

Информационные технологии

УДК 621.317

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ*

В.С. Мелентьев, В.В. Муратова

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

E-mail: vs_mel@mail.ru

Рассматривается новый метод измерения параметров гармонических сигналов по их отдельным мгновенным значениям. Реализация метода обеспечивает исключение погрешности по напряжению фазосдвигающего блока. Приводятся результаты анализа погрешности метода из-за отклонения реальных сигналов от гармонической модели.

Ключевые слова: *параметры периодических сигналов, гармоническая модель, мгновенные значения, фазосдвигающий блок, погрешность по модулю, методическая погрешность.*

Введение

В настоящее время достаточно широкое распространение получили методы измерения параметров гармонических сигналов (среднеквадратических значений напряжения и тока, активной и реактивной мощности) по отдельным мгновенным значениям, основанные на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно входных, и определении параметров по мгновенным значениям входных и дополнительных сигналов [1].

Использование в качестве дополнительных ортогональных составляющих сигналов упрощает реализацию методов и в общем случае обеспечивает сокращение времени измерения [2].

Однако использование ортогональных составляющих сигналов приводит к значительной частотной погрешности фазосдвигающих блоков (ФСБ), осуществляющих формирование дополнительных сигналов. В результате этого при изменении частоты входного сигнала ФСБ производят сдвиг на угол, отличный от $\pi/2$. Кроме того, при реализации известных методов неизбежно возникает погрешность по модулю фазосдвигающих блоков, обусловленная отличием амплитуд входного и дополнительного сигналов [3].

Исключение влияния частотной погрешности ФСБ обеспечивают методы, основанные на формировании дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 13-08-00173-а).

Владимир Сергеевич Мелентьев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника».

Вера Владимировна Муратова, аспирант.

относительно входных на произвольный в общем случае угол [4]. Однако при отличии углов сдвига фаз в каналах напряжения и тока возникает существенная погрешность.

В [5] предложен метод измерения параметров гармонических сигналов (ПГС), использующий формирование только дополнительного напряжения с пространственным и временным разделением мгновенных значений сигналов.

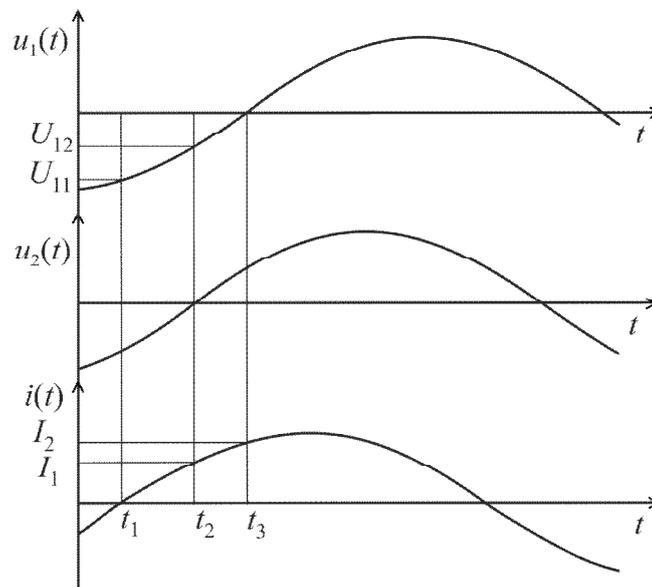
Однако реализация метода также приводит к погрешности по модулю (погрешности по напряжению) ФСБ.

В статье рассматривается новый метод измерения ПГС, также основанный на формировании только дополнительного сигнала напряжения и исключающий данный вид погрешности.

Метод измерения ПГС по мгновенным значениям сигналов с использованием дополнительного напряжения

Метод заключается в том, что в момент перехода входного сигнала тока через ноль измеряют первое мгновенное значение входного напряжения; в момент перехода дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на произвольный (в общем случае) угол $\Delta\alpha$, через ноль одновременно измеряют второе мгновенное значение входного напряжения и первое мгновенное значение тока; в момент перехода входного сигнала напряжения через ноль измеряют второе мгновенное значение тока. ПГС определяют по измеренным мгновенным значениям сигналов.

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



Р и с. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Входной и дополнительный сигналы напряжения и ток, имеющие гармонические модели, соответствуют следующим выражениям:

$$u_1(t) = U_m \sin \omega t; \quad u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha); \quad i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi),$$

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 перехода сигнала тока через ноль мгновенное значение входного напряжения $U_{11} = U_m \sin(-\varphi)$.

В момент времени t_2 перехода дополнительного сигнала напряжения через ноль мгновенные значения входного напряжения и тока соответственно равны

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

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

Определим следующий коэффициент $l = \left| \frac{U_{11}}{I_3} \right| = \frac{U_m}{I_m}$, отражающий соотношение между амплитудными значениями напряжения и тока.

С помощью данного коэффициента можно вычислить значение напряжения $U'_{14} = l|I_2| = U_m |\sin(\varphi - \Delta\alpha)|$.

