

УДК 621.317

ОЦЕНКА МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗ-ЗА ОТКЛОНЕНИЯ РЕАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ ОТ ГАРМОНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ*

Ю.М. Иванов

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

E-mail: fuego27@rambler.ru

Исследуется новый метод измерения параметров гармонических сигналов, основанный на формировании дополнительных сигналов напряжения и тока и выявлении моментов переходов входных сигналов через ноль. При реализации метода возможен сдвиг дополнительных сигналов в каналах напряжения и тока на различные углы, что позволяет исключить погрешности, обусловленные неидеальностью фазосдвигающих блоков, осуществляющих формирование дополнительных сигналов. Приводятся результаты анализа погрешности метода, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели. Полученные результаты позволяют выбирать оптимальные значения углов сдвига фаз фазосдвигающих блоков с точки зрения точности измерения параметров.

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

Измерение и контроль параметров гармонических сигналов (ПГС) широко используется в научных исследованиях и промышленности. В настоящее время получили распространение методы измерения ПГС (среднеквадратических значений напряжения и тока, активной и реактивной мощности) по мгновенным значениям напряжения и тока, не связанным с периодом входного сигнала. Методы обеспечивают в общем случае время измерения менее периода входного сигнала [1].

Дальнейшее сокращение времени измерения возможно за счет формирования дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных по фазе, и определении ПГС по мгновенным значениям входных и дополнительных сигналов [2].

При реализации данных методов формируются дополнительные сигналы напряжения и тока, сдвинутые по фазе относительно входных на одинаковые углы $\Delta\alpha$.

Однако это может привести к возникновению дополнительной погрешности, которая обусловлена отличием углов сдвига фазосдвигающих блоков (ФБ), формирующих дополнительные сигналы в каналах тока и напряжения [3].

В [4] автором предложен новый метод измерения ПГС, при реализации которого углы сдвига фаз ФБ для дополнительных сигналов напряжения и тока мо-

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-00173).

Юрий Михайлович Иванов (к.т.н.), с.н.с. кафедры «Информационно-измерительная техника».

гут отличаться друг от друга.

Метод заключается в том, что в момент перехода входного тока через ноль одновременно измеряют первые мгновенные значения входного напряжения и сдвинутого относительно него по фазе на угол $\Delta\alpha_1$ дополнительного напряжения, первое мгновенное значение дополнительного тока, сдвинутого по фазе относительно входного на угол $\Delta\alpha_2$; в момент перехода входного напряжения через ноль одновременно измеряют вторые мгновенные значения входного и дополнительные значения входного и дополнительного сигналов тока и второе мгновенное значение напряжения. ПГС определяют по измеренным мгновенным значениям сигналов.

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

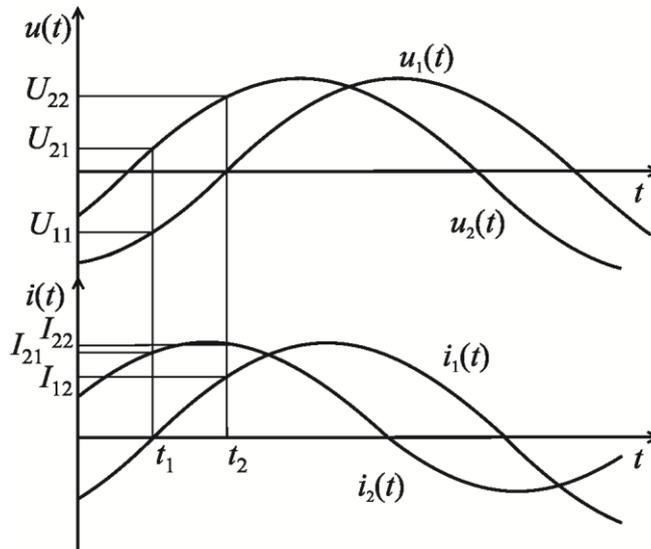


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Входные и дополнительные сигналы напряжения и тока, имеющие гармонические модели, соответствуют следующим выражениям:

$$u_1(t) = U_m \sin \omega t; \quad i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi); \quad u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha_1); \\ i_2(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi + \Delta\alpha_2),$$

где U_m, I_m – амплитудные значения сигналов напряжения и тока;

ω – угловая частота входного сигнала;

φ – угол сдвига фаз между входными сигналами напряжения и тока.

