

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ, ОСНОВАННОГО НА ФОРМИРОВАНИИ И СРАВНЕНИИ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯ

© 2016 В.С. Мелентьев

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 27.05.2016

В статье рассматривается новый метод измерения параметров гармонических сигналов по их мгновенным значениям и реализующая его информационно-измерительная система. Метод основан на формировании и сравнении ортогональных составляющих напряжения. Приводятся результаты анализа погрешностей определения параметров, возникающих при реализации метода: погрешности по модулю и угловой погрешности фазосдвигающего блока, осуществляющего формирование дополнительного сигнала. Полученные результаты позволяют оценить предельные погрешности измерения и определить возможные области его использования.

Ключевые слова: периодический сигнал, гармоническая модель, мгновенные значения сигналов, ортогональные составляющие, фазосдвигающий блок, погрешность.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-08-00252 А)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время имеются два основных направления развития методов и систем измерения параметров периодических сигналов.

Первое направление связано с попытками увеличения точности определения отдельных параметров периодических сигналов за счет обработки результатов измерений. В них отсутствует системный подход к определению всего комплекса параметров. При этом вопросы сокращения времени измерения не рассматриваются [1 - 3].

Второе направление используется для измерения параметров периодических сигналов, форма которых близка к гармонической модели [4]. Методы основаны на предположении о соответствии входных сигналов гармоническим моделям, что значительно упрощает алгоритм определения параметров и значительно сокращает время измерения. Методы и, реализующие их системы, используют определение параметров сигналов по отдельным мгновенным значениям напряжения и тока, которые не связаны с длительностью периода входного сигнала. Для оценки полученных результатов производится анализ погрешности, обусловленной отклонением реальных сигналов от гармонической модели [5].

Для дальнейшего сокращения времени измерения используют разделение мгновенных значений сигналов в пространстве за счет формирования дополнительных напряжений и токов, которые смещены по фазе относительно входных. При этом определение параметров производят по мгновенным значениям как входных, так и дополнительных сигналов [6].

Мелентьев Владимир Сергеевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой. E-mail: vs_mel@mail.ru

Упрощение алгоритма определения параметров, а также сокращение аппаратных затрат обеспечивает реализация методов, в которых в качестве дополнительных используют ортогональные составляющие сигналов [7].

В статье рассматривается новый метод определения параметров и, реализующая его информационно-измерительная система (ИИС), которые основаны на формировании и сравнении ортогональных составляющих напряжения [8].

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ И СРАВНЕНИЯ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Согласно предлагаемому автором методу производится формирование дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на 90° . В произвольный момент времени измеряют мгновенные значения входного и дополнительного напряжений и тока, а в момент равенства ортогональных составляющих напряжения измеряют мгновенные значения входного напряжения и тока. Искомые параметры определяют по измеренным мгновенным значениям.

Метод можно пояснить с помощью следующих временных диаграмм (рис. 1).

При гармонических входных напряжении и токе $u_1(t) = U_m \sin \omega t$; $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, дополнительное напряжение примет вид

$$u_2(t) = U_m \cos \omega t,$$

где U_m , I_m – амплитудные значения входного напряжения и тока; φ – угол сдвига фаз между входными напряжением и током; ω – угловая частота.

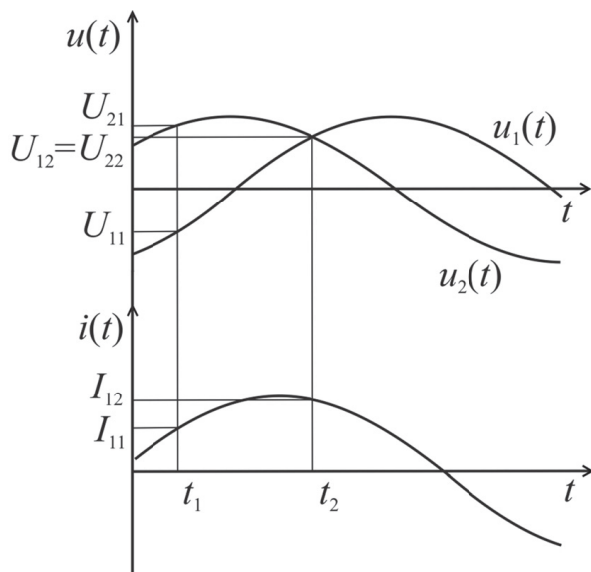


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

В произвольный момент времени (момент времени t_1 на рис. 1) сигналы будут равны:

$$U_{11} = U_m \sin \alpha_1; U_{21} = U_m \cos \alpha_1;$$

$$I_{11} = I_m \sin(\alpha_1 + \varphi),$$

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

В момент времени, когда ортогональные составляющие напряжения будут равны (момент времени t_2 на рис. 1), мгновенные значения напряжения и тока примут вид:

$$U_{12} = U_m \sin \alpha_2; U_{22} = U_m \cos \alpha_2;$$

$$I_{12} = I_m \sin(\alpha_2 + \varphi),$$

где α_2 – фаза входного напряжения в момент времени t_2 .

Учитывая, что равенство ортогональных составляющих напряжения U_{12} и U_{22} наступит при угле $\alpha_2 = \frac{\pi}{4} + \pi l$ (где $l = 0, 1$), мгновенные значения сигналов примут следующий вид: $U_{12} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$;

$$I_{12} = I_m \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right).$$

После преобразований можно найти выражения для определения основных параметров гармонических сигналов:

- среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока

$$U_{\text{СКЗ}} = |U_{12}|; \quad (1)$$

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

- активная (АМ) и реактивная (РМ) мощности

$$P = \frac{|U_{12}|(I_{11}|U_{12}| - I_{12}U_{21})}{U_{11} - U_{21}}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{|U_{12}|(I_{12}U_{11} - I_{11}|U_{12}|)}{U_{11} - U_{21}}. \quad (4)$$

Схема ИИС, которая может быть использована для реализации метода, приведена на рис. 2.

В состав устройства входят: первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ, аналого-цифровые преобразователи АЦП1 – АЦП3, фазосдвигающий блок ФСБ, компаратор КОМП, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД.

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Одним из недостатков ИИС, которая реализует данный метод, является погрешность по напряжению (погрешность по модулю) фазосдвигающих блоков. Данный вид погрешности заключается в том, что амплитуда входного напряжения может отличаться от амплитудного значения напряжения на выходе ФСБ.

Если амплитудные значения напряжений на входе и выходе фазосдвигающего блока будут отличаться на величину ΔU_m , то мгновенные значения сигналов примут следующий вид:

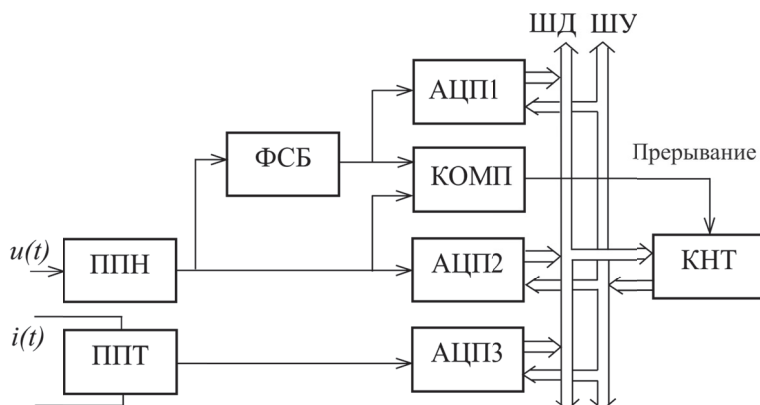


Рис. 2. Схема ИИС, реализующей метод

венные значения дополнительного напряжения примут вид: $U'_{21} = (U_m + \Delta U_m) \cos \alpha_1$ и $U'_{22} = (U_m + \Delta U_m) \cos \alpha_2$. Поскольку мгновенное значение U'_{21} используется для определения информативных параметров, а U'_{22} участвует в сравнении ортогональных составляющих напряжения, то неизбежно возникает погрешность.

При анализе влияния данной погрешности на результирующую погрешность определения параметров может быть успешно использована известная методика оценки погрешности результата измерения интегральной характеристики как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала, рассмотренной в [9].

