

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 621.317

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА СРАВНЕНИЯ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Н.Е. Карпова

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

Исследуется новый метод определения среднеквадратического значения тока, активной и реактивной мощности периодических сигналов по отдельным мгновенным значениям напряжения и тока. Метод основан на сравнении ортогональных составляющих напряжения и использовании дополнительных временных интервалов. Приводятся результаты оценки погрешности метода из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели. Представлены графики зависимости погрешностей от угла сдвига фаз между первыми гармониками напряжения и тока и длительностью дополнительного временного интервала. Результаты показывают существующие зависимости погрешностей определения интегральных характеристик от длительности интервала времени, что позволяет увеличивать точность измерения за счет соответствующего выбора этого параметра. Полученные в работе результаты позволяют выбрать область применения метода в зависимости от гармонического состава сигнала.

Ключевые слова: интегральные характеристики, СКЗ тока, активная и реактивная мощность, мгновенные значения сигналов, гармоническая модель.

При проведении диагностического контроля оборудования часто возникает необходимость измерений на функционирующих системах. Возникающие при этом трудности объясняются:

- случайным характером ряда воздействий;
- ограниченностью экспериментальных данных;
- ограниченностью времени для обработки информации и принятия решений.

Причем обеспечение необходимого быстрого действия измерительных процессов связано с возможностью своевременного вмешательства в режим работы оборудования. Особенно это становится актуальным при развитии аварийной ситуации, когда время становится решающим фактором.

Надежда Евгеньевна Карпова (к.т.н.), доцент кафедры «Электронные системы и информационная безопасность».

Существуют различные способы решения этой проблемы. В частности – увеличение производительности вычислительных средств. Это приводит к удорожанию средств измерения и обработки.

В этом отношении положительно выделяется аппроксимационный подход, который наиболее эффективно решает поставленную задачу. Данный подход позволяет решать подобные вопросы для одного параметра сигнала, а также определять интегральные характеристики периодических сигналов (ИХПС).

Один из основных вопросов, который возникает при этом, – выбор мгновенных значений сигналов для определения ИХПС.

Изначально считается, что отсчеты сигналов равномерно распределены по периоду. В реальности это не выполняется, что приводит к появлению погрешности, которая зависит от колебания частоты входного сигнала и неточности деления периода на отрезки.

Проще всего методы ИХПС реализуются на определении интегральных характеристик гармонических сигналов (ИХГС).

Существуют различные методы определения ИХГС по их отдельным мгновенным значениям [1].

Широко используются методы определения ИХГС, в которых формируются дополнительные сигналы, сдвинутые по фазе относительно входных, а ИХГС определяются по мгновенным значениям как входных, так и дополнительных сигналов [1].

Известен метод, который использует такой подход и основан на формировании дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых относительно входных на 90° , измерении мгновенных значений сигналов в моменты равенства входного и дополнительного напряжений, входного и дополнительного тока и определении ИХГС по полученным значениям [1]. Однако реализация данного метода предусматривает использование двух фазосдвигающих блоков (ФСБ), осуществляющих сдвиг сигналов напряжения и тока на 90° , что требует дополнительных аппаратных затрат и может привести к возникновению дополнительной погрешности из-за отклонения углов ФСБ в каналах напряжения и тока. Кроме того, время измерения ИХГС достаточно велико и в общем случае зависит от интервала времени между моментами начала процесса измерения и равенства мгновенных значений либо входного и дополнительного сигналов тока, либо напряжения, а также от угла сдвига фаз между напряжением и током.

Наименьшее время требуется для измерения ИХГС по двум мгновенным значениям напряжения и тока, одновременно измеренным в произвольный момент времени, причем вторые мгновенные значения напряжения и тока сдвинуты относительно первых на угол 90° [2]. При этом время измерения не зависит от момента начала измерения, угла сдвига фаз между напряжением и током и периода входного сигнала. Однако реализация данного метода также предусматривает использование двух ФСБ.