Используя мгновенные значения сигналов и выбирая угол сдвига фазы дополнительного сигнала $\Delta\alpha < 90^\circ$, можно получить выражения для определения основных ИХГС:

– среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока:

$$U_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2}|U_{11}U_{12}U'_{14}|}{\sqrt{4U_{14}'^2U_{11}^2 - (U_{14}'^2 + U_{11}^2 - U_{12}^2)^2}}; \quad (1)$$

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

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

$$P = \frac{|U_{11}U_{12}U'_{14}| \left[I_3(U_{14}'^2 + U_{11}^2 - U_{12}^2) - 2I_2U'_{14}|U_{11}| \right]}{\sqrt{4U_{14}'^2U_{11}^2 - (U_{14}'^2 + U_{11}^2 - U_{12}^2)^2}}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{I_3|U_{11}U_{12}U'_{14}|}{\sqrt{4U_{14}'^2U_{11}^2 - (U_{14}'^2 + U_{11}^2 - U_{12}^2)^2}}. \quad (4)$$

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

В случае, если $\varphi = \pi p$, измерение параметров производится следующим образом.

Временные диаграммы для угла сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = 0$ приведены на рис. 2.

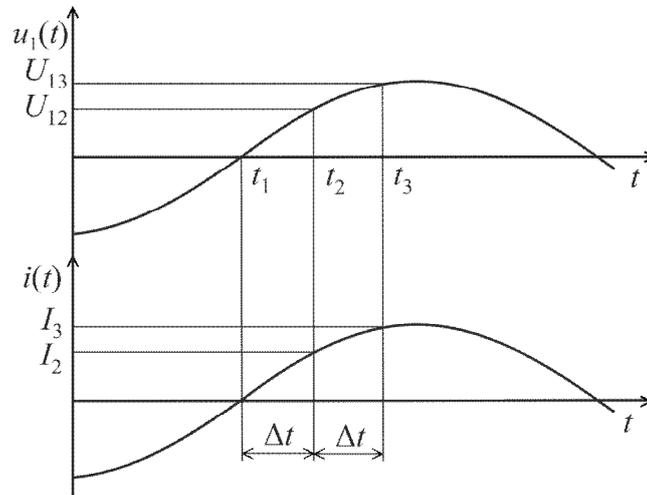
Если в момент времени t_1 входные сигналы напряжения и тока одновременно переходят через ноль, то производится измерение мгновенных значений сигналов через произвольный (в общем случае) интервал времени Δt .

Через интервал времени Δt (в момент времени t_2) мгновенные значения входного напряжения и тока будут равны

$$U'_{12} = U_m \sin \omega t; I'_2 = I_m \sin \omega t.$$

Через интервал времени $2\Delta t$ (в момент времени t_3) мгновенные значения сигналов примут вид

$$U'_{13} = U_m \sin 2\omega t ; I'_3 = I_m \sin 2\omega t .$$

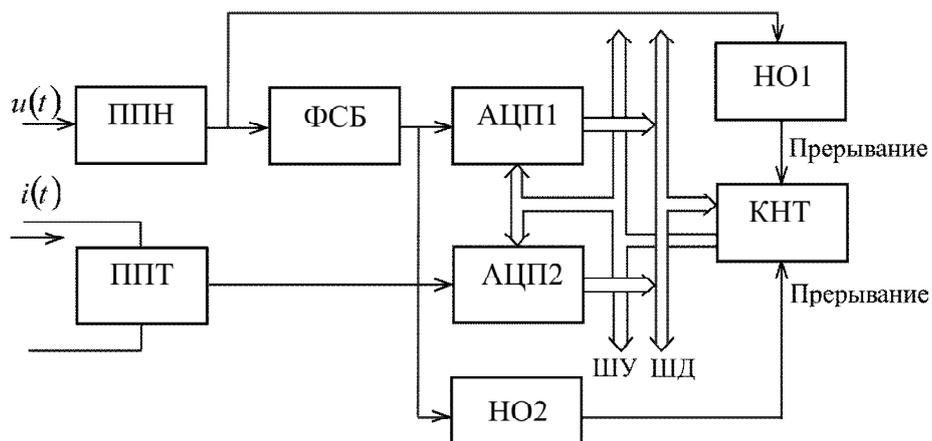


Р и с. 2. Временные диаграммы, поясняющие метод при $\varphi=0$

Используя мгновенные значения сигналов, можно определить СКЗ напряжения и тока:

$$U_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2}U'_{12}}{\sqrt{4U'_{12}{}^2 - U'_{13}{}^2}} ; I_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2}|I'_2 U'_{12}|}{\sqrt{4U'_{12}{}^2 - U'_{13}{}^2}} .$$

Если знаки вторых мгновенных значений входных сигналов напряжения и тока совпадают ($sign U_{12} = sign I_2$), то $\varphi = 0$. При этом активная мощность $P = U_{СКЗ} I_{СКЗ}$, а реактивная мощность $Q = 0$.



Р и с. 3. СИ, реализующее метод

Если вторые мгновенные значения входных сигналов напряжения и тока имеют противоположные знаки ($sign U_{12} \neq sign I_2$), то $\varphi = \pi$. При этом АМ $P = -U_{CK3} I_{CK3}$, а РМ $Q = 0$.

