

УДК 621.317

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ И СРАВНЕНИЯ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯ*

В.С. Мелентьев, В.В. Муратова, А.С. Пескова

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: vs_mel@mail.ru

Исследуется новый метод измерения параметров (среднеквадратических значений напряжения и тока, активной и реактивной мощности) по мгновенным значениям гармонических сигналов. Метод предусматривает формирование ортогональной составляющей напряжения и сравнение входного и дополнительного напряжений. В отличие от известных методов, основанных на формировании ортогональных составляющих сигналов, реализация метода обеспечивает возможность начала измерения в произвольный момент времени. Приводятся результаты анализа погрешности метода, обусловленной отклонением реальных сигналов от гармонической модели. Полученные результаты позволяют определить предельные значения погрешностей измерения параметров и выбрать возможную область использования метода.

Ключевые слова: *параметры периодических сигналов, гармоническая модель, мгновенные значения, ортогональные составляющие, погрешность.*

В настоящее время для измерения параметров периодических сигналов (ППС), форма которых близка к гармонической модели (ГМ), все большее распространение находят так называемые аппроксимационные методы [1]. Они основаны на предположении, что входные сигналы являются гармоническими, – это значительно упрощает алгоритм определения ППС и, главное, существенно сокращает время измерения. Для оценки качества полученных результатов производится анализ погрешности, обусловленной несоответствием реальных сигналов ГМ [2].

Методы основаны на определении ППС по отдельным мгновенным значениям (МЗ) напряжения и тока, которые не связаны с длительностью периода входного контролируемого сигнала [3].

Для дальнейшего сокращения времени измерения используют пространственное разделение МЗ сигналов путем формирования дополнительных напряжений и токов, смещенных по фазе относительно входных, и определение ППС по МЗ сигналов как входных, так и дополнительных [4].

С целью упрощения алгоритма определения ППС, а также уменьшения аппаратных затрат в качестве дополнительных используют ортогональные со-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-08-00252 А).

Владимир Сергеевич Мелентьев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника».

Вера Владимировна Муратова, аспирант.

Анастасия Сергеевна Пескова, аспирант.

ставляющие сигналов [5–7].

В статье исследуется новый метод измерения ППС, основанный на формировании и сравнении ортогональных составляющих напряжения [8].

В отличие от известных методов, использующих такой подход [9–11], этот метод обеспечивает возможность начала измерения в произвольный момент времени.

В соответствии с разработанным авторами методом формируют дополнительный сигнал напряжения, сдвинутый относительно входного на 90° ; в произвольный момент времени измеряют мгновенные значения входного и дополнительного сигналов напряжения и тока; в момент равенства ортогональных составляющих напряжения измеряют мгновенные значения входного напряжения и тока. Информативные параметры определяют по измеренным МЗ.

Для пояснения метода могут быть использованы следующие временные диаграммы (рис. 1).

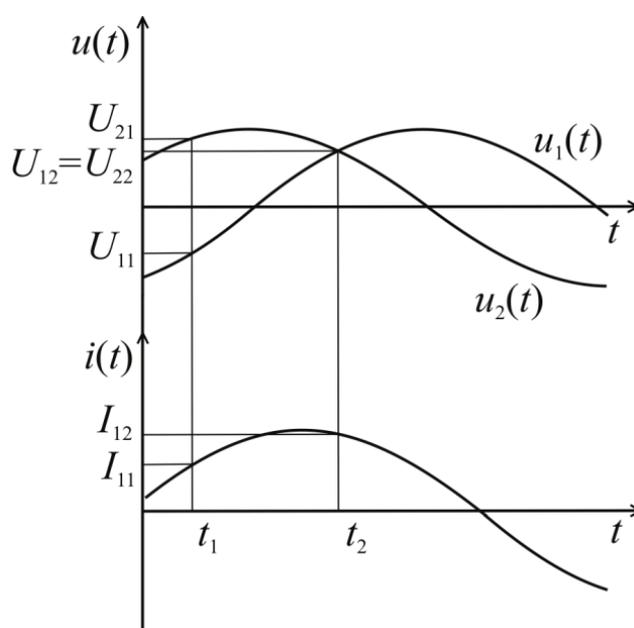


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Если считать, что входное и сдвинутое относительно него на 90° дополнительное напряжение, а также ток имеют ГМ, то они принимают следующий вид:

$$u_1(t) = U_m \sin \omega t; \quad u_2(t) = U_m \cos \omega t; \quad i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi),$$

где U_m , I_m – амплитуды напряжения и тока;

φ – угол сдвига фаз между напряжением и током;

ω – угловая частота входного сигнала.

