{Lc}{Rc}\right) = 1,1691$$

$$Ya := \frac{1}{Za} = 0,0087$$

$$Yb := \frac{1}{Zb} = 0,0087$$

$$Yc := \frac{1}{Zc} = 0,0087$$

$$ya := Ya \cdot \exp(j \cdot \varphi a) = 0,0034 + 0,008 \cdot i$$

$$|Uab| = 99,9779$$

$$yb := Yb \cdot \exp(j \cdot \varphi b) = 0,0034 + 0,008 \cdot i$$

$$|Ubc| = 99,9779$$

$$yc := Yc \cdot \exp(j \cdot \varphi c) = 0,0034 + 0,008 \cdot i$$

$$|Uca| = 99,9779$$

$$Iab := Uab \cdot ya = 0,6579 - 0,5672 \cdot i$$

$$Ibc := Ubc \cdot yb = 0,865 - 0,0798 \cdot i$$

$$Ica := Uca \cdot yc = -0,6579 + 0,5672 \cdot i$$

$$|Iab| = 0,8686$$

$$|Ica| = 0,8686$$

$$|Ibc| = 0,8686$$

$$Ia := Iab - Ica = 1,3159 - 1,1343 \cdot i$$

$$Ib := Ibc - Iab = 0,207 + 0,4874 \cdot i$$

$$Ic := Ica - Ibc = -1,5229 + 0,6469 \cdot i$$

$$|Ia| = 1,7373$$

$$Pa := Ia \cdot Uab \cdot \cos\left(\arctg\left(\omega \cdot \frac{La}{Ra}\right)\right) = -57,9077 - 35,4735 \cdot i$$

$$Pb := Ib \cdot Ubc \cdot \cos\left(\arctg\left(\omega \cdot \frac{Lb}{Rb}\right)\right) = 20,612 - 1,9007 \cdot i$$

$$Pc := Ic \cdot Uca \cdot \cos\left(\arctg\left(\omega \cdot \frac{Lc}{Rc}\right)\right) = -42,2293 - 48,9886 \cdot i$$

Вывод: в процессе выполнения лабораторной работе № 4 были исследованы свойства линейных трёхфазных цепей синусоидального тока при соединении приёмников звездой и треугольником с равномерной и неравномерной нагрузкой. Также были получены значения напряжения, силы тока, мощности для каждого случая с помощью расчетов и эксперимента, сравнивая их, видно, что значения похожи (есть некоторые отличия по причине погрешности измерений), таким образом работа выполнена верно.