

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КРАСНОЯРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт инженерных систем и энергетики
Кафедра «Теоретические основы электротехники»

«МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ»

Методические указания к выполнению курсовой работы
студентам всех форм обучения

Направление подготовки:

35.03.06 «Агроинженерия»

Профиль:

Электрооборудование и электротехнологии в АПК

Красноярск 2017

Оглавление

Тема 1: Измерение активной мощности в трехфазных сетях электрических сетях	3
1.1 Методические указания при подготовке к занятиям	3
1.2 Краткие теоретические сведения	3
Пример расчета задания 1.1	6
Пример расчета задания 1.2	9

Тема 1: Измерение активной мощности в трехфазных сетях электрических сетях

1.1 Методические указания при подготовке к занятиям

При изучении темы особое внимание следует обратить на способы измерения мощности электрического тока. Измерение мощности в цепи переменного тока электродинамическим ваттметром.

Измерение активной мощности в цепи трехфазного тока методом одного, двух и трех ваттметров. Измерение мощности трехфазного тока с применением измерительных трансформаторов.

1.2 Краткие теоретические сведения

Активная мощность в электрической цепи измеряется прибором, называемым ваттметром, показания которого определяется по формуле:

$$P_W = \operatorname{Re} \left(\underline{U}_{W2} \underline{I}_{W1}^* \right) = U_{W2} \cdot I_{W1} \cdot \cos[\underline{U}_{W2} \hat{\cdot} \underline{I}_{W1}],$$

где U_W, I_W - векторы напряжения и тока, подведенные к обмоткам прибора.

Для измерения активной мощности всей трехфазной цепи в зависимости от схемы соединения фаз нагрузки и ее характера применяются различные схемы включения измерительных приборов.

Мощность в цепи трехфазного тока, в зависимости от схемы соединения фаз нагрузки и ее характера, может быть измерена с помощью *одного, двух и трех* ваттметров.

Для измерения активной мощности *симметричной трехфазной цепи* применяется схема с *одним ваттметром*, который включается в одну из фаз и измеряет активную мощность только этой фазы (рис. 1.1, а, б). Активная мощность всей цепи получается путем умножения показания ваттметра на число фаз:

$$P = 3W = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos(\varphi).$$

Схема с одним ваттметром может быть использована только для ориентировочной оценки мощности и неприменима для точных и коммерческих измерений.

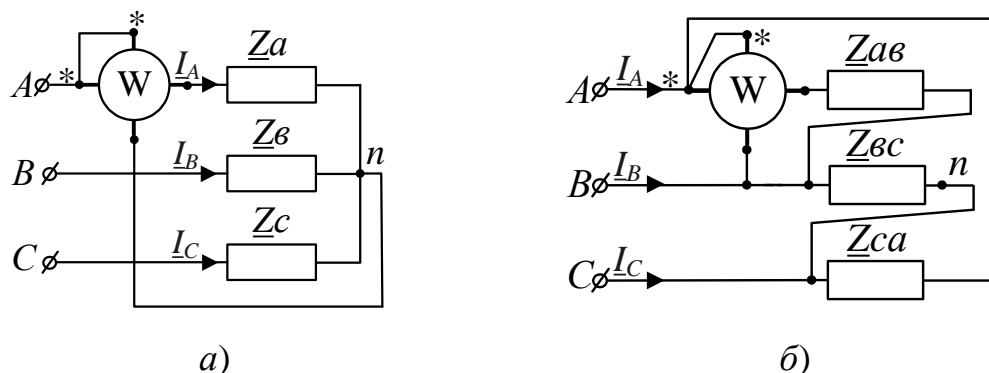


Рисунок 1.1 - Схемы включения ваттметров в трехпроводных сетях: а – с доступной нулевой точкой; б – при включении потребителей

электроэнергии треугольником.