В произвольный момент времени t_1 после начала измерения МЗ сигналов будут равны:

$$U_{11} = U_m \sin \alpha_1; \quad U_{21} = U_m \cos \alpha_1; \quad I_{11} = I_m \sin(\alpha_1 + \varphi),$$

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

В момент равенства ортогональных составляющих напряжения (момент времени t_2) МЗ сигналов примут вид:

$$U_{12} = U_m \sin \alpha_2; \quad U_{22} = U_m \cos \alpha_2; \quad I_{12} = I_m \sin(\alpha_2 + \varphi),$$

где α_2 – фаза входного напряжения в момент времени t_2 .

Равенство МЗ напряжения U_{12} и U_{22} имеет место при угле $\alpha_2 = \frac{\pi}{4} + \pi l$, где $l = 0, 1$. При этом МЗ сигналов примут следующий вид:

$$U_{12} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; I_{12} = I_m \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right).$$

Произведя соответствующие преобразования, можно найти выражения для определения основных ППС:

– при измерении среднеквадратических значений (СКЗ) напряжения и тока

$$U_{СКЗ} = |U_{12}|; \quad (1)$$

$$I_{СКЗ} = \frac{\sqrt{(I_{11}|U_{12}| - I_{12}U_{21})^2 + (I_{12}U_{11} - I_{11}|U_{12}|)^2}}{|U_{11} - U_{21}|}; \quad (2)$$

– при измерении активной (АМ) и реактивной (РМ) мощности

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

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

Как уже было отмечено выше, одной из основных проблем, которые могут возникнуть при использовании аппроксимационных методов измерения ППС, является погрешность, обусловленная несоответствием большинства реальных сигналов ГМ.

Проведем оценку такого вида погрешности. Для этого будем использовать известную методику оценки погрешности вычисления функции [12]. Погрешность определения функции с приближенно заданными аргументами можно найти с помощью дифференцирования этой функции. Для получения предельных оценок погрешности аргументам присваиваются приращения, которые соответствуют наибольшему отклонению реального сигнала от ГМ.

При использовании выражений (1) – (4) предельные значения абсолютных погрешностей (АБП) определения ППС принимают вид:

$$\Delta U_{СКЗ} = \left| \frac{\partial U_{СКЗ}}{\partial U_{12}} \right| \Delta U_{\max}; \quad (5)$$

$$\Delta I_{СКЗ} = \left(\left| \frac{\partial I_{СКЗ}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial I_{СКЗ}}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial I_{СКЗ}}{\partial U_{21}} \right| \right) \Delta U_{\max} + \left(\left| \frac{\partial I_{СКЗ}}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial I_{СКЗ}}{\partial I_{12}} \right| \right) \Delta I_{\max}; \quad (6)$$

$$\Delta P = \left(\left| \frac{\partial P}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{21}} \right| \right) \Delta U_{\max} + \left(\left| \frac{\partial P}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_{12}} \right| \right) \Delta I_{\max}; \quad (7)$$

$$\Delta Q = \left(\left| \frac{\partial Q}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{21}} \right| \right) \Delta U_{\max} + \left(\left| \frac{\partial Q}{\partial I_{11}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial I_{12}} \right| \right) \Delta I_{\max}. \quad (8)$$

АБП аргументов в выражениях (5)–(8) ΔU_{\max} и ΔI_{\max} соответствуют максимальным отклонениям МЗ реальных сигналов от соответствующих значений

ГМ и в предельном случае равны

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

где $h_{uk} = \frac{U_{km}}{U_{1m}}$ и $h_{ik} = \frac{I_{km}}{I_{1m}}$ – коэффициенты высших гармоник напряжения и тока порядка k ;

U_{1m} и I_{1m} – амплитуды первых гармоник сигналов;

U_{km} и I_{km} – амплитуды высших гармоник напряжения и тока порядка k .

