

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.317

В. С. Мелентьев, Е. В. Поздеева, А. С. Пескова, Д. И. Нефедьев

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПО ИХ МГНОВЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ, ИЗМЕРЕННЫМ ОДИН РАЗ В ТЕЧЕНИЕ ПЕРИОДА¹

V. S. Melent'ev, E. V. Pozdeeva, A. S. Peskova, D. I. Nefed'ev

METHOD OF DETERMINATION OF PARAMETERS OF HARMONIC SIGNALS BY THEIR INSTANTANEOUS VALUES, MEASURED ONCE DURING THE PERIOD

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Предметом исследования является метод определения параметров, основанный на формировании двух дополнительных напряжений и одного дополнительного тока, сдвинутых относительно входных по фазе. Целью работы является разработка и исследование нового метода определения параметров гармонических сигналов, реализация которого предусматривает одновременное измерение мгновенных значений входных и дополнительных сигналов один раз в течение периода и обеспечивает сокращение времени измерения. *Материалы и методы.* Предложен подход к определению параметров на основе формирования дополнительных напряжений и тока, сдвинутых на произвольный угол относительно входных сигналов, и измерения мгновенных значений сигналов один раз за период. При анализе погрешности, обусловленной отклонением реальных сигналов от принятой гармонической модели, используется известная методика, основанная на оценке погрешности результата измерения параметра как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, характеризующей отклонение модели от реального сигнала в соответствующих точках. *Результаты.* Использование нового подхода к определению параметров гармонических сигналов позволило разработать метод, который, в отличие от большинства известных методов, основанных на формировании дополнительных сигналов, исключает частотную погрешность фазосдвигающих блоков, осуществляющих формирование дополнительных сигналов. Приведены результаты оценки степени отклонения реальных сигналов от гармонической модели на результирующую погрешность определения параметров. *Выводы.* Разработанный метод определения информативных параметров сокращает время измерения за счет однократного и одновременного измерения мгновенных значений сигналов. Полученные в работе результаты позволяют выбирать оптимальные параметры фазосдвигающих блоков, осуществляющих формирование дополнительных сигналов, в соответствии с требованиями по точности измерения.

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 16-08-00252 А).

Abstract. Background. The subject of research is the method of measuring, based on the formation of two additional voltages and additional current, shifted relative to the input phase. The purpose of work is development and investigation of a new method determine the parameters of harmonic signals, the implementation of which includes simultaneous measurement of the instantaneous values of the input and additional signals once per period, that reduces the time of measurement. *Materials and methods.* The approach to the determination of the parameters on the basis of the formation of additional voltage and current, shifted by an arbitrary angle relative to the input signals, and measuring the instantaneous values of the signals once per period is offered. In the analysis of error due to deviation of the real signal from the harmonic model, used a known method based on the estimation of uncertainty of measurement parameter, as a function, the arguments of which are assigned approximately with an error describing the deviation of the model from the real signal at appropriate points. *Results.* A new approach to the determination of parameters of harmonic signals allowed us to develop a method that, unlike most known methods based on the formation of additional signals, eliminates frequency error of the phase-shifting units engaged in the generation of additional signals. The evaluation of the degree of deviation of the real signal from a harmonic model on the resulting error of the determined parameters are given. *Conclusions.* Developed method of determining the informative parameters reduces the measurement time at the expense of single and simultaneous measurement of the instantaneous values of the signals. Obtained results allow to choose optimal parameters of the phase-shifting units engaged in the generation of additional signals, in accordance with the requirements in measurement accuracy.

Ключевые слова: параметры, гармонический сигнал, мгновенные значения, дополнительные сигналы, фазосдвигающий блок, время измерения, погрешность.

Keywords: parameters, harmonic signal, the instantaneous values, additional signals, the phase-shifting block, measuring time, error.

Введение

Исследования в области создания новых методов и средств определения характеристик периодических сигналов с улучшенными метрологическими характеристиками широко проводятся как в России, так и за рубежом [1–3].

При этом большая часть исследований сводится к попыткам увеличения точности определения отдельных параметров периодических сигналов в основном за счет обработки результатов измерений. В них отсутствует системный подход как к определению всего комплекса характеристик, так и к проблемам повышения точности их измерений. Вопросы сокращения времени измерения не рассматриваются.

В настоящее время развивается направление, связанное с разработкой методов и средств определения параметров сигналов, близких к гармоническим, по отдельным мгновенным значениям, не связанным с периодом входного сигнала [4], что позволяет существенно сократить время измерения.

