

УДК 621.317

В. С. Мелентьев, В. И. Батищев, Ю. М. Иванов

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО МГНОВЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ СИГНАЛОВ¹

V. S. Melentiev, V. I. Batishchev, Y. M. Ivanov

RESEARCH OF THE METHOD OF MEASUREMENT OF INTEGRATED CHARACTERISTICS ON INSTANT VALUES OF SIGNALS

А н н о т а ц и я. Рассмотрен метод измерения интегральных характеристик гармонических сигналов, использующий как пространственное, так и временное разделение мгновенных значений сигналов. Приведены результаты анализа погрешности измерения интегральных характеристик из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели.

A b s t r a c t. The method of measurement of integrated characteristics of the harmonious signals, using both spatial, and time division of instant values of signals is considered. Results of the analysis of an error of measurement of integrated characteristics because of a deviation of a real signal from harmonious model are resulted.

К л ю ч е в ы е с л о в а: интегральные характеристики, мгновенные значения сигналов, гармоническая модель, погрешность.

K e y w o r d s: integrated characteristics, instant values of signals, harmonious model, an error.

Введение

В настоящее время получили распространение методы измерения интегральных характеристик гармонических сигналов (ИХГС) по их отдельным мгновенным значениям, не связанным с периодом входного сигнала, что предполагает два основных способа разделения мгновенных значений: во времени и в пространстве [1].

Второй способ требует формирования дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых по фазе относительно входных, и обеспечивает, в общем случае, сокращение времени измерения. При этом упрощение алгоритма измерения и аппаратной реализации обеспечивают методы, использующие в качестве дополнительных ортогональные составляющие сигналов [2].

Одним из существенных недостатков информационно-измерительных систем (ИИС), реализующих данные методы, является частотная погрешность фазосдвигающих блоков (ФСБ). Изменение частоты входного сигнала приводит к тому, что угол сдвига фаз ФСБ будет отличаться от $\pi/2$ [3]. Этот недостаток устраняется в методах измерения ИХГС, основанных на формировании дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых на одинаковые

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-00039-а).

(в общем случае произвольные) углы $\Delta\alpha$ [4]. Однако при отличии углов сдвига фаз в каналах напряжения и тока возникает существенная погрешность.

Исключения влияния частотной погрешности ФСБ и погрешности, обусловленной отличием углов сдвига фаз в каналах напряжения и тока, можно достичь, применив метод определения ИХГС по трем мгновенным значениям напряжения и тока с использованием переходов сигналов через нуль [5]. К недостаткам метода и реализующих его ИИС можно отнести достаточно большое время измерения, которое зависит от угла сдвига фаз между напряжением и током, и использование ФСБ в обоих измерительных каналах.

В статье исследуется новый метод измерения ИХГС, использующий только один переход сигнала через нуль и формирование только дополнительного сигнала напряжения.

Метод измерения интегральных характеристик с использованием пространственного и временного разделения мгновенных значений сигналов

Разработанный авторами метод измерения ИХГС заключается в следующем. В момент перехода входного сигнала напряжения через нуль одновременно измеряют мгновенное значение дополнительного напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол $\Delta\alpha$, и мгновенное значение тока; через интервал времени Δt одновременно измеряют мгновенные значения входного и дополнительного сигналов напряжения и тока. ИХГС определяют по измеренным значениям.