Если считать, что мгновенные значения входных сигналов напряжения и тока измерены без погрешности, то можно определить предельные значения абсолютных погрешностей измерения СКЗ тока, АМ и РМ:

$$\Delta I_{СКЗ} = \left(\left| \frac{\partial I_{СКЗ}}{\partial U_{22}} \right| + \left| \frac{\partial I_{СКЗ}}{\partial U_{21}} \right| \right) \Delta U; \quad (5)$$

$$\Delta P = \left(\left| \frac{\partial P}{\partial U_{22}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{21}} \right| \right) \Delta U; \quad (6)$$

$$\Delta Q = \left(\left| \frac{\partial Q}{\partial U_{22}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{21}} \right| \right) \Delta U. \quad (7)$$

Из выражений (5) – (7) и (2) – (4) можно найти относительные погрешности (ОТП) измерения СКЗ сигналов и приведенные погрешности (ПРП) определения АМ и РМ:

$$\delta_{I_{СКЗ}} = h_m \left[1 - \cos \varphi (\sin \varphi + \cos \varphi) \right] + \sqrt{2} |\sin(\alpha_1 + \varphi) (\cos \varphi - \sin \varphi)| / |\sin \alpha_1 - \cos \alpha_1|; \quad (8)$$

$$\gamma_P = h_m \left[|\sin \varphi| + |\sin(\alpha_1 + \varphi) + \cos \varphi (\sin \varphi - \cos \varphi)| / |\sin \alpha_1 - \cos \alpha_1| \right]; \quad (9)$$

$$\gamma_Q = h_m \left[|\sin \varphi| + \sqrt{2} |\sin \varphi (\sin \alpha_1 - \cos \alpha_1) - \sin(\alpha_1 + \varphi)| / |\sin \alpha_1 - \cos \alpha_1| \right], \quad (10)$$

$$\text{где } h_m = \frac{\Delta U_m}{U_m}.$$

Из анализа выражений (8) – (10) следует, что ОТП определения СКЗ тока и ПРП измерения АМ и РМ зависят от гармонического состава сигналов, угла сдвига фаз между входным напряжением и током φ и момента начала измерения, характеризуемого начальной фазой α_1 .

Графики зависимости ОТП измерения СКЗ тока и ПРП определения АМ и РМ приведены на рис. 3 – 5.

