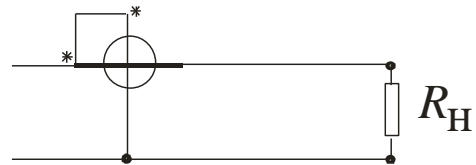
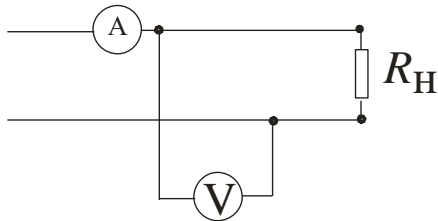


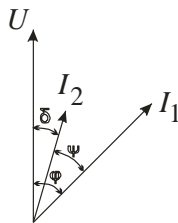
ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Мощность в цепях постоянного тока равна произведению тока на напряжение $P = UI$. Измерить можно либо прямым методом с помощью электродинамического или ферродинамического ваттметра, либо косвенным методом с использованием амперметра и вольтметра.



В однофазных цепях переменного тока аналогично, но с использованием фазометра

$$P = UI \cos \varphi$$



ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Активная мощность в 3-фазной цепи равна сумме мощностей каждой фазы

$$p = u_A i_A \cos \varphi_A + u_B i_B \cos \varphi_B + u_C i_C \cos \varphi_C$$

где u, i, φ – мгновенные значения.

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$$

т.к. $U_L = \sqrt{3}U_\phi, I_L = I_\phi$ если "звезда"

$$U_L = U_\phi, I_L = \sqrt{3}I_\phi \text{ если "треугольник"}.$$

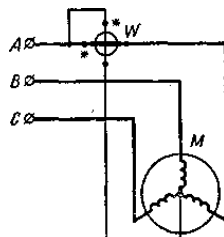
Измерение мощности 3-фазной симметричной цепи по методу одного ваттметра

Если система напряжений симметрична, а сопротивления фаз нагрузки одинаковы (равномерная нагрузка), то, измерив мощность одной фазы и умножив ее на 3, получим мощность трехфазной цепи.

- При симметричной нагрузке:
1. Симметрия напряжений
 2. Равенство мощностей в каждой фазе
 3. одинаковые углы между токами и напряжениями

Рассмотрим несколько случаев.

1. При доступной нулевой точке нагрузки измерение производится однофазным ваттметром



В последовательно цепи ваттметра идет ток фазы A , параллельная цепь ваттметра находится под фазным напряжением той же фазы, следовательно, ваттметр измеряет активную мощность фазы A :

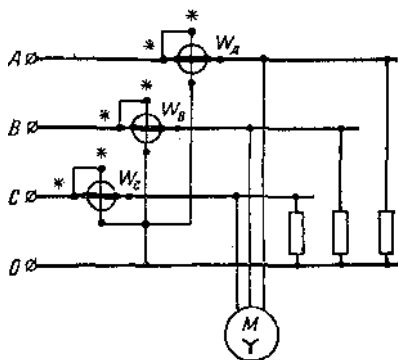
$$P_W = P_\phi = I_\phi U_\phi \cos \varphi.$$

Активная мощность трехфазной цепи $P = 3 P_W$

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi = 3P_W$$

Метод 3 ваттметров

Так как активную мощность P четырехпроводной трехфазной цепи можно выразить суммой мощностей P_A, P_B, P_C трех фаз, т. е.



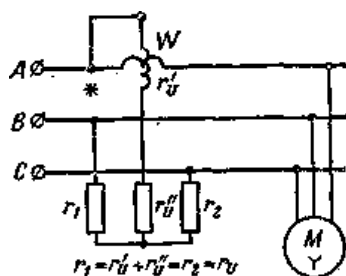
$$\begin{aligned} P &= P_A + P_B + P_C = \\ &= I_A U_A \cos \varphi_A + \\ &+ I_B U_B \cos \varphi_B + \\ &+ I_C U_C \cos \varphi_C. \end{aligned}$$

Из написанного следует, что измерение активной мощности цепи можно произвести тремя ваттметрами, каждый из которых измеряет мощность одной фазы.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ 3 ФАЗНОЙ ЦЕПИ С ИСКУССТВЕННОЙ НУЛЕВОЙ ТОЧКОЙ

При недоступной нулевой точке или при приемниках, соединенных треугольником, ваттметр включается с искусственной нулевой точкой.

