

## МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ\*

*Е.Е. Ярославкина, В.В. Муратова*

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

E-mail: k0046979@yandex.ru

**Аннотация.** *Приводится единая концепция улучшения метрологических характеристик, определяющих критерии синтеза средств измерений. Рассматриваются методы измерения интегральных характеристик, использующие пространственное разделение мгновенных значений гармонических сигналов за счет формирования дополнительных сигналов. Приводятся результаты анализа влияния погрешности, обусловленной неидеальностью фазосдвигающих блоков, осуществляющих формирование дополнительных сигналов. Полученные результаты позволяют выбрать соответствующие аппаратные средства в зависимости от предъявляемых требований по точности измерения.*

**Ключевые слова:** *гармонические сигналы, мгновенные значения, дополнительные сигналы, фазосдвигающие блоки, гармоническая модель, погрешность.*

В настоящее время большое внимание уделяется измерению показателей качества электрической энергии. Круг пользователей электроэнергии в наше время очень велик и постоянно расширяется. В него входят не только физические лица, но и крупнейшие промышленные предприятия, а также целые отрасли. Вследствие этого к качеству электроэнергии (КЭ) предъявляются достаточно высокие требования. От КЭ напрямую зависят жизнь и здоровье пользователей, а также стабильное функционирование высококачественного офисного, медицинского, измерительного оборудования.

Требования, предъявляемые к КЭ в системах электроснабжения общего назначения, регламентируются национальными и международными нормативными документами.

К основным показателям КЭ относятся:

- установившееся отклонение напряжения;
- размах изменения напряжения  $t$ ;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;
- коэффициент  $n$ -той гармонической составляющей напряжения;
- отклонение частоты;
- длительность провала напряжения;
- коэффициент временного перенапряжения;

---

*\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-08-00253, 16-08-00252).*

*Ярославкина Екатерина Евгеньевна (к.т.н., доц.), заведующая кафедрой «Информационно-измерительная техника».*

*Муратова Вера Владимировна, старший преподаватель кафедры «Информационно-измерительная техника».*

– отклонение частоты.

Согласно ГОСТ [1] измерение показателей качества электроэнергии непосредственно связано с измерением напряжений.

Как одна из составных частей измерений качества должно проводиться оперативное измерение среднеквадратичного значения (СКЗ) напряжения и тока, активной и реактивной мощности [2].

Все перечисленные измеряемые величины представляют собой интегральные параметры, которые возможно вычислить математически посредством соответствующих функционалов, отображающих свойства функций (сигналов) в числовой форме [3–5].

Для оперативного определения параметров периодических сигналов предлагаются новые методы измерения мгновенных значений (МЗ) на основе формирования дополнительных сигналов [6, 7].

### **Метод определения параметров по мгновенным значениям входных сигналов и дополнительного напряжения, измеренным в моменты переходов сигналов напряжения через ноль и через произвольный интервал времени**

В соответствии с разработанным авторами методом для мгновенного измерения интегральных характеристик формируется дополнительный сигнал напряжения, который имеет смещение относительно входного по фазе на угол  $\Delta\alpha$ ; в момент его перехода через ноль производят измерение первого МЗ входного сигнала напряжения; в тот момент, когда входной сигнал напряжения проходит через ноль, производят измерение МЗ дополнительного напряжения и тока; затем через временной интервал  $\Delta t$  производят измерение МЗ входного и дополнительного напряжения и тока одновременно. Затем определяемые информативные параметры рассчитывают по полученным значениям [5].

Графики процессов, поясняющие рассмотренный метод, приведены на рис. 1.

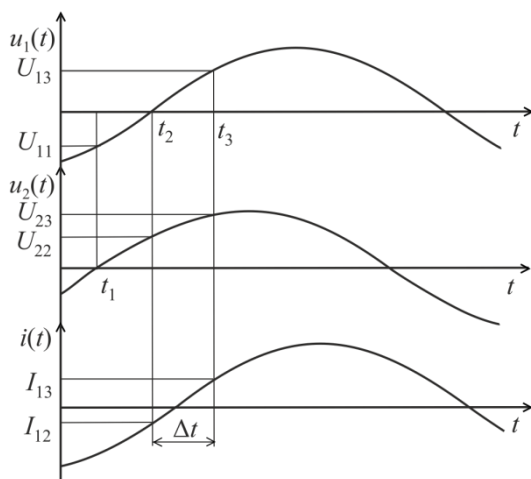


Рис. 1. Графики процессов, поясняющие первый метод

Для входных гармонических сигналов напряжения  $u_1(t) = U_m \sin \alpha t$  и тока  $i(t) = I_m \sin(\alpha t + \varphi)$  дополнительный сигнал напряжения примет вид

$u_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \Delta\alpha)$ , где  $U_{m1}$ ,  $U_{m2}$  – амплитудные значения входного и дополнительного напряжений.

