

УДК 621.317

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ИНВАРИАНТНЫЙ К ПОГРЕШНОСТЯМ ФОРМИРОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА

© 2014 В.С. Мелентьев, В.В. Муратова, Ю.М. Иванов

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 10.02.2014

В статье рассматривается новый метод измерения характеристик периодических сигналов, позволяющий повысить точность измерения. Приводятся результаты анализа погрешности измерения интегральных характеристик из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели.

Ключевые слова: *периодический процесс, гармоническая модель, фазосдвигающий блок, высшие гармоники, погрешность*

В системах автоматического управления технологическими процессами, обработки информации, в электроэнергетике, радиотехнике, технике связи широко используется измерение интегральных характеристик периодических сигналов: среднеквадратических значений (СКЗ) напряжения и тока, активной (АМ) и реактивной (РМ) мощности. В настоящее время успешно развивается направление, связанное с разработкой методов и систем определения интегральных характеристик гармонических сигналов (ИХГС) по отдельным мгновенным значениям, не связанным с периодом входного сигнала, что позволяет сократить время измерения [1]. При реализации данных методов часто считают, что модель сигнала – гармоническая и оценивают погрешность, обусловленную отклонением модели от реального сигнала. Широко распространенные методы, в которых для определения ИХГС используют дополнительные сигналы, сдвинутые относительно входных на определенный угол, обеспечивают дальнейшее сокращение времени измерения [2]. Если в качестве дополнительных сигналов использовать их ортогональные составляющие, то это упрощает реализацию, однако возникает существенный недостаток – частотная погрешность фазосдвигающих блоков (ФСБ), обеспечивающих сдвиг дополнительных сигналов на 90° [3]. Этот недостаток устраняется в методах измерения ИХГС, использующих сдвиг сигналов на произвольный угол

$\Delta\alpha$ [4]. Однако при отличии углов сдвига фаз в каналах напряжения и тока возникает дополнительная погрешность. Реализация методов, использующих формирование только дополнительного сигнала напряжения, может привести к возникновению погрешности по напряжению (погрешности по модулю) ФСБ, обусловленной отличием амплитуд входного и дополнительного сигналов [5].

В [6] авторами разработан метод, который обеспечивает повышение точности измерения ИХГС за счет исключения данного вида погрешности. Однако реализация метода предусматривает проведение дополнительных измерений мгновенных значений как входного, так и дополнительного сигналов с целью определения корректирующего коэффициента, что увеличивает время определения параметров и аппаратные затраты. В статье рассматривается новый метод, не требующий специальной коррекции мгновенных значений сигналов и инвариантный к погрешностям формирования дополнительного сигнала.

Метод измерения интегральных характеристик на основе сравнения мгновенных значений гармонических сигналов, разделенных в пространстве. Разработанный авторами метод измерения ИХГС основан на формировании двух дополнительных сигналов напряжения: первого – инверсного входному и второго – сдвинутого относительно входного на произвольный угол $\Delta\alpha$. Метод заключается в том, что в момент равенства дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол $\Delta\alpha$, и сигнала, инверсного входному, измеряют первые мгновенные значения входного напряжения и тока; в момент равенства дополнительного и входного напряжений

Мелентьев Владимир Сергеевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой. E-mail: vs_mel@mail.ru
Муратова Вера Владимировна, преподаватель. E-mail: muratova1991@yandex.ru
Иванов Юрий Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. E-mail: fuego27@rambler.ru

измеряют вторые мгновенные значения входных сигналов напряжения и тока. ИХГС определяют по измеренным значениям. Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 1.

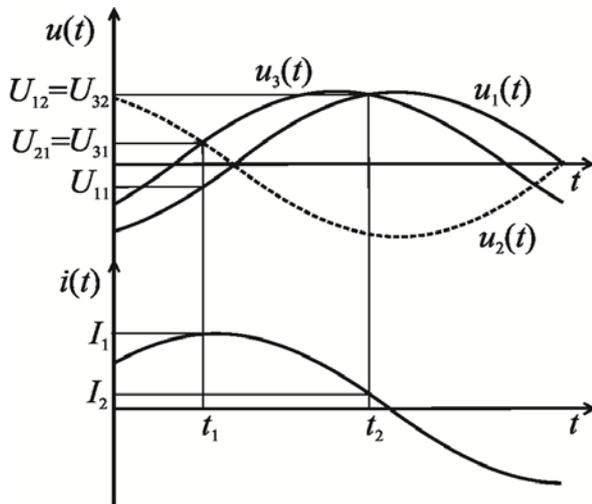


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Если входные напряжение и ток имеют гармонические модели: $u_1(t) = U_m \sin \omega t$; $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, то дополнительные напряжения примут вид: $u_2(t) = -U_m \sin \omega t$ и $u_3(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$, где U_m и I_m – амплитудные значения напряжения и тока; ω – угловая частота входного сигнала; φ – угол сдвига фаз между входными напряжением и током.