При *несимметричной* нагрузке активную мощность в *четырёхпроводных трёхфазных цепях* (при наличии нулевого провода) измеряют *тремя приборами* (рис. 1.2, а), в которой производится измерение активной мощности каждой фазы в отдельности, а мощность всей цепи определяется как сумма показаний трех ваттметров:

$$P_W = P_{W_1} + P_{W_2} + P_{W_3} = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C$$

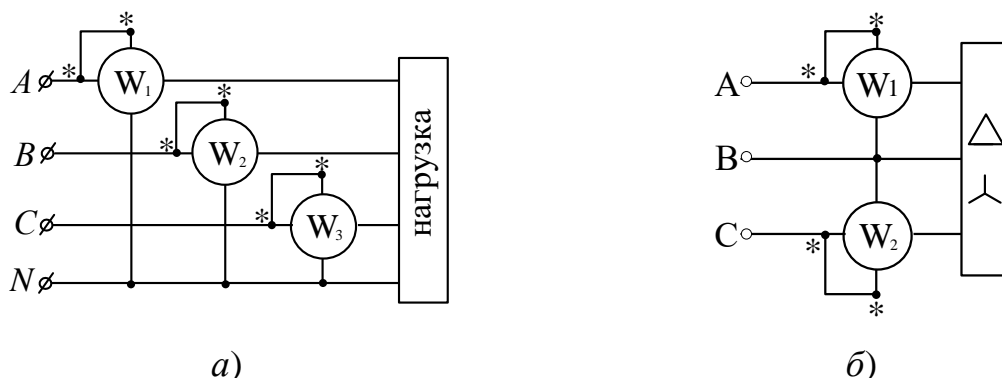


Рисунок 1.2 - Схемы включения ваттметров:

а – в четырёхпроводной цепи; б – в трёхпроводной цепи.

Для измерения активной мощности в *трёхпроводных трёхфазных цепях* (при отсутствии нулевого провода) применяется *схема с двумя приборами* (рис. 2.2 б).

1.3 Задание 1

Цель работы: Изучить способы измерения активной мощности в цепи трёхфазного тока электродинамическими ваттметрами методом двух и трех ваттметров.

Задание 1.1: Измерение активной мощности в трёхфазной цепи при соединении приёмников по схеме треугольника

По данным варианта (табл. 1.1) для нормального режима работы цепи:

- 1) нарисовать схему соединения приемников и схему включения ваттметров в цепь;
- 2) определить фазные и линейные токи;
- 3) сделать проверку на баланс мощностей;
- 4) определить показания ваттметров;
- 5) построить в масштабе векторную диаграмму, выделив на ней векторы напряжений и токов, под действием которых находятся параллельные и последовательные обмотки ваттметров;

Задание 1.2: Измерение активной мощности в трёхфазной четырёхпроводной цепи

При соединении этих же элементов по схеме звезда с нейтральным проводом:

- 1) нарисовать схему соединения приемников в звезду с нейтральным проводом и схему включения ваттметров в цепь, согласно рис. 1.4 (для всех вариантов)
- 2) определить токи в линейных и нейтральном проводах;
- 3) сделать проверку на баланс мощностей;

4) определить показания ваттметров;

5) построить в масштабе векторную диаграмму, выделив на ней векторы напряжений и токов, под действием которых находятся параллельные и последовательные обмотки ваттметров;

б) для обеих схем включения провести сравнительный анализ линейных токов и показаний ваттметров в расчетной трехфазной цепи для различных схем соединения и свести их в таблицу.

Таблица - Анализ линейных токов и показаний ваттметров

Схема соединения приемника	Токи в линейных проводах, А			Показание ваттметров, Вт
	I_A	I_B	I_C	P_W
Звезда				
Треугольник				