В работах [5, 6] предложено разделять мгновенные значения в пространстве за счет формирования дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых по фазе относительно входных. Это обеспечивает сокращение времени определения параметров гармонических сигналов (ПГС).

Дальнейшее сокращение времени определения ПГС обеспечивают методы, осуществляющие одновременное измерение мгновенных значений входных и дополнительных сигналов один раз за период.

Известный метод измерения ПГС, использующий такой подход, основан на формировании ортогональных составляющих напряжения и тока и определении параметров сигналов по двум мгновенным значениям напряжения и тока, одновременно измеренным в произвольный момент времени [7].

Однако реализация подобных методов может привести к погрешности, обусловленной частотной погрешностью фазосдвигающих блоков (ФБ), обеспечивающих формирование ор-

тогональных составляющих сигналов. С изменением частоты сигнала угол сдвига ФБ может отличаться от 90° [8].

Исключить частотную погрешность ФБ позволяет метод [9], который заключается в определении ПГС по трем мгновенным значениям напряжения и тока, одновременно измеренным в произвольный момент времени, причем вторые мгновенные значения сигналов сдвинуты относительно первых на произвольный (в общем случае) угол $\Delta\alpha$, а третьи мгновенные значения напряжения и тока сдвинуты относительно вторых на угол $\Delta\alpha$.

Однако для реализации метода требуется использование четырех ФБ и шести аналого-цифровых преобразователей. Кроме того, метод предусматривает анализ мгновенных значений напряжений и токов на ноль и измерении дополнительных сигналов, если хотя бы одно из значений равно нулю.

В статье рассматривается новый метод, реализация которого снижает аппаратные затраты и сокращает время измерения.

Метод определения параметров гармонических сигналов по одновременно измеренным мгновенным значениям напряжений и токов

Метод заключается в том, что формируют два дополнительных напряжения, сдвинутые относительно входного на углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$, и дополнительный ток, сдвинутый относительно входного на угол $\Delta\alpha$. В момент перехода через ноль дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на угол $2\Delta\alpha$, производится одновременное измерение мгновенных значений входных и дополнительных сигналов напряжения и тока. ПГС определяют по измеренным значениям.

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

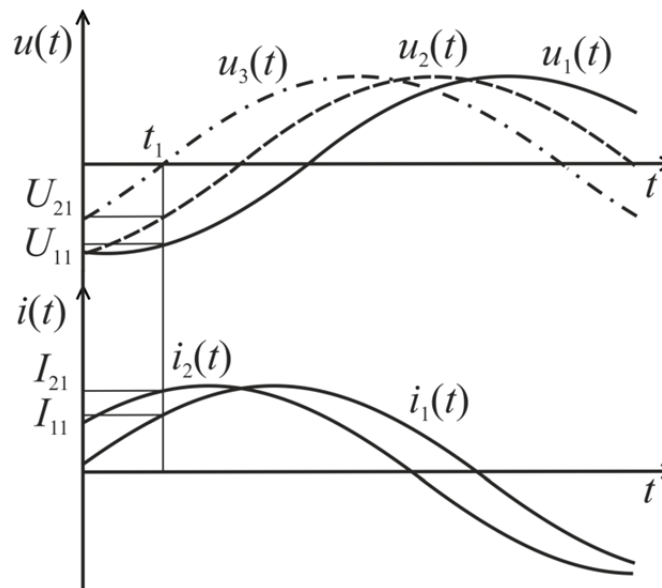


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Для входных гармонических сигналов напряжения $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ и тока $i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ дополнительные сигналы принимают следующий вид: $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$, $u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha)$; $i_2(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi + \Delta\alpha)$, где U_m , I_m – амплитудные значения напряжения и тока; ω – угловая частота входного сигнала; φ – угол сдвига фаз между напряжением и током.

В момент перехода напряжения $u_3(t)$ через ноль (момент времени t_1) мгновенные значения сигналов будут равны:

$$U_{11} = U_m \sin(-2\Delta\alpha); U_{21} = U_m \sin(-\Delta\alpha); I_{11} = I_m \sin(\varphi - 2\Delta\alpha); I_{21} = I_m \sin(\varphi - \Delta\alpha).$$

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

– среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока:

$$U_{\text{СКЗ}} = \frac{\sqrt{2}U_{11}^2}{\sqrt{4U_{21}^2 - U_{11}^2}}; \quad (1)$$

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

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

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

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

Оценка погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели

Рассматриваемый метод измерения ПГС предназначен для измерения параметров гармонических сигналов. Если форма реального сигнала отличается от гармонической модели, то неизбежно возникает погрешность.