Искусственная нулевая точка имеет два резистора сопротивления каждого из которых равно сопротивлению параллельной цепи ваттметра, т. е. $r_1 = r_2 = r_v$. При этом условии параллельная цепь ваттметра и два резистора образуют искусственную нулевую точку, на каждом из сопротивлений которой будет фазное напряжение.



При этом на параллельной цепи ваттметра будет фазное напряжение U_A фазы A , а в токовой цепи ваттметра — фазный ток I_A той же фазы. При этом ваттметр измерит активную мощность одной фазы, а активная мощность трех фазной цепи

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi = 3P_W$$

Таким образом, постоянная ваттметра с искусственной нулевой точкой будет в 3 раза больше постоянной того же ваттметра при использовании его в однофазной цепи.

Ваттметр, предназначенный для постоянной совместной работы с определенной искусственной нулевой точкой, имеет шкалу, на которой наносятся значения мощности трехфазной цепи.

МЕТОД ДВУХ ВАТТМЕТРОВ

Измерение мощности в трехпроводных цепях при неравномерной нагрузке фаз. Мгновенная мощность трехфазной цепи может быть выражена как сумма мощностей отдельных фаз:

$$p = p_A + p_B + p_C = i_A u_A + i_B u_B + i_C u_C$$

Для нулевой точки приемников энергии, соединенных звездой (рис. 8-23), по первому закону Кирхгофа

$$i_A + i_B + i_C = 0$$

откуда каждый из линейных токов можно выразить через два других:

$$i_A = -i_B - i_C; \quad i_B = -i_A - i_C; \quad i_C = -i_A - i_B.$$

Подставив одно из этих выражений, например, для тока i_C , в формулу (8-19), получим:

$$p = i_A u_A + i_B u_B - i_A u_C - i_B u_C = i_A (u_A - u_C) + i_B (u_B - u_C) = i_A u_{AC} + i_B u_{BC} = p' + p''.$$

Следовательно, мгновенную мощность трехфазной цепи можно представить суммой двух слагающих, первая из которых $p' = I_A U_{AC}$ и вторая $p'' = I_B U_{BC}$

Переходя от мгновенной мощности к средней (активной) и допуская, что токи и напряжения синусоидальны, получаем:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_A u_{AC} dt + \frac{1}{T} \int_0^T i_B u_{BC} dt = I_A U_{AC} \cos \psi_1 + I_B U_{BC} \cos \psi_2 = P' + P''.$$

Переходя от мгновенной мощности к средней (активной) и допуская, что токи и напряжения синусоидальны, получаем:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_A u_{AC} dt + \frac{1}{T} \int_0^T i_B u_{BC} dt = I_A U_{AC} \cos \psi_1 + I_B U_{BC} \cos \psi_2 = P' + P''.$$

где ψ_1 - угол сдвига фаз между током I_A и линейным напряжением U_{AC} , ψ_2 - между током I_B и напряжением U_{BC} .

Первое слагаемое P' можно измерить одним ваттметром, а второе слагаемое P'' - вторым, если ваттметры соединены следующим образом: токовая цепь первого ваттметра в соответствии с индексом A у тока I_A включается в рассечку провода A , и так как ток положителен, то генераторный зажим ее соединяется с источником питания. Генераторный зажим параллельной цепи в соответствии с первой частью индекса A у напряжения U_{AC} соединен с проводом A , а негенераторный зажим той же цепи в соответствии со второй частью индекса C присоединен к проводу C . Аналогично включается второй ваттметр. Активная мощность трехфазной цепи равна алгебраической сумме показаний двух ваттметров.

В частном случае при симметричной системе напряжений и одинаковой нагрузке фаз $\varphi_1 = 30^\circ - \varphi$ и $t = 30^\circ + \varphi$ показания ваттметров будут:

$$P' = IU \cos (30^\circ - \varphi) \quad \text{и} \quad P'' = IU \cos (30^\circ + \varphi).$$

$$P' = P'' = IU \cos 30^\circ.$$

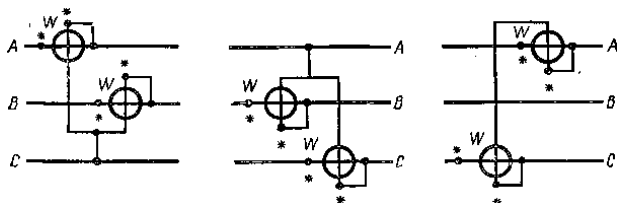
При активной нагрузке ($\varphi = 0$) показания ваттметров будут одинаковы.

