

# ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.317

*В. С. Мелентьев, Е. В. Поздеева, А. С. Пескова*

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ, ОСНОВАННОГО НА СРАВНЕНИИ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ<sup>1</sup>

*V. S. Melent'ev, E. V. Pozdeeva, A. S. Peskova*

## THE ANALYSIS OF THE ERROR OF THE METHOD OF THE DETERMINATION OF PARAMETERS OF SIGNALS BASED ON COMPARING OF THE INSTANTANEOUS VALUES OF THEIR ORTHOGONAL COMPONENTS

**А н н о т а ц и я.** *Актуальность и цели.* Предметом исследования является метод определения параметров, основанный на пространственном и временном разделении мгновенных значений гармонических сигналов. Целью работы является исследование нового метода определения параметров гармонических сигналов, реализация которого предусматривает формирование ортогональных составляющих напряжения и сравнение их мгновенных значений. *Материалы и методы.* Предложен подход к определению параметров на основе формирования только дополнительного напряжения и измерении мгновенных значений сигналов, распределенных в пространстве и во времени. 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, в котором, в отличие от большинства известных методов, основанных на использовании дополнительных сигналов, формируется только одно дополнительное напряжение и измеряются только мгновенные значения входного напряжения и тока. Это значительно сокращает аппаратные затраты при его реализации. Приведены результаты оценки влияния степени отклонения реальных сигналов от гармонической модели на результирующую погрешность определения параметров. *Выводы.* Реализация разработанного метода определения информативных параметров обеспечивает существенное сокращение аппаратных затрат. Полученные в работе результаты позволяют оценивать погрешность определения информативных параметров при отклонении входных сигналов от гармонической модели, а также выбирать параметры

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 16-08-00252 А).

измерительного процесса в соответствии со спектральным составом сигналов и требованиями по точности измерения.

**A b s t r a c t.** *Background.* Object of research is the method of determination of parameters based on space and time division of the instantaneous values of harmonic signals. The purpose of operation is research of a new method of determination of parameters of harmonic signals which implementation provides formation of orthogonal components of voltage and comparing of their instantaneous values. *Materials and methods.* Approach to determination of parameters on the basis of formation only of additional voltage and measurement of the instantaneous values of the signals distributed in space and in time 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.* Use of new approach to determination of parameters of harmonic signals allowed to develop a method in which, unlike the majority of the known methods based on use of additional signals only one additional voltage is created and only the instantaneous values of input voltage and current are measured. It considerably reduces instrumental expenses in case of its implementation. Results of an impact assessment of a level of a deviation of real signals from harmonic model on a resultant error of determination of parameters are given. *Conclusions.* Implementation of the developed method of determination of the informative parameters provides essential abbreviation of instrumental expenses. The results received in operation allow to evaluate an error of determination of informative parameters in case of a deviation of input signals from harmonic model, and also to select parameters, according to spectral content of signals and requirements for measuring accuracy.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** параметры, гармонический сигнал, мгновенные значения, дополнительные сигналы, ортогональные составляющие, фазосдвигающий блок, погрешность.

**К e y w o r d s:** parameters, harmonic signal, the instantaneous values, additional signals, orthogonal components, the phase-shifting block, an error.

### Введение

При измерении параметров периодических сигналов, форма которых близка к гармонической модели, может быть успешно использован аппроксимационный подход, заключающийся в определении информативных параметров по отдельным мгновенным значениям сигналов с последующей оценкой погрешностей, обусловленных отклонением принятой модели от реальных сигналов [1].

При определении параметров гармонических сигналов (ПГС) значительное сокращение времени измерения может быть достигнуто за счет пространственного разделения их мгновенных значений, т.е. путем формирования дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно входных [2].

Упрощение алгоритма измерения ПГС и сокращение аппаратных затрат могут обеспечить методы, в которых в качестве дополнительных сигналов используются ортогональные составляющие входных [3].

Авторами разработан ряд методов [4, 5], в которых осуществляется формирование ортогональных составляющих как напряжения, так и тока. Однако это приводит к усложнению средств измерения, реализующих методы, и появлению дополнительных инструментальных погрешностей [6].

Данные недостатки могут быть частично устранены при использовании методов, в которых производится формирование только дополнительного напряжения, а для определения ПГС используются мгновенные значения как входного, так и дополнительного напряжений [7, 8]. Однако это может привести к появлению дополнительных погрешностей при реализации методов.