В момент времени t_1 , когда $U_{21} = U_{31}$, мгновенные значения сигналов примут вид:

$$\begin{aligned} U_{11} &= U_m \sin \alpha_1; \\ U_{21} &= -U_m \sin \alpha_1; U_{31} = U_m \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha); \\ I_1 &= I_m \sin(\alpha_1 + \varphi), \end{aligned}$$

где α_1 – начальная фаза входного напряжения в момент времени t_1 .

Равенство мгновенных значений сигналов $U_{21} = U_{31}$ выполняется в том случае, если $\alpha_1 = \alpha_1 + \Delta\alpha$ ($\Delta\alpha \neq 0$), то есть, когда $\Delta\alpha = 2\pi l - 2\alpha_1$ или $\alpha_1 = \pi l - \frac{\Delta\alpha}{2}$, где $l=0, 1$. Отсюда, при $l=0$ $U_{11} = U_m \sin\left(-\frac{\Delta\alpha}{2}\right)$, а при $l=1$ $U_{11} = U_m \sin\frac{\Delta\alpha}{2}$, то есть $U_{11} = \pm U_m \sin\frac{\Delta\alpha}{2}$. В этом случае $I_1 = I_m \sin\left(\pi l + \varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right)$ или

$$I_1 = \pm I_m \sin\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right).$$

В момент времени t_2 , когда $U_{12} = U_{32}$, мгновенные значения сигналов примут вид:

$$\begin{aligned} U_{12} &= U_m \sin \alpha_2; U_{32} = U_m \sin(\alpha_2 + \Delta\alpha); \\ I_2 &= I_m \sin(\alpha_2 + \varphi), \end{aligned}$$

где α_2 – начальная фаза входного напряжения в момент времени t_2 .

Равенство мгновенных значений сигналов $U_{12} = U_{32}$ выполняется в том случае, если $\alpha_2 = \alpha_2 + \Delta\alpha$, то есть, когда $\Delta\alpha = \pi + 2\pi l - 2\alpha_2$ или $\alpha_2 = \frac{3\pi l}{2} - \frac{\Delta\alpha}{2}$. Отсюда, $U_{12} = \pm U_m \cos\frac{\Delta\alpha}{2}$ и $I_2 = \pm I_m \cos\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right)$.

Используя мгновенные значения сигналов, после преобразований получим выражения для определения ИХГС:

- СКЗ напряжения и тока

$$U_{СКЗ} = \sqrt{\frac{U_{11}^2 + U_{12}^2}{2}}; \tag{1}$$

$$I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2}{2}}; \tag{2}$$

- активная и реактивная мощности

$$P = \frac{I_2|U_{12}| - I_1|U_{11}|}{2}; \tag{3}$$

$$Q = \frac{I_1|U_{12}| + I_2|U_{11}|}{2}. \tag{4}$$

Информационно-измерительная система (ИИС), реализующая метод представлена на рис. 2.

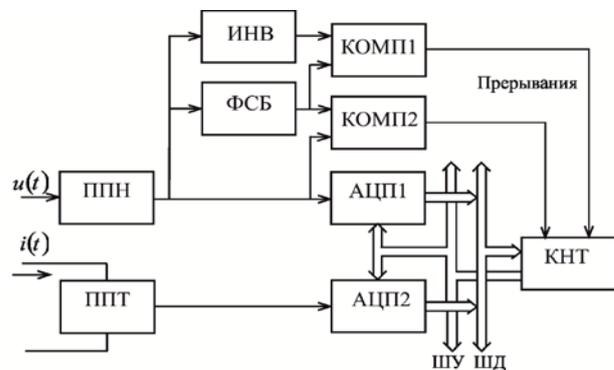


Рис. 2. Схема ИИС, реализующей метод

В состав ИИС входят: первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ, аналого-цифровые преобразователи АЦП1 и АЦП2, компараторы КОМП1 и КОМП2, фазосдвигающий

блок ФСБ, осуществляющий сдвиг входного напряжения на угол $\Delta\alpha$, инвертор ИНВ, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД. Анализ показывает, что в случае наличия погрешности по модулю ФСБ дополнительный сигнал напряжения примет вид

$$u_3(t) = U_{m3} \sin(\omega t + \Delta\alpha),$$

где U_{m3} - амплитудное значение напряжения на выходе фазосдвигающего блока.