При нагрузке с углом сдвига 60° показания второго ваттметра равны нулю, так как

$$P'' = IU \cos (30^\circ + \varphi) = IU \cos (30^\circ + 60^\circ) = 0,$$

и, следовательно, мощность трехфазной цепи измеряется одним ваттметром.

При нагрузке с углом сдвига $\varphi > 60^\circ$ мощность, измеряемая вторым ваттметром, будет отрицательной, так как $(30^\circ + \varphi) > 90^\circ$, а косинусы углов, больших 90° , отрицательны. Следовательно, подвижная часть ваттметров повернется в обратную сторону, где делений нет. Поэтому для отсчета необходимо изменить на 180° фазу тока в одной из цепей ваттметра. В этом случае мощность цепи трехфазного тока равна разности показаний ваттметров.



Активную мощность трехфазной цепи можно измерить двумя ваттметрами и в том случае, когда приемники энергии соединены треугольником, так как всякий треугольник можно заменить эквивалентной звездой.

Три возможные схемы включения ваттметров в трехфазную цепь даны на рис.

В стационарных установках обычно пользуются более удобными в эксплуатации двухэлементными ваттметрами. В электродинамическом и ферродинамическом ваттметрах каждый элемент состоит из неподвижной катушки тока и подвижные катушки крепятся на одной оси. Суммарный вращающий момент, действующий на эту ось, пропорциональный мощности трехфазной цепи, вызывает поворот подвижной части на угол, пропорциональный этой мощности.

ИЗМЕРЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Реактивная мощность однофазной цепи определяется выражением

$$IU \sin \varphi$$

Реактивная мощность трехфазной цепи определяется суммой реактивных мощностей отдельных фаз.

Видно, что измерение реактивной мощности как в однофазной, так и в трехфазной цепи, трехпроводной или четырехпроводной, может быть осуществлено приборами с одно-, двух- и трехэлементными механизмами, у которых вращающий момент пропорционален не косинусу угла между векторами тока и напряжения, а синусу этого угла. Последнее достигается

включением обычных электродинамических или ферродинамических измерительных механизмов в цепь по специальным схемам.

Прежде чем провести более подробное рассмотрение вопросов измерения реактивной мощности, необходимо отметить, что практическое значение измерения реактивной мощности имеет лишь у крупных потребителей электроэнергии, которые всегда подключены к трехфазным цепям. Поэтому измерение реактивной мощности в однофазных цепях производится только в лабораторных условиях при проведении каких-либо исследований.

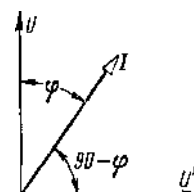
Напряжения трехфазных цепей, имеющих практически всегда большую мощность, симметричны.

Метод включения на чужое напряжение

Реактивную мощность в трехфазных четырехпроводных цепях можно измерить одним трехэлементным ваттметром активной мощности или тремя одноэлементными. Мощность, измеряемая одноэлементным ваттметром активной мощности, определяется током I в его последовательной цепи, напряжением U , приложенным к его параллельной цепи, и косинусом угла сдвига фаз между током I и напряжением U .

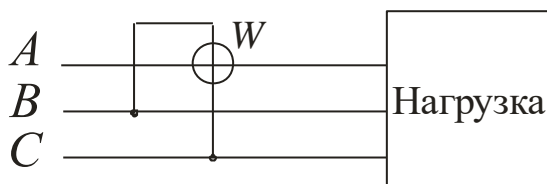
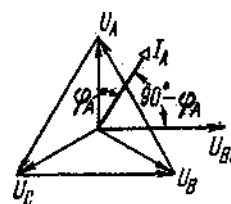
Если между током I и напряжением U' будет угол сдвига $90^\circ - \varphi$, то измеряемая ваттметром мощность будет реактивной:

$$IU' \cos(90^\circ - \varphi) = IU' \sin \varphi = Q.$$



В трехфазных цепях при симметричной системе напряжения линейные напряжения U_{BC} , U_{CA} , U_{AB} отстают от соответствующих фазных напряжений U_A , U_B и U_C на углы 90° . Поэтому при включении последовательной цепи ваттметра на ток I_A и подведении к параллельной цепи его напряжения U_{BC} ваттметр измерит мощность

$$I_A U_{BC} \cos(90^\circ - \varphi) = I_A \sqrt{3} U_A \sin \varphi = \sqrt{3} Q_A,$$