Метод, использующий в качестве дополнительных сигналов ортогональные составляющие [3], свободен от вышеизложенных недостатков. Этот метод решает поставленные ранее задачи: сокращает время измерения и не требует деления периода сигнала на равные отрезки, так как интегральные характеристики определяются по двум мгновенным значениям напряжения и тока, одновременно измеренным в произвольные моменты времени. Он также является более простым в реализации, так как в нем формируется только дополнительный сигнал напряжения, сдвинутый относительно входного на 90° .

Таким образом, именно данный метод целесообразно использовать на практике. Следовательно, анализ погрешностей измерения ИХГС данным методом является важной и актуальной задачей.

Суть метода определения ИХГС по ортогональным составляющим [3] состоит в следующем.

В момент равенства входного и дополнительного сигналов напряжения измеряют мгновенное значение тока; через интервал времени Δt одновременно измеряют мгновенные значения входного и дополнительного сигналов напряжений и тока и определяют ИХГС по измеренным значениям.

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

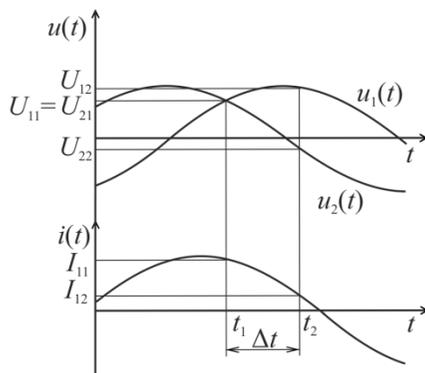


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод измерения

Входные гармонические сигналы напряжения и тока и дополнительный сигнал напряжения имеют вид

$$u_1(t) = U_m \sin \omega t; \quad i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi); \quad u_2(t) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \cos \omega t,$$

где U_m, I_m – амплитудные значения сигналов напряжения и тока;

ω – угловая частота входного сигнала;

φ – угол сдвига фаз между входными сигналами напряжения и тока.

В момент времени t_1 , когда основной и дополнительный сигналы напряжения будут равны, выражения для мгновенных значений сигналов примут вид

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

где α_1, α_2 – фазы сигналов 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 примут вид

$$U_{11} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \tag{1}$$

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

Через интервал времени Δt (в момент времени t_2) мгновенные значения сигналов будут равны

$$U_{12} = U_m \sin\left(\frac{\pi}{4} + \omega\Delta t\right); \quad (3)$$

$$U_{22} = U_m \cos\left(\frac{\pi}{4} + \omega\Delta t\right); \quad (4)$$

$$I_{12} = I_m \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{4} + \omega\Delta t\right). \quad (5)$$

Используя мгновенные значения сигналов (1)–(5), можно получить выражения для определения основных ИХГС:

– среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока

$$U_{\text{СКЗ}} = |U_{11}|; \quad I_{\text{СКЗ}} = \frac{\sqrt{(I_{11}U_{22} - I_{12}U_{11})^2 + (I_{12}U_{11} - I_{11}U_{12})^2}}{|U_{22} - U_{12}|}; \quad (6)$$

– активная (АМ) и реактивная (РМ) мощности

$$P = \frac{|U_{11}|(I_{11}U_{22} - I_{12}U_{11})}{|U_{22} - U_{12}|}; \quad (7)$$

$$Q = \frac{|U_{11}|(I_{12}U_{11} - I_{11}U_{12})}{2|U_{22} - U_{12}|}. \quad (8)$$

Однако при применении метода, основанного на использовании гармонической модели, существует погрешность определения ИХГС, которая обусловлена несоответствием используемой гармонической модели сигнала его реальному виду. Возникает необходимость оценить эту погрешность.