В момент перехода дополнительного напряжения через ноль (момент времени  $t_1$  на рис. 1) мгновенное значение напряжения  $U_{11}$  равно

$$U_{11} = U_{m1} \sin(-\Delta\alpha).$$

В момент времени  $t_2$  (см. рис. 1), когда входной сигнал напряжения переходит через ноль, мгновенные значения сигналов будут равны  $U_{22} = U_{m2} \sin\Delta\alpha$ ;  $I_{12} = I_m \sin\varphi$ .

Через интервал времени  $\Delta t$  (в момент времени  $t_3$  на рис. 1) мгновенные значения напряжения и мгновенные значения тока будут определяться следующими выражениями:

$$U_{13} = U_{m1} \sin\omega\Delta t, U_{23} = U_{m2} \sin(\Delta\alpha + \omega\Delta t), I_{13} = I_m \sin(\varphi + \omega\Delta t).$$

Погрешность по модулю фазосдвигающего блока (ФСБ) можно оценить следующим коэффициентом:

$$k_m = \frac{U_{m1}}{U_{m2}} = \left| \frac{U_{11}}{U_{22}} \right|.$$

За счет использования данного коэффициента можно произвести корректировку мгновенного значения дополнительного напряжения:

$$U'_{22} = k_m U_{22} = U_{m1} \sin\Delta\alpha, U'_{23} = k_m U_{23} = U_{m1} \sin(\Delta\alpha + \omega\Delta t).$$

Выражения для определения информативных параметров для случая, когда  $\Delta\alpha \leq 90^\circ$ , имеют вид

$$U_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2}|U_{13}U'_{22}U'_{23}|}{\sqrt{\left[4U_{22}^2U_{23}^2 - (U_{22}^2 - U_{13}^2 + U_{23}^2)^2\right]}}; \quad (1)$$

$$I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{U'_{22}U'_{23} \left[ 2U'_{22}U'_{23}(I_{12}^2 + I_{13}^2) - I_{12}I_{13}(U_{22}^2 - U_{13}^2 + U_{23}^2) \right]}{4U_{22}^2U_{23}^2 - (U_{22}^2 - U_{13}^2 + U_{23}^2)^2}}. \quad (2)$$

При отклонении реального сигнала от гармонической модели предельные значения абсолютной погрешности определения параметров сигналов в соответствии с (1) и (2) примут вид

$$\Delta U_{СКЗ} = \left( \left| \frac{\partial U_{СКЗ}}{\partial U'_{22}} \right| + \left| \frac{\partial U_{СКЗ}}{\partial U_{13}} \right| + \left| \frac{\partial U_{СКЗ}}{\partial U'_{23}} \right| \right) \Delta U_{\max}; \quad (3)$$

$$\Delta I_{СКЗ} = \left( \left| \frac{\partial I_{СКЗ}}{\partial I_{12}} \right| + \left| \frac{\partial I_{СКЗ}}{\partial I_{13}} \right| \right) \Delta I_{\max} + \left( \left| \frac{\partial I_{СКЗ}}{\partial U'_{22}} \right| + \left| \frac{\partial I_{СКЗ}}{\partial U_{13}} \right| + \left| \frac{\partial I_{СКЗ}}{\partial U'_{23}} \right| \right) \Delta U_{\max}. \quad (4)$$

