

УДК 621.317

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ\*

**В.В. Муратова**

Самарский государственный технический университет  
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: muratova1991@yandex.ru

*Рассматривается новый метод измерения параметров гармонических сигналов по их мгновенным значениям, связанным с переходом напряжения через ноль. В отличие от известных методов, основанных на формировании дополнительных сигналов напряжения и тока, реализация метода позволяет исключить погрешность, обусловленную неидентичностью углов сдвига фаз фазосдвигающих блоков в каналах напряжения и тока. Предлагается структурная схема средства измерения, реализующего метод. Приводятся результаты анализа погрешности по модулю фазосдвигающих блоков, которая приводит к отличию амплитудного значения входного сигнала от амплитуды сигнала на выходе фазосдвигающего блока. Полученные результаты позволяют выбирать аппаратные средства, а также параметры измерительного процесса, оптимальные с точки зрения точности и времени измерения.*

**Ключевые слова:** гармонические сигналы, мгновенные значения, дополнительные сигналы, средство измерения, фазосдвигающие блоки, погрешность по модулю.

При измерении параметров сигналов (среднеквадратических значений напряжения и тока, активной и реактивной мощности) в измерительных цепях, информационные сигналы в которых близки к гармоническим моделям, в настоящее время широко используются методы их определения по отдельным мгновенным значениям, не связанным с периодом входного сигнала. Это обеспечивает возможность определения информативных параметров за время менее периода сигнала [1].

Для сокращения времени измерения параметров гармонических сигналов (ПГС) используют методы, основанные на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно входных, и определении ПГС по мгновенным значениям входных и дополнительных сигналов [2].

Однако реализация большинства таких методов [3, 4] может привести к существенной погрешности, обусловленной угловой погрешностью фазосдвигающих блоков (ФСБ), формирующих дополнительные сигналы. В этом случае углы сдвига в каналах напряжения и тока могут отличаться друг от друга.

В статье проводится анализ нового метода, реализация которого исключает угловую погрешность ФСБ, поскольку обеспечивает возможность формирования дополнительных сигналов в каналах напряжения и тока, сдвинутых на произвольные углы.

Метод заключается в том, что в момент перехода входного сигнала напряже-

---

\* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 14-08-00700-а).

Вера Владимировна Муратова, аспирант.

ния через ноль одновременно измеряют первое мгновенное значение дополнительного напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол  $\Delta\alpha_1$ , и первые мгновенные значения входного тока и сдвинутого относительно него по фазе на угол  $\Delta\alpha_2$  дополнительного сигнала тока; через произвольный (в общем случае) интервал времени  $\Delta t$  одновременно измеряют вторые мгновенные значения входного и дополнительного напряжений и второе мгновенное значение дополнительного тока. ПГС определяют по измеренным мгновенным значениям сигналов [5].

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 1.

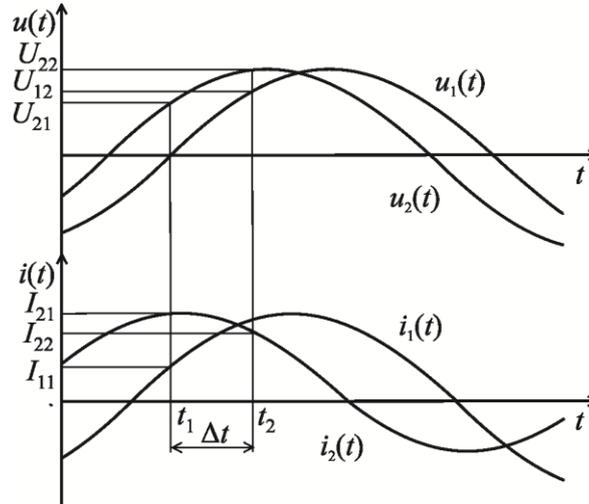


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

При входных гармонических сигналах  $u_1(t) = U_m \sin \omega t$  и  $i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$  дополнительные сигналы напряжения и тока имеют вид  $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha_1)$  и  $i_2(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi + \Delta\alpha_2)$ .