Оценка погрешности результата измерения проводится по максимальному отклонению реального сигнала от гармонической модели. Погрешность результата измерения оценивается как погрешность вычисления функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностями, соответствующими максимальному отклонению модели от реального сигнала [4]. Значения абсолютных погрешностей определения СКЗ тока, активной и реактивной мощности соответственно равны [5]

$$\Delta I_{\tilde{n}\tilde{e}\tilde{c}} = \left[\left| \frac{\delta I_{\tilde{n}\tilde{e}\tilde{c}}}{\delta I_{11}} \right| + \left| \frac{\delta I_{\tilde{n}\tilde{e}\tilde{c}}}{\delta I_{12}} \right| \right] \Delta I_{\text{max}} + \left[\left| \frac{\delta U_{\tilde{n}\tilde{e}\tilde{c}}}{\delta U_{11}} \right| + \left| \frac{\delta U_{\tilde{n}\tilde{e}\tilde{c}}}{\delta U_{12}} \right| + \left| \frac{\delta U_{\tilde{n}\tilde{e}\tilde{c}}}{\delta U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\text{max}}; \quad (9)$$

$$\Delta P = \left[\left| \frac{\delta P}{\delta U_{11}} \right| + \left| \frac{\delta P}{\delta U_{21}} \right| + \left| \frac{\delta P}{\delta U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\text{max}} + \left[\left| \frac{\delta P}{\delta I_{11}} \right| + \left| \frac{\delta P}{\delta I_{12}} \right| \right] \Delta I_{\text{max}}; \quad (10)$$

$$\Delta Q = \left[\left| \frac{\delta Q}{\delta U_{11}} \right| + \left| \frac{\delta Q}{\delta U_{21}} \right| + \left| \frac{\delta Q}{\delta U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\text{max}} + \left[\left| \frac{\delta Q}{\delta I_{11}} \right| + \left| \frac{\delta Q}{\delta I_{12}} \right| \right] \Delta I_{\text{max}}. \quad (11)$$

При этом ΔU_{max} и ΔI_{max} – это значения наибольшего отклонения значений модели от соответствующих значений сигналов.

Данные значения определяются как

$$\Delta U_{\text{max}} = \sup |u(t) - U_{m1} \sin(\omega t)|,$$

где $u(t) = U_{m1} \left\{ \sin(\omega t) + \sum_{k=2}^{\infty} [h_{uk} \sin(k\omega t + \psi_{uk})] \right\}$.

Здесь $u(t)$ – реальный сигнал напряжения в общем виде;
 U_{m1} – амплитудное значение 1-й гармоники сигнала напряжения;
 k – номер гармоники напряжения;
 h_{uk} – коэффициент k -той гармоники сигнала напряжения;
 ψ_{uk} – начальная фаза гармоник напряжения k -го порядка.

Для большинства сетей общего пользования среди высших гармоник наибольшее значение имеет третья гармоника.

В этом случае наибольшее отклонение реального сигнала напряжения, содержащего 1-ю и 3-ю гармоники, при $\psi_{uk} = 0$ от модели

$$\Delta U_{\max} = U_{m1} h_{u3}. \quad (12)$$

Аналогично

$$\Delta I_{\max} = \sup |i(t) - I_{m1} \sin(\omega t)|,$$

где $i(t) = I_{m1} \left\{ \sin(\omega t) + \sum_{k=2}^{\infty} [h_{ik} \sin(k\omega t + \psi_{ik})] \right\}$.

Здесь $i(t)$ – реальный сигнал тока в общем виде; I_{m1} – амплитудное значение 1-й гармоники сигнала тока; h_{ik} – коэффициент k -той гармоники сигнала тока; ψ_{ik} – начальная фаза гармоник тока k -го порядка.

Следовательно, наибольшее отклонение реального сигнала тока, содержащего 1-ю и 3-ю гармоники, от модели при $\psi_{ik} = 0$

$$\Delta I_{\max} = I_{m1} h_{i3}. \quad (13)$$

Если взять соответствующие производные в выражении (9), используя (1)–(6), (12) и (13), и считать, что

$$\begin{aligned} h_{u3} &= h_{i3} = h_3; & U_m &= U_{m1}; \\ I_m &= I_{m1}, \end{aligned}$$

то получим предельное значение абсолютной погрешности определения СКЗ тока:

$$\Delta I_{\tilde{n}\hat{e}\zeta} = I_{m1} h_3 \left[\frac{|\sin(\varphi + \omega\Delta t)| + |\cos(\varphi + \omega\Delta t)| + |\cos(\omega\Delta t)| + 1}{\sqrt{2} |\sin \omega\Delta t|} \right]. \quad (14)$$