В работе [9] авторами предложен новый метод определения ПГС, в котором формируется дополнительный сигнал напряжения и производится измерение только мгновенных значений входного напряжения и тока.

В статье проводится анализ погрешности данного метода, обусловленной отклонением реальных сигналов от гармонической модели.

### Метод определения параметров на основе сравнения гармонических составляющих сигналов

В соответствии с методом формируют дополнительный сигнал напряжения, сдвинутый относительно входного на  $90^\circ$ ; в момент равенства входного и дополнительного напряжений измеряют мгновенные значения входного напряжения и тока; через интервал времени  $\Delta t$  одновременно измеряют мгновенные значения входного напряжения и тока и определяют ПГС по измеренным значениям.

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

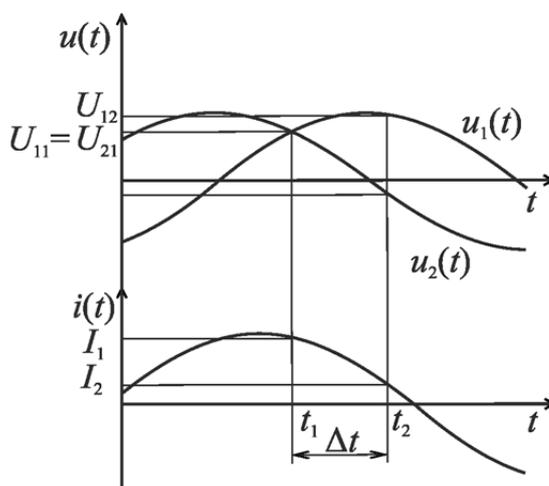


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Для гармонических входных напряжения  $u_1(t) = U_m \sin \omega t$  и тока  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$  дополнительное напряжение примет вид

$$u_2(t) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \cos \omega t,$$

где  $U_m$ ,  $I_m$  – амплитудные значения напряжения и тока;  $\omega$  – угловая частота входного сигнала;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между напряжением и током.

В момент равенства  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  (момент времени  $t_1$ ) выражения для мгновенных значений сигналов примут вид

$$U_{11} = U_m \sin \alpha_1; U_{21} = U_m \cos \alpha_1; I_{11} = I_m \sin \alpha_2,$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – начальные фазы напряжения и тока в момент времени  $t_1$ .

Мгновенные значения  $U_{11}$  и  $U_{21}$  будут равны при угле  $\alpha_1 = \frac{\pi}{4} + \pi l$ , где  $l = 0, 1$ . В этом случае мгновенные значения сигналов будут иметь вид

$$U_{11} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; I_{11} = I_m \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right).$$

Через интервал времени  $\Delta t$  (в момент времени  $t_2$ ) мгновенные значения сигналов будут равны:

$$U_{12} = U_m \sin\left(\frac{\pi}{4} + \omega\Delta t\right); I_{12} = I_m \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{4} + \omega\Delta t\right).$$

Используя мгновенные значения сигналов, можно получить выражения для определения основных ПГС:

– среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока:

$$U_{\text{СКЗ}} = |U_{11}|; \quad (1)$$

$$I_{\text{СКЗ}} = \frac{\left[ (I_1 U_{12} - I_2 U_{11})^2 + \left( I_2 U_{11} - I_1 \sqrt{2U_{11}^2 - U_{12}^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{U_{12} - \sqrt{2U_{11}^2 - U_{12}^2}}; \quad (2)$$

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

$$P = \frac{|U_{11}| \left( I_2 U_{11} - I_1 \sqrt{2U_{11}^2 - U_{12}^2} \right)}{U_{12} - \sqrt{2U_{11}^2 - U_{12}^2}}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{|U_{11}| (I_1 U_{12} - I_2 U_{11})}{U_{12} - \sqrt{2U_{11}^2 - U_{12}^2}}. \quad (4)$$

#### **Анализ погрешности, обусловленной отклонением реальных сигналов от гармонической модели**

Рассматриваемый метод предназначен для определения ПГС. Если реальные сигналы отличаются от гармонической модели, то возникает методическая погрешность.

Проведем анализ погрешности метода, используя предложенную в [10] методику оценки погрешности результата вычисления функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью соответствующей отклонению модели от реального сигнала.