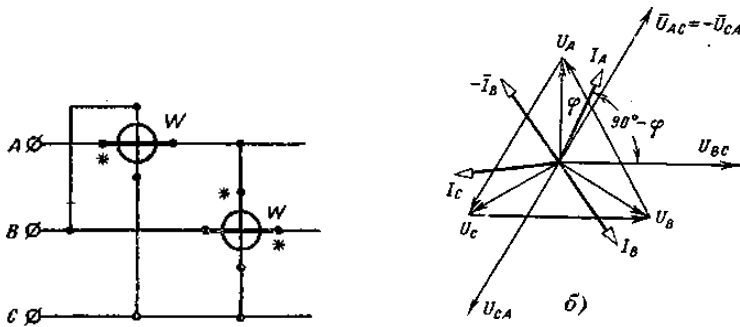


Появление множителя $\sqrt{3}$ объясняется тем, что приложенное к параллельной цепи ваттметра линейное напряжение U_{bc} больше фазного U_d в $\sqrt{3}$ раз.

Измерение мощности в трехфазной цепи методом одного прибора возможно только при полной симметрии. Незначительная асимметрия токов приводит к значительным погрешностям.

МЕТОД ДВУХ ВАТТМЕТРОВ, ВКЛЮЧЕННЫХ НА ЧУЖИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Симметричная система напряжений и равномерная нагрузка.



Реактивную мощность можно измерить двухэлементным ваттметром или двумя одноэлементными ваттметрами активной мощности реактивную мощность трехфазной цепи:

$$P_W = I_A U_{BC} \cos(90^\circ - \varphi) + I_B U_{CA} \cos(90^\circ - \varphi) = 2I_\pi U_\pi \sin \varphi.$$

Умножив показание ваттметра на $\sqrt{3}/2$, получим

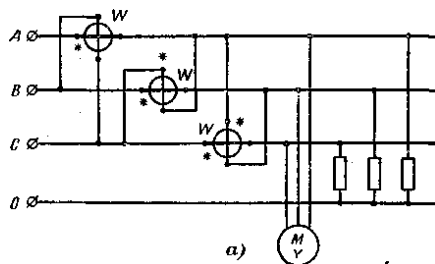
$$(\sqrt{3}/2) P_W = (\sqrt{3}/2) \cdot 2I_\pi U_\pi \sin \varphi = \sqrt{3} I_\pi U_\pi \sin \varphi.$$

Если двухэлементный ваттметр предназначен для измерения реактивной мощности, то на его шкале наносятся значения реактивной мощности.

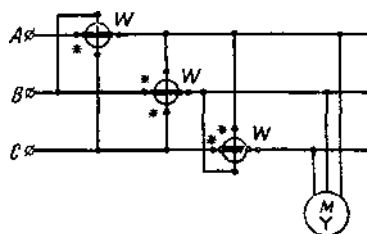
МЕТОД ТРЕХ ВАТТМЕТРОВ (3-Х ЭЛЕМЕНТНЫЙ ВАТТМЕТР).

Симметричная система напряжений и неравномерная нагрузка. Мощность можно измерить трехэлементным ваттметром или тремя одноэлементными ваттметрами активной мощности.

Если второй и третий ваттметры (или элементы трехфазного ваттметра) будут включены аналогичным образом, то сумма показаний трех ваттметров, деленная на $\sqrt{3}$, будет равна реактивной мощности трехфазной четырехпроводной цепи.



Для трехпроводной схема включения та же, что и для четырехпроводной цепи.



