

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНИВАНИЮ ПОГРЕШНОСТЕЙ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА  
В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ МЕТОДОМ «ТРЕХ ВАТТМЕТРОВ»**

Савкова Е.Н., Сипачев И.В., Малашонок С.В.  
Белорусский национальный технический университет

*Аннотация*

Приведены методические рекомендации по оцениванию погрешностей и неопределенностей результатов измерений активной мощности переменного тока в трехфазных цепях методом «трех ваттметров», которые по модульному принципу могут быть использованы при проведении сличений результатов измерений в аккредитованной лаборатории как метрологической процедуры согласно новому законодательству в области обеспечения единства измерений.

*Текст доклада:*

Согласно Закону Республики Беларусь от 11 ноября 2019 г. № 254-З «Об изменении Закона Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» одной из процедур метрологической оценки является сличение результатов измерений на внутрилабораторном или межлабораторном уровнях. В данной связи на базе лабораторий кафедры «Электротехника и электроника» в рамках учебных дисциплин «Электрические измерения» и «Метрология, стандартизация и сертификация» были проведены внутрилабораторные сличительные эксперименты по оценке точности (погрешности и неопределенности) результатов измерений и разработано методическое обеспечение сличения результатов измерений активной мощности переменного тока в трехфазных цепях. Эксперимент осуществлялся по двум направлениям: с помощью метода «трех ваттметров» и с помощью индукционного счетчика электрической энергии.

Модель математических ожиданий результата измерения электрической мощности методом «трех ваттметров» выглядит следующим образом:

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \quad (1)$$

где  $P_1, P_2, P_3$  – показания первого, второго и третьего ваттметров соответственно.

Модель рассеяния (относительной погрешности) с учетом применения амперметра и вольтметра запишется в виде:

$$\delta(P) = \sqrt{\delta^2(P_1) + \delta^2(P_2) + \delta^2(P_3) + \delta^2(I) + \delta^2(U)}, \quad (2)$$

где  $\delta(P_1), \delta(P_2), \delta(P_3)$  – относительные погрешности измерения активной электрической мощности с помощью первого, второго и третьего ваттметров соответственно;

$\delta(I)$  – относительная погрешность измерения электрического тока с помощью амперметра;

$\delta(U)$  – относительная погрешность измерения электрического напряжения с помощью вольтметра.

В свою очередь, данные погрешности раскладываются на составляющие – субмодели второго уровня:

$$\delta(P_1) = \sqrt{\delta_{11}^2 + \delta_{12}^2}. \quad (3)$$

$$\delta(P_2) = \sqrt{\delta_{21}^2 + \delta_{22}^2}. \quad (4)$$

$$\delta(P_3) = \sqrt{\delta_{31}^2 + \delta_{32}^2}. \quad (5)$$

$$\delta(I) = \sqrt{\delta_{I1}^2 + \delta_{I2}^2}. \quad (6)$$

$$\delta(U) = \sqrt{\delta_{U1}^2 + \delta_{U2}^2}. \quad (7)$$

где  $\delta_{11}$ ,  $\delta_{21}$ ,  $\delta_{31}$  – относительные инструментальные погрешности первого, второго и третьего ваттметров соответственно для данного показания;

$\delta_{I1}$  – относительная погрешность амперметра для данного показания;

$\delta_{U1}$  – относительная погрешность вольтметра для данного показания;

$\delta_{12}$ ,  $\delta_{22}$ ,  $\delta_{32}$  – субъективные погрешности, обусловленные считыванием показаний со шкалы первого, второго и третьего ваттметров соответственно;

$\delta_{I2}$  – субъективная погрешность, обусловленная считыванием показаний со шкалы амперметра;

$\delta_{U2}$  – субъективная погрешность, обусловленная считыванием показаний со шкалы вольтметра.