Из выражений (5)–(8) и (1)–(4) можно найти относительные погрешности (ОТП) измерения СКЗ сигналов и приведенные погрешности (ПРП) определения АМ и РМ:

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

$$\delta_{I_{СКЗ}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 |\sin \alpha_1 - \cos \alpha_1|}} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} |\sin \varphi - \cos \varphi| [|\sin \varphi| + |\cos \varphi| + \right. \\ \left. + \sqrt{2} |\sin(\alpha_1 + \varphi)|] + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} [|\sin \varphi - \cos \varphi| + \sqrt{2} |\cos(\alpha_1 + \varphi)|] \right\}; \quad (10)$$

$$\gamma_P = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 |\sin \alpha_1 - \cos \alpha_1|}} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} [|\sin \varphi| + |\cos \varphi| + \right. \\ \left. + |2 \sin(\alpha_1 + \varphi) + \cos \varphi (\sin \alpha_1 - \cos \alpha_1)|] + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} (1 + \sqrt{2} |\cos \alpha_1|) \right\}; \quad (11)$$

$$\gamma_Q = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 |\sin \alpha_1 - \cos \alpha_1|}} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} [|\sin \varphi| + |\cos \varphi| + \right. \\ \left. + \sqrt{2} |\sin \varphi (\sin \alpha_1 - \cos \alpha_1) - \sin(\alpha_1 + \varphi)|] + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} (1 + \sqrt{2} |\sin \alpha_1|) \right\}. \quad (12)$$

Из анализа выражений (9)–(12) следует, что ОТП измерения СКЗ напряжения зависит только от гармонического состава сигнала напряжения. ОТП определения СКЗ тока и ПРП измерения АМ и РМ зависят еще и от угла сдвига фаз между напряжением и током φ и момента начала измерения, характеризуемого начальной фазой α_1 .

Для оценки предельных значений погрешностей измерения ППС следует по-

строить графики зависимости погрешностей определения СКЗ тока, АМ и РМ от φ и α_1 .

Графики зависимости ОТП измерения СКЗ тока и ПРП определения АМ и РМ от φ и α_1 при наличии в сигналах первой и третьей гармоники с коэффициентами $h_{u3} = h_{i3} = 0,1\%$, построенные на основе выражений (10)–(12), представлены на рис. 2–4.

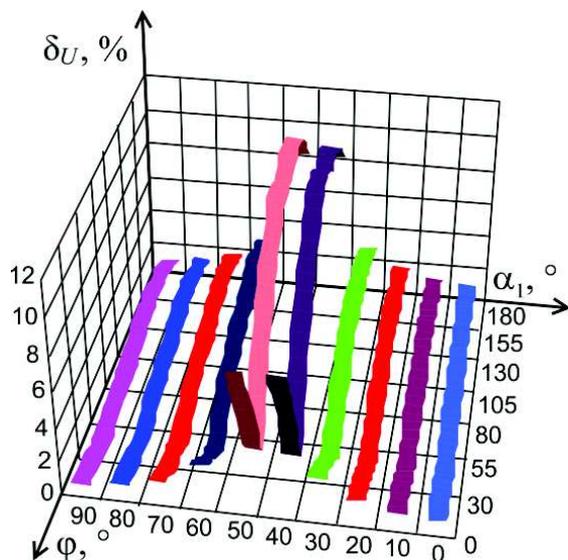


Рис. 2. Графики зависимости $\delta_{I_{СКЗ}}$ от φ и α_1

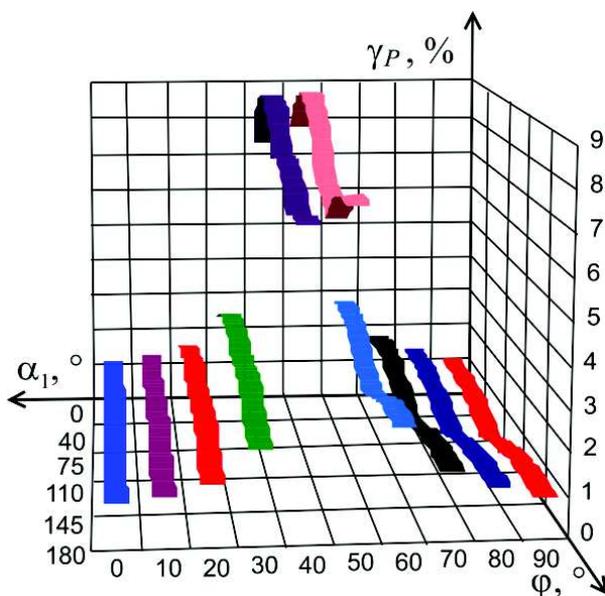


Рис. 3. Графики зависимости γ_P от φ и α_1

Анализ показывает, что при $\alpha_1 = 45^\circ$ знаменатели выражений (10)–(12) обращаются в ноль. Этим объясняется резкое увеличение погрешностей в окрестностях 45° (начальные фазы, равные 40° и 50° , на рис. 2–4).

