

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ*

А.Е. Сеницын

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

Приводятся результаты анализа метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям гармонических сигналов, разделенных как в пространстве, так и во времени.

Ключевые слова: интегральные характеристики, гармонические сигналы, мгновенные значения, характерные точки.

Определение параметров периодических процессов в течение периода сигнала находит широкое применение при контроле и испытаниях электромеханических систем, электротехнического оборудования, в системах автоматизированного управления.

В большинстве случаев периодические процессы различной физической природы преобразуются в электрические сигналы, удобные для измерения и обработки.

Особенно следует отметить гармонические сигналы, которые широко используются в измерительной технике для анализа и синтеза измерительных сигналов.

В настоящее время успешно развивается направление, связанное с разработкой методов и средств измерения интегральных характеристик по отдельным мгновенным значениям гармонических и дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно входного сигнала [1].

В [2] предложен метод определения ИХГС, использующий как пространственное, так и временное разделение мгновенных значений сигналов и отличающийся от известных использованием характерных точек (переход сигнала через ноль).

В соответствии с данным методом в момент перехода входного сигнала напряжения через ноль одновременно измеряют первое мгновенное значение дополнительного напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол $\Delta\alpha$, и первые мгновенные значения входного сигнала тока и сдвинутого относительно него по фазе на угол $\Delta\alpha$ дополнительного сигнала тока; через интервал времени Δt одновременно измеряют вторые мгновенные значения входного и дополнительного сигналов напряжения и определяют ИХГС по измеренным значениям.

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рисунке.

Если сигналы напряжения и тока в исследуемой цепи имеют гармонические модели, то входные и дополнительные сигналы напряжения и тока имеют вид

$$u(t) = U_m \sin \omega t; \quad i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi); \quad u'(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha); \\ i'(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi + \Delta\alpha),$$

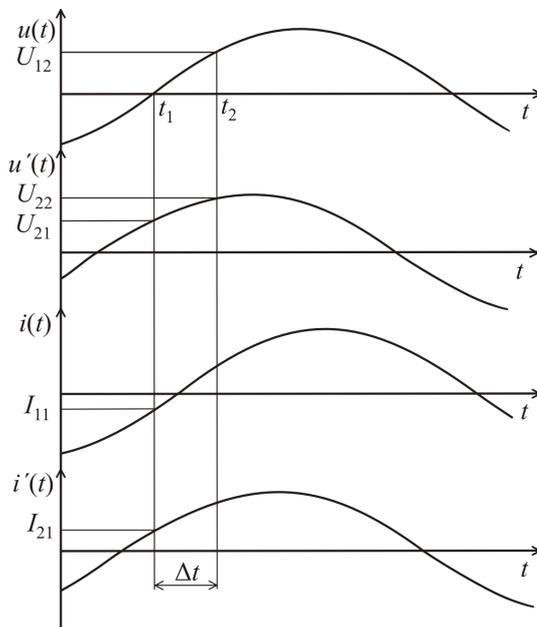
где U_m, I_m – амплитудные значения сигналов напряжения и тока;

ω – угловая частота входного сигнала;

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

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

Антон Евгеньевич Сеницын, аспирант.



Временные диаграммы, поясняющие метод

Согласно методу мгновенные значения сигналов напряжения и тока равны:

$$\begin{cases} U_{21} = U_m \sin \Delta\alpha; \\ U_{12} = U_m \sin \omega\Delta t; \\ U_{22} = U_m \sin(\Delta\alpha + \omega\Delta t); \\ I_{11} = I_m \sin \varphi; \\ I_{21} = I_m \sin(\varphi + \Delta\alpha). \end{cases} \quad (1)$$

В соответствии с (1) ИХГС определяются согласно выражениям:
– среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока

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

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

– активная (АМ) и реактивная (РМ) мощности

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

$$Q = \frac{U_{12}I_{11}}{2 \sqrt{1 - \left(\frac{U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2}{2U_{22}U_{21}} \right)^2}}. \quad (5)$$

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

Проведем оценку методической погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели. Для этого используем предложенную в [1] методику оценки погрешности результата измерения интегральной характеристики как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала. Как известно, погрешность вычисления значения какой-либо функции, аргументы которой заданы приближенно, может быть оценена с помощью дифференциала этой функции. Погрешность функции есть не что иное, как возможное приращение функции, которое она получит, если ее аргументам дать приращения, равные их погрешностям.