В момент времени t_1 , когда сигнал $i_1(t)$ переходит через ноль, мгновенные значения входного напряжения, дополнительных сигналов напряжения и тока будут равны

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

В момент времени t_2 , когда сигнал $u_1(t)$ переходит через ноль, мгновенные значения входного тока, дополнительных сигналов напряжения и тока примут вид

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

Используя мгновенные значения сигналов, можно определить основные ПГС:

– среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока

$$U_{CK3} = \frac{\sqrt{2}|U_{11}U_{22}U_{21}|}{\sqrt{4U_{11}^2U_{21}^2 - (U_{21}^2 + U_{11}^2 - U_{22}^2)^2}}; \quad (1)$$

$$I_{CK3} = \frac{\sqrt{2}|I_{12}I_{22}I_{21}|}{\sqrt{4I_{12}^2I_{22}^2 - (I_{22}^2 + I_{12}^2 - I_{21}^2)^2}}; \quad (2)$$

– активную (АМ) и реактивную (РМ) мощности

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

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

Определение ИХГС в соответствии с (1) – (4) справедливо только в том случае, если $\varphi \neq \pi l$, где $l = 0; 1$.

Если $\varphi = \pi l$, то входные сигналы напряжения и тока одновременно переходят через ноль. В этом случае производится измерение мгновенных значений дополнительных сигналов напряжения и тока.

Через произвольный (в общем случае) интервал времени Δt измеряют мгновенные значения входных и дополнительных сигналов напряжения и тока. ПГС определяют по измеренным мгновенным значениям сигналов.

Рассматриваемый метод предназначен для измерения параметров гармонических сигналов. При отклонении реальных сигналов от гармонической модели неизбежно возникает погрешность.

Произведем оценку данного вида методической погрешности, используя предложенную в [5] методику. Методика заключается в определении погрешности измерения параметров сигналов как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностями, соответствующими отклонению реального сигнала от гармонической модели.

В случае, когда аргументы будут соответствовать наибольшим отклонениям реального сигнала от интерпретирующей модели, предельные значения погрешностей в соответствии с (1) – (4) примут вид

$$\Delta U_{CK3} = \left[\left| (U_{CK3})'_{U_{11}} \right| + \left| (U_{CK3})'_{U_{21}} \right| + \left| (U_{CK3})'_{U_{22}} \right| \right] \Delta U_m; \quad (5)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left[\left| (I_{CK3})'_{I_{21}} \right| + \left| (I_{CK3})'_{I_{12}} \right| + \left| (I_{CK3})'_{I_{22}} \right| \right] \Delta I_m; \quad (6)$$

$$\Delta P = \left[\left| (P)'_{U_{11}} \right| + \left| (P)'_{U_{21}} \right| + \left| (P)'_{U_{22}} \right| \right] \Delta U_m + \left[\left| (P)'_{I_{21}} \right| + \left| (P)'_{I_{12}} \right| + \left| (P)'_{I_{22}} \right| \right] \Delta I_m; \quad (7)$$

$$\Delta Q = \left[\left| (Q)'_{U_{11}} \right| + \left| (Q)'_{U_{21}} \right| + \left| (Q)'_{U_{22}} \right| \right] \Delta U_m + \left| (Q)'_{I_{12}} \right| \Delta I_m, \quad (8)$$

где $\Delta U_{\max} = U_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}$ и $\Delta I_{\max} = I_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}$ – предельные абсолютные погрешно-

сти аргументов, соответствующие наибольшим отклонениям гармонических моделей от реальных сигналов; U_{1m} и I_{1m} – амплитудные значения первых гармоник сигналов; $h_{uk} = \frac{U_{mk}}{U_{1m}}$ и $h_{ik} = \frac{I_{mk}}{I_{1m}}$ – коэффициенты k -тых гармоник напряжения и тока.

Используя (1) – (4), с учетом абсолютных погрешностей (5) – (8) можно определить относительные погрешности измерения СКЗ напряжения и тока и приведенные погрешности измерения АМ и РМ:

$$\delta_{U_{СКЗ}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} [\cos(\Delta\alpha_1 - \varphi)\cos\Delta\alpha_1 + |\cos\Delta\alpha_1 \cos\varphi| + |\cos(\Delta\alpha_1 - \varphi)\cos\varphi]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2 |\sin\Delta\alpha_1 \sin\varphi \sin(\Delta\alpha_1 - \varphi)}}; \quad (9)$$

$$\delta_{I_{СКЗ}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} [\cos(\varphi + \Delta\alpha_2)\cos\Delta\alpha_2 + |\cos\Delta\alpha_2 \cos\varphi| + |\cos(\varphi + \Delta\alpha_2)\cos\varphi]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 |\sin\Delta\alpha_2 \sin\varphi \sin(\Delta\alpha_2 + \varphi)}}; \quad (10)$$