Приведем формулы для расчета данных погрешностей - субмодели третьего уровня. Для относительных инструментальных погрешностей ваттметров, амперметра и вольтметра:

$$\delta_{11} = \frac{\gamma_1 P_{k1}}{P_{j1}}. \quad (8)$$

$$\delta_{21} = \frac{\gamma_2 P_{k2}}{P_{j2}}. \quad (9)$$

$$\delta_{31} = \frac{\gamma_3 P_{k3}}{P_{j3}}. \quad (10)$$

где  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$  – приведенные погрешности первого, второго и третьего ваттметров соответственно (в эксперименте  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3$ );

$P_{k1}$ ,  $P_{k2}$ ,  $P_{k3}$  – значения границ диапазонов измерений первого, второго и третьего ваттметров соответственно (в эксперименте  $P_{k1} = P_{k2} = P_{k3}$ );

$P_{j1}$ ,  $P_{j2}$ ,  $P_{j3}$  – показания первого, второго и третьего ваттметров соответственно.

$$\delta_{I1} = \frac{\gamma_I I_k}{I_j}. \quad (11)$$

где  $\gamma_I$  – приведенная погрешность амперметра;

$I_k$  – значение границы диапазона измерений амперметра;

$I_j$  – показание амперметра.

$$\delta_{U1} = \frac{\gamma_U U_k}{U_j}. \quad (12)$$

где  $\gamma_1$  – приведенная погрешность вольтметра;

$I_k$  – значение границы диапазона измерений вольтметра;

$I_j$  – показание вольтметра.

Для субъективных погрешностей, обусловленных считыванием показаний со шкал измерительных приборов:

$$\delta_{12} = \frac{\eta_1}{2P_{j1}}. \quad (13)$$

$$\delta_{22} = \frac{\eta_2}{2P_{j2}}. \quad (14)$$

$$\delta_{32} = \frac{\eta_3}{2P_{j3}}. \quad (15)$$

где  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  – цена деления первого, второго и третьего ваттметров соответственно ( $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3$ ).

$$\delta_{I2} = \frac{\varepsilon}{2I_j} \quad (16)$$

$$\delta_{U2} = \frac{\varphi}{2U_j}. \quad (17)$$

где  $\varphi$  – цена деления вольтметра.

Подставляя данные составляющие в выражение (2), получим формулу для вычисления суммарной относительной погрешности измерения активной электрической мощности методом трех ваттметров. Результат измерения запишется в виде модели:

$$(A \pm \Delta); P = 0,95, \quad (18)$$

где  $A$  – значение измеряемой величины;

$\Delta$  – граница погрешности результата измерения;

$P$  – доверительная вероятность.

Границы погрешности найдем по формуле:

$$\Delta = \pm 1,1A\delta(P) \quad (19)$$

Таким образом, результат измерения запишется на базе теории погрешностей в виде:

$$(A \pm \Delta); P = 0,95 \quad (20)$$

Учитывая требования стандарта ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 к аккредитованным лабораториям в части представления результатов измерений в виде интервалов охватов на базе концепции неопределенности, приведем рекомендации по оцениванию неопределенностей

входных и выходных величин. Общая модель рассеяния (неопределенности выходной величины – электрической активной мощности) запишется в виде:

$$u(P) = \sqrt{u^2(P_1) + u^2(P_2) + u^2(P_3) + u^2(I) + u^2(U)}. \quad (21)$$

В относительном виде:

$$\frac{u(P)}{P} = \sqrt{\frac{u^2(P_1)}{P_1^2} + \frac{u^2(P_2)}{P_2^2} + \frac{u^2(P_3)}{P_3^2}}. \quad (22)$$

