УДК 621.317

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

© 2013 В.С. Мелентьев, В.В. Муратова, Ю.М. Иванов

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 25.04.2013

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

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

Современное состояние техники характеризуется широкой автоматизацией различных технологических процессов, невозможных без измерения и контроля различных величин. Измерение параметров процессов, являющихся периодическими в течение времени измерения, находит чрезвычайно широкое применение в системах автоматизированного управления технологическими процессами, при этом в большинстве случаев периодические процессы различной физической природы преобразуются в электрические сигналы, удобные для измерения и обработки. Особую роль играют гармонические сигналы, которые широко используются для контроля и анализа различных процессов. В настоящее время успешно развивается направление, связанное с разработкой методов и средств измерения характеристик гармонических сигналов (ХГС) по отдельным мгновенным значениям, не связанным с периодом входного сигнала [1]. Одним из подходов, используемых для реализации методов, является разделение мгновенных значений в пространстве за счет формирования дополнительных напряжения и тока, сдвинутых по фазе относительно входных [2]. Это обеспечивает существенное сокращение времени определения ХГС. Если в качестве дополнительных сигналов использовать ортогональные составляющие, то это обеспечит упрощение алгоритма измерения и аппаратной реализации методов [3]. Одним из существенных недостатков измерительных систем, реализующих данные методы, является

Мелентьев Владимир Сергеевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой. E-mail: vs_mel@mail.ru Муратова Вера Владимировна, инженер. E-mail: muratova1991@yandex.ru

Иванов Юрий Михайлович, кандидат технических наук,старший научный сотрудник. E-mail: fuego27@rambler.ru

частотная погрешность фазосдвигающих блоков (ФСБ). В результате этого изменение частоты входного сигнала приводит к тому, что угол сдвига фаз ФСБ будет отличаться от $\pi/2$. Этот недостаток устраняется в методах измерения ХГС, использующих сравнение основных и дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых на произвольный угол $\Delta \alpha$ [4]. Однако при отличии углов сдвига фаз в каналах напряжения и тока возникает погрешность. Исключение погрешности, обусловленной отличием углов сдвига фаз в измерительных каналах, обеспечивает метод определения ХГС по трем мгновенным значениям напряжения и тока с использованием переходов сигналов через ноль [5]. Недостатком данного метода и реализующих его систем является достаточно большое время измерения, которое зависит от угла сдвига фаз между напряжением и током.

В [6] авторами предложен метод измерения ХГС, который заключается в том, что в момент перехода входного сигнала напряжения через ноль 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. К несомненным достоинствам метода следует отнести тот факт, что угол сдвига фаз между входным и дополнительным сигналами напряжения $\Delta \alpha$ может принимать (в общем случае) произвольные значения, то есть исключается влияние угловой погрешности ФСБ. Однако погрешность по напряжению (погрешность по модулю) ФСБ может привести к значительной потери точности измерения ХГС. Наличие данного вида погрешности приводит к отклонению амплитуды дополнительного сигнала от амплитуды входного.

Метод измерения характеристик гармонических сигналов с пространственным и временным разделением мгновенных значений. Авторами разработан новый метод, который обеспечивает повышение точности измерения ХГС за счет исключения данного вида погрешности. Метод заключается в том, что в момент перехода дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол $\Delta\alpha$, через ноль измеряют мгновенное значение входного напряжения; в момент перехода входного напряжения через ноль одновременно измеряют мгновенное значение дополнительного напряжения и мгновенное значение тока; через интервал времени Δt одновременно измеряют мгновенные значения входного и дополнительного сигналов напряжения и тока. ХГС определяют по измеренным значениям. Временные диаграммы, поясняющие представлены на рис. 1.

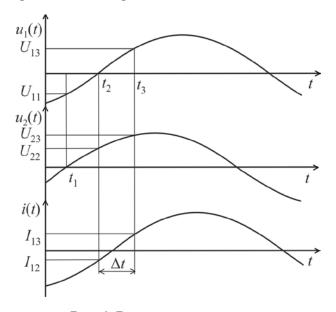


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Если входные напряжение, ток и дополнительный сигнал напряжения имеют гармонические модели: $u_1(t)=U_{m1}\mathrm{sin}\omega t;\ i(t)=I_m\mathrm{sin}(\omega t+\phi)$ и $u_2(t)=U_{m2}\sin(\omega t+\Delta\alpha)$, то в момент времени, когда дополнительный сигнал напряжения переходит через ноль, выражение для мгновенного значения напряжения примет вид:

$$U_{11} = U_{m1} \sin(-\Delta \alpha)$$

где U_{m1} , U_{m2} , I_m - амплитудные значения входного и дополнительного сигналов напряжения и тока; ω – угловая частота входного сигнала; ϕ – угол сдвига фаз между напряжением и током.