Относительная погрешность определения СКЗ тока по максимальному отклонению $\delta_{I_{\text{СКЗ}}}$ определяется выражением [1]

$$\delta_{I_{\tilde{n}\hat{e}\zeta}} = \frac{\Delta I_{\tilde{n}\hat{e}\zeta}}{\frac{I_{m1}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + h_3^2}},$$

а ее значение с учетом (14)

$$\delta_{I_{\tilde{n}\hat{e}\zeta}} = \frac{h_3}{\sqrt{1 + h_3^2}} \left[\frac{|\sin(\varphi + \omega\Delta t)| + |\cos(\varphi + \omega\Delta t)| + |\cos(\omega\Delta t)| + 1}{|\sin \omega\Delta t|} \right]. \quad (15)$$

График зависимости $\delta_{СКЗ}$ от φ приведен на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что погрешность минимальна (около 1 %) при значении $\omega\Delta t$, стремящемся к 90° . Углом $\varphi = 90^\circ$ и 120° также соответствуют минимальные значения погрешности определения СКЗ тока.

Следовательно, при определении СКЗ тока при использовании метода, основанного на сравнении ортогональных составляющих гармонических сигналов, наименьшая погрешность измерения достигается при соотношении угловой частоты входного сигнала ω и интервалов времени Δt $\omega\Delta t=90^\circ$, а также при фазовом сдвиге между входными сигналами напряжения и тока, равном 90° или 120° .

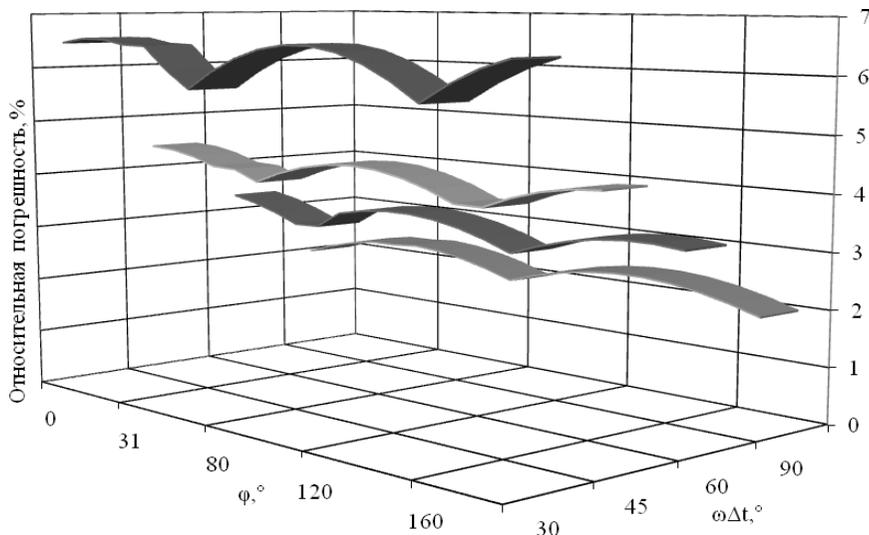


Рис. 2. Относительная погрешность определения СКЗ тока

Предельное значение абсолютной погрешности определения активной мощности в соответствии с (7) и (10) с учетом принятых ранее допущений имеет вид

$$\Delta P = \frac{h_3}{2\sqrt{2} \sin \omega\Delta t} U_{m_1} I_{m_1} [1 + |\cos(\omega\Delta t)| + |\sin(\omega\Delta t)|(1 + 2|\cos \varphi|) + 2|\sin \varphi|]. \quad (16)$$

Предельное значение абсолютной погрешности определения реактивной мощности в соответствии с (8) и (11) с учетом принятых ранее допущений имеет вид

$$\Delta Q = \frac{h_3}{4\sqrt{2}} U_{m_1} I_{m_1} \frac{[1 + |\cos(\omega\Delta t)| + |\sin(\omega\Delta t)| + |\cos \varphi| + 2|\sin \varphi| + 2|\sin \omega\Delta t \cos \varphi|]}{|\sin \omega\Delta t|}. \quad (17)$$

Оценим приведенные погрешности определения активной и реактивной мощности.