В этом случае равенство мгновенных значений сигналов напряжения произойдет в моменты времени t'_1 и t'_2

$$\begin{aligned} U'_{21} = U'_{31} = U_{m3} \sin(\alpha'_1 + \Delta\alpha) \text{ и} \\ U'_{12} = U'_{32} = U_{m3} \sin(\alpha'_2 + \Delta\alpha). \end{aligned}$$

Поскольку изначально считалось, угол сдвига $\Delta\alpha$ – произвольный, то это не приведет к погрешности, а сместит моменты равенства сигналов. Таким образом, метод и реализующая его ИИС инвариантны к погрешностям формирования дополнительного сигнала. Предлагаемый

метод предназначен для измерения 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. Для анализа методической погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели, используем методику оценки погрешности результата измерения интегральной характеристики как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала. Погрешность вычисления значения какой-либо функции, аргументы которой заданы приближенно, может быть оценена с помощью дифференциала этой функции [1]. Если абсолютные погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению моделей от реальных сигналов, то предельные значения абсолютных погрешностей определения характеристик сигналов в соответствии с (1) – (4) примут вид:

$$\Delta U_{CK3} = \left[\left| (U_{CK3})'_{U_{11}} \right| + \left| (U_{CK3})'_{U_{12}} \right| \right] \Delta U_{\max}; \quad (5)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left[\left| (I_{CK3})'_{I_1} \right| + \left| (I_{CK3})'_{I_2} \right| \right] \Delta I_{\max}; \quad (6)$$

$$\Delta P = \left[\left| (P)'_{I_1} \right| + \left| (P)'_{I_2} \right| \right] \Delta I_{\max} + \left[\left| (P)'_{U_{11}} \right| + \left| (P)'_{U_{12}} \right| \right] \Delta U_{\max}; \quad (7)$$

$$\Delta Q = \left[\left| (Q)'_{I_1} \right| + \left| (Q)'_{I_2} \right| \right] \Delta I_{\max} + \left[\left| (Q)'_{U_{11}} \right| + \left| (Q)'_{U_{12}} \right| \right] \Delta U_{\max}, \quad (8)$$

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

В общем случае предельные абсолютные погрешности, соответствующие наибольшим отклонениям моделей от реальных сигналов имеют вид:

$$\Delta U_{\max} = U_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \quad \text{и} \quad \Delta I_{\max} = I_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik},$$

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)-(8), можно определить относительные погрешности измерения СКЗ напряжения и

тока и приведенные погрешности измерения АМ и РМ:

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

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

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

На рис. 3 представлен график зависимости относительной погрешности измерения СКЗ напряжения от $\Delta\alpha$ в соответствии с (9) при наличие в сигнале первой и третьей гармоник с $h_{U3} = 1\%$.

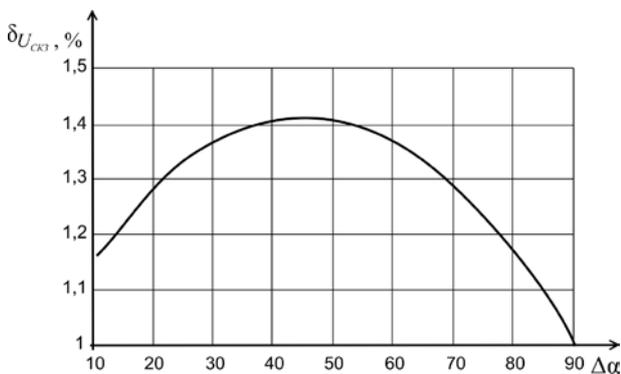


Рис. 3. График зависимости δ_U от $\Delta\alpha$

На рис. 4 и 5 представлены графики зависимости погрешности измерения СКЗ тока, АМ и РМ от $\Delta\alpha$ и φ согласно (10) и (11) при наличие в сигнале первой и третьей гармоник с $h_{U3} = h_{I3} = 1\%$.

Анализ выражений (9)-(11) и рис. 3-5 показывает, что погрешности измерения ИХГС из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели зависят от спектра сигнала и угла сдвига фазы ФСБ. Кроме того, погрешности измерения СКЗ тока, АМ и РМ зависят также и от угла сдвига фаз между первыми гармониками напряжения и тока.

Выводы: разработанный метод измерения ИХГС использует формирование дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого на произвольный угол относительно входного и сигнала, инверсного входному. Поскольку инверторы, используемые для этих целей, могут обеспечивать погрешность в сотые доли процента, то это позволяет исключить угловую погрешность и погрешность по напряжению ИНВ. Проведенный анализ показывает, что наличие в сигналах высших гармоник приводит к существенному увеличению погрешности измерения ИХГС.