Будем считать, что абсолютные погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению моделей от реальных сигналов. Тогда, используя (1)–(4), можно определить относительные погрешности измерения СКЗ напряжения и тока и приведенные погрешности определения АМ и РМ:

$$\delta_{U_{\text{СКЗ}}} = \frac{\sqrt{2} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \delta_{I_{\text{СКЗ}}} = & \frac{\sqrt{2} \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} \left[ |\sin \varphi (\sin \omega\Delta t + \cos \omega\Delta t) - \cos \varphi (\cos \omega\Delta t - \sin \omega\Delta t)| + \right. \\ & \left. + |\cos \varphi - \sin \varphi| \right] + \frac{\sqrt{2} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} \left\{ (\cos \varphi - \sin \varphi) \times \right. \\ & \left. \times [\cos(2\omega\Delta t + \varphi) - \sin \varphi] + |\sin \omega\Delta t \cos 2\varphi + \cos \omega\Delta t (\sin 2\varphi - 1)| \right\}; \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_P = & \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} |\cos \omega \Delta t - \sin \omega \Delta t| + 1}{2\sqrt{2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} |\sin \omega \Delta t|} + \\ & + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2\sqrt{2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} |\sin \omega \Delta t (\cos \omega \Delta t - \sin \omega \Delta t)|} \left[ \sin 2\omega \Delta t \times \right. \\ & \times (\cos \varphi - \sin \varphi) + \cos \varphi (\cos^2 \omega \Delta t - 3 \sin^2 \omega \Delta t) - \sin \varphi \left. + \right. \\ & \left. + |\sin \varphi (\cos \omega \Delta t + \sin \omega \Delta t) + \cos \varphi (\cos \omega \Delta t - \sin \omega \Delta t)| \right]; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_Q = & \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} |\cos \omega \Delta t + \sin \omega \Delta t| + 1}{2\sqrt{2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} |\sin \omega \Delta t|} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2\sqrt{2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} |\sin \omega \Delta t (\cos \omega \Delta t - \sin \omega \Delta t)|} \times \\ & \times \left[ \cos 2\omega \Delta t (\cos \varphi + \sin \varphi) - 2 \sin \varphi + |\sin \varphi (\cos \omega \Delta t + \sin \omega \Delta t) + \cos \varphi (\cos \omega \Delta t - \sin \omega \Delta t)| \right], \quad (8) \end{aligned}$$

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.

Из анализа выражения (5) следует, что относительная погрешность определения СКЗ напряжения зависит только от спектра сигнала.

Погрешности определения остальных параметров зависят от угла сдвига фаз между первыми гармониками напряжения и тока  $\varphi$  и интервала времени  $\Delta t$ .

Графики зависимости относительной погрешности определения СКЗ тока от угла  $\varphi$  и  $\omega \Delta t$  при наличии в сигналах первой и третьей гармоники с коэффициентами  $h_{u3} = h_{i3} = 0,2\%$ , полученные в соответствии с (6), приведены на рис. 2.

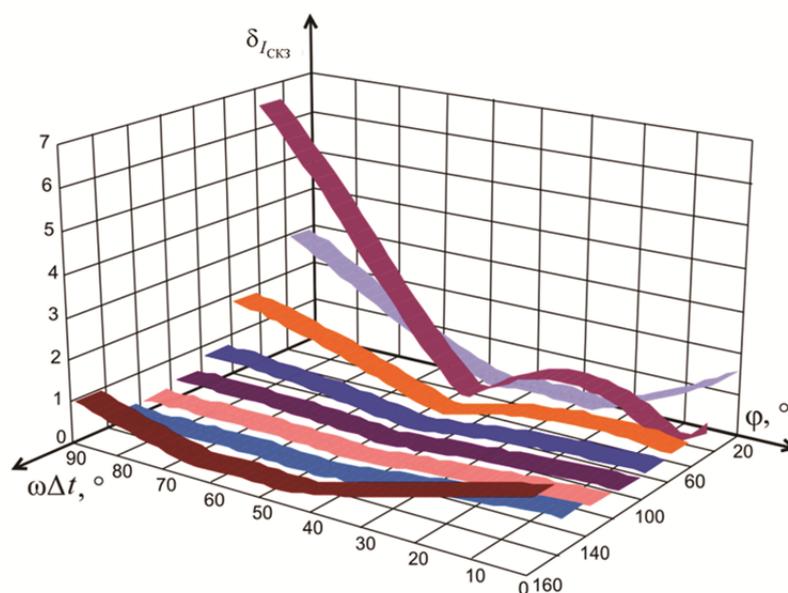


Рис. 2. Графики зависимости  $\delta_{I_{СКЗ}}$  от  $\varphi$  и  $\omega \Delta t$