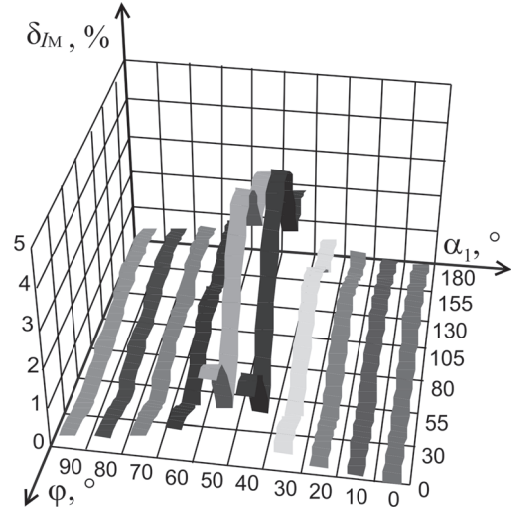


Рис. 3. Графики зависимости δ_{IM} от φ и α_1

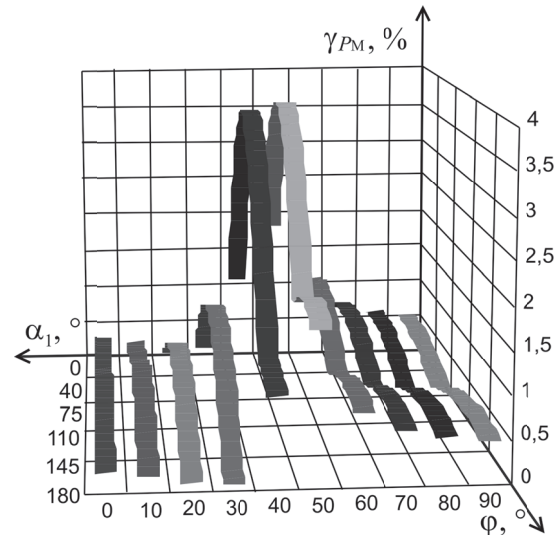


Рис. 4. Графики зависимости γ_{PM} от φ и α_1

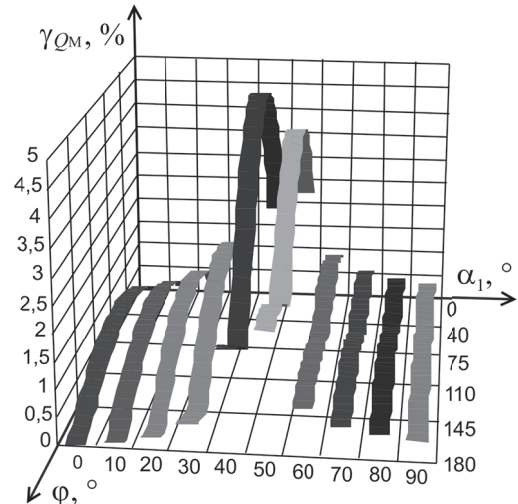


Рис. 5. Графики зависимости γ_{QM} от φ и α_1

Анализ показывает, что при $\alpha_1 = 45^\circ$ знаменатели выражений (8) – (10) обращаются в ноль. Этим объясняется резкое увеличение погрешностей в окрестностях 45° (начальные фазы, равные 40° и 50° на рис. 2 – 4).

Другим видом погрешности, которая может возникать при реализации методов, использующих ортогональные составляющие сигналов, является частотная погрешность фазосдвигающего блока, которая может привести к тому, что при изменении частоты входного сигнала угол сдвига фазы ФСБ будет отличаться от 90° .

Если при анализе влияния частотной погрешности фазосдвигающих блоков на погрешность результата измерения параметров считать, что углы сдвига фазы ФСБ1 и ФСБ2 отклоняются от 90° на одинаковый угол $\Delta\beta$, то дополнительное напряжение примет следующий вид:

$$u'_2(t) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \Delta\beta\right) = U_m \cos(\omega t + \Delta\beta);$$

Мгновенное значение дополнительного напряжения в момент времени t_1 будет равно:

$$U'_{21} = U_m \cos(\alpha_1 + \Delta\beta).$$

В момент времени t_2 мгновенные значения сигналов примут вид:

$$U'_{12} = U_m \sin\alpha'_2; U'_{22} = U_m \cos(\alpha'_2 + \Delta\beta);$$

$$I'_{12} = I_m \sin(\alpha'_2 + \varphi).$$

Равенство U'_{12} и U'_{22} происходит при угле $\alpha'_2 = \frac{\pi}{4} + \pi l - \frac{\Delta\beta}{2}$. Если $l=0$, то мгновенные значения сигналов будут соответствовать следующим выражениям:

$$U'_{12} = U_m \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta\beta}{2}\right);$$

$$I'_{12} = I_m \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\Delta\beta}{2} + \varphi\right).$$

Используя мгновенные значения сигналов, можно найти погрешности определения параметров:

$$\delta_{U\beta} = \cos \frac{\Delta\beta}{2} - \sin \frac{\Delta\beta}{2} - 1; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \delta_{I\beta} = & \left\{ \sin(\alpha_1 + \varphi) \left(\cos \frac{\Delta\beta}{2} - \sin \frac{\Delta\beta}{2} \right) - \right. \\ & \left. - \left[\cos\left(\varphi - \frac{\Delta\beta}{2}\right) + \sin\left(\varphi - \frac{\Delta\beta}{2}\right) \right] \times \right. \\ & \left. \times \cos\left(\alpha_1 + \frac{\Delta\beta}{2}\right) \right\}^2 - \left\{ \cos \frac{\Delta\beta}{2} - \sin \frac{\Delta\beta}{2} \right\} \times \\ & \times \sin(\alpha_1 + \varphi) - \left[\sin\left(\varphi - \frac{\Delta\beta}{2}\right) + \cos\left(\varphi - \frac{\Delta\beta}{2}\right) \right] \times \\ & \times \sin \alpha_1 \left. \right\}^{\frac{1}{2}} / \left[\sqrt{2} |\sin \alpha_1 - \cos(\alpha_1 + \Delta\beta)| \right] - 1; \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_{P\beta} = & \left\{ \sin(\alpha_1 + \varphi) \left(\cos \frac{\Delta\beta}{2} - \sin \frac{\Delta\beta}{2} \right) - \right. \\ & \left. - \left[\cos\left(\varphi - \frac{\Delta\beta}{2}\right) + \sin\left(\varphi - \frac{\Delta\beta}{2}\right) \right] \times \right. \\ & \left. \times \cos\left(\alpha_1 + \frac{\Delta\beta}{2}\right) \right\} \left| \cos \frac{\Delta\beta}{2} - \sin \frac{\Delta\beta}{2} \right| / \\ & / [\sin \alpha_1 - \cos(\alpha_1 + \Delta\beta)] - \cos \varphi; \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_{Q\beta} = & \left\{ \left[\sin\left(\varphi - \frac{\Delta\beta}{2}\right) + \cos\left(\varphi - \frac{\Delta\beta}{2}\right) \right] \sin \alpha_1 - \right. \\ & \left. - \sin(\alpha_1 + \varphi) \left| \cos \frac{\Delta\beta}{2} - \sin \frac{\Delta\beta}{2} \right| \right\} \left| \cos \frac{\Delta\beta}{2} - \right. \\ & \left. - \sin \frac{\Delta\beta}{2} \right| / [\sin \alpha_1 - \cos(\alpha_1 + \Delta\beta)] - \sin \varphi. \quad (14) \end{aligned}$$