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.

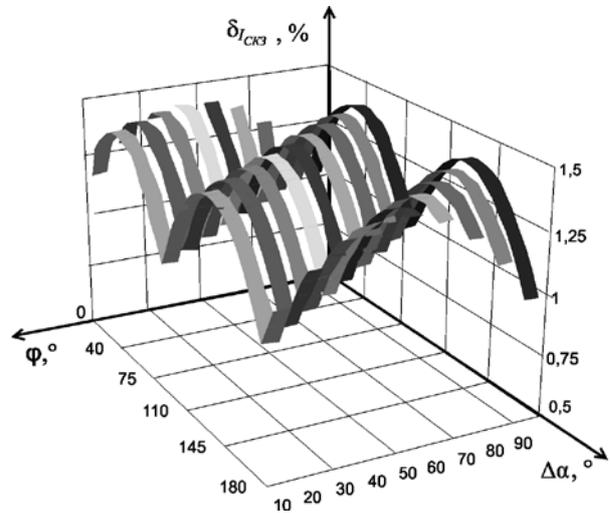


Рис. 4. Графики зависимости δ_I от $\Delta\alpha$ и φ

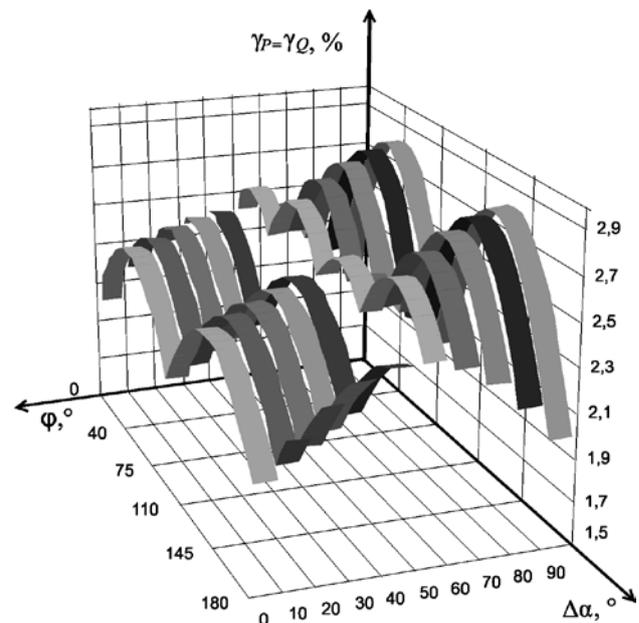


Рис. 5. Графики зависимости $\gamma_P = \gamma_Q$ от $\Delta\alpha$ и φ

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

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. Методы измерения интегральных характеристик на основе формирования дополнительных сигналов / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, А.Е. Сеницын // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2013. № 2 (38). С. 56-63.
3. Мелентьев, В.С. Синтез методов измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, А.Е. Сеницын // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2012. № 3 (35). С. 84-89.
4. Мелентьев, В.С. Исследование метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям сигналов / В.С. Мелентьев, В.И. Батищев, Ю.М. Иванов // 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.
5. Иванов, Ю.М. Оценка погрешности средства измерения интегральных характеристик гармонических сигналов с фазосдвигающими блоками / Ю.М. Иванов, А.Е. Сеницын, А.В. Симонов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2013. №1 (37). С. 48-52.
6. Мелентьев, В.С. Метод повышения точности измерения характеристик периодических процессов / В.С. Мелентьев, В.В. Муратова, Ю.М. Иванов // Известия Самар. науч. центра РАН. 2013. Том 15. № 4(2). С. 376-380.

METHOD OF MEASUREMENT THE CHARACTERISTICS OF PERIODIC SIGNALS, INVARIANT TO THE ERRORS OF ADDITIONAL SIGNAL FORMATION

© 2014 V.S. Melentyev, V.V. Muratova, Yu.M. Ivanov

Samara State Technical University

In article the new method of measurement the characteristics of periodic signals, allowing to increase the measurement accuracy is considered. Results of the analysis the error of integral characteristics because of deviation the actual signal from harmonic model are given.

Key words: *periodic process, harmonic model, phase moving block, upper harmonics, error*

Vladimir Melentyev, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department. E-mail: vs_mel@mail.ru

Vera Muratova, Teacher. E-mail: muratova1991@yandex.ru

Yuriy Ivanov, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow. E-mail: fuego27@rambler.ru