Для анализа данного вида погрешности можно использовать методику оценки погрешности результата измерения параметра как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала [10]. Погрешность вычисления значения какой-либо функции, аргументы которой заданы приближенно, может быть оценена с помощью дифференциала этой функции. Погрешности функции соответствует ее возможное приращение, которое она может получить, если аргументам дать приращения, равные их погрешностям.

Если погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению моделей от реальных сигналов, то предельные значения абсолютных погрешностей определения СКЗ напряжения и тока, АМ и РМ в соответствии с (1)–(4) примут следующий вид:

$$\Delta U_{\text{СКЗ}} = \left| \frac{\partial U_{\text{СКЗ}}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial U_{\text{СКЗ}}}{\partial U_{21}} \right| \Delta U_{\text{max}}; \quad (5)$$

$$\Delta I_{\text{СКЗ}} = \left[\left| \frac{\partial I_{\text{СКЗ}}}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial I_{\text{СКЗ}}}{\partial I_{21}} \right| \right] \Delta I_{\text{max}} + \left| \frac{\partial I_{\text{СКЗ}}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial I_{\text{СКЗ}}}{\partial U_{21}} \right| \Delta U_{\text{max}}; \quad (6)$$

$$\Delta P = \left[\left| \frac{\partial P}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_{21}} \right| \right] \Delta I_{\text{max}} + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{21}} \right| \Delta U_{\text{max}}; \quad (7)$$

$$\Delta Q = \left[\left| \frac{\partial Q}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial I_{21}} \right| \right] \Delta I_{\text{max}} + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{21}} \right| \Delta U_{\text{max}}, \quad (8)$$

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

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

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

$$\delta_{U_{СКЗ}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} (|\cos \Delta\alpha| + 2|\cos 2\Delta\alpha|)}{2|\sin^3 \Delta\alpha| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}}; \quad (9)$$

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

$$+ \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} |\cos(\varphi - \Delta\alpha) \cos(\varphi - 2\Delta\alpha)| (1 + 2|\cos \Delta\alpha|)}{2|\sin^3 \Delta\alpha| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}}; \quad (10)$$

$$\gamma_P = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} [|\cos \Delta\alpha| + |\cos 2\Delta\alpha|]}{|\sin \Delta\alpha| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2|\sin^3 \Delta\alpha| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} \times$$

$$\times [2 \cos^2 \Delta\alpha \cos(\varphi - \Delta\alpha) + \sin \varphi \sin \Delta\alpha] +$$

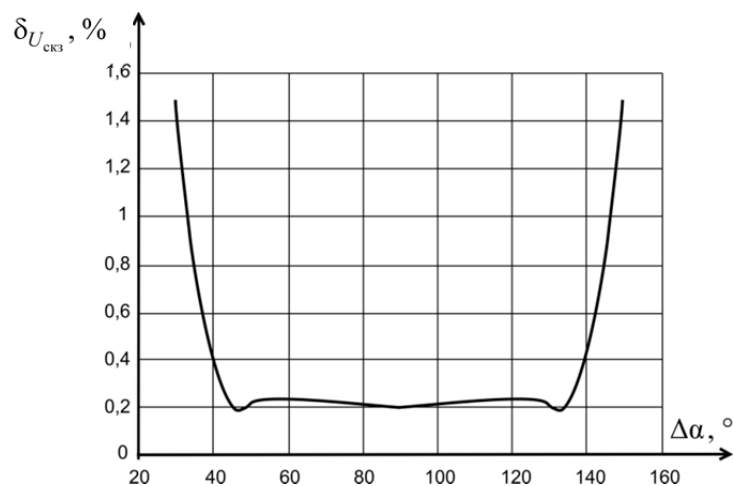
$$+ 2|\sin(\Delta\alpha - \varphi) \sin \Delta\alpha - 2 \cos^3 \Delta\alpha \cos(\Delta\alpha - \varphi)|; \quad (11)$$

$$\gamma_Q = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} (1 + 2|\cos \Delta\alpha|)}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} +$$