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

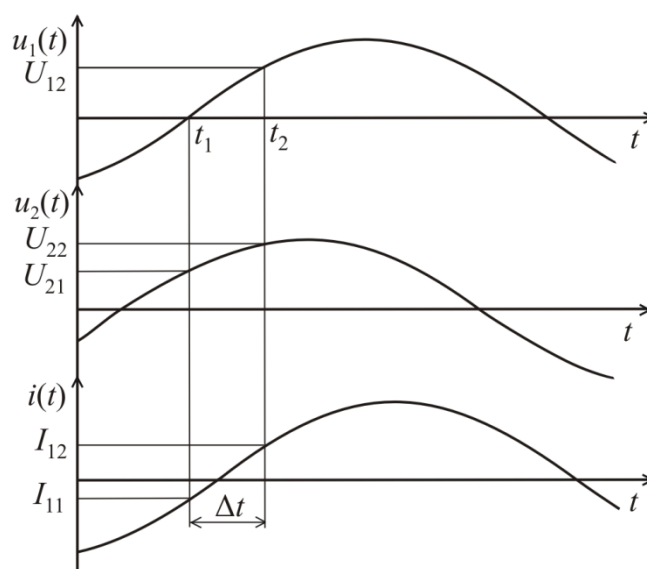


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Для входного напряжения $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ и тока $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ и дополнительного сигнала напряжения $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$ в момент времени t_1 , когда сигнал напряжения переходит через нуль, выражения для мгновенных значений примут следующий вид:

$$U_{21} = U_m \sin \Delta\alpha ; I_{11} = I_m \sin \varphi ,$$

где U_m , I_m – амплитудные значения сигналов напряжения и тока; φ – угол сдвига фаз между напряжением и током.

Через образцовый интервал времени δt (в момент времени t_2) мгновенные значения сигналов будут равны:

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

Используя мгновенные значения сигналов, после преобразований можно получить выражения для определения основных ИХГС:

– среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока:

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

$$I_{\text{СКЗ}} = \sqrt{\frac{2U_{21}U_{22}[2U_{21}U_{22}(I_{11}^2 + I_{12}^2) - I_{11}I_{12}(U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)]}{2[4U_{21}^2U_{22}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2]}}; \quad (2)$$

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

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

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

Схема ИИС, реализующей данный метод, представлена на рис. 2.

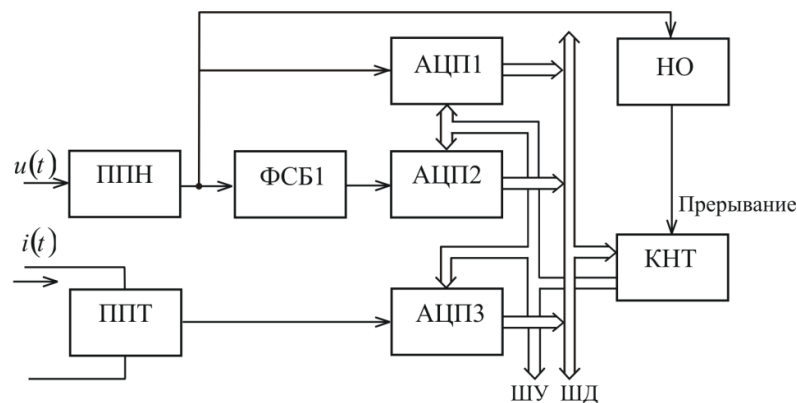


Рис. 2. Схема ИИС, реализующей метод

В состав ИИС входят первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ, аналого-цифровые преобразователи АЦП1 – АЦП3, нуль-орган НО, фазосдвигающий блок ФСБ1, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД.

Рассматриваемый метод предназначен для определения интегральных характеристик сигналов с гармоническими моделями. При наличии в сигналах высших гармоник неизбежно возникает погрешность.

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

Проведем оценку методической погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели. Для этого воспользуемся методикой оценки погрешности результата измерения интегральной характеристики как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала. Известно, что погрешность вычисления значения какой-либо функции, аргументы которой заданы приближенно, может быть оценена с помощью дифференциала этой функции. Погрешности функции соответствует возможное ее приращение, которое она получит, если аргументам дать приращения, равные их погрешностям [1].

Если абсолютные погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению моделей от реальных сигналов, то предельные значения абсолютных погрешностей определения интегральных характеристик сигналов в соответствии с (1)–(4) примут следующий вид:

$$\Delta U_{CK3} = \left[\left| (U_{CK3})'_{U_{21}} \right| + \left| (U_{CK3})'_{U_{12}} \right| + \left| (U_{CK3})'_{U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\max}; \quad (5)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left[\left| (I_{CK3})'_{I_{11}} \right| + \left| (I_{CK3})'_{I_{12}} \right| \right] \Delta I_{\max} + \left[\left| (I_{CK3})'_{U_{21}} \right| + \left| (I_{CK3})'_{U_{12}} \right| + \left| (I_{CK3})'_{U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\max}; \quad (6)$$

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

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

где $\Delta U_{\max}$, $\Delta I_{\max}$ – предельные абсолютные погрешности аргументов, соответствующие наибольшим отклонениям моделей от реальных сигналов.