В момент перехода входного сигнала напряжения через ноль (момент времени  $t_1$  на рис. 1) мгновенные значения дополнительного напряжения, входного и дополнительного сигналов тока соответственно равны

$$U_{21} = U_m \sin \Delta\alpha_1; \quad I_{11} = I_m \sin \varphi; \quad I_{21} = I_m \sin(\varphi + \Delta\alpha_2).$$

Через интервал времени  $\Delta t$  в момент времени  $t_2$  мгновенные значения входного и дополнительного сигналов напряжения и второе мгновенное значение дополнительного тока примут вид

$$U_{12} = U_m \sin \omega \Delta t; \quad U_{22} = U_m \sin(\Delta\alpha_1 + \omega \Delta t); \quad I_{22} = I_m \sin(\varphi + \omega \Delta t + \Delta\alpha_2).$$

Используя мгновенные значения сигналов, можно получить выражения для определения основных ПГС:

– среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока

$$U_{СКЗ} = \frac{|U_{12}U_{22}U_{21}|}{\sqrt{2 \left[ 4U_{22}^2U_{21}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2 \right]}}; \quad (1)$$

$$I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ I_{21}^2 + \frac{[2I_{22}U_{22}U_{21} - I_{21}(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)]^2}{4U_{22}^2U_{21}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2} \right\}}; \quad (2)$$

– активная (АМ) и реактивная (РМ) мощности:

$$P = \frac{|U_{12}U_{22}U_{21}|}{4U_{22}^2U_{21}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2} \left\{ (I_{21}^2 - I_{11}^2) [4U_{22}^2U_{21}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2] + [2I_{22}U_{22}U_{21} - I_{21}(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{I_{11}|U_{12}U_{22}U_{21}|}{2\sqrt{[4U_{22}^2U_{21}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2]}}. \quad (4)$$

Анализ выражений (1) – (4) показывает, что выражения для определения СКЗ тока, АМ и РМ инварианты к значениям углов сдвига фаз ФСБ, при этом  $\Delta\alpha_1$  и  $\Delta\alpha_2$  могут отличаться друг от друга.

Метод может быть реализован с помощью средства измерения, приведенного на рис. 2.

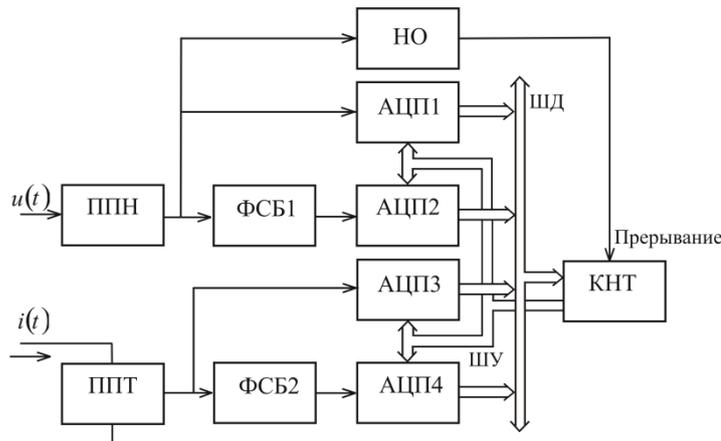


Рис. 2. Средство измерения, реализующее метод

В состав средства измерения входят: первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ, фазосдвигающие блоки ФСБ1 и ФСБ2, аналого-цифровые преобразователи АЦП1 – АЦП4, нуль-орган НО и контроллер КНТ с шинами данных ШД и управления ШУ.

Однако при реализации метода возможно возникновение погрешности по напряжению (погрешности по модулю) ФСБ. Наличие данного вида погрешности приводит к тому, что амплитудное значение входного сигнала будет отличаться от амплитуды выходного сигнала ФСБ.

В случае, если амплитудное значение напряжения на выходе ФСБ1 отличается от амплитуды входного на величину  $\Delta U_m$ , мгновенные значения дополнительного напряжения примут вид  $U'_{21} = (U_m + \Delta U_m)\sin \Delta\alpha$  и

$U'_{22} = (U_m + \Delta U_m) \sin(\Delta\alpha + \omega\Delta t)$ . Аналогично при отличии дополнительного тока от входного сигнала на величину  $\Delta I_m$  мгновенные значения дополнительного сигнала тока будут равны  $I'_{21} = (I_m + \Delta I_m) \sin(\varphi + \Delta\alpha)$  и  $I'_{22} = (I_m + \Delta I_m) \sin(\varphi + \Delta\alpha + \omega\Delta t)$ .