На рис. 3 и 4 представлены графики зависимости приведенных погрешностей определения АМ и РМ от угла  $\varphi$  и  $\omega\Delta t$  при наличии в сигналах первой и третьей гармоники с коэффициентами  $h_{u3} = h_{i3} = 0,2\%$  согласно (7) и (8).

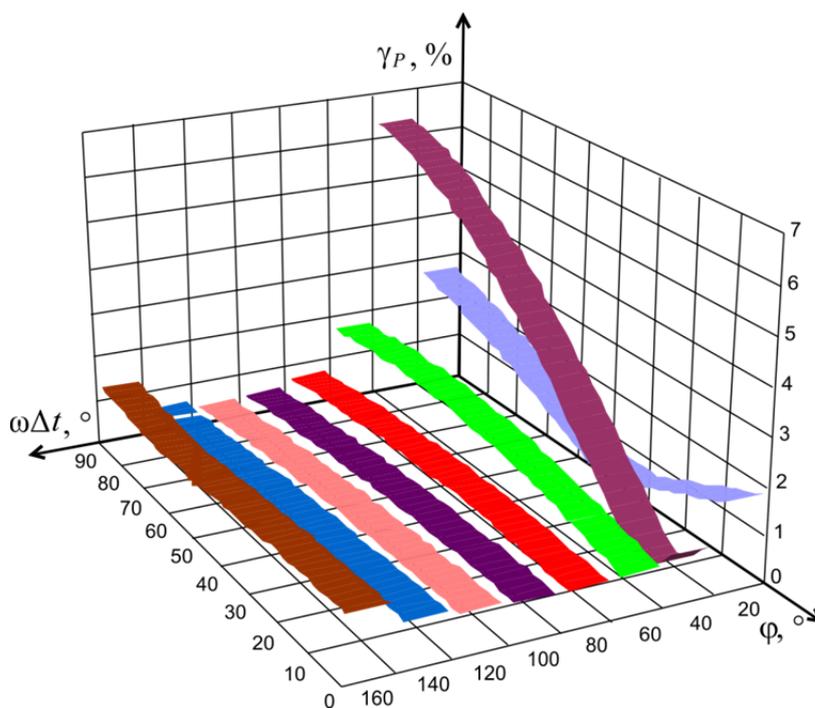


Рис. 3. Графики зависимости погрешности  $\gamma_P$  от  $\varphi$  и  $\omega\Delta t$