Известно, что

$$\gamma_P = \frac{\Delta P}{S} 100\%, \text{ а } \gamma_Q = \frac{\Delta Q}{S} 100\%,$$

где S рассчитывается как

$$S = U_{m_1} \frac{\sqrt{1+h_{u_3}^2}}{\sqrt{2}} I_{m_1} \frac{\sqrt{1+h_{i_3}^2}}{\sqrt{2}}.$$

Тогда с учетом (16), (17) и ранее принятых допущений

$$\gamma_P = \frac{h_3 \left[1 + |\cos(\omega\Delta t)| + |\sin(\omega\Delta t)|(1 + 2|\cos\phi|) + 2|\sin\phi| \right]}{(1+h_3^2)\sqrt{2}|\sin(\omega\Delta t)|} 100\%; \quad (18)$$

$$\gamma_Q = \frac{h_3 \left[1 + |\cos(\omega\Delta t)| + |\sin(\omega\Delta t)| + |\cos\phi| + 2|\sin\phi| + 2|\sin\omega\Delta t \cos\phi| \right]}{2\sqrt{2}(1+h_3^2)|\sin\omega\Delta t|} 100\%. \quad (19)$$

Если считать, что реальный сигнал близок к гармоническому, то принимаем значение $h_3=0,01$.

При таком значении h_3 график определения приведенной погрешности γ_{PA} принимает следующий вид (рис. 3).

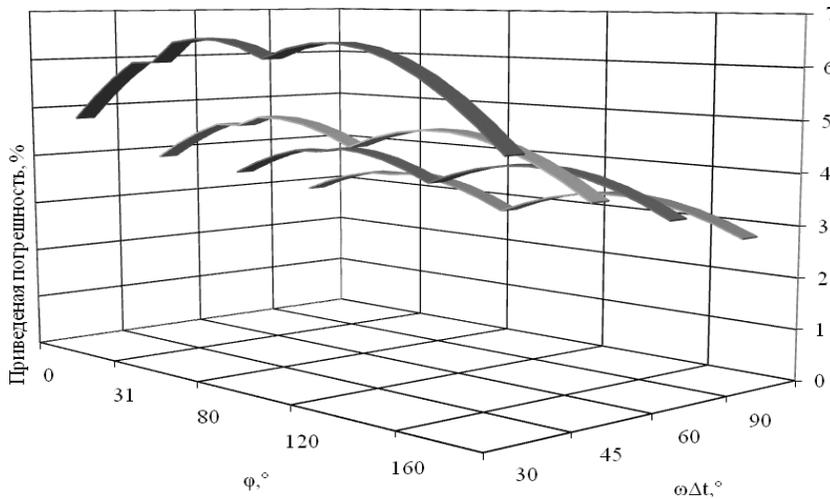


Рис. 3. Приведенная погрешность определения активной мощности γ_P

Из рис. 3 видно, что погрешность резко возрастает (достигает 7 %) при значениях $\omega\Delta t$, близких к 0° , и минимальна (около 2 %) при значениях $\omega\Delta t = 90^\circ$.

Следовательно, при определении активной мощности при использовании метода, основанного на сравнении ортогональных составляющих гармонических сигналов, наименьшая погрешность измерения достигается при соответствии угловой частоты входного сигнала ω и интервала Δt значению $\omega\Delta t=90^\circ$, а также при фазовом сдвиге между входными сигналами напряжения и тока, равном 120° .

График погрешности γ_Q приведен на рис. 4. Из рисунка видно, что погрешность минимальна (около 1 %) при значениях $\omega\Delta t$, близких к 0° .

Следовательно, при определении реактивной мощности при использовании метода, основанного на сравнении ортогональных составляющих гармонических

сигналов, наименьшая погрешность измерения достигается при соотношении угловой частоты ω входного сигнала и интервала времени Δt $\omega\Delta t=0^\circ$, а также при фазовом сдвиге между входными сигналами напряжения и тока, равном 90° .