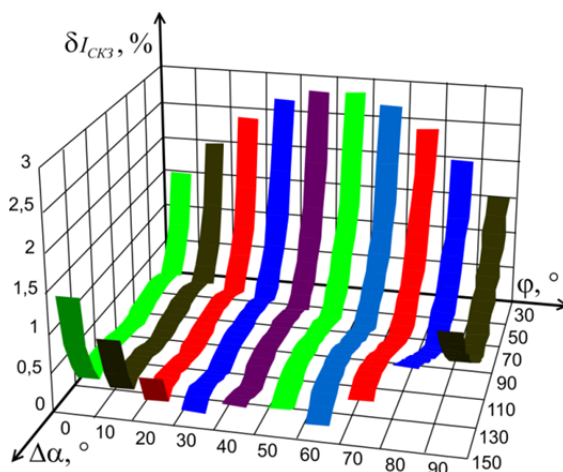
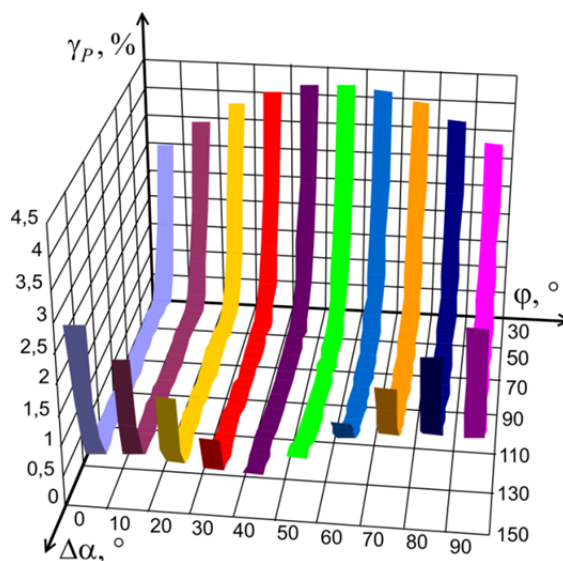
$$+ \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} [2 \cos^3 \Delta\alpha \sin \varphi + \sin^3 \Delta\alpha \cos \varphi + 2|\sin^3 \Delta\alpha \cos(\varphi - \Delta\alpha) - \sin \varphi|]}{|\sin^3 \Delta\alpha| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}}. \quad (12)$$

Анализ выражения (9) показывает, что относительная погрешность определения СКЗ напряжения зависит от спектра сигнала и угла сдвига фазы ФБ $\Delta\alpha$. Погрешности определения других параметров зависят еще и от угла сдвига фазы между напряжением и током φ .

На рис. 2 представлен график зависимости относительной погрешности определения СКЗ напряжения от угла $\Delta\alpha$ при наличии в сигнале первой и третьей гармоники с коэффициентом $h_{u3} = 0,2\%$ согласно (9).

Рис. 2. График зависимости $\delta_{U_{СКЗ}}$ от $\Delta\alpha$

На рис. 3–5 приведены графики зависимости относительной погрешности определения СКЗ тока и приведенных погрешностей измерения АМ и РМ от угла $\Delta\alpha$ и φ при наличии в сигналах напряжения и тока первых и третьих гармоник с коэффициентами $h_{u3} = h_{i3} = 0,2 \%$ согласно (10)–(12).

Рис. 3. Графики зависимости $\delta_{I_{СКЗ}}$ от $\Delta\alpha$ и φ Рис. 4. Графики зависимости γ_P от $\Delta\alpha$ и φ

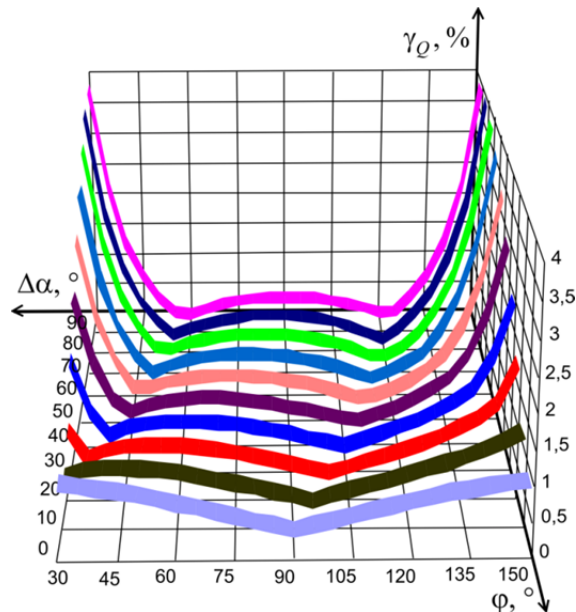


Рис. 5. Графики зависимости γ_Q от $\Delta\alpha$ и φ

Из рис. 2–5 следует, что относительные погрешности измерения СКЗ сигналов и приведенные погрешности определения АМ и РМ существенно зависят от $\Delta\alpha$. В общем случае погрешности меньше при $\Delta\alpha = 45\text{--}135^\circ$.