Анализ составляющих  $U(P_1)$ ,  $U(P_2)$ ,  $U(P_3)$  удобно начинать с субмодели нижнего (третьего) уровня. Так, в предположении равновероятного распределения вероятностей и приняв за интервалы варьирования границы инструментальных погрешностей измерительных приборов, получим выражения для инструментальных неопределенностей ваттметров, амперметра и вольтметра в относительном виде:

$$u(\delta_{11}) = \frac{\gamma_{1P_{k1}}}{\sqrt{3}P_{j1}}. \quad (23)$$

$$u(\delta_{21}) = \frac{\gamma_{2P_{k2}}}{\sqrt{3}P_{j2}}. \quad (24)$$

$$u(\delta_{31}) = \frac{\gamma_{3P_{k3}}}{\sqrt{3}P_{j3}}. \quad (25)$$

$$u(\delta_{I1}) = \frac{\gamma_{II_k}}{\sqrt{3}I_j}. \quad (26)$$

$$u(\delta_{U1}) = \frac{\gamma_{IU_k}}{\sqrt{3}U_j}. \quad (27)$$

Для неопределенностей, обусловленных считыванием показаний со шкал измерительных приборов, в предположении равновероятного распределения вероятностей и приняв за интервалы варьирования границы субъективных погрешностей измерительных приборов, получим выражения для неопределенностей, обусловленных считыванием показаний со шкал ваттметров, амперметра и вольтметра в относительном виде:

$$u(\delta_{12}) = \frac{\eta_1}{2\sqrt{3}P_{j1}}. \quad (28)$$

$$u(\delta_{22}) = \frac{\eta_2}{2\sqrt{3}P_{j2}}. \quad (29)$$

$$u(\delta_{32}) = \frac{\eta_3}{2\sqrt{3}P_{j3}}. \quad (30)$$

$$u(\delta_{I1}) = \frac{\varepsilon}{2\sqrt{3}I_j}. \quad (31)$$

$$u(\delta_{U2}) = \frac{\varphi}{2\sqrt{3}U_j}. \quad (32)$$

Субмодели второго уровня запишутся в относительном виде следующим образом:

$$\frac{u(P_1)}{P_1} = \sqrt{\left(\frac{\gamma_{1P_{k1}}}{\sqrt{3}P_{j1}}\right)^2 + \left(\frac{\eta_1}{2\sqrt{3}P_{j1}}\right)^2}. \quad (33)$$

$$\frac{u(P_2)}{P_2} = \sqrt{\left(\frac{\gamma_{2P_{k2}}}{\sqrt{3}P_{j2}}\right)^2 + \left(\frac{\eta_2}{2\sqrt{3}P_{j2}}\right)^2}. \quad (34)$$

$$\frac{u(P_3)}{P_3} = \sqrt{\left(\frac{\gamma_{3P_{k3}}}{\sqrt{3}P_{j3}}\right)^2 + \left(\frac{\eta_3}{2\sqrt{3}P_{j3}}\right)^2}. \quad (35)$$

$$\frac{u(I)}{I} = \sqrt{\left(\frac{\gamma_{II_k}}{\sqrt{3}I_j}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2\sqrt{3}I_j}\right)^2}. \quad (36)$$

$$\frac{u(P_1)}{P_1} = \sqrt{\left(\frac{\gamma_{1P_{k1}}}{\sqrt{3}P_{j1}}\right)^2 + \left(\frac{\eta_1}{2\sqrt{3}P_{j1}}\right)^2}. \quad (37)$$

Подставив субмодели второго уровня (33–37) в исходную модель (22), получим результирующее выражение для неопределенности, ассоциированной с выходной величиной. Интервал охвата (результат измерения) запишется в виде:

$$(A \pm U) / p = 95 \%, \quad (38)$$

где  $U$  – расширенная неопределенность выходной величины, полученная путем умножения неопределенности выходной величины  $U(P)$  на коэффициент охвата  $k=2$  в предположении нормального распределения вероятностей выходной величины с уровнем доверия  $p = 95 \%$ :

$$U(P) = 2u(P) \quad (39)$$

Разработанные методические рекомендации по оцениванию погрешностей и неопределенностей результатов измерений активной мощности переменного тока в трехфазных цепях методом «трех ваттметров» могут быть взяты за основу при обработке результатов сравнительных внутрилабораторных и межлабораторных экспериментов в рамках верификации методов испытаний.