$$\gamma_P = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} |\cos\varphi| [\cos(\Delta\alpha_1 - \varphi)\cos\Delta\alpha_1 + |\cos\Delta\alpha_1 \cos\varphi| + |\cos(\Delta\alpha_1 - \varphi)\cos\varphi]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 |\sin\Delta\alpha_1 \sin\varphi \sin(\Delta\alpha_1 - \varphi)}} +$$

$$+ \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \{ |\sin\Delta\alpha_2| [1 + \cos(\varphi + \Delta\alpha_2)\cos\varphi + |\cos(\varphi + \Delta\alpha_2)|] + |\sin(\varphi + \Delta\alpha_2)\cos(\varphi + \Delta\alpha_2)| \}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 |\sin\varphi \sin(\Delta\alpha_2 + \varphi)| \sin^2\Delta\alpha_2}}; \quad (11)$$

$$\gamma_Q = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} [\cos(\Delta\alpha_1 - \varphi)\cos\Delta\alpha_1 + |\cos\Delta\alpha_1 \cos\varphi| + |\cos(\Delta\alpha_1 - \varphi)\cos\varphi]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2 |\sin\Delta\alpha_1 \sin\varphi \sin(\Delta\alpha_1 - \varphi)}} +$$

$$+ \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}}. \quad (12)$$

Анализ выражений (9) – (12) показывает, что погрешности измерения параметров сигналов зависят от гармонического состава сигналов, угла сдвига фаз между первыми гармониками напряжения и тока φ и углов сдвига фаз фазосдвигающих блоков $\Delta\alpha_1$ и $\Delta\alpha_2$.

На рис. 2 и 3 представлены графики зависимости относительных погрешностей измерения СКЗ напряжения и тока от φ и $\Delta\alpha_1$ ($\Delta\alpha_2$) в соответствии с (9) и (10) при наличии в сигналах первой и третьей гармоник с $h_{u3} = h_{i3} = 0,1\%$.

На рис. 4 и 5 представлены графики зависимости приведенных погрешностей измерения АМ и РМ от φ и $\Delta\alpha_1$ ($\Delta\alpha_2$) в соответствии с (11) и (12) при наличии в сигналах первой и третьей гармоник с $h_{u3} = h_{i3} = 0,1\%$.

Анализ рис. 2–5 показывает существенную зависимость погрешностей как от угла сдвига фаз φ , так и от углов сдвига фаз ФБ.

При этом меньшие значения погрешностей имеют место для $\Delta\alpha_1$ ($\Delta\alpha_2$), соответствующих $60\text{--}90^\circ$ (при $\varphi \neq \Delta\alpha$). В случае если $\varphi = \Delta\alpha$, знаменатели выражений (9), (11) и (12) обращаются в ноль, что соответствует разрывам графиков на рис. 2, 4 и 5.