Схемы к заданию №1

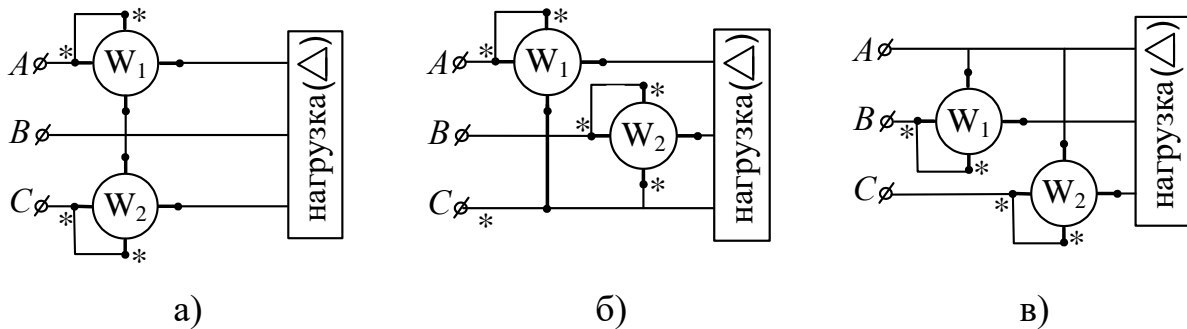


Рисунок 1.3 - Схемы включения ваттметров в трехпроводных сетях

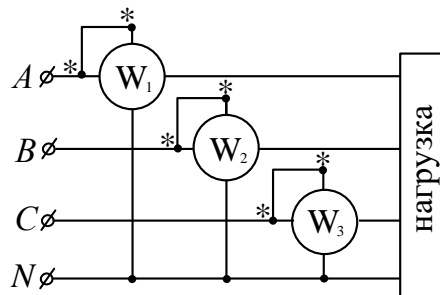


Рисунок 1.4 - Схемы включения ваттметров в четырехпроводной трехфазной цепи (цепь с нейтральным проводом)

Таблица 1.1 – Варианты заданий к заданию №1

№.		Параметры элементов электрической схемы									
вар-та	схемы	$U_{л},$ В	Фаза а (ав)			Фаза в (вс)			Фаза с (са)		
			$R_1,$ Ом	$X_{L1},$ Ом	$X_{C1},$ Ом	$R_2,$ Ом	$X_{L2},$ Ом	$X_{C2},$ Ом	$R_3,$ Ом	$X_{L3},$ Ом	$X_{C3},$ Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Рис. 1.3,а	380	6	4	5	6	6	9	3	5	5
2	Рис. 1.3,б	220	10	2	0	20	0	0	0	20	0

№.		Параметры элементов электрической схемы									
вар-та	схемы	$U_{л},$ В	Фаза a ($a\bar{b}$)			Фаза b ($b\bar{c}$)			Фаза c ($c\bar{a}$)		
			$R_1,$ Ом	$X_{L1},$ Ом	$X_{C1},$ Ом	$R_2,$ Ом	$X_{L2},$ Ом	$X_{C2},$ Ом	$R_3,$ Ом	$X_{L3},$ Ом	$X_{C3},$ Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	Рис. 1.3,в	220	40	4	0	10	18	7	0	10	0
4	Рис. 1.3,а	380	20	0	0	10	20	0	0	10	0
5	Рис. 1.3,б	220	10	20	0	30	30	0	0	40	0
6	Рис. 1.3,в	380	10	10	0	10	0	0	0	20	0
7	Рис. 1.3,а	220	20	0	-10	50	30	0	0	0	-40
8	Рис. 1.3,б	380	30	40	0	10	10	0	0	40	0
9	Рис. 1.3,в	220	40	30	0	40	0	0	0	30	0
10	Рис. 1.3,а	380	10	0	0	20	10	0	0	0	-20
11	Рис. 1.3,б	220	40	0	-30		40	0	0	50	0
12	Рис. 1.3,в	220	15	10	0	12	0	25	20	17	0
13	Рис. 1.3,а	380	30	0	20	25	20	0	20	0	30
14	Рис. 1.3,б	220	10	10	0	5	0	14	15	7	0
15	Рис. 1.3,в	220	17	0	20	15	15	0	5	0	30
16	Рис. 1.3,а	380	20	25	0	35	0	20	20	20	0
17	Рис. 1.3,б	220	5	0	20	10	14	0	18	0	8
18	Рис. 1.3,в	220	10	17	0	12	0	35	15	10	0
19	Рис. 1.3,а	380	0	0	25	7	35	0	17	0	20
20	Рис. 1.3,б	220	0	7	0	10	0	18	0	14	0
21	Рис. 1.3,в	220	10	0	35	15	5	0	30	0	14
22	Рис. 1.3,а	380	0	0	17	15	35	0	18	0	20
23	Рис. 1.3,б	380	18	0	7	0	35	0	30	0	20
24	Рис. 1.3,в	380	7	7	0	25	0	5	25	15	0

Пример расчета задания 1.1

Условие задачи.

К трехфазной линии с линейным напряжением $U_{л} = 220$ В подключен трехфазный приемник соединенный «треугольником». Активное и реактивное сопротивления фазы приемника соответственно равны:

$$R_1 = 40 \text{ Ом}, X_{L1} = 20 \text{ Ом}, R_2 = 30 \text{ Ом}, X_{C2} = 30 \text{ Ом}, R_3 = 80 \text{ Ом}.$$

Требуется для цепи, представленной на рис. 1.3, а:

- 1) нарисовать схему соединения приемников и схему включения ваттметров в цепь;
- 2) определить фазные и линейные токи;
- 3) сделать проверку на баланс мощностей;
- 4) определить показания ваттметров;

5) построить в масштабе векторную диаграмму, выделив на ней векторы напряжений и токов, под действием которых находятся параллельные и последовательные обмотки ваттметров;

Решение:

1) Чертим схему нагрузки, согласно заданию она соответствует рис. 1.5 и выбираем условное направление токов.