При этом выражения для определения ПГС (1 – 4) преобразуются к виду

$$U_{CK3} = \frac{|U_{12}U'_{22}U'_{21}|}{\sqrt{2[4U'^2_{22}U'^2_{21} - (U'^2_{21} - U^2_{12} + U'^2_{22})^2]}}; \quad (5)$$

$$I_{CK3} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ I'^2_{21} + \frac{[2I'_{22}U'_{22}U'_{21} - I'_{21}(U'^2_{21} - U^2_{12} + U'^2_{22})]^2}{4U'^2_{22}U'^2_{21} - (U'^2_{21} - U^2_{12} + U'^2_{22})^2} \right\}}; \quad (6)$$

$$P = \frac{|U_{12}U'_{22}U'_{21}|}{4U'^2_{22}U'^2_{21} - (U'^2_{21} - U^2_{12} + U'^2_{22})^2} \left\{ (I'^2_{21} - I^2_{11}) [4U'^2_{22}U'^2_{21} - (U'^2_{21} - U^2_{12} + U'^2_{22})^2] + \right. \\ \left. + [2I'_{22}U'_{22}U'_{21} - I'_{21}(U'^2_{21} - U^2_{12} + U'^2_{22})]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad (7)$$

$$Q = \frac{I_{11}|U_{12}U'_{22}U'_{21}|}{2\sqrt{[4U'^2_{22}U'^2_{21} - (U'^2_{21} - U^2_{12} + U'^2_{22})^2]}}. \quad (8)$$

Для оценки данного вида погрешности можно воспользоваться методикой оценки погрешности результата измерения ПГС как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала [6].

Если считать, что абсолютные погрешности аргументов соответствуют отклонению мгновенных значений дополнительного напряжения и тока на  $\Delta U_m$  и  $\Delta I_m$ , то при условии, что мгновенные значения входных сигналов были измерены без погрешности, можно найти предельные значения абсолютных погрешностей измерения ПГС:

$$\Delta U_{CK3} = \left[ \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_m; \quad (9)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left[ \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{21}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{22}} \right| \right] \Delta I_m + \left[ \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_m; \quad (10)$$

$$\Delta P = \left[ \left| \frac{\partial P}{\partial I_{21}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_{22}} \right| \right] \Delta I_m + \left[ \left| \frac{\partial P}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_m; \quad (11)$$

$$\Delta Q = \left[ \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_m. \quad (12)$$

С учетом абсолютных погрешностей (9) – (12) и выражений для ПГС (1) – (4)

можно определить относительные погрешности измерения СКЗ напряжения и тока и приведенные погрешности измерения АМ и РМ:

$$\delta_{U_{СКЗ}} = \frac{h_U |\cos \omega \Delta t| [|\cos \Delta \alpha_1| + |\cos(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t)|]}{|\sin \omega \Delta t \sin \Delta \alpha_1 \sin(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t)|} ; \quad (13)$$

$$\delta_{I_{СКЗ}} = \frac{h_I [|\cos(\varphi + \Delta \alpha_2 + \omega \Delta t)| + |\cos(\varphi + \Delta \alpha_2)|]}{|\sin \omega \Delta t|} + \frac{h_U}{|\sin \omega \Delta t \sin \Delta \alpha_1 \sin(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t)|} \times \\ \times |\cos(\varphi + \Delta \alpha_2) \cos(\varphi + \Delta \alpha_2 + \omega \Delta t)| [|\cos(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t)| + |\cos \Delta \alpha_1|]; \quad (14)$$

$$\gamma_P = \frac{h_I [|\cos(\varphi + \Delta \alpha_2 + \omega \Delta t)| + |\cos(\varphi + \Delta \alpha_2)|]}{|\cos \varphi \sin \omega \Delta t|} + \frac{h_U}{|\sin \omega \Delta t \sin \Delta \alpha_1 \sin(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t) \cos \varphi|} \times \\ \times \{ |\cos(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t)| + |\cos \Delta \alpha_1| \} [2 \cos \omega \Delta t \cos^2 \varphi + \cos(\varphi + \Delta \alpha_2) \cos(\varphi + \Delta \alpha_2 + \omega \Delta t)]; \quad (15)$$

$$\gamma_Q = \frac{2h_U [|\cos(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t)| + |\cos \Delta \alpha_1|] (|\sin \varphi \cos \omega \Delta t|)}{|\sin \Delta \alpha_1 \sin \omega \Delta t \sin(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t)|} , \quad (16)$$

где  $h_U = \Delta U_M / U_m$ ;  $h_I = \Delta I_M / I_m$ .