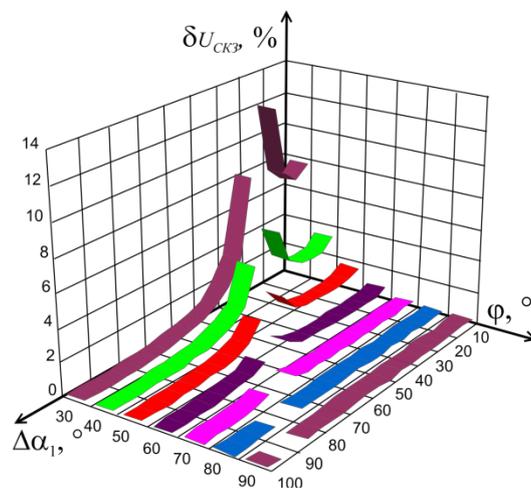


Рис. 2. Графики зависимости $\delta_{U_{СКЗ}}$ от $\Delta\alpha_1$ и φ

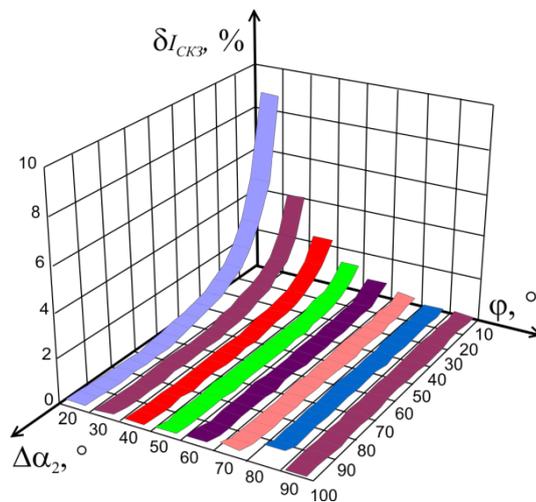


Рис. 3. Графики зависимости $\delta_{I_{СКЗ}}$ от $\Delta\alpha_2$ и φ

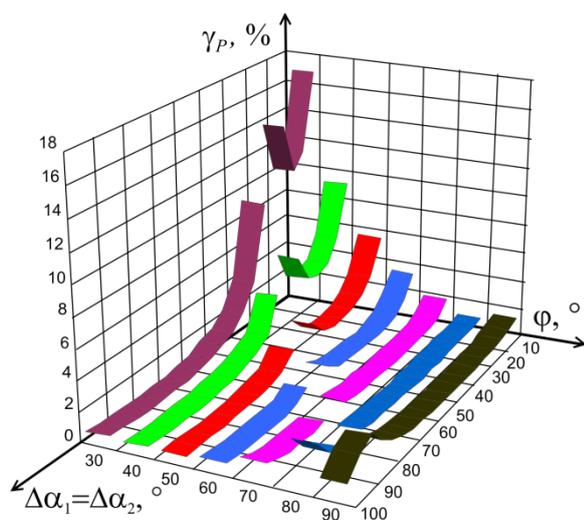


Рис. 4. Графики зависимости γ_P от $\Delta\alpha_1=\Delta\alpha_2$ и φ

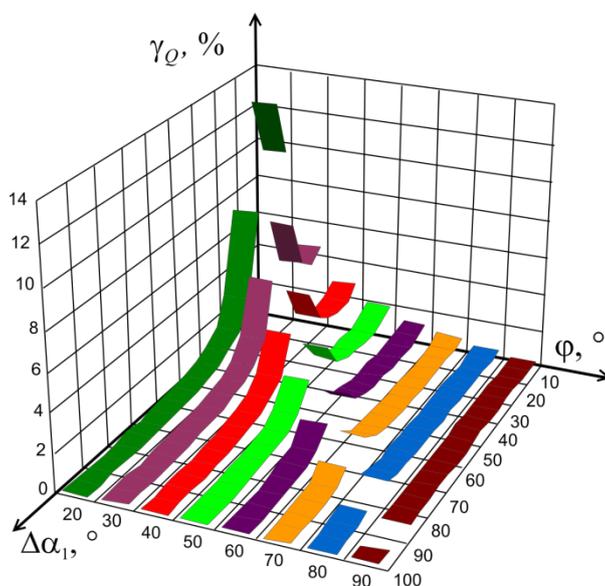


Рис. 5. Графики зависимости γ_P от $\Delta\alpha_1$ и φ

Полученные результаты позволяют выбирать оптимальные значения углов сдвига фаз ФБ с точки зрения точности измерения параметров.

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., Симицын А.Е. Методы измерения интегральных характеристик на основе формирования дополнительных сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 2 (38). – С. 56–63.
3. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Симицын А.Е. Анализ погрешности измерения интегральных характеристик гармонических сигналов из-за отклонения углов сдвига фаз в каналах напряжения и тока // Современные информационные технологии: Сб. статей междунар. науч.-техн.

- конф. – Пенза: ПГТА, 2013. – Вып. 17. – С. 79–82.
4. *Иванов Ю.М.* Повышение точности измерения интегральных характеристик при использовании пространственного и временного разделения мгновенных значений гармонических сигналов // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: Сб. статей Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2013. – С. 152–155.
 5. *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 25 января 2015 г.

ASSESSMENT OF THE METHODOLOGICAL ERROR OF PARAMETERS MEASUREMENT DUE THE DEVIATION OF THE REAL SIGNALS FROM THE HARMONIC MODEL

Ju.M. Ivanov

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

The paper studies a new method of measuring the parameters of harmonic signals: it is based on the formation of additional voltage and current signals and identification of points of zero transitions of input signals. During the implementation of the method there can be the multi-angle shifting of additional signals in the voltage and current channels, which allows to exclude the errors caused by the non-ideal structure of phase-shifting units used for formation of those additional signals. The paper gives the results of the analysis of the method error caused by the deviation of the real signal from the harmonic model. The obtained results allow to choose optimal values of phase angle of phase-shifting units in terms of parameter measurement accuracy.

Keywords: *harmonic signals, parameters, instant values, additional signals, phase-shifting units, an error, mode.*