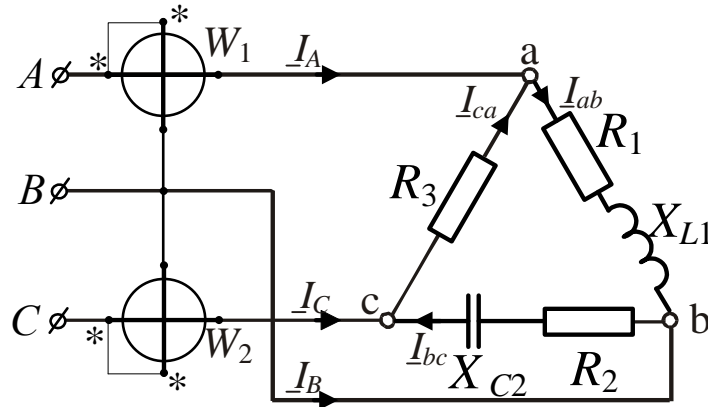


Рисунок 1.5 – Схема включения двух ваттметров для измерения мощности в трехпроводной сети при соединении фаз потребителя «треугольником»

2) Характер нагрузки:

фазы a – активно-индуктивная,

фазы b – активно-емкостная,

фазы c – активная.

Комплексные сопротивления фаз потребителя:

$$\underline{Z}_{ab} = R_1 + jX_{L1} = 40 + j20 = \sqrt{40^2 + 20^2} \cdot e^{j \arctg \frac{20}{40}} = 44,72 e^{j26,6} \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_{bc} = R_2 - jX_{C2} = 30 - j30 = \sqrt{30^2 + 30^2} \cdot e^{j \arctg \frac{-30}{30}} = 44,42 e^{-j45} \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_{ca} = R_3 = 80 = 80 e^{j0} \text{ Ом}.$$

При соединении элементов по схеме в треугольник фазные напряжения увеличиваются до линейных. Для определения фазы напряжений за начало отсчета принимаем вектор напряжения в фазе A. Воспользуемся формулами:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{ab} = \underline{U}_A - \underline{U}_B = 127 + 63,5 + j110 = 190,5 + j110 = 220 e^{j30^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_{bc} = \underline{U}_B - \underline{U}_C = -63,5 - j110 + 63,5 - j110 = -j220 = 220 e^{-j90^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_{ca} = \underline{U}_C - \underline{U}_A = -63,5 + j110 - 127 = -190,5 + j110 = 220 e^{j150^\circ} \text{ В};$$

Находим фазные токи по закону Ома.

Ток фазы ab :

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{220 e^{j30^\circ}}{44,72 e^{j26,56}} = 4,92 e^{j3,44} = 4,91 + j0,29 \text{ А}.$$

Ток фазы bc :

$$\underline{I}_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}} = \frac{220e^{-j90^\circ}}{42,43e^{-j45^\circ}} = 5,2e^{-j45^\circ} = 3,7 - j3,7 \text{ А.}$$

Ток фазы ca :

$$\underline{I}_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{220e^{j150^\circ}}{80} = 2,75e^{j150^\circ} = -2,38 + j1,375 \text{ А.}$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа, ток в линии A находится как:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 4,91 + j0,29 + 2,38 - j1,37 = 7,29 - j1,08 = 7,37e^{-j8,4^\circ} \text{ А.}$$

Аналогичным образом находится ток в линии B

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = 3,7 - j3,7 - 4,91 - j0,29 = -1,21 - j3,99 = 4,17e^{-j106,9^\circ} \text{ А.}$$

Ток в линии C

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = -2,38 + j1,375 - 3,7 + j3,7 = -6,08 + j5,07 = 7,9e^{j140,2^\circ} \text{ А.}$$

3) Проверка решения:

Решение проверим с помощью уравнения энергетического баланса:

$$\underline{S}_\Gamma = \underline{S}_\Pi.$$

Мощность, отдаваемая сетью

$$\begin{aligned} \underline{S}_\Gamma &= \underline{U}_A \cdot \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \cdot \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \cdot \underline{I}_C^* = \\ &= 127 \cdot 7,37e^{j8,4^\circ} + 127e^{-j120^\circ} \cdot 4,17e^{j106,9^\circ} + 127e^{j120^\circ} \cdot 7,9e^{-j140,2^\circ} = \\ &= 935,99e^{j8,4^\circ} + 529,6e^{-j13,1^\circ} + 1003,3e^{-j20,2^\circ} \\ &= 925,95 + j136,7 + 515,8 - j120 + 941,6 - j346,44 = 2383,35 - j329,74 \text{ В} \cdot \text{А} \end{aligned}$$

Активная мощность, потребляемая трехфазной нагрузкой:

$$\begin{aligned} P_\Pi &= P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}. \\ P_\Pi &= R_1 I_{ab}^2 + R_2 I_{bc}^2 + R_3 I_{ca}^2 = 40 \cdot 4,92^2 + 30 \cdot 5,2^2 + 80 \cdot 2,75^2 = \\ &= 968,25 + 811,2 + 605 = 2384,45 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Суммарная реактивная мощность

$$Q_\Pi = Q_{ab} + Q_{bc} = X_{L1} I_{ab}^2 - X_{C2} I_{bc}^2 = 20 \cdot 4,92^2 - 30 \cdot 5,2^2 = 484,13 - 811,2 \text{ В} \cdot \text{Ар}$$

Сравнив мощность отдаваемую источником и мощность, потребляемую трехфазной нагрузкой, видно, что энергетический баланс исследуемой цепи сошелся и, следовательно, задача решена верно.

4) Активная мощность трехфазной цепи равна сумме показаний двух ваттметров:

$$P_W = P_{W1} + P_{W2}$$

Активная мощность, показываемая ваттметром P_{W1} :

$$P_{W1} = U_{AB} I_A \cos \varphi_1 = 220 \cdot 7,37 \cdot \cos(30 + 8,4) = 1270,7 \text{ Вт.}$$

Активная мощность, показываемая ваттметром P_{W2} :

$$P_{W2} = U_{CB} I_C \cos \varphi_2 = 220 \cdot 7,9 \cdot \cos(90 - 140,2) = 1112,51 \text{ Вт},$$

Следует обратить внимание, что берется напряжение \underline{U}_{CB} потому, что начало параллельной цепи ваттметра, отмеченное звездочкой подключено к фазе C , а не к B .

$$\begin{aligned} \underline{U}_{CB} &= \underline{U}_C - \underline{U}_B = -\underline{U}_{BC} = 127e^{j120^\circ} - 127e^{-j120^\circ} = \\ &= -63,5 + j110 + 63,5 + j110 = j220 = 220e^{j90^\circ} \text{ В}. \end{aligned}$$

Найдем показания приборов:

$$P_W = P_{W1} + P_{W2} = 1270,7 + 1112,51 = 2383,2 \text{ Вт}.$$

5) Строим в масштабе векторную диаграмму, иллюстрирующую работу схемы включения ваттметров.