Схема средства измерения (СИ), реализующего метод, приведена на рис. 3.

СИ содержит: первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ, фазосдвигающий блок ФСБ, осуществляющий сдвиг сигнала напряжения на угол $\Delta\alpha$, два нуля-органа НО1 и НО2, два аналого-цифровых преобразователя АЦП1 и АЦП2, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД.

В данном методе не используются мгновенные значения дополнительного сигнала напряжения, а только его переходы через ноль, что устраняет погрешность по модулю фазосдвигающего блока. Кроме того, угол сдвига фазы ФСБ $\Delta\alpha$ может быть выбран произвольным $0 < \Delta\alpha < 90^\circ$, что не приводит к угловой погрешности фазосдвигающего блока.

Анализ погрешности метода из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели

Рассматриваемый метод предназначен для определения параметров гармонических сигналов. При наличии в сигналах высших гармоник неизбежно возникает погрешность.

Проведем оценку предельного значения методической погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели. Для этого используем методику оценки погрешности результата измерения соответствующего параметра как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала [1].

Если абсолютные погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению моделей от реальных сигналов, то предельные значения абсолютных погрешностей определения параметров сигналов в соответствии с (1) – (4) будут равны:

$$\Delta U_{CK3} = \left(\left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U'_{14}} \right| \right) \Delta U_m; \quad (5)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_3} \right| \Delta I_m + \left(\left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U'_{14}} \right| \right) \Delta U_m; \quad (6)$$

$$\Delta P = \left(\left| \frac{\partial P}{\partial I_2} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_3} \right| \right) \Delta I_m + \left(\left| \frac{\partial P}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U'_{14}} \right| \right) \Delta U_m; \quad (7)$$

$$\Delta Q = \left| \frac{\partial Q}{\partial I_3} \right| \Delta I_m + \left(\left| \frac{\partial Q}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U'_{14}} \right| \right) \Delta U_m, \quad (8)$$

где $\Delta U_{\max} = U_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}$ и $\Delta I_{\max} = I_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}$ – предельные абсолютные погрешности аргументов, соответствующие наибольшим отклонениям гармонических моделей от реальных сигналов; U_{1m} и I_{1m} – амплитуды первых гармоник сигналов; $h_{ik} = \frac{U_{mk}}{U_{1m}}$ и

$h_{uk} = \frac{I_{mk}}{I_{1m}}$ – коэффициенты k -тых гармоник напряжения и тока.

Используя предельные значения абсолютных погрешностей (5) – (8) и выражения (1) – (4), можно определить относительные погрешности определения СКЗ напряжения и тока и приведенные погрешности определения АМ и РМ:

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

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

$$\gamma_P = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} |1 + \cos \Delta\alpha|}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} \times \\ \times \left\{ |\sin(\varphi - \Delta\alpha) [\sin(\varphi - \Delta\alpha) + \cos \varphi \sin \Delta\alpha] - 1 - \cos^2 \varphi| + |\cos^3 \varphi \cos \Delta\alpha + \cos(\varphi - \Delta\alpha)| + \right. \\ \left. + |\cos \varphi [2 \cos \varphi \cos \Delta\alpha - \sin \varphi \sin \Delta\alpha]| \right\}; \quad (11)$$

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

Из выражений (9) – (12) следует, что погрешности определения параметров периодических сигналов зависят не только от гармонического состава сигналов, но и от угла сдвига фаз между напряжением и током φ и угла сдвига фазы ФСБ $\Delta\alpha$.

Анализ показывает, что, выбирая соответствующие значения угла $\Delta\alpha$, можно значительно снизить погрешность, обусловленную отклонением реальных сигналов от гармонической модели.

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., Сеницын А.Е. Синтез методов измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 3(35). – С. 84-89.
3. Мелентьев В.С., Леонович Г.И., Рудаков Д.В. Анализ метода измерения интегральных характеристик гармонических сигналов на основе сравнения их ортогональных составляющих // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: Тр. 10-й Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. – Самара: СамГТУ, 2011. – С. 61-63.
4. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Сеницын А.Е. Методы измерения интегральных характеристик на основе формирования дополнительных сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 2(39). – С. 56-63.
5. Мелентьев В.С., Батищев В.И., Иванов Ю.М. Исследование метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям сигналов // Датчики и системы: методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации (Датчики и системы – 2012): труды Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – С. 11-16.

Статья поступила в редакцию 7 июня 2013 г.

THE ACCURACY INCREASE OF MEASUREMENT OF HARMONIOUS SIGNALS PARAMETERS ON THE BASIS OF ADDITIONAL VOLTAGE FORMATION

V.S. Melentiev, V.V. Muratova

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

The new method of measurement of harmonious signals parameters on their separate instant values is considered. Realization of a method provides exception of a voltage error of the phase-shifting block. Results of the analysis of a method's error because of a deviation of real signals from harmonious model are considered.

Keywords: *parameters of periodic signals, harmonious model, the instant values, the phase-shifting block, an error on the module, a methodical error.*

*Vladimir S. Melentiev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Vera V. Muratova, Postgraduate Student.*