

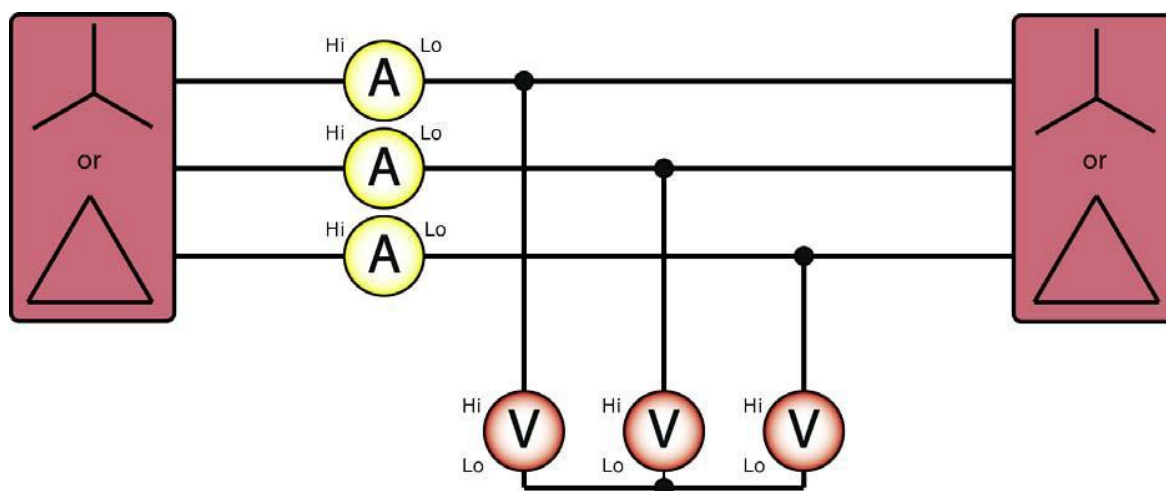
## ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ - 014

### Измерение мощности 3-фазных систем с помощью 2 ваттметров



В течение многих лет термины «3 фазы 3 ваттметра» и «3 фазы 2 ваттметра» использовались в задачах измерения мощности. Данный документ объясняет разницу между двумя методами измерения, возможность применения и достоинства каждого метода, а также разъясняет каким образом и при каких условиях метод 2 ваттметров и метод 3 ваттметров дают одинаковые результаты.

#### 3 ФАЗЫ 3 ВАТТМЕТРА



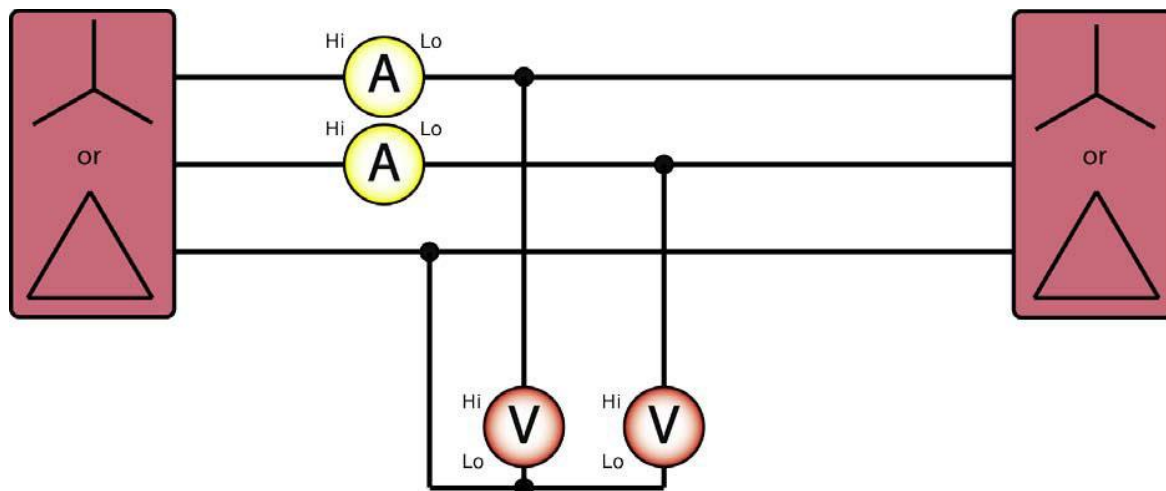
На диаграмме выше представлен метод измерения мощности «3 фазы 3 ваттметра». Это самый простой для понимания метод измерения, так как анализатор мощности измеряет мгновенные и отдельные значения по фазе 1, 2 и 3. Сумма мощностей по всем фазам равняется общей мощности системы. Упрощенное выражение, без учета коэффициента мощности, выглядит так:

$$(V_1 \times I_1) + (V_2 \times I_2) + (V_3 \times I_3) = \text{Суммарная мощность, Вт}$$

$$\text{Мощность фаза 1, Вт} + \text{Мощность фаза 2, Вт} + \text{Мощность фаза 3, Вт} = \text{Суммарная мощность, Вт}$$

**Примечание:** в 4-проводных системах нейтральный провод считается общей точкой нулевого потенциала.

### 3 ФАЗЫ 2 ВАТТМЕТРА



На диаграмме выше представлен метод измерения мощности «3 фазы 2 ваттметра». Метод позволяет высвободить 3-й фазный канал анализатора мощности для измерения параметров других систем, например, шины DC, так как основные измерения по 3 фазам могут проводиться с использованием всего двух фазных каналов анализатора.

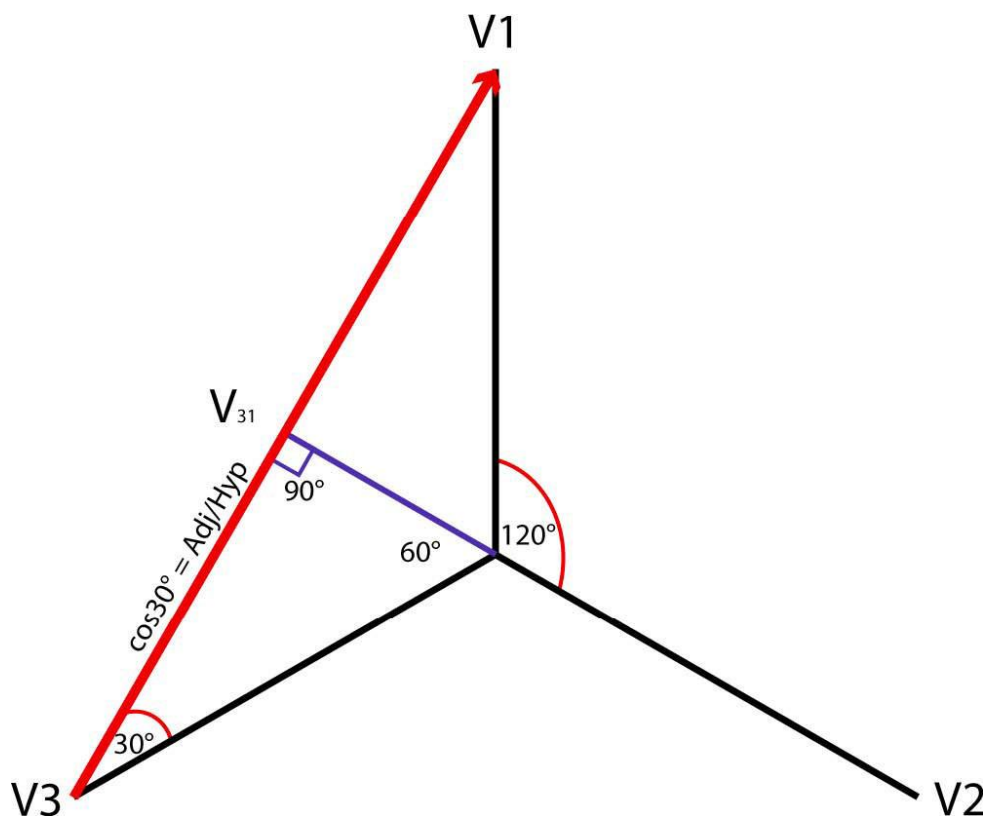
Фаза 3 на приведенной выше диаграмме используется как опорный уровень. Поэтому если бы к Фазе 3 был подключен ваттметр, то его показания были бы равны 0, так как  $P = V \times I$ , и хотя значение тока не равно нулю, измеренное напряжение было бы нулевым. Как известно, при соединении звездой, линейное напряжение в  $\sqrt{3}$  раза больше фазного напряжения. И поэтому без вычислений видно, что мощность Фазы 3 будет включена в показания 2 ваттметров, так как в данном методе измеряются не фазные, а линейные напряжения двух других фаз.