При использовании (1) и (2) с учетом (3) и (4) можно найти относительные погрешности определения СКЗ сигналов напряжения и тока:

$$\delta_{U_{СКЗ}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{2 \left( 1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2 \right) |\sin \Delta \alpha \sin(\Delta \alpha + \omega \Delta t)| + 2 |\sin \omega \Delta t \cos \Delta \alpha \sin(\omega \Delta t + \Delta \alpha)| + |\cos(\omega \Delta t + 2 \Delta \alpha)|}} \left\{ \sin \Delta \alpha [\sin \Delta \alpha - \sin(\Delta \alpha + 2 \omega \Delta t)] + \right. \quad (5)$$

$$\delta_{I_{СКЗ}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} [|\cos \varphi| + |\cos(\varphi - \omega \Delta t)|]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 |\sin \omega \Delta t|}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2 \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 \sin^2 \omega \Delta t |\sin \Delta \alpha \sin(\omega \Delta t + \Delta \alpha)|}} \times \quad (6)$$

$$\times \left[ |\sin \omega \Delta t \cos \Delta \alpha| |\cos \omega \Delta t + \cos(2 \omega \Delta t + \varphi)| + |\sin \Delta \alpha + \sin(2 \omega \Delta t + \Delta \alpha)| + |\sin \omega \Delta t| |2 \sin \varphi \sin(\omega \Delta t + \varphi) - 1| \right],$$

где  $h_{ik}$  и  $h_{uk}$  – коэффициент  $k$ -ой гармоники тока и напряжения соответственно.

Из анализа (5) и (6) следует, что погрешности измерения информативных параметров зависят от угла сдвига фаз ФСБ и интервала  $\omega \Delta t$ .

Погрешности измерения СКЗ тока определяются углом сдвига фаз между первыми гармониками напряжения и тока  $\varphi$  [7].

Графики зависимости относительной погрешности измерения СКЗ напряжения и тока от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$  при наличии в сигналах 1-й и 3-й гармоник с  $h_{u3}=0,1\%$ , построенные согласно (5) и (6), показаны на рис. 2 и 3.

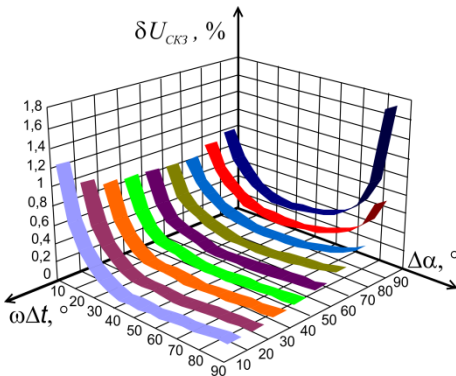


Рис. 2. Графики зависимости погрешности определения СКЗ напряжения  $\delta_{U_{СКЗ}}$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$

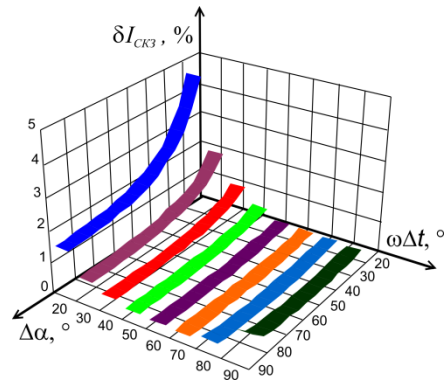


Рис. 3. Графики зависимости погрешности определения СКЗ тока  $\delta_{I_{СКЗ}}$  от  $\Delta \alpha$  и  $\omega \Delta t$

Проведенный анализ показал, что с увеличением угла сдвига фаз между входными сигналами напряжения и тока погрешности измерения СКЗ тока снижаются.

### Метод определения параметров по мгновенным значениям входных сигналов, измеренным в моменты переходов входного и дополнительного напряжений и тока через ноль

Данный метод основан на том, что когда входной сигнал тока проходит через ноль, измеряется первое МЗ входного сигнала напряжения; когда сигнал дополнительного напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на произвольный угол  $\Delta\alpha$ , переходит через ноль, одновременно производят измерения второго МЗ входного сигнала напряжения и первого МЗ тока; в точке перехода входного сигнала напряжения через ноль измеряют второе МЗ тока. Параметры гармонического сигнала определяют по измеренным МЗ сигналам.

Графики процессов, поясняющие метод, приведены на рис. 4.