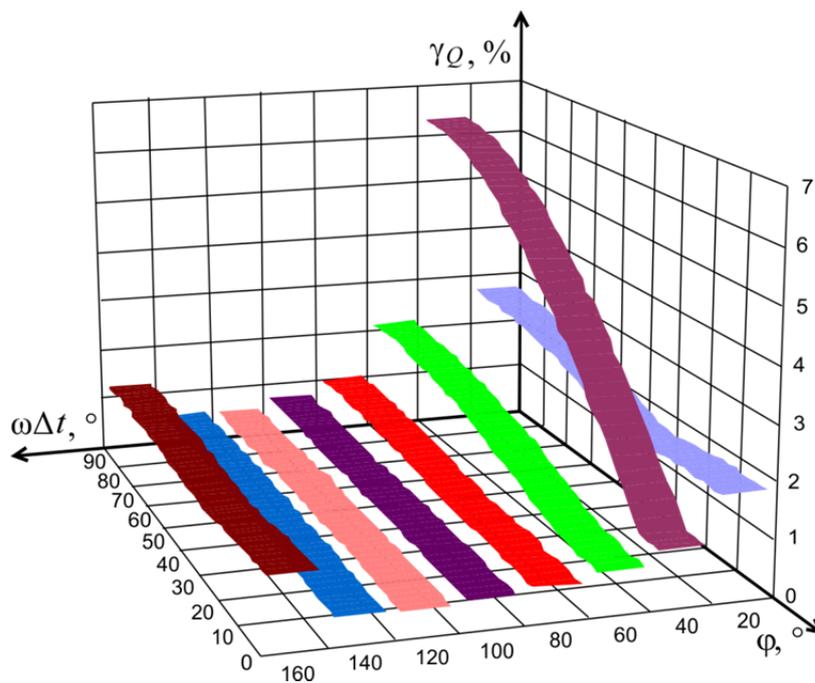


Рис. 4. Графики зависимости погрешности  $\gamma_Q$  от  $\varphi$  и  $\omega\Delta t$

Анализ рис. 2–4 показывает существенную зависимость погрешностей измерения параметров сигналов от  $\omega\Delta t$ . Меньшие значения погрешностей имеют место при  $\omega\Delta t = 80\text{--}140^\circ$ .

Резкое возрастание погрешностей в окрестностях  $\omega\Delta t = 45^\circ$  обусловлено тем, что при данном угле  $\cos\omega\Delta t - \sin\omega\Delta t = 0$  и знаменатели в выражениях (6)–(8) обращаются в ноль.

### Заключение

Таким образом, разработанный метод позволяет определять все основные параметры гармонических сигналов. В нем, в отличие от большинства известных методов, основанных на использовании дополнительных сигналов, формируется только одно дополнительное напряжение и измеряются только мгновенные значения входного напряжения и тока. Это значительно сокращает аппаратные затраты при его реализации.

Полученные в работе результаты позволяют оценивать погрешность определения ПГС при отклонении входных сигналов от гармонической модели, а также выбирать параметры измерительного процесса ( $\Delta t$ ) в соответствии со спектральным составом сигналов и требованиями по точности измерения.

### 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 и анализ методов оперативного измерения параметров периодических процессов на основе формирования дополнительных сигналов / В. С. Мелентьев, Ю. М. Иванов, В. В. Муратова // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. XVI Междунар. конф. – Самара : Самарский научный центр РАН, 2014. – С. 717–722.
3. Мелентьев, В. С. Сокращение времени измерения параметров гармонических сигналов на основе использования их ортогональных составляющих / В. С. Мелентьев, В. В. Муратова, Е. В. Павленко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : сб. науч. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. – Курск : ЮЗГУ, 2014. – Т. 3. – С. 67–71.
4. Мелентьев, В. С. Совершенствование методов и средств измерения параметров гармонических сигналов на основе сравнения их ортогональных составляющих / В. С. Мелентьев, Ю. М. Иванов, А. С. Пескова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 3 (9). – С. 34–40.
5. 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 Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 3 (35). – С. 84–89.
6. Мелентьев, В. С. Анализ погрешности реализации метода измерения параметров сигналов на основе формирования ортогональных составляющих напряжения / В. С. Мелентьев, Ю. М. Иванов, Е. В. Павленко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 1. – С. 23–30.
7. Мелентьев, В. С. Синтез и анализ методов оперативного измерения параметров периодических процессов на основе формирования дополнительных сигналов / В. С. Мелентьев, Ю. М. Иванов, В. В. Муратова // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. XVI Междунар. конф. – Самара : Самарский научный центр РАН, 2014. – С. 717–722.
8. Мелентьев, В. С. Сокращение времени измерения параметров за счет использования мгновенных значений входных и дополнительных гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, Е. Е. Ярославкина, Е. В. Поздеева, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1 (15). – С. 48–55.
9. Мелентьев, В. С. Метод и система измерения интегральных характеристик с использованием ортогональных составляющих сигналов / В. С. Мелентьев, В. В. Муратова, Е. Е. Ярославкина // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4 (40). – С. 206–209.
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

***Поздеева Елена Владиславовна***

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

***Пескова Анастасия Сергеевна***

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

***Melent'ev Vladimir Sergeevich***

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

***Pozdeeva Elena Vladislavovna***

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

***Peskova Anastasiya Sergeevna***

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

УДК 621.317

**Мелентьев, В. С.**

**Анализ погрешности метода определения параметров сигналов, основанного на сравнении мгновенных значений их ортогональных составляющих / В. С. Мелентьев, Е. В. Поздеева, А. С. Пескова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 3 (17). – С. 5–12.**