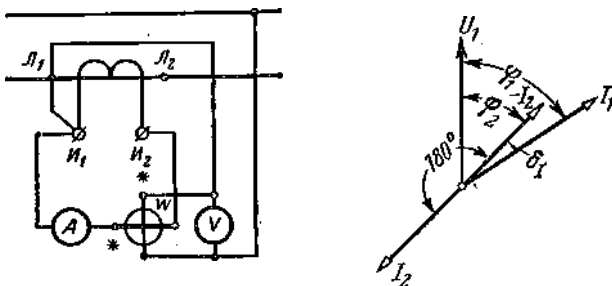
$Q_{3\Phi} = ?$

Реактивная мощность 3-х фазной цепи равна показанию 3-х элементного ваттметра, деленного на $\sqrt{3}$.

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ВАТТМЕТРОМ С ТРАНСФОРМАТОРОМ ТОКА

В трехфазных цепях низкого напряжения, если токи цепи превышают номинальные токи измерительных приборов, последние включаются через трансформаторы тока. В высоковольтных цепях трехфазного тока измерительные приборы подключаются через трансформаторы тока и напряжения. На шкалах ваттметров, предназначенных для постоянной совместной работы с измерительными трансформаторами, наносятся значения мощности в первичной цепи. У ваттметров, не предназначенных для такой совместной работы, на шкалах даются значения, определяемые мощностями, непосредственно действующими на цепи ваттметров. Поэтому для определения мощности первичной цепи показания таких ваттметров необходимо умножить на номинальные коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов, совместно с которыми ваттметр включен.

Схема соединения одноэлементного ваттметра показана на рис. Первичная обмотка



трансформатора тока соединяется последовательно с нагрузкой. К зажимам вторичной обмотки присоединяются последовательно соединенные амперметр и токовая цепь ваттметра. Параллельная цепь ваттметра и вольтметр присоединяются к проводам первичной цепи.

Зажимы трансформатора L_1 и I_2 соединяются между собой, чтобы генераторные зажимы ваттметра имели один потенциал. Поэтому вторичная обмотка трансформатора тока не заземляется.

Исходя из схемы соединения и векторной диаграммы, выражение мощности, измеряемой ваттметром:

$$P_W = I_2 U_1 \cos \varphi_2$$

Умножив это выражение на номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока $k_{н1}$, получим:

$$P_1 = k_{н1} I_2 U_1 \cos(\varphi_1 - \sigma_1)$$

вследствие малости σ_1

Таким образом, найденное значение мощности P_1 , равное произведению показаний ваттметра и номинального коэффициента трансформации трансформатора тока, приближенно равно измеряемой мощности P .

У ваттметров, предназначенных для постоянной совместной работы с определенным трансформатором тока, на шкале наносятся значения мощности первичной цепи и указывается номинальный коэффициент трансформатора тока, с которым произведена градуировка.

Задача 1. Вольтметр проградуирован для работы с ИТН с $k_{Uн} = 800/100/$. Определить напряжение сети, если показание вольтметра, включенного через ИТН 10 000/100 равно 300 В.

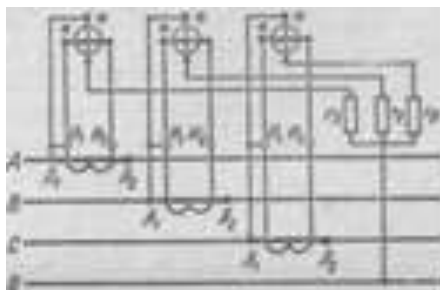
Погрешность в измерении мощности, вызванная применением трансформатора тока, зависит от токовой и угловой погрешности трансформатора.

Задача 2. Определить показания амперметра, включенного во вторичную обмотку ТТ, если $k_{Iн} = 100/5$, погрешность тока $f_I = 0,6 \%$, угловая погрешность δ_I , первичный ток 80 А.

Реш: $I_1/I_2 = k_{Iн} (1+\lambda) \rightarrow I_2 = I_1/[k_{Iн} (1+\lambda)] = I_1/[k_{Iн} (1+f_I + j\delta_I)]$

Следует отметить, что погрешность измерения мощности, вызванная угловой погрешностью трансформатора тока, зависит не только от δ , но и от угла сдвига между током и напряжением в первичной цепи. Чем больше угол, тем больше погрешность. Так при угле около 89° она больше в 50 раз чем при угле 45° .

Трехэлементный ваттметр с трансформаторами тока



Измерение мощности ваттметром с трансформаторами тока и напряжения

Измерение мощности в цепях высокого напряжения производится ваттметром с трансформаторами тока и напряжения.