Пусть предельные абсолютные погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению моделей от реальных сигналов. В этом случае предельные значения абсолютных погрешностей определения интегральных характеристик сигналов в соответствии с (2) – (5) будут равны:

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

$$\begin{aligned} \Delta I_{CK3} &= \left[\left| (I_{CK3})'_{I_{11}} \right| + \left| (I_{CK3})'_{I_{21}} \right| \right] \Delta I_{\max} + \\ &+ \left[\left| (I_{CK3})'_{U_{21}} \right| + \left| (I_{CK3})'_{U_{12}} \right| + \left| (I_{CK3})'_{U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\max}; \end{aligned} \quad (7)$$

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

$$\Delta Q = \left| (Q)'_{I_{11}} \right| \Delta I_{\max} + \left[\left| (Q)'_{U_{21}} \right| + \left| (Q)'_{U_{12}} \right| + \left| (Q)'_{U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\max}; \quad (9)$$

где ΔU_{\max} , ΔI_{\max} – предельные абсолютные погрешности аргументов, соответствующие наибольшим отклонениям моделей от реальных сигналов.

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

Используя выражения (2) – (5) и предельные значения абсолютных погрешностей (6) – (9), можно определить относительные погрешности определения СКЗ напряжения и тока и приведенные погрешности определения АМ и РМ:

$$\delta_{U_{СКЗ}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \left\{ \cos \omega \Delta t \left[\left| \cos(\Delta \alpha + \omega \Delta t) \right| + \left| \cos \Delta \alpha \right| \right] + 0,5 \left| \cos(2\Delta \alpha + \omega \Delta t) \right| \right\}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2 \left| \sin \omega \Delta t \sin \Delta \alpha \sin(\Delta \alpha + \omega \Delta t) \right|}}; \quad (10)$$

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

$$\times \left\{ \left| \sin \varphi \sin(\varphi + \omega \Delta t) - 0,5 \right| + \left| \cos \varphi \cos(\varphi + \omega \Delta t) - 0,5 \right| \left[\left| \cos(\Delta \alpha + \omega \Delta t) \right| + \left| \cos \Delta \alpha \right| \right] \right\}; \quad (11)$$

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

$$\times \left\{ \left| \cos \varphi \cos \Delta \alpha \cos(\Delta \alpha + \omega \Delta t) + \cos(\varphi + \omega \Delta t) \right| + \left| \cos \varphi \cos \omega \Delta t + \cos(\varphi + \omega \Delta t) \right| \times \right.$$

$$\left. \times \left[\left| \cos(\Delta \alpha + \omega \Delta t) \right| + \left| \cos \Delta \alpha \right| \right] \right\}; \quad (12)$$

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

$$\times \left\{ \left| \cos(2\Delta \alpha + \omega \Delta t) \right| + \sin^2 \omega \Delta t \left| \cos \omega \Delta t \right| \left[\left| \cos \Delta \alpha \right| + \left| \cos(\Delta \alpha + \omega \Delta t) \right| \right] \right\}. \quad (13)$$

Анализ выражений (10) – (13) показывает, что относительные погрешности определения СКЗ напряжения и тока и приведенные погрешности определения АМ и РМ зависят от гармонического состава сигналов, угла сдвига фаз $\Delta \alpha$ и интервала времени Δt . Кроме того, погрешности $\delta_{I_{СКЗ}}$, γ_P и γ_Q зависят от угла сдвига фаз φ .

Полученные результаты позволяют выбирать области использования метода в зависимости от предъявляемых требований по точности измерения.

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., Рудаков Д.В. Методы измерения интегральных характеристик гармонических сигналов, основанные на сравнении ортогональных составляющих сигналов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвуз. сборник. – Вып. 1. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2011. – С. 129-131.
3. Батищев В.И., Мелентьев В.С. Аппроксимационные методы и системы промышленных измерений, контроля, испытаний, диагностики. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 393 с.

4. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Синицын А.Е. Метод измерения интегральных характеристик гармонических сигналов по мгновенным значениям их ортогональных составляющих // Современные инновации в науке и технике: Матер. II-й Междунар. науч.-практ. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2012. – С. 123, 124.

Статья поступила в редакцию 20 августа 2012 г.

THE SYNTHESIS OF METHODS OF MEASUREMENT OF INTEGRATED CHARACTERISTICS ON INSTANT VALUES OF ORTHOGONAL MAKING HARMONIOUS SIGNALS

A.E. Sinitsyn

Classification of methods of measurement of integrated characteristics by instant values with use of orthogonal harmonious signals is considered. The new approach to the synthesis of such methods is offered. Four methods synthesized on the basis of the given approach are examined.

Keywords: *integrated characteristics, harmonious signals, instant values, orthogonal components of signals, comparison of signals, characteristic points.*

Anton E. Sinitsyn, Postgraduate Student.