Из (11) следует, что погрешность измерения СКЗ напряжения зависит только от $\Delta\beta$. При $\Delta\beta=0,1^\circ$ значение погрешности равно $\delta_{U\beta}=-0,17\%$.

На рис. 6 - 8 приведены графики зависимости погрешностей определения СКЗ тока, АМ и РМ от угла сдвига фаз φ и начальной фазы входного напряжения α_1 при $\Delta\beta=0,1^\circ$ в соответствии с (12) - (14).

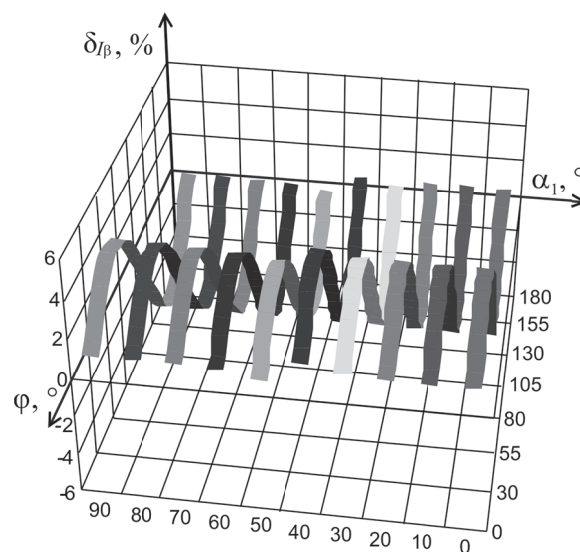
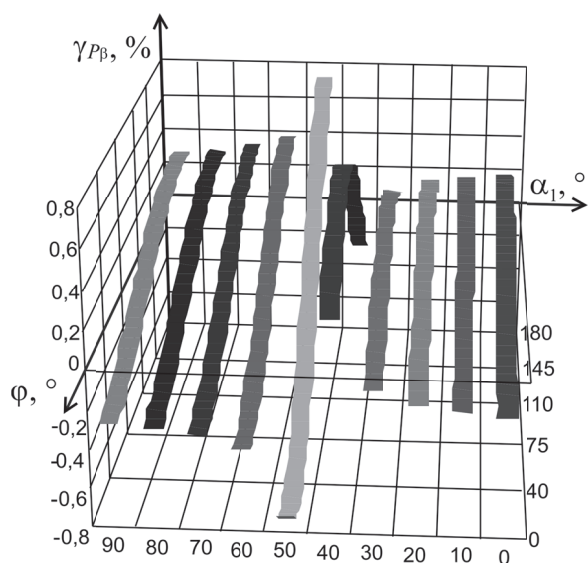
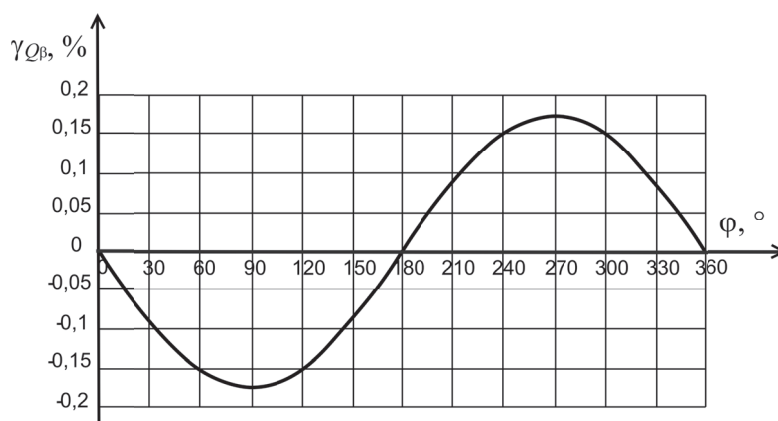