Первичная обмотка трансформатора тока соединяется последовательно с приемником энергии; к зажимам вторичной обмотки присоединяются последовательно соединенные амперметр и токовая цепь ваттметра.

Первичная обмотка трансформатора напряжения соединяется с проводами первичной цепи; к зажимам вторичной обмотки присоединяются вольтметр и цепь напряжения ваттметра.

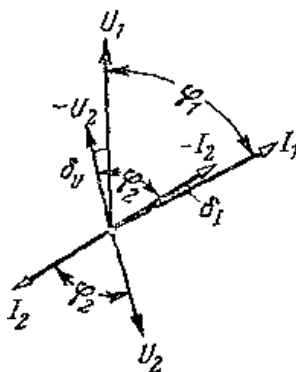
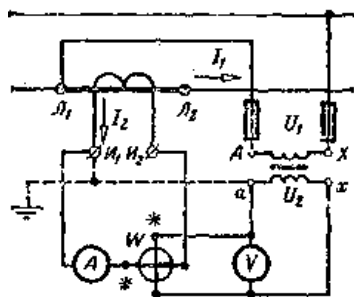


Схема соединения ваттметра с измерительными трансформаторами (а) и векторная диаграмма (б).

Один зажим каждой из вторичных обмоток измерительных трансформаторов и их корпуса заземляются. Исходя из схемы соединения и векторной диаграммы, напишем выражение мощности, измеряемой ваттметром:

$$P_W = I_2 U_2 \cos \varphi_2.$$

Умножив на произведение номинальных коэффициентов трансформации трансформаторов, получим:

$$\begin{aligned} P'_1 &= P_W k_{нI} k_{нU} = I_2 k_{нI} U_2 k_{нU} \cos \varphi_2 = \\ &= I_2 k_{нI} U_2 k_{нU} \cos (\varphi_1 + \delta_U - \delta_I). \end{aligned}$$

Так как

$$I_2 k_{нI} \approx I_1; \quad U_2 k_{нU} \approx U_1$$

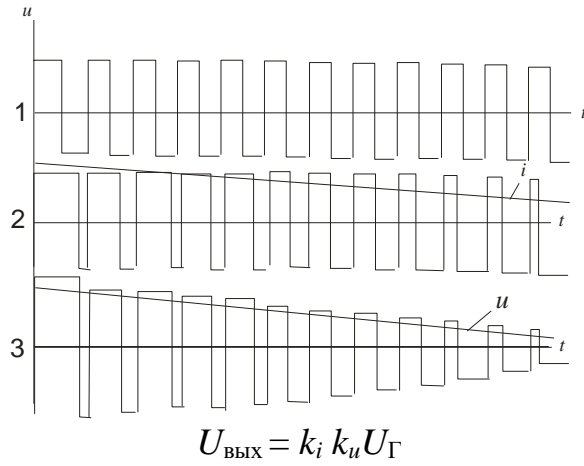
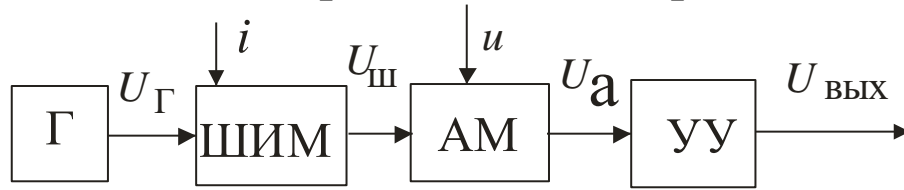
$$\varphi_1 + \delta_U - \delta_I \approx \varphi_1.$$

и в виду малости δ_I и принимаем: $P'_1 = P_W k_{нI} k_{нU} \approx I_1 U_1 \cos \varphi_1 = P_1.$

Таким образом, найденное значение мощности P_1 , равное произведению показаний ваттметра и номинальных коэффициентов трансформации измерительных трансформаторов, приближенно равно мощности первичной цепи, подлежащей измерению.

Погрешность в измерении мощности, вызванная применением измерительных трансформаторов, зависит от погрешности в токе, погрешности в напряжении, от угловых погрешностей трансформаторов и угла сдвига фаз между током и напряжением в первичной цепи.

Электронные ваттметры



Электронные счетчики