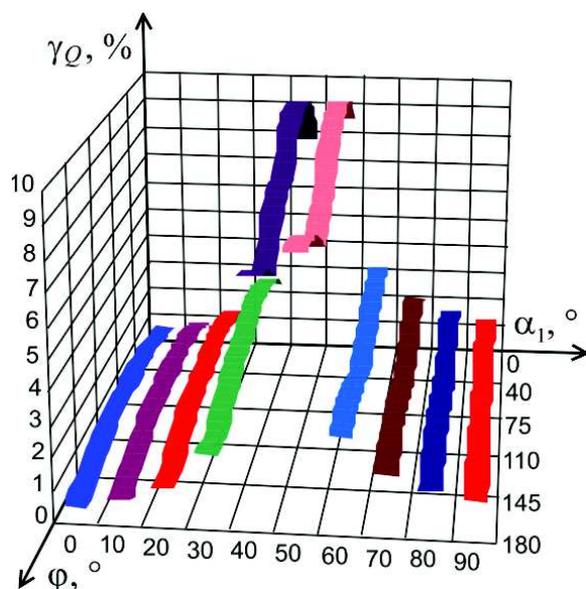


Рис. 4. Графики зависимости γ_Q от φ и α_1

Таким образом, полученные в работе результаты позволяют оценить предельные значения погрешностей определения ППС и, следовательно, выбрать области его возможного использования в зависимости от гармонического состава сигналов в цепях контролируемых объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 240 с.
2. Мелентьев В.С. Анализ погрешности измерения параметров периодических сигналов из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели // Современные материалы, техника и технологии. – 2015. – № 3 (3). – С. 172–178.
3. Melent'ev V.S., Ivanov Yu.M., Lychev A.O. A method of measuring integral characteristics from the instantaneous values of signals separated in time and space // Measurement Techniques: Volume 57, No. 9, October, 2014. – Page 979–984.
4. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Синтез и анализ методов оперативного измерения параметров периодических процессов на основе формирования дополнительных сигналов / Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVI междунар. конф. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2014. – С. 717–722.
5. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Сокращение времени измерения интегральных характеристик при использовании ортогональных составляющих гармонических сигналов / Измерения, контроль, информатизация: матер. XV междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – С. 73–75.
6. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Сеницын А.Е. Синтез методов измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2012. – № 3 (35). – С. 84–89.
7. Мелентьев В.С., Муратова В.В., Ярославкина Е.Е. Метод и система измерения интегральных характеристик с использованием ортогональных составляющих сигналов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4 (40). – С. 206–209.
8. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Ярославкина Е.Е. Метод измерения характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов / Техника и технологии: пути инновационного развития: Матер. III Междунар. науч.-практ. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2013. – С. 126–129.
9. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Симонов А.В. Метод измерения интегральных характеристик на основе сравнения ортогональных составляющих гармонических сигналов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 2(4). – С. 58–62.
10. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Пескова А.С. Совершенствование методов и средств измерения параметров гармонических сигналов на основе сравнения их ортогональных составляющих

- щих // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 3 (9). – С. 34–40.
11. Мелентьев В.С., Рудаков Д.В. Методы измерения интегральных характеристик гармонических сигналов, основанные на сравнении их ортогональных составляющих / Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: межвуз. сборник. – Вып. 1. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2011. – С. 129–131.
 12. Мелентьев В.С. Иванов Ю.М., Муратова В.В. Анализ погрешности метода измерения интегральных характеристик, обусловленной отклонением формы сигнала от гармонической модели // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – 2013. – № 2 (31). – С. 80–84.

Статья поступила в редакцию 2 марта 2016 г.

THE RESEARCH OF THE MEASUREMENT METHOD PARAMETERS ON THE BASIS OF THE FORMATION AND COMPARISON OF ORTHOGONAL VOLTAGE COMPONENTS

V.S. Melent'ev, V.V. Muratova, A.S. Peskova

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

A new method of measuring the parameters (RMS of voltage and current, active and reactive power) on the instantaneous values of harmonic signals is investigated. The method provides the formation of the orthogonal component of the voltage and comparison of the input and additional voltage. In contrast to the known methods based on the formation of orthogonal components of the signals, the method implementation provides the ability to start the measurement in an arbitrary time. The analysis results of the method error due to the actual signal deviation from the harmonic model is given. The obtained results allow to determine the limit values of measurement errors of parameters and to choose a possible area of use of the method.

Keywords: *the parameters of periodic signals, harmonic model, the instantaneous values, orthogonal components, an error.*

*Vladimir S. Melent'ev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Vera V. Muratova, Postgraduate Student.
Anastasia S. Peskova, Postgraduate Student.*