Для доказательства такого вывода, ниже будут представлены математические вычисления.

**Примечание:** Показания двух ваттметров не будут одинаковыми, если коэффициент мощности по фазам не равен единице, либо присутствует разбалансировка. В любом случае, сумма показаний двух ваттметров всегда будет постоянной и будет равна общей мощности 3-фазной системы.

### ФАЗНОЕ ИЛИ ЛИНЕЙНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ?

Ниже представлена векторная диаграмма 3 фазной системы, соединенная в звезду. Фазное напряжение составляет 240В. Это именно то напряжение, которое измеряется в методе «3 фазы 3 ваттметра». Однако в методе «3 фазы 2 ваттметра» измеряется линейное напряжение, т.е. напряжение Фаза 1 – Фаза 3 и Фаза 3 – Фаза 2. Рассмотрим векторную диаграмму напряжений и сделаем некоторые математические выводы.



Примем для удобства амплитуду напряжения по всем фазам равной 1В, и рассчитаем соотношение между фазным и линейным напряжением в такой системе.

Для расчета напряжения  $V_3 - V_1$ , рассмотрим прямоугольный треугольник, образованный нулевой точкой звезды,  $V_3$  и серединой отрезка между  $V_3$  и  $V_1$ . Тогда:

$$\cos 30^\circ = (\frac{1}{2} (V_1 - V_3)) / 1$$

$$\cos 30^\circ = \frac{1}{2} (V_1 - V_3)$$

$$2 \times \cos 30^\circ = V_1 - V_3$$

$$V_1 - V_3 = 1.73205 \text{ (Примечание: } 1.73205^2 = 3)$$

Следовательно:

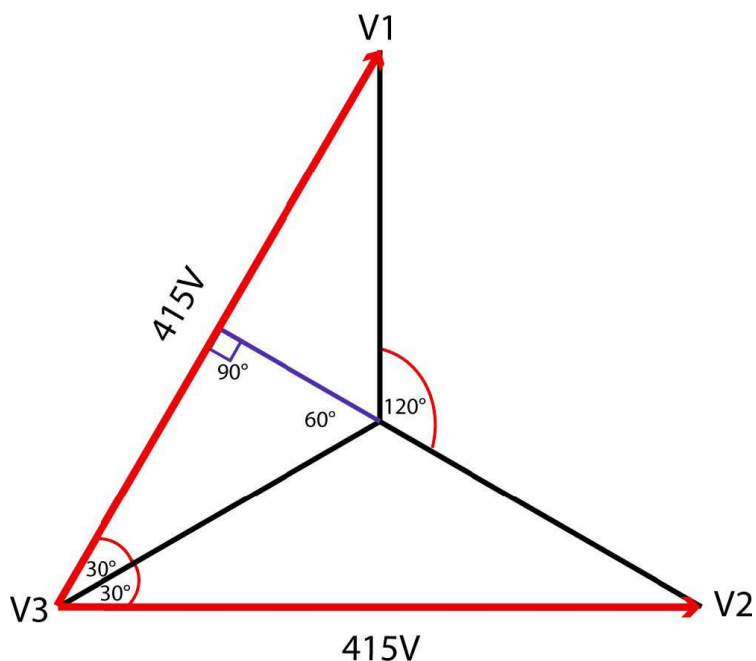
$$V_1 - V_3 = V_3 \times \sqrt{3}$$

Для удобства понимания можно использовать реальные значения напряжений:

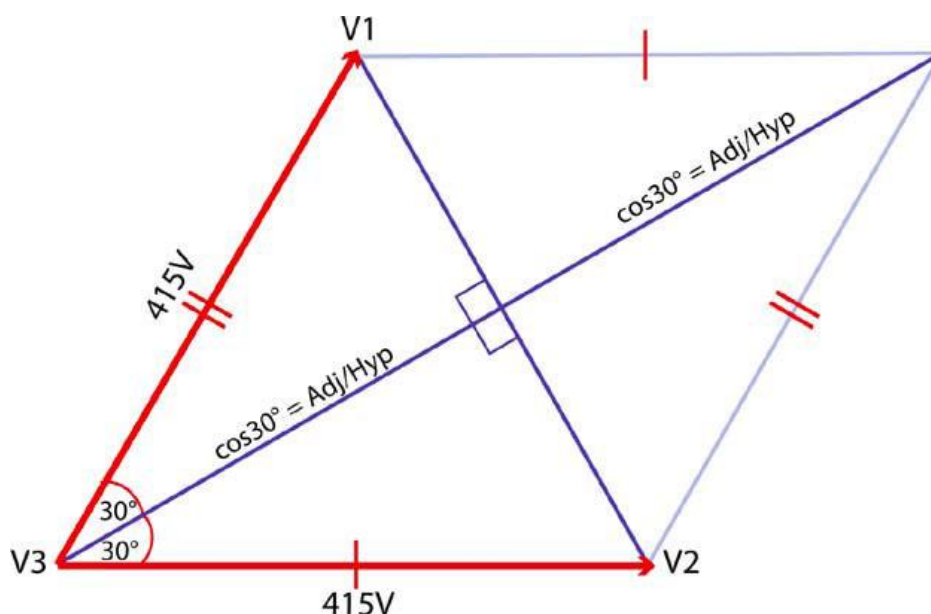
Фазное напряжение (линия - нейтраль) = 240В (стандартное напряжение сети в ВБ)

Линейное напряжение (линия - линия) = 240В  $\times \sqrt{3}$  = 415В

Такие же соотношения соответствуют линейному напряжению Фаза 3 – Фаза 2



На диаграмме выше представлено два вектора напряжения, которые измеряются в методе «3 фазы 2 ваттметра». Теперь можно рассчитать суммарное напряжение путем сложения векторов.



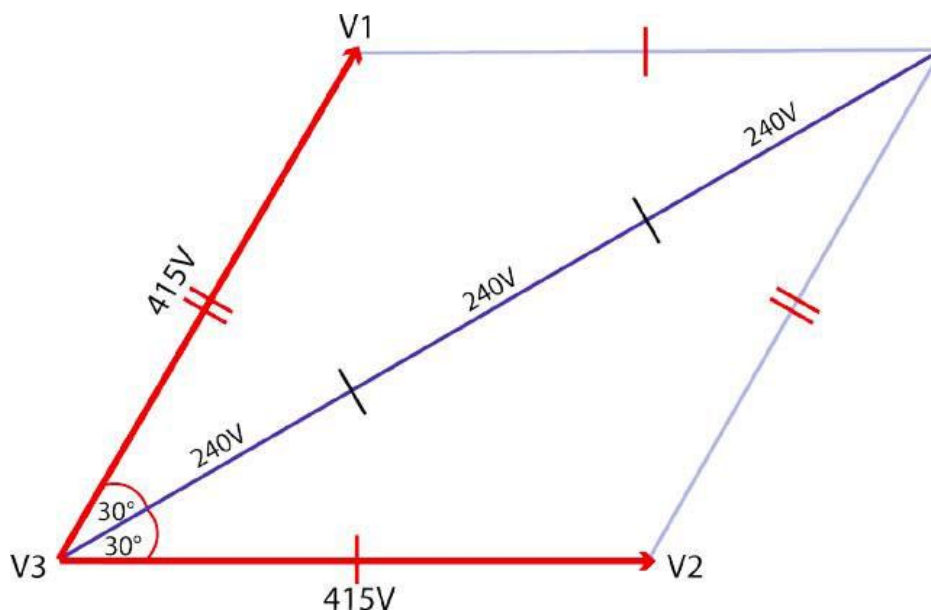
Из векторной диаграммы следует:

$$\text{Adj} = 415 \times \cos 30^\circ$$

$$(V_3 - V_1) + (V_3 - V_2) = 2 \times (415 \times \cos 30^\circ)$$

$$(V_3 - V_1) + (V_3 - V_2) = 2 \times 359.4$$

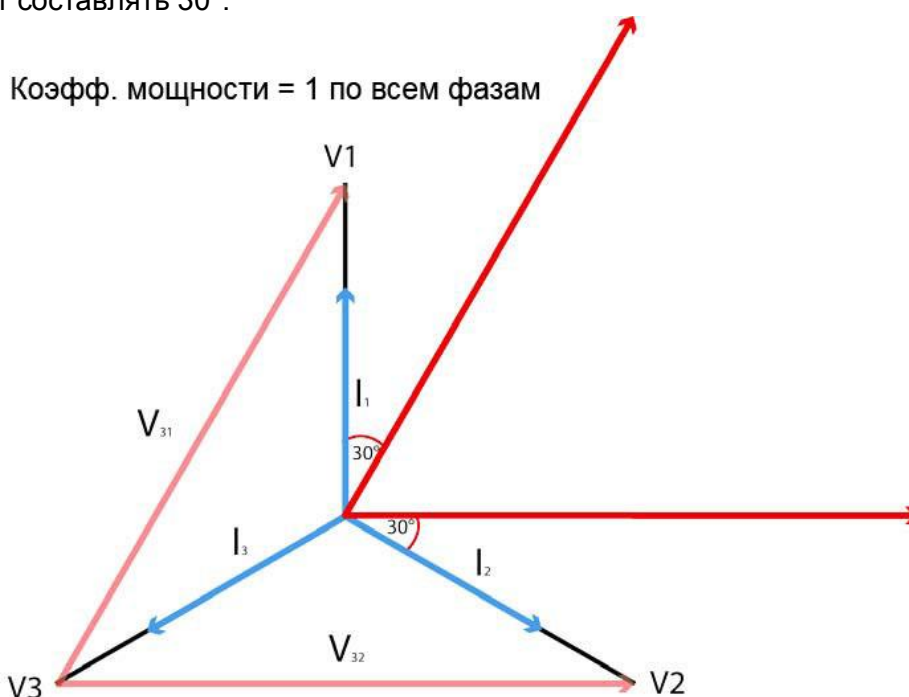
$(V_3 - V_1) + (V_3 - V_2) = 718.8$  – это значение равно сумме все напряжений 3-фазной системы, если разделить это значение на 3, то получим значения фазных напряжений:  $718.8 / 3 = 240\text{В}$ .



**Примечание:** угол между двумя векторами линейного напряжения составляет  $60^\circ$ , не  $120^\circ$ , как между векторами фазного напряжения.

Таким образом, приведенный выше расчет соответствует измеренным мгновенным значениям напряжения и тока.

Фазовый сдвиг между вектором линейного напряжения и соответствующим вектором фазного напряжения будет составлять  $30^\circ$ .



Учитывая фазовый сдвиг  $30^\circ$  между линейным напряжением и током в соответствующей фазе, при условии, что коэффициент мощности равен 1, рассчитаем мощность, отображаемую каждым ваттметром:

$W_1 = \text{Ваттметр 1 (ток Фаза 1, напряжение Фаза 3 – Фаза 1)}$

$W_2 = \text{Ваттметр 2 (ток Фаза 2, напряжение Фаза 3 – Фаза 2)}$

$$P = W_1 + W_2$$

$W_1 = V_{31} \times I_1 \times \cos\varphi_A$ , где  $\varphi_A$  – фазовый угол между вектором  $V_{31}$  и  $I_1$

$W_2 = V_{32} \times I_2 \times \cos\varphi_C$ , где  $\varphi_C$  – фазовый угол между вектором  $V_{32}$  и  $I_2$

**Примечание:**  $\varphi_A$  и  $\varphi_C$  – фазовые углы, равные  $\pm 30^\circ$  в зависимости от того, отстает или опережает вектор тока от соответствующего вектора фазного напряжения.

Таким образом, если учесть отставание вектора тока от вектора фазного напряжения, выражение для вычисления мощности может быть записано:

$$W_1 = V_{31} \times I_1 \times \cos(30^\circ - \varphi)$$

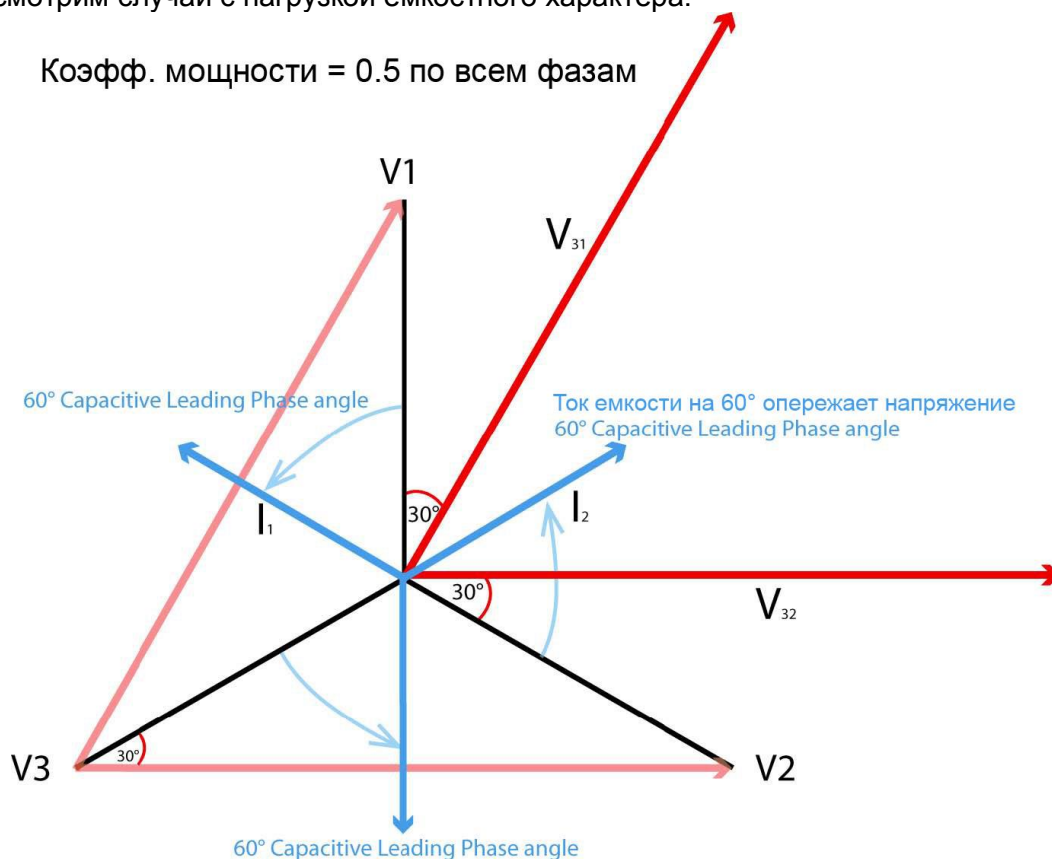
$$W_2 = V_{32} \times I_2 \times \cos(30^\circ + \varphi)$$

Приведенное выше выражение сходно с векторной диаграммой цепи с индуктивной нагрузкой, в которой напряжение опережает ток. Поэтому если фазовый угол  $\varphi$  будет приближаться к значению  $60^\circ$ , показания Ваттметра #2 будут стремиться к нулю, а показания Ваттметра #1 будут стремиться к полной (суммарной) мощности.

$$\text{Суммарная мощность, Вт} = [V_{31} \times I_1 \times \cos(30^\circ - \varphi)] + [V_{32} \times I_2 \times \cos(30^\circ + \varphi)]$$

Теперь рассмотрим случай с нагрузкой емкостного характера.

Коэфф. мощности = 0.5 по всем фазам



Измерение мощности 3-фазных систем с помощью 2 ваттметров

Newton's4th Ltd 1 Bede Island Road Leicester, LE2 7EA UK

Tel: +44 (0)116 230 1066

**Исходные данные:** линейное напряжение 415В, фазный ток 5А, емкостной фазовый угол 60°

### 3 ФАЗЫ 2 ВАТТМЕТРА

$$\text{Суммарная мощность, Вт} = [415 \times 5 \times \cos(30^\circ - 60^\circ)] + [415 \times 5 \times \cos(30^\circ + 60^\circ)]$$

$$\text{Суммарная мощность, Вт} = [2075 \times \cos(90^\circ)] + [2075 \times \cos(-30^\circ)]$$

$$\text{Суммарная мощность, Вт} = [2075 \times 0] + [2075 \times 0.866]$$

$$\text{Суммарная мощность} = \mathbf{1797 \text{ Вт}}$$

$$\text{Показания ваттметра \#1} = \mathbf{0 \text{ Вт}}$$

$$\text{Показания ваттметра \#2} = \mathbf{1797 \text{ Вт}}$$

### 3 ФАЗЫ 3 ВАТТМЕТРА

При таком методе измерения, отдельный ваттметр измеряет мощность отдельной фазы, и сумма показаний ваттметров и есть суммарная мощность 3-фазной системы.