В общем случае для сложных периодических сигналов $\Delta U_{\max} = U_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}$ и $\Delta I_{\max} = I_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}$, где $h_{uk} = \frac{U_{km}}{U_{1m}}$ и $h_{ik} = \frac{I_{km}}{I_{1m}}$ – коэффициенты k -тых гармоник напряжения и тока; U_{1m} и I_{1m} – амплитуды первых гармоник сигналов; U_{km} и I_{km} – амплитуды k -тых гармоник напряжения и тока.

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

$$\delta_{U_{CK3}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{2 \left(1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2 \right) |\sin \Delta \alpha \sin(\Delta \alpha + \omega \Delta t)|}} \left\{ \left| \sin \Delta \alpha [\sin \Delta \alpha - \sin(\Delta \alpha + 2\omega \Delta t)] \right| + \right. \\ \left. + 2 |\sin \omega \Delta t \cos \Delta \alpha \sin(\omega \Delta t + \Delta \alpha)| + |\cos(\omega \Delta t + 2\Delta \alpha)| \right\}; \quad (9)$$

$$\delta_{I_{CK3}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} [|\cos \varphi| + |\cos(\varphi - \omega \Delta t)|]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} |\sin \omega \Delta t|} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2 \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sin^2 \omega \Delta t |\sin \Delta \alpha \sin(\omega \Delta t + \Delta \alpha)|} \left[|\sin \omega \Delta t \cos \Delta \alpha| \times \right. \\ \left. \times |\cos \omega \Delta t + \cos(2\omega \Delta t + \varphi)| + |\sin \Delta \alpha + \sin(2\omega \Delta t + \Delta \alpha)| + |\sin \omega \Delta t| |2 \sin \varphi \sin(\omega \Delta t + \varphi) - 1| \right]; \quad (10)$$

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

$$\gamma_Q = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} \left(\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} |\sin \varphi|}{2 |\sin \Delta \alpha \sin \omega \Delta t \sin(\Delta \alpha + \omega \Delta t)|} \left\{ 2 \sin^2 \omega \Delta t |\cos \Delta \alpha \cos \omega \Delta t| + \right. \right.$$

$$+ |\cos \omega \Delta t + \cos(\omega \Delta t + 2\Delta\alpha)| + |\cos \omega \Delta t \sin \omega \Delta t| |\sin \Delta\alpha - \sin(2\omega \Delta t + \Delta\alpha)| \}. \quad (12)$$

Анализ выражений (9)–(12) показывает, что погрешности измерения ИХГС из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели зависят от спектра сигнала, угла сдвига фазы ФСБ и интервала времени Δt .

Кроме того, погрешности измерения СКЗ тока, АМ и РМ зависят и от угла сдвига фаз между первыми гармониками напряжения и тока.

В качестве примера на рис. 3 представлены графики зависимости относительной погрешности измерения СКЗ напряжения, обусловленной отклонением исследуемого сигнала, содержащего первую и третью гармоники с коэффициентом $h_{u3} = 1\%$, от гармонической модели, от $\Delta\alpha$ и $\omega\Delta t$, изменяющихся в диапазоне от 10 до 90° в соответствии с (9).