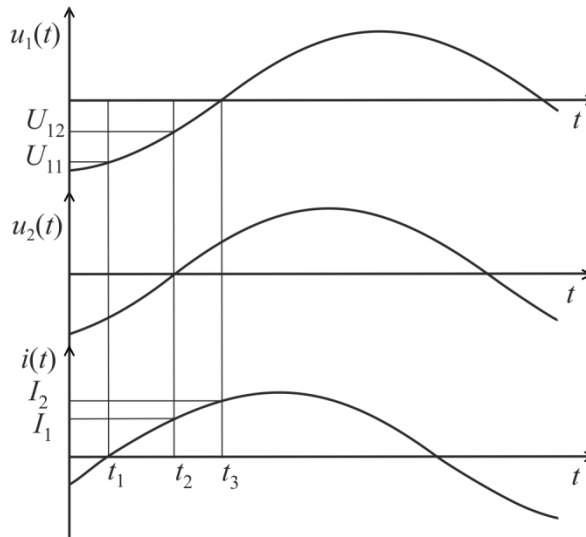


Рис. 4. Графики процессов, поясняющие второй метод

Входное и дополнительное напряжения и ток, имеющие гармоническую форму, соответствуют выражениям, аналогичным тем, что приведены в предыдущем методе.

В момент времени  $t_1$  перехода тока через ноль мгновенное значение входного сигнала напряжения  $U_{11} = U_{m1} \sin(-\varphi)$ .

В момент времени  $t_2$  перехода дополнительного сигнала напряжения через ноль мгновенное значение входного напряжения и тока соответственно равны

$$U_{12} = U_{m1} \sin(-\Delta\alpha); I_2 = I_m \sin(\varphi - \Delta\alpha).$$

В момент времени  $t_3$  перехода входного сигнала напряжения через ноль мгновенное значение тока  $I_3 = I_m \sin \varphi$ .

Определим коэффициент  $l = \left| \frac{U_{11}}{I_3} \right| = \frac{U_{m1}}{I_m}$ , отражающий соотношение между амплитудными значениями напряжения и тока. С помощью данного коэффициента можно вычислить значение напряжения  $U'_{14} = l|I_2| = U_{m1}|\sin(\varphi - \Delta\alpha)|$ .

Выражения для определения среднеквадратического значения напряжения и тока:

$$U_{CK3} = \frac{\sqrt{2}|U_{11}U_{12}U'_{14}|}{\sqrt{4U'^2_{14}U^2_{11} - (U'^2_{14} + U^2_{11} - U^2_{12})^2}}; \quad (7)$$

$$I_{CK3} = \frac{\sqrt{2}|I_3U_{12}U'_{14}|}{\sqrt{4U'^2_{14}U^2_{12} - (U'^2_{14} + U^2_{12} - U^2_{11})^2}}. \quad (8)$$

Проведем оценку предельного значения методической погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от модели гармонического сигнала [8].

Если абсолютная погрешность аргументов соответствует наибольшему отклонению гармонических моделей от реального сигнала, то предельные значения абсолютных погрешностей определения информативных параметров сигналов в соответствии с (7) и (8) будут равны

$$\Delta U_{CK3} = \left( \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U'_{14}} \right| \right) \Delta U_{\max}; \quad (9)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_3} \right| \Delta I_{\max} + \left( \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U'_{14}} \right| \right) \Delta U_{\max}. \quad (10)$$

При применении предельных значений абсолютных погрешностей (9) и (10) и выражений (7) и (8) есть возможность найти относительную погрешность измерения СКЗ напряжения и тока:

$$\delta_{U_{CK3}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2 |\sin(\varphi - \Delta\alpha) \sin \varphi \sin \Delta\alpha|}} \left[ |\sin(\varphi - \Delta\alpha) \sin \Delta\alpha - \cos \varphi| + \right. \\ \left. + |\sin(\varphi - \Delta\alpha) \sin \varphi - \cos \Delta\alpha| + |\sin \varphi \sin \Delta\alpha - \cos(\varphi - \Delta\alpha)| \right]; \quad (11)$$

$$\delta_{I_{CK3}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 |\sin \varphi|}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 |\sin(\varphi - \Delta\alpha) \sin \varphi \sin \Delta\alpha|}} \left[ |\cos \varphi| + \right. \\ \left. + |\sin(\varphi - \Delta\alpha) \sin \varphi - \cos \Delta\alpha| + |\cos \varphi \cos \Delta\alpha| \right]; \quad (12)$$

Проанализировав (11) и (12), можно сделать вывод, что погрешности нахождения параметров периодических сигналов зависят как от спектрального состава сигналов, так и от угла сдвига фаз между входными сигналами напряжения и тока  $\varphi$  и угла сдвига фазы ФСБ  $\Delta\alpha$ .