В момент времени, когда входное напряжение переходит через ноль, мгновенные значения сигналов будут равны:

$$U_{22} = U_{m2} \sin \Delta \alpha \cdot I_{12} = I_m \sin \varphi$$

Через образцовый интервал времени Δt мгновенные значения сигналов будут определяться выражениями:

$$U_{13} = U_{m1} \sin \omega \Delta t ; U_{23} = U_{m2} \sin(\Delta \alpha + \omega \Delta t);$$

$$I_{13} = I_{m} \sin(\varphi + \omega \Delta t);$$

Погрешность по напряжению ФСБ может быть оценена коэффициентом

$$k_m = \frac{U_{m1}}{U_{m2}} = \left| \frac{U_{11}}{U_{22}} \right|$$
.С помощью данного коэффи-

циента, можно скорректировать мгновенные значения дополнительного напряжения:

$$U'_{22} = k_m U_{22} = U_{m1} \sin \Delta \alpha$$
;
 $U'_{23} = k_m U_{23} = U_{m1} \sin (\Delta \alpha + \omega \Delta t)$

Используя скорректированные мгновенные значения сигналов, после преобразований можно получить выражения для определения основных $X\Gamma C$ в случае, если $\Delta \alpha \le 90^\circ$:

- среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока

$$U_{CK3} = \frac{\sqrt{2}|U_{13}U'_{22}U'_{23}|}{\sqrt{\left[4U'_{22}^{2}U'_{23}^{2} - \left(U'_{22}^{2} - U_{13}^{2} + U'_{23}^{2}\right)^{2}\right]}};$$

$$I_{CK3} = \sqrt{\frac{U'_{22}U'_{23}\left[2U'_{22}U'_{23}\left(I_{12}^{2} + I_{13}^{2}\right) - I_{12}I_{13}\left(U'_{22}^{2} - U_{13}^{2} + U'_{23}^{2}\right)\right]}{4U'_{22}^{2}U'_{23}^{2} - \left(U'_{22}^{2} - U_{13}^{2} + U'_{23}^{2}\right)^{2}}};$$
(1)

- активная (АМ) и реактивная (РМ) мощности

$$P = \frac{\left| U_{13} U_{22}' U_{23}' \left[2I_{13} U_{22}' U_{23}' - I_{12} \left(U_{22}'^2 - U_{13}^2 + U_{23}'^2 \right) \right]}{\left[4U_{22}'^2 U_{23}'^2 - \left(U_{22}'^2 - U_{13}^2 + U_{23}'^2 \right)^2 \right]};$$
(3)

$$Q = \frac{I_{12} \left| U_{13} U_{22}' U_{23}' \right|}{\sqrt{4U_{22}'^2 U_{23}'^2 - \left(U_{22}'^2 - U_{13}^2 + U_{23}'^2 \right)^2}}.$$
(4)

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

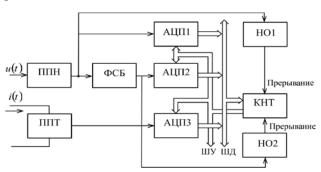


Рис. 2. Схема ИИС, реализующей метод

В состав ИИС входят: первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ, аналогоцифровые преобразователи АЦП1 — АЦП3, нуль-органы НО1 и НО2, фазосдвигающий блок ФСБ, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД. Рассматриваемый метод предназначен для определения ХГС 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 характеристик сигналов в соответствии с (1)-(4) примут вид:

$$\Delta U_{CK3} = \left[\left| (U_{CK3})'_{U_{22}} \right| + \left| (U_{CK3})'_{U_{13}} \right| + \left| (U_{CK3})'_{U_{23}} \right| \right] \Delta U_{\text{max}}; \tag{5}$$

$$\Delta I_{CK3} = \left[\left| (I_{CK3})'_{I_{12}} \right| + \left| (I_{CK3})'_{I_{13}} \right| \right] \Delta I_{\text{max}} + \left[\left| (I_{CK3})'_{U_{22}} \right| + \left| (I_{CK3})'_{U_{13}} \right| + \left| (I_{CK3})'_{U_{23}} \right| \right] \Delta U_{\text{max}}; \tag{6}$$

$$\Delta P = \left[\left| (P)'_{I_{12}} \right| + \left| (P)'_{I_{13}} \right| \right] \Delta I_{\text{max}} + \left[\left| (P)'_{U_{22}} \right| + \left| (P)'_{U_{13}} \right| + \left| (P)'_{U_{23}} \right| \right] \Delta U_{\text{max}}; \tag{7}$$

$$\Delta Q = \left| (Q)'_{I_{12}} \right| \Delta I_{\text{max}} + \left[\left| (Q)'_{U_{22}} \right| + \left| (Q)'_{U_{13}} \right| + \left| (Q)'_{U_{23}} \right| \right] \Delta U_{\text{max}}; \tag{8}$$

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

ских 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

В общем случае для сложных периодиче-

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:

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

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

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

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

Анализ выражений (9)-(12) показывает, что погрешности измерения XГС 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 также и от угла сдвига фаз между первыми гармониками напряжения и тока.

Выводы: разработанный метод измерения XГС использует формирование только дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого на произвольный угол относительно входного. Это позволяет исключить угловую погрешность и погрешность по напряжению ФСБ. 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.

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.

- Мелентьев, В.С. 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.
- 3. 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: Труды XIV междунар. конф. Самара: Самар. науч. центр РАН, 2012. С. 625-633.
- 4. *Мелентьев*, *В.С.* Использование компарирования мгновенных значений периодических сигналов для определения их интегральных характеристик / *В.С. Мелентьев*, *Е.Г. Кожевн*икова // Вестник Самар.

- гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2010. №7(28). С. 225-228.
- 5. 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.
- 6. 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: Издво ПГУ, 2012. С. 11-16.

METHOD OF INCREASING THE ACCURACY OF MEASUREMENT THE CHARACTERISTICS OF PERIODIC PROCESSES

© 2013 V.S. Melentyev, V.V. Muratova, Yu.M. Ivanov

Samara State Technical University

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

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