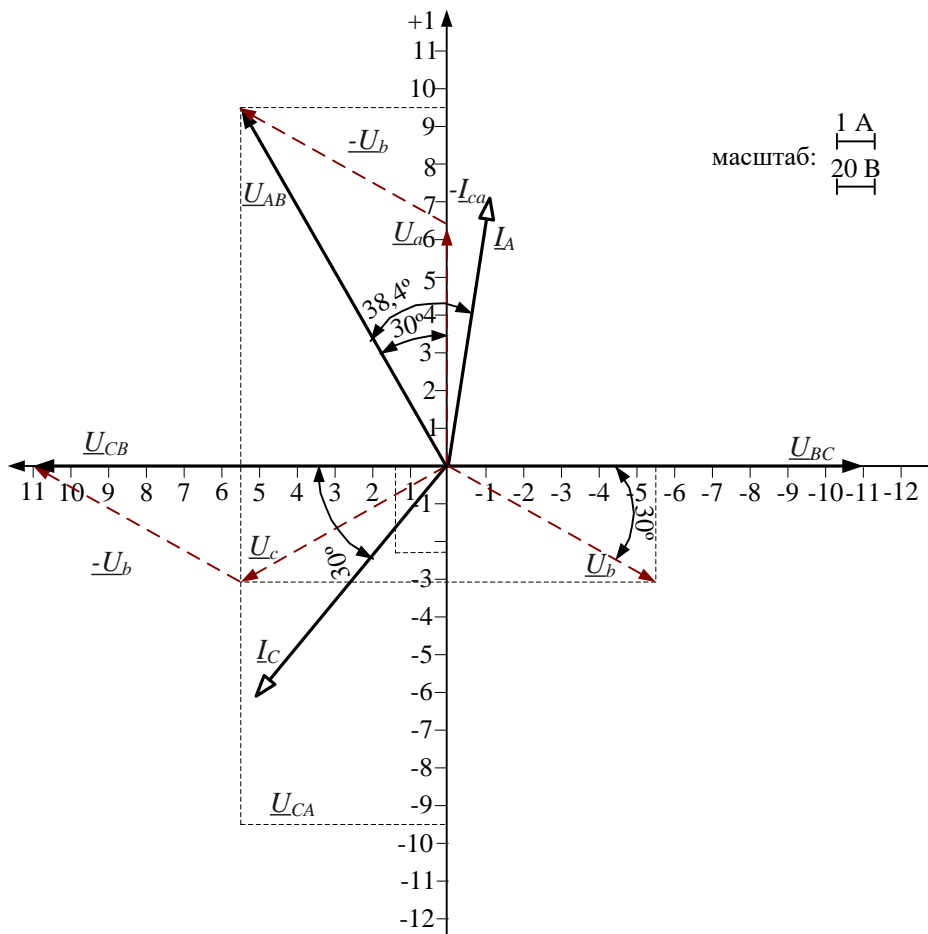


Рисунок 1.6 – Векторная диаграмма, иллюстрирующая работу схемы включения ваттметров, приведенную на рис. 1.5

Пример расчета задания 1.2

Условие задачи.

К трехфазной линии с линейным напряжением $U_{л} = 220 \text{ В}$ подключен трехфазный приемник соединенный «звездой» с нейтральным проводом. Активное и реактивное сопротивления фазы приемника соответственно равны:

$$R_1 = 40 \text{ Ом}, X_{L1} = 20 \text{ Ом}, R_2 = 30 \text{ Ом}, X_{C2} = 30 \text{ Ом}, R_3 = 80 \text{ Ом}.$$

Анализ решения задачи:

1) Чертим схему нагрузки, если нагрузка несимметрична, то нужно включить три ваттметра, согласно заданию она соответствует рис. 1.7.

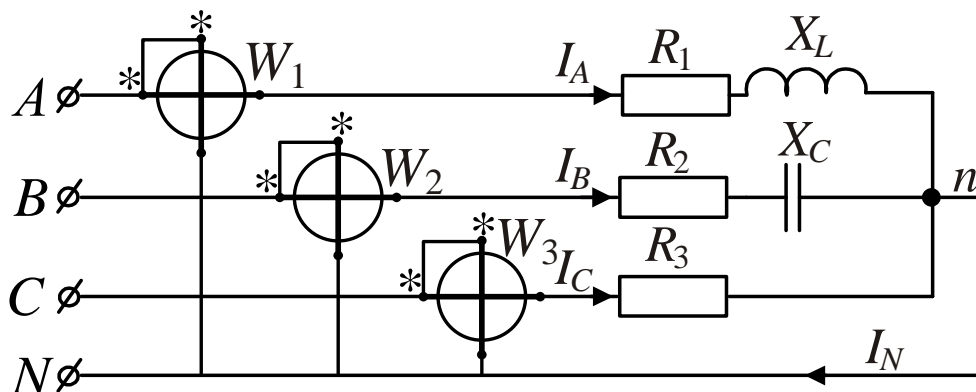


Рисунок 1.7 – схема соединения фаз потребителя «звезда» с нейтральным проводом

2. Комплексные сопротивления фаз потребителя:

$$\underline{Z}_a = R_1 + jX_{L1} = 44,72e^{j26,6} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_b = R_2 - jX_{C2} = 44,42e^{-j45} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_c = R_3 = 80 = 80e^{j0} \text{ Ом}.$$

Если приемник соединен *звездой с нейтральным* (нулевым) проводом (рис. 2.7), а сопротивления линейных и нейтрального проводов пренебрежимо малы, то фазные напряжения приемника равны соответствующим фазным напряжениям генератора.