Графики зависимости относительной погрешности измерения СКЗ сигналов от  $\Delta\alpha$  и  $\omega\Delta t$  при наличии в сигналах 1-й и 3-й гармоник с  $h_{u3} = h_{i3} = 0,1\%$ , построенные согласно (11) и (12), показаны на рис. 5.

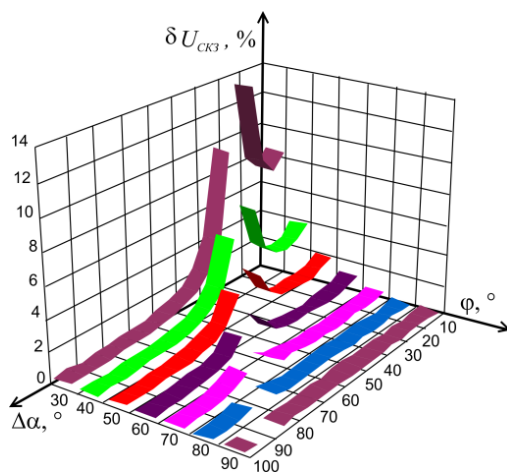


Рис. 5. Графики зависимости  $\delta_{U_{СКЗ}}$  ( $\delta_{I_{СКЗ}}$ ) от  $\Delta\alpha$  и  $\varphi$

Проведенный анализ рис. 5 показывает существенную зависимость погрешностей как от угла сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi$ , так и от угла сдвига фазы ФСБ.

При этом меньшие значения погрешностей имеют место для  $\Delta\alpha$ , соответствующих  $70\text{--}90^\circ$  (при  $\varphi \neq \Delta\alpha$ ). В случае, если  $\varphi = \Delta\alpha$ , знаменатели выражений (11)–(12) обращаются в ноль, что соответствует разрывам графиков на рис. 5.

В обоих методах используется коррекция МЗ сигналов, что требует дополнительных вычислений и не позволяет полностью скорректировать погрешности по модулю ФСБ; кроме того, реализация второго метода предусматривает обязательное наличие сигнала в канале тока.

Одним из преимуществ второго метода является то, что исключается угловая погрешность ФСБ.

Рассмотренные методы позволяют определять интегральные характеристики периодических сигналов за время не более одного периода входного сигнала, что обеспечивает качественные измерения электрических параметров.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: Издание официальное. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
2. Чернецов М.В., Кудашов А.В., Михотин В.Д. Способы и алгоритмы измерения интегральных параметров электрической энергии: монография / под ред. М.В. Чернецова. – Пенза: Информационно-издательский центр ПензГУ, 2009. – 140 с.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
4. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Ярославкина Е.Е. Метод измерения характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов // Техника

- и технологии: пути инновационного развития: Матер. III Междунар. научн. практ. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т., 2013. – С. 123–126.
5. Мелентьев В.С., Муратова В.В., Ярославкина Е.Е. Метод и система измерения интегральных характеристик с использованием ортогональных составляющих сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4(40). – С. 206–209.
  6. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Ярославкина Е.Е. Исследование метода измерения интегральных характеристик на основе сравнения и временного разделения мгновенных значений гармонических сигналов // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. науч. трудов 40-й Междунар. науч.-практ. конф. – Курск: ЮЗГУ, 2014. – Т. 1. – С. 390–395.
  7. 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. – ИПУСС РАН, 2014.
  8. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Сеницын А.Е. 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.

*Статья поступила в редакцию 20 февраля 2018 г.*

## METHODS OF OPERATIONAL MEASUREMENTS OF INTEGRAL CHARACTERISTICS OF PERIODIC SIGNALS

***E.E. Yaroslavkina, V.V. Muratova***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, Russia, 443100

***Abstract.*** *The paper presents a unified concept of improving the metrological characteristics that determine the criteria for the synthesis of measuring instruments. Methods for measuring the integral characteristics are considered, using the spatial separation of the instantaneous values of harmonic signals with the formation of additional signals. The results of the analysis of the influence of the error due to the non-ideal phase-shifting blocks providing the formation of additional signals are given. The results obtained make it possible to choose the appropriate hardware depending on the requirements for the accuracy of the measurement.*

***Keywords:*** *additional signals, harmonic signals, error instantaneous values, phase-shift blocks, harmonic model.*

---

*Ekaterina E. Yaroslavkina (Ph.D. (Techn.)), Head of the Department of Measuring Technique.*

*Vera V. Muratova, Senior Lecturer.*