Рис. 6. Графики зависимости $\delta_{I\beta}$ от φ и α_1

Анализ выражений (12) - (14) и рис. 6 - 8 показывает существенную зависимость погрешностей измерения параметров не только от угловой погрешности, характеризующейся $\Delta\beta$, но и от угла сдвига фаз между напряжением и током φ .

При этом ПРП определения АМ в значительной степени зависит еще и от начальной фазы входного напряжения α_1 , то есть от момента начала измерения.

Относительная погрешность измерения СКЗ тока существенно меньше зависит от α_1 , а на

Рис. 7. Графики зависимости γ_{P_B} от ϕ и α_1 Рис. 8. Графики зависимости γ_{Q_B} от ϕ и α_1

приведенную погрешность определения РМ этот параметр вообще не оказывает влияния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод измерения параметров гармонических сигналов позволяет начинать процесс измерения в произвольный момент времени, что сокращает, в общем случае, время измерения. Кроме того, метод прост в реализации и требует незначительных аппаратных затрат.

Полученные в работе результаты позволяют оценить предельные значения погрешностей определения параметров гармонических сигналов и, следовательно, выбрать области возможного использования метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Petrovic P.B. A method of measuring the integral characteristics of a signal // Measurement Techniques. 2013. V. 56, No. 2. P. 185-194.
2. Jiekang W., Jun L., Jixiang W. High-accuracy, wide-range frequency estimation methods for power system signals under nonsinusoidal conditions // IEEE Transactions. Power Delivery. 2005. V. 20, No. 1. P. 366-374.
3. Petrovic P.B., Stevanovic M.P. A new method of determining the amplitude and phase of an alternating signal // Measurement Techniques. 2010. V. 53, No. 8. P. 903-910.
4. Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 240 с.
5. Melent'ev V.S., Ivanov Yu.M. Study of the method of measurement of parameters of periodic signals by their instantaneous values using feature points / Science and Education: Materials of the XI International research and practice conference. Munich, Germany, 2016. Vol. 1. P. 99 - 106.
6. Мелентьев В.С., Ярославкина Е.Е., Поздеева Е.В., Нефедьев Д.И. Сокращение времени измерения параметров за счет использования мгновенных значений входных и дополнительных гармонических сигналов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 1 (15). С. 48-55.
7. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Пескова А.С. Совершенствование методов и средств измерения параметров гармонических сигналов на основе сравнения их ортогональных составляющих // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 3 (9). С. 34-40.
8. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Пескова А.С. Исследование метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов / Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. науч. трудов 4-ой Междунар. науч.-практ. конф. Курск: ЮЗГУ, 2014. С. 187-189.
9. Мелентьев В.С. Оценка погрешности реализации

метода измерения интегральных характеристик по
мгновенным значениям ортогональных составля-

ющих сигналов // Евразийский союз ученых: науч.
журнал. 2015. № 8(17). Часть 2. С. 99-102.

**THE EVALUATION OF ERROR OF IMPLEMENTATION
OF THE PARAMETERS MEASUREMENT METHOD,
BASED ON THE FORMATION AND COMPARISON
OF ORTHOGONAL VOLTAGE COMPONENTS**

© 2016 V.S. Melent'ev

Samara State Technical University

The article discusses a new method for the measurement of harmonic signal parameters by their instantaneous values and information-measuring system that implements it. The method is based on the formation and comparison the orthogonal voltage components. The results of the analysis of the error of definition the parameters arising from the implementation of the method: the error of the module and angular error of phase shifter blocks that forms an additional signal. The results allow to evaluate the limits of measurement error and to identify possible areas of use of the method.

Keywords: periodic signal, the harmonic model, the instantaneous values of the signals, orthogonal components, phase-shifting block, an error