Определим действующее значение фазного напряжения

$$U_\phi = U_n / \sqrt{3} = 220 / \sqrt{3} = 127 \text{ В}.$$

Фазу вектора напряжения фазы А обычно выбирают равной нулю, поэтому фазные напряжения:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A = U_\phi e^{j0} = 127e^{j0} = 127 \text{ В},$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B = 127e^{-j120^\circ} = -63,5 - j110 \text{ В},$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C = 127e^{j120^\circ} = -63,5 + j110 \text{ В}.$$

При соединении приемника в звезду токи линейные равны токам фазным и определяются по закону Ома:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{U_\phi e^{j0}}{\underline{Z}_a} = \frac{127}{44,72e^{j26,6}} = 2,84e^{-j26,6} = 2,54 - j1,27 \text{ А},$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{U_\phi e^{-j120^\circ}}{\underline{Z}_b} = \frac{127e^{-j120^\circ}}{42,42e^{-j45}} = 3e^{-j75} = 0,77 - j2,9 \text{ А},$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{127e^{j120^\circ}}{80} = 1,59e^{j120^\circ} = -0,79 + j1,37 \text{ А}.$$

Ток нейтрального провода, в соответствии с первым законом Кирхгофа, находится как алгебраическая сумма токов

$$\begin{aligned}\underline{I}_N &= \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 2,54 - j1,27 + 0,77 - j2,9 - 0,79 + j1,37 = \\ &= 2,52 - j2,8 = 3,77 \cdot e^{-j48} \text{ А.}\end{aligned}$$

3) Проверка решения:

Активная мощность, потребляемая всеми фазами нагрузки, находится как сумма активных мощностей фаз, т.е.

$$\begin{aligned}P &= P_a + P_b + P_c. \\ P &= R_1 I_a^2 + R_2 I_b^2 + R_3 I_c^2 = 40 \cdot 2,84^2 + 30 \cdot 3^2 + 80 \cdot 1,59^2 = \\ &= 322,624 + 270 + 202,25 = 794,87 \text{ Вт}\end{aligned}$$

Реактивная мощность трехфазной нагрузки находится как сумма реактивных мощностей

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c.$$

В фазе c находится чисто активная нагрузка, поэтому $Q_c = 0$.

Реактивная мощность остальных фаз

$$Q = Q_a + Q_b = X_{L1} I_a^2 - X_{C2} I_b^2 = 20 \cdot 2,84^2 - 30 \cdot 3^2 = 161,31 - 270 = -108,7 \text{ В} \cdot \text{Ар}.$$

$$\begin{aligned}S_\Gamma &= \underline{U}_A \cdot \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \cdot \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \cdot \underline{I}_C^* = \\ &= 127 \cdot 2,84 e^{j26,6} + 127 e^{-j120} \cdot 3 e^{j75} + 127 e^{j120} \cdot 1,59 e^{-j120} = \\ &= 360,68 e^{j26,6} + 381 e^{-j45} + 201,93 e^{j0} \\ &= 322,6 + j161,27 + 269,4 - j269,4 + 201,93 = 793,94 - j108,1 \text{ В} \cdot \text{А}\end{aligned}$$

4) Активная мощность трехфазного приемника равна сумме показаний трех ваттметров:

$$P_W = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} = 322,5 + 269,4 + 201,93 = 793,83 \text{ Вт},$$

где P_{W1} , P_{W2} , P_{W3} – фазная мощность, показываемая ваттметрами W_1 , W_2 , W_3 , определяются как:

$$\begin{aligned}P_{W1} &= U_A I_A \cos \varphi_a = 127 \cdot 2,84 \cos(0 + 26,6) = 322,5 \text{ Вт}; \\ P_{W2} &= U_B I_B \cos \varphi_b = 127 \cdot 3 \cos(-120 + 75) = 269,4 \text{ Вт}; \\ P_{W3} &= U_C I_C \cos \varphi_c = 127 \cdot 1,59 \cos(120 - 120) = 201,93 \text{ Вт}.\end{aligned}$$