Погрешности измерения СКЗ тока АМ и РМ менее существенно зависят от угла сдвига фаз между напряжением и током φ . При этом в наиболее важной с практической точки зрения области значений угла, близких к нулю, погрешности меньше.

Заключение

Таким образом, разработанный метод позволяет определять все основные параметры гармонических сигналов. Метод, в отличие от большинства известных методов, основанных на формировании дополнительных сигналов, не использует временное разделение мгновенных значений сигналов для определения ПГС. При этом время измерения мало и определяется в основном длительностью интервала времени с момента начала измерения до момента перехода дополнительного напряжения через ноль.

В общем случае угол сдвига фазы ФБ может быть произвольным, что исключает возможность возникновения частотной погрешности фазосдвигающих блоков.

Полученные в работе результаты позволяют оценивать погрешность определения ПГС при отклонении входных сигналов от гармонической модели, а также выбирать параметры фазосдвигающих блоков в соответствии со спектральным составом сигналов и требованиями по точности измерения.

Список литературы

1. Petrovic, P. B. A method of measuring the integral characteristics of a signal / P. B. Petrovic // Measurement Techniques. – 2013. – Vol. 56, № 2. – P. 185–194.
2. Jiekang, W. High-accuracy, wide-range frequency estimation methods for power system signals under nonsinusoidal conditions / W. Jiekang, L. Jun, W. Jixiang // IEEE Transactions. Power Delivery. – 2005. – Vol. 20, № 1. – P. 366–374.
3. Petrovic, P. B. A new method of determining the amplitude and phase of an alternating signal / P. B. Petrovic, M. P. Stevanovic // Measurement Techniques. – 2010. – Vol. 53, № 8. – P. 903–910.
4. Melentiev, V. S. An improvement in the methods used for the measurement of the integrated characteristics of harmonic signals / V. S. Melentiev, V. I. Batishchev, A. N. Kamysnikova, D. V. Rudakov // Measurement Techniques. – 2011. – Vol. 54, № 4. – P. 407–411.
5. Melent'ev, V. S. A method of measuring integral characteristics from the instantaneous values of signals separated in time and space / V. S. Melent'ev, Yu. M. Ivanov, A. O. Lychev // Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 57, № 9. – P. 979–984.

6. Мелентьев, В. С. Сокращение времени определения параметров за счет пространственного разделения мгновенных значений гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, Ю. М. Иванов, В. В. Муратова // Измерения, контроль, информатизация : материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2015. – С. 61–63.
7. Мелентьев, В. С. Исследование метода измерения параметров по мгновенным значениям входных и дополнительных гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, В. И. Батищев, В. В. Муратова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 1. – С. 4–10.
8. Мелентьев, В. С. Оценка погрешности реализации метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих сигналов / В. С. Мелентьев // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 8 (17). – Ч. 2. – С. 99–102.
9. Мелентьев, В. С. Метод определения интегральных характеристик гармонических сигналов по мгновенным значениям напряжения и тока, сдвинутым в пространстве / В. С. Мелентьев, Е. Г. Кожевникова // Измерение, контроль, автоматизация : матер. 12-й Междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул, 2011. – С. 115–118.
10. Мелентьев, В. С. Анализ погрешности измерения параметров периодических сигналов из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели / В. С. Мелентьев // Современные материалы, техника и технологии. – 2015. – № 3 (3). – С. 172–178.

Мелентьев Владимир Сергеевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
информационно-измерительной техники,
Самарский государственный
технический университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: vs_mel@mail.ru

Melent'ev Vladimir Sergeevich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of information
and measuring equipment,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Поздеева Елена Владиславовна

аспирант,
Самарский государственный
технический университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: yaelenkapavlenko@yandex.ru

Pozdeeva Elena Vladislavovna

postgraduate student,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Пескова Анастасия Сергеевна

аспирант,
Самарский государственный
технический университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: yaelenkapavlenko@yandex.ru

Peskova Anastasiya Sergeevna

postgraduate student,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Нефедьев Дмитрий Иванович

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Nefed'ev Dmitriy Ivanovich

doctor of technical sciences, associate professor,
head of sub-department
of information and measuring equipment
and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317

Мелентьев, В. С.

Метод определения параметров гармонических сигналов по их мгновенным значениям, измеренным один раз в течение периода / В. С. Мелентьев, Е. В. Поздеева, А. С. Пескова, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 73–80.