Погрешности измерения СКЗ напряжения и РМ, определяемые в соответствии с (13) и (16), зависят от коэффициента  $h_U$ , угла сдвига фазы ФСБ1  $\Delta \alpha_1$  и интервала времени  $\Delta t$ . Погрешности измерения СКЗ тока и АМ, которые определяются согласно выражениям (14) и (15), кроме этого, зависят от угла сдвига фазы ФСБ2  $\Delta \alpha_2$  и угла сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi$ .

На рис. 3 приведены графики зависимости относительной погрешности измерения СКЗ напряжения от угла  $\Delta \alpha_1$  и интервала времени  $\Delta t$  в соответствии с (13) при  $h_U = 0,1\%$ .

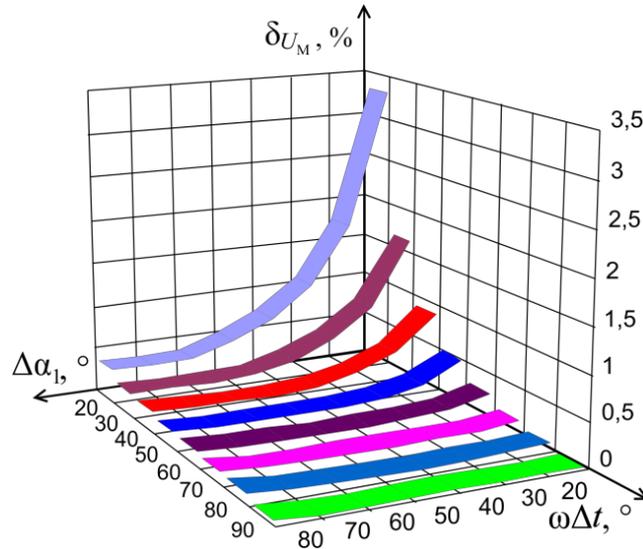


Рис. 3. Зависимость погрешности  $\delta_{U_M}$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$

На рис. 4 и 5 представлены графики зависимости погрешностей измерения СКЗ тока и АМ для угла сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi=0^\circ$ .

Из выражения (16) следует, что при  $\varphi=0^\circ$  погрешность измерения РМ равна нулю.

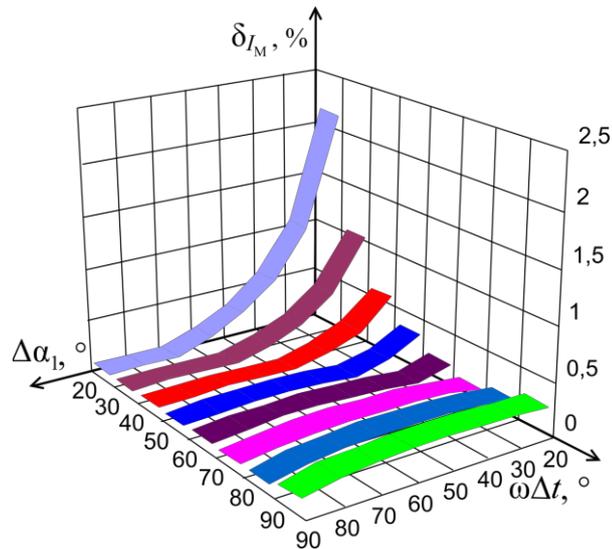


Рис. 4. Зависимость погрешности  $\delta_{I_M}$  от  $\Delta\alpha$  и  $\omega\Delta t$  при  $\varphi=0^\circ$

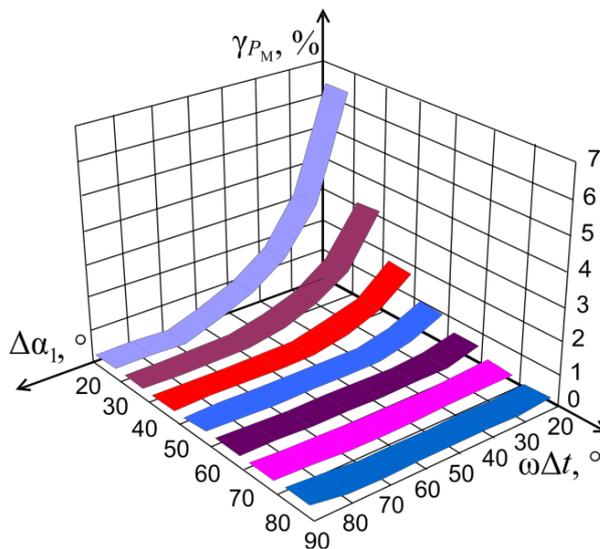


Рис. 5. Зависимость погрешности  $\gamma_{PM}$  от  $\Delta\alpha$  и  $\omega\Delta t$  при  $\varphi=0^\circ$