Теперь измеряется фазное напряжение 239.6В, фазный ток прежний 5А

$$\text{Суммарная мощность, Вт} = [V_1 \times I_1 \times \cos(\varphi)] + [V_2 \times I_2 \times \cos(\varphi)] + [V_3 \times I_3 \times \cos(\varphi)]$$

$$\text{Суммарная мощность, Вт} = [239.6 \times 5 \times \cos(60^\circ)] + [239.6 \times 5 \times \cos(60^\circ)] + [239.6 \times 5 \times \cos(60^\circ)]$$

$$\text{Суммарная мощность, Вт} = [1198 \times 0.5] + [1198 \times 0.5] + [1198 \times 0.5]$$

$$\text{Суммарная мощность, Вт} = [599] + [599] + [599]$$

$$\text{Суммарная мощность} = \mathbf{1797 \text{ Вт}}$$

Таким образом, значение суммарной мощности, полученное методом «3 Фазы 2 Ваттметра» и методом «3 Фазы 3 Ваттметра» - одинаково.

### ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАНИЯ ВАТТМЕТРА?

При коэффициенте мощности менее 0.5, показания одного из ваттметров будут отрицательными, но разница между показаниями двух ваттметров все равно будет равна суммарной мощности.

**Исходные данные:** линейное напряжение 415В, фазный ток 5А, емкостной фазовый угол 80°

### 3 ФАЗЫ 2 ВАТТМЕТРА

$$\text{Суммарная мощность, Вт} = [415 \times 5 \times \cos(30^\circ - 80^\circ)] + [415 \times 5 \times \cos(30^\circ + 80^\circ)]$$

$$\text{Суммарная мощность, Вт} = [2075 \times \cos(110^\circ)] + [2075 \times \cos(-50^\circ)]$$

$$\text{Суммарная мощность, Вт} = [2075 \times -0.34] + [2075 \times 0.64279]$$

Суммарная мощность, Вт =  $[-709.69] + [1333.78]$

**Показания ваттметра #1 = -709.69 Вт**

**Показания ваттметра #2 = 1333.78 Вт**

**Суммарная мощность = 624.09 Вт**

### 3 ФАЗЫ 3 ВАТТМЕТРА

Суммарная мощность, Вт =  $[239.6 \times 5 \times \cos(80^\circ)] + [239.6 \times 5 \times \cos(80^\circ)] + [239.6 \times 5 \times \cos(80^\circ)]$

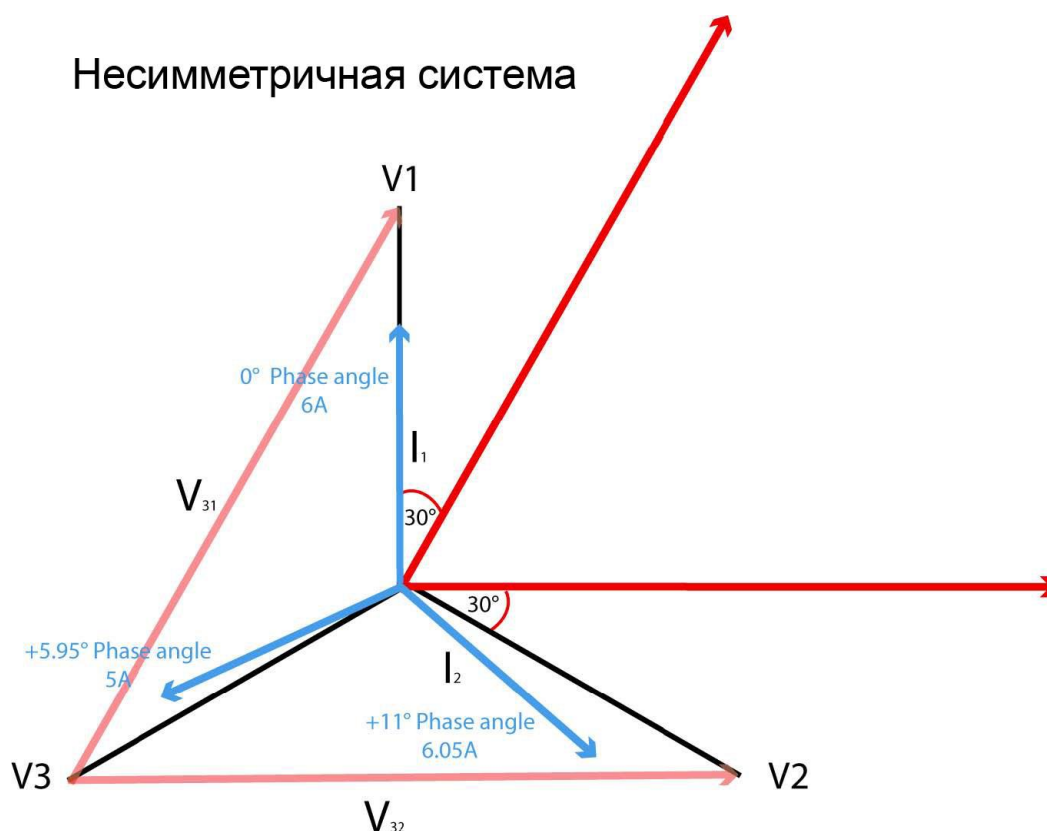
Суммарная мощность, Вт =  $[208.03] + [208.03] + [208.03]$