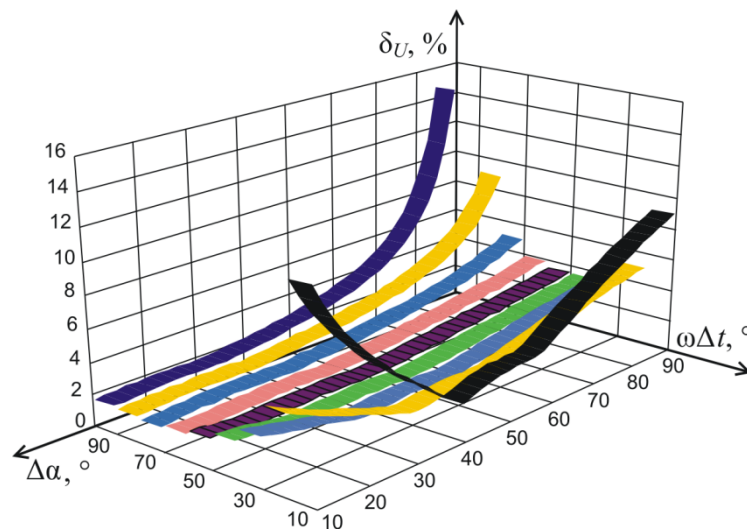


Рис. 3. Графики зависимости δ_U от $\Delta\alpha$ и $\omega\Delta t$

Из рис. 3 видно, что существуют значения $\Delta\alpha$ и $\omega\Delta t$, при которых относительная погрешность измерения СКЗ напряжения значительно снижается.

Заключение

Разработанный метод измерения ИХГС использует один переход сигнала через нуль и формирование только дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого на произвольный угол относительно входного. Это позволяет исключить угловую погрешность ФСБ и существенно уменьшить аппаратные затраты при реализации метода.

Проведенный анализ показывает, что наличие в сигналах высших гармоник приводит к существенному увеличению погрешности измерения интегральных характеристик.

Полученные результаты позволяют выбирать области использования метода в зависимости от спектра сигналов и требований по точности измерения, а также подбирать оптимальные параметры измерительного процесса для обеспечения наименьшей погрешности.

Список литературы

1. Мелентьев, В. С. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов / В. С. Мелентьев, В. И. Батищев. – М. : Физматлит, 2011. – 240 с.
2. Мелентьев, В. С. Синтез методов и систем измерения интегральных характеристик с использованием ортогональных составляющих гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, А. О. Лычев, А. А. Миронов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. XIV Междунар. конф. – Самара : Самар. науч. центр РАН, 2012. – С. 625–633.
3. Мелентьев, В. С. Методы измерения интегральных характеристик гармонических сигналов, основанные на сравнении ортогональных составляющих сигналов / В. С. Мелен-

- тьев, Д. В. Рудаков // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях : межвуз. сб. – Бийск : Изд-во АГТУ им. И. И. Ползунова, 2011. – Вып. 1. – С. 129–131.
4. Мелентьев, В. С. Метод измерения интегральных характеристик на основе сравнения мгновенных значений гармонических сигналов, распределенных в пространстве / В. С. Мелентьев, А. О. Лычев // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Технические науки. – 2011. – № 4 (32). – С. 236–239.
5. Совершенствование методов измерений интегральных характеристик гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, В. И. Батищев, А. Н. Камышникова, Д. В. Рудаков // Измерительная техника. – 2011. – № 4. – С. 32–34.

Мелентьев Владимир Сергеевич

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
информационно-измерительной техники, Самар-
ский государственный
технический университет
E-mail: vs_mel@mail.ru

Melent'ev Vladimir Sergeevich

doctor of technical sciences, associate professor,
head of sub-department
of information and measuring technique,
Samara State Technical University

Батищев Виталий Иванович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
информационных технологий,
Самарский государственный
технический университет
E-mail: vib@list.ru

Batishchev Vitaliy Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department
of information technology,
Samara State Technical University

Иванов Юрий Михайлович

кандидат технических наук,
младший научный сотрудник,
кафедра информационно-измерительной техники,
Самарский государственный
технический университет
E-mail: ims@samgtu.ru

Ivanov Yuriy Mikhaylovich

candidate of technical sciences, junior researcher,
sub-department of information
and measuring technique,
Samara State Technical University

УДК 621.317

Мелентьев, В. С.

Исследование метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям сигналов / В. С. Мелентьев, В. И. Батищев, Ю. М. Иванов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 2. – С. 92–97.