На рис. 6 приведены графики зависимости погрешностей измерения РМ при угле сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi=90^\circ$ .

Анализ рис. 3–6 показывает, что для уменьшения погрешности определения СКЗ напряжения нужно выбирать  $\Delta\alpha_1$  в диапазоне  $50\div 80^\circ$ , а  $\omega\Delta t$  – в пределах  $60\div 90^\circ$ .

Полученные результаты позволяют выбирать аппаратные средства, а также

параметры измерительного процесса, оптимальные с точки зрения точности и времени измерения.

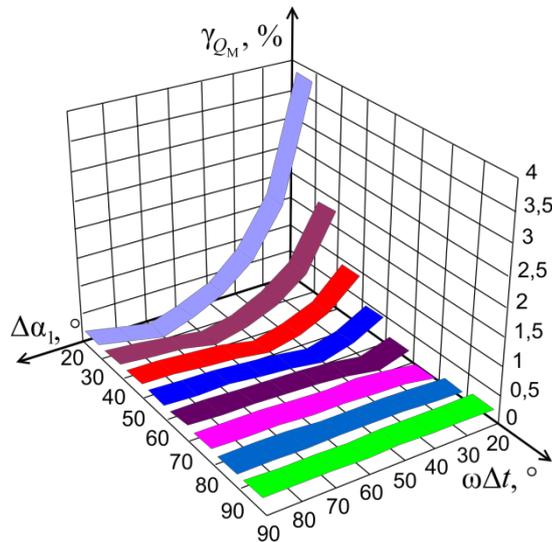


Рис. 6. Зависимость погрешности  $\gamma_{QM}$  от  $\Delta\alpha$  и  $\omega\Delta t$  при  $\varphi=90^\circ$

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 240 с.
2. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Синтез и анализ методов оперативного измерения параметров периодических процессов на основе формирования дополнительных сигналов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XVI междунар. конф. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2014. – С. 717-722.
3. Мелентьев В.С., Леонович Г.И., Кожевникова Е.Г. Метод измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям гармонических сигналов, разделенным во времени и пространстве // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: Тр. 9-й Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. – Самара: СамГТУ, 2010. – С. 42-44.
4. Мелентьев В.С., Болотнова А.Н. Исследование метода определения интегральных характеристик периодических сигналов по мгновенным значениям, связанным с переходом через ноль // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – № 2(24). – С. 82–89.
5. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Сеницын А.Е., Муратова В.В. Анализ влияния погрешностей формирования дополнительных сигналов на погрешность измерения интегральных характеристик гармонических сигналов // Информационные технологии в науке и производстве: Матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – С. 86-90.
6. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Анализ погрешности метода измерения интегральных характеристик, обусловленной отклонением формы сигнала от гармонической модели // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – 2013. – № 2 (31). – С. 80-84.

Статья поступила в редакцию 9 сентября 2014 г.

## **AN ERROR ESTIMATE FOR THE IMPLEMENTATION OF THE METHOD OF MEASURING THE PARAMETERS OF HARMONIC SIGNALS**

***V. V. Muratova***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*This paper deals with a new method of measuring the parameters of harmonic signals at their instantaneous values as the voltage passes zero point. Unlike the known methods based on the formation of additional voltage and current signals, the implementation of the method allows to eliminate the error caused by the non-identical phase angles of phase-shifting units in current and voltage channels. The structural diagram of the measurement means implementing the method is given. The paper shows the results of error analysis of the phase-shifting units which causes the difference between the input signal amplitude value and the signal amplitude at the output of the phase-shifting unit. The obtained results allow to choose the hardware and the measuring process parameters most appropriate in terms of accuracy and measurement time.*

***Keywords:*** *harmonic signals, the instantaneous values, additional signals, measuring means, phase-shifting units, modulo error.*