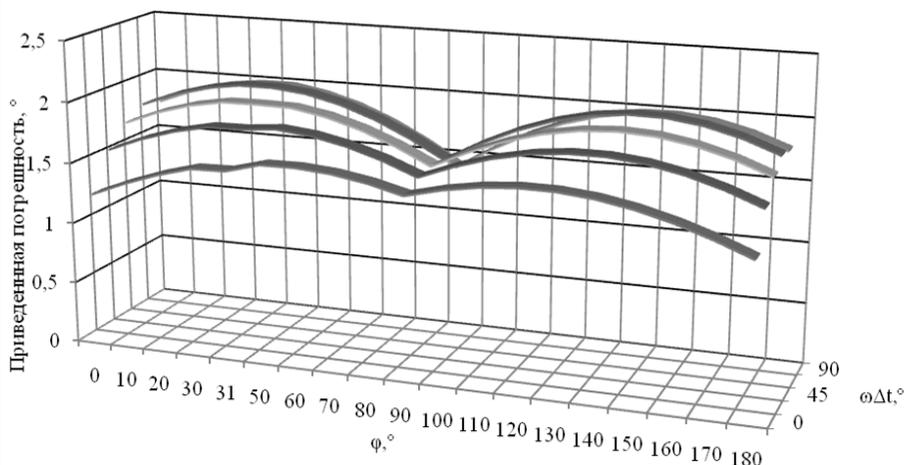


Рис. 4. Приведенная погрешность определения реактивной мощности γ_Q

Анализ зависимостей, представленных на рис. 2–4, показывает, что погрешность измерения можно существенно снизить за счет выбора соотношения угловой частоты ω входного сигнала и интервала времени Δt .

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

Погрешности определения СКЗ тока, активной и реактивной мощности зависят от угла сдвига фаз между напряжением и током и соотношения $\omega\Delta t$, то есть периода входного сигнала $T = \frac{1}{2\pi\omega}$ и интервала времени Δt .

Поскольку угол сдвига фазы φ в общем случае является случайной величиной, то снижение погрешностей может быть достигнуто за счет соответствующего выбора интервала времени Δt .

На основании полученных выше результатов можно отметить, что наименьшая погрешность измерения достигается при соотношении $\omega\Delta t = 90^\circ$.

Полученные результаты могут быть использованы для определения частотной области применения метода при известных спектрах входных сигналов.

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. Метод измерения интегральных характеристик на основе сравнения ортогональных составляющих гармонических сигналов / Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Симонов А.В. // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 2(4). – С. 58-62.
3. Мелентьев В.С. Синтез методов измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов / Мелентьев В.С., Иванов Ю.М. и др. // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 3 (35). – С. 84-90.
4. Картова Н.Е. Сравнительный анализ погрешностей методов измерения активной и реактивной мощности и коэффициента мощности по отдельным мгновенным значениям сигналов //

Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 3 (31). – С. 61-68.

5. *Иванов Ю.М.* Анализ метода измерения параметров гармонических сигналов по мгновенным значениям их ортогональных составляющих // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 4(36). – С. 121-125.

Статья поступила в редакцию 24 мая 2016 г.

THE ANALYSIS OF INACCURACY OF THE METHODS OF THE ACTIVE AND REACTIVE POWER AND POWERS FACTOR MEASUREMENT ON INSTANT SIGNAL SAMPLINGS

N.E. Karpova

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

In the paper the methods of accuracy of the active and reactive power determination are investigated, as well as power factor of periodic signal on instant voltage and current samplings. The analysis of different methods of the measurement of the integral parameters of periodic signal is considered. The results of inaccuracy estimation of the method are given because of the deviation of real signal from harmonic model. Dependence error diagrams from phase shift angle are shown between the first tension harmonics, current and additional time interval duration. Integral characteristic errors depend on time interval which allows to increase the measurement accuracy by this parameter choice. The obtained results allow to choose use method area by means of harmonic signal composition.

Keywords: *integral parameters, active and reactive power, instant signal samplings, harmonic model.*