**Суммарная мощность = 624.09 Вт**

Таким образом, значение суммарной мощности, полученное методом «3 Фазы 2 Ваттметра» и методом «3 Фазы 3 Ваттметра» - одинаково.

### НЕСИММЕТРИЧНАЯ СИСТЕМА

С помощью метода «3 Фазы 2 Ваттметра» также можно измерить суммарную мощность несимметричных 3-фазных систем. В текущем примере нагрузка одной фазы полностью омическая, а двух других фаз – индуктивная, с разными фазовыми углами и амплитудами токов.





### 3 ФАЗЫ 2 ВАТТМЕТРА

Суммарная мощность, Вт =  $[415 \times 6 \times \cos(30^\circ - 0^\circ)] + [415 \times 6.05 \times \cos(30^\circ + (+11^\circ))]$

Суммарная мощность, Вт =  $[2490 \times \cos(30^\circ)] + [2510.75 \times \cos(41^\circ)]$

Суммарная мощность, Вт =  $[2156.40] + [1894.90]$

**Показания ваттметра #1 = 2156.40 Вт**

**Показания ваттметра #2 = 1894.90 Вт**

**Суммарная мощность = 4052 Вт**

### 3 ФАЗЫ 3 ВАТТМЕТРА

Суммарная мощность, Вт =  $[239.6 \times 6 \times \cos(0^\circ)] + [239.6 \times 5 \times \cos(5.95^\circ)] + [239.6 \times 6.05 \times \cos(11^\circ)]$

Суммарная мощность, Вт =  $[1437.6] + [1191.55] + [1422.95]$

**Суммарная мощность = 4052 Вт**

## ВЫВОДЫ

Таким образом, для измерения мощности 3-фазных систем требуется только 2 ваттметра. Анализаторы серии ПРИЗМА-50/150/450/550 обеспечивают режим «3 фазы 2 ваттметра + фаза 3». Такой режим позволяет с помощью свободного фазного входа 3 измерять мощность других AC/DC систем. Т.е. обеспечить 4-фазное измерение с помощью 3 ваттметров.

**Количество требуемых ваттметров = Количество фазных проводов - 1**

Измерения, выполненные с помощью метода «3 Фазы 2 Ваттметра» имеют смысл только в отношении суммарной мощности. Для измерения импеданса, мощности и др. параметров отдельной фазы, требуется метод «3 Фазы 3 Ваттметра».

При измерении параметров 4-проводных систем с нейтралью, результаты, полученные с помощью метода «3 Фазы 2 Ваттметра» будут корректны только в том случае, если система является симметричной. Если система несимметричная, то необходимо использовать метод «3 Фазы 3 Ваттметра».

Дополнительную информацию по прецизионным анализаторам мощности серии ПРИЗМА вы можете найти на сайтах [www.n4l.ru](http://www.n4l.ru), [www.newtons4th.com](http://www.newtons4th.com)