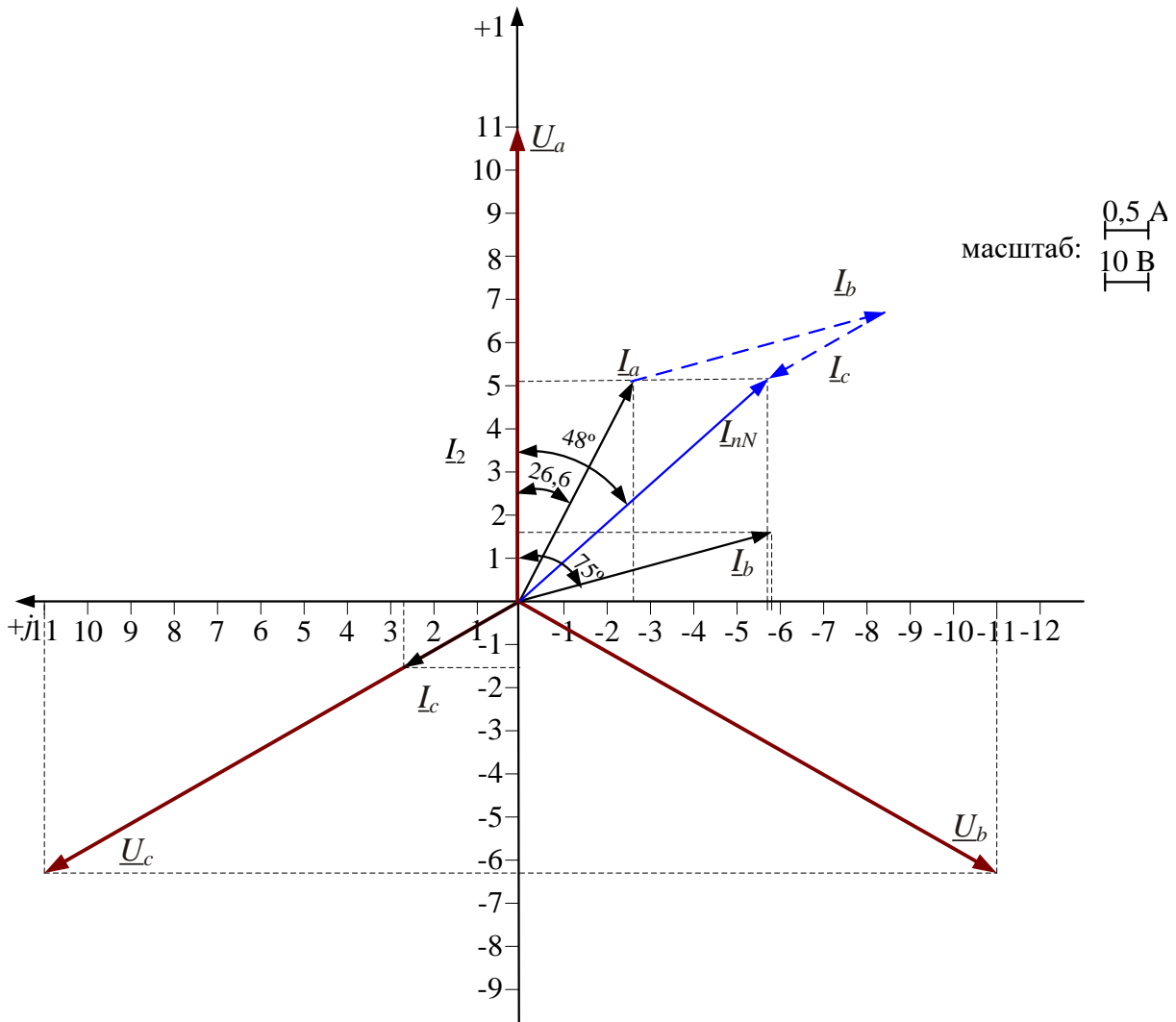


Рисунок 1.8 – Векторная диаграмма иллюстрирующая работу схемы включения ваттметров, приведенную на рис. 3.7

Сравнительный анализ линейных токов и показаний ваттметров в расчетной трехфазной цепи для различных схем соединения при заданных сопротивлениях в фазах приемника приводится в табл. 3.2.

Таблица 1.2 - Анализ линейных токов и показаний ваттметров

Схема соединения приемника	Токи в линейных проводах, А			Показание ваттметров, Вт
	I_A	I_B	I_C	P
Звезда	2,84	3	1,59	793,83
Треугольник	7,37	4,17	7,9	2383,2

Вывод: При соединении элементов приемника по схеме в треугольник - токи в линейных проводах увеличиваются на $\sqrt{3}$, а мощность в 3 раза, т. е.
 $P_{\Delta} = 3P_{\lambda}$