

УДК 621.317

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНВЕРТИРОВАНИЯ ВХОДНОГО СИГНАЛА ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ*

В.С. Мелентьев, Е.Е. Ярославкина, Е.В. Павленко

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

E-mail: vs_mel@mail.ru

Рассматривается новый метод измерения параметров (среднеквадратических значений напряжения и тока, активной и реактивной мощности) по мгновенным значениям гармонических сигналов, обеспечивающий сокращение времени измерения. В отличие от известных методов, основанных на формировании дополнительных сигналов напряжения, выявлении моментов переходов сигналов через ноль и сравнении их мгновенных значений, реализация метода позволяет исключить погрешности по модулю фазосдвигающих блоков. Предлагается структурная схема информационно-измерительной системы, реализующей метод. Приводятся результаты анализа погрешности системы, обусловленной отклонением реальных сигналов от гармонической модели. Полученные результаты позволяют выбрать соответствующие аппаратные средства в зависимости от предъявляемых требований по точности измерения.

Ключевые слова: гармонические сигналы, мгновенные значения, дополнительные сигналы, фазосдвигающие блоки, гармоническая модель, погрешность.

Использование аппроксимационных методов и систем измерения параметров гармонических и близких к гармоническим сигналов (среднеквадратических значений напряжения (СКЗН) и тока (СКЗТ), активной (АМ) и реактивной (РМ) мощности) по отдельным мгновенным значениям (МЗ), которые не связаны с периодом входного сигнала, позволяет значительно сократить время определения параметров за счет замены функциональных преобразований арифметическими операциями с МЗ [1].

Для реализации такого подхода возможно разделение мгновенных значений во времени и в пространстве [2]. Возможно также использование как временного, так и пространственного разделения.

Использование пространственного разделения требует формирования дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно входных, и в общем случае обеспечивает уменьшение времени определения параметров [3]. Для упрощения алгоритма измерения, а также сокращения аппаратных затрат в ка-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-00173-а).

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

Екатерина Евгеньевна Ярославкина (к.т.н.), доцент кафедры «Информационно-измерительная техника».

Елена Владиславовна Павленко, аспирант.

честве дополнительных сигналов используют ортогональные составляющие входных.

Использование ортогональных составляющих входных сигналов может привести к достаточно большой частотной погрешности фазосдвигающего блока (ФБ), который осуществляет сдвиг входного сигнала на 90° . Изменение частоты в достаточно широких пределах может привести к тому, что угол сдвига фазы ФБ может отличаться от 90° [4].

Для исключения частотной погрешности находят применение методы измерения параметров гармонических сигналов (ГС), которые основаны на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных на угол $\Delta\alpha$, значение которого может быть выбрано произвольным образом, и определении параметров ГС с использованием МЗ входных и дополнительных сигналов [5].

При аппаратной реализации данных методов возможно возникновение погрешности по модулю ФБ, которая заключается в том, что амплитудные значения напряжения на входе и выходе фазосдвигающего блока будут отличаться [6].

В [7] предложен метод измерения параметров ГС, в котором используется формирование двух дополнительных сигналов напряжения: первого – инверсного входному и второго – сдвинутого относительно входного на произвольный угол $\Delta\alpha$. Реализация данного метода исключает погрешность по модулю ФБ.

Недостатком метода является большое время измерения, которое не может быть меньше четверти периода.

В [8] предложен метод измерения параметров ГС, который заключается в формировании двух дополнительных сигналов напряжения, сдвинутых по фазе на углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$ относительно входного, и сигнала, инверсного входному.

Однако при отклонении углов сдвига фазы ФБ, формирующих первый и второй дополнительные сигналы, может возникнуть существенная погрешность.

В статье рассматривается новый метод определения параметров ГС, исключая данный вид погрешности, поскольку используется формирование только одного дополнительного напряжения. Кроме того, реализация метода обеспечивает исключение погрешности по модулю ФБ и сокращение времени измерения.

Метод заключается в том, что в момент перехода дополнительного напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол $\Delta\alpha$, через ноль измеряют первые МЗ входного напряжения и тока; в момент равенства дополнительного напряжения и сигнала, инверсного входному, измеряют вторые мгновенные значения входного напряжения и тока. Параметры ГС определяют по полученным значениям.

Сущность метода показана на рис. 1.

Если напряжение и ток являются гармоническими $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ и $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, то дополнительное напряжение будет иметь вид $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$, а инверсный сигнал - $u_3(t) = -U_m \sin \omega t$, где U_m – амплитудное значение напряжения; ω – угловая частота; φ – угол сдвига фаз между напряжением и током.

В момент времени t_1 , когда $u_2(t)$ переходит через ноль, МЗ сигналов будут равны $U_{11} = U_m \sin(-\Delta\alpha)$; $I_1 = I_m \sin(\varphi - \Delta\alpha)$.

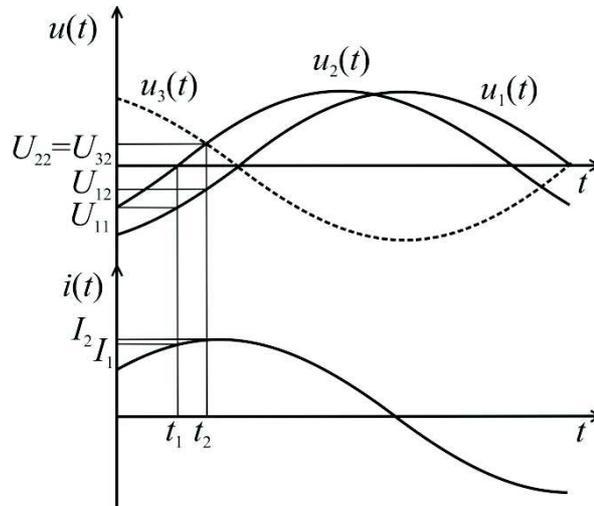


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

В момент времени t_2 , когда $U_{22} = U_{32}$, МЗ сигналов примут вид:

$$U_{12} = U_m \sin \alpha_1; U_{22} = U_m \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha); U_{32} = -U_m \sin \alpha_1; I_2 = I_m \sin(\alpha_1 + \varphi),$$

где α_1 – начальная фаза входного напряжения в момент времени t_2 .

Равенство МЗ сигналов $U_{22} = U_{32}$ будет выполняться, если $-\alpha_1 = \alpha_1 + \Delta\alpha$

($\Delta\alpha \neq 0$), то есть когда $\Delta\alpha = 2\pi l - 2\alpha_1$ или $\alpha_1 = \pi l - \frac{\Delta\alpha}{2}$, где $l = 0, 1$.

$$\text{Отсюда } U_{12} = \pm U_m \sin \frac{\Delta\alpha}{2}, \text{ а } I_2 = \pm I_m \sin\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right).$$

При использовании МЗ сигналов после преобразований можно получить выражения для определения основных параметров ГС:

– СКЗН и СКЗТ

$$U_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2}U_{12}^2}{\sqrt{4U_{12}^2 - U_{11}^2}}; \quad (1)$$

$$I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{2[U_{12}^2(I_1^2 + I_2^2) - I_1 I_2 U_{11} U_{12}]}{4U_{12}^2 - U_{11}^2}}; \quad (2)$$

– АМ и РМ

$$P = \frac{|U_{12}| \left| U_{11} (I_2 U_{11} - I_1 U_{12}) - I_2 (4U_{12}^2 - U_{11}^2) \right|}{2(4U_{12}^2 - U_{11}^2)}; \quad (3)$$

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

Метод можно реализовать с помощью следующей информационно-измерительной системы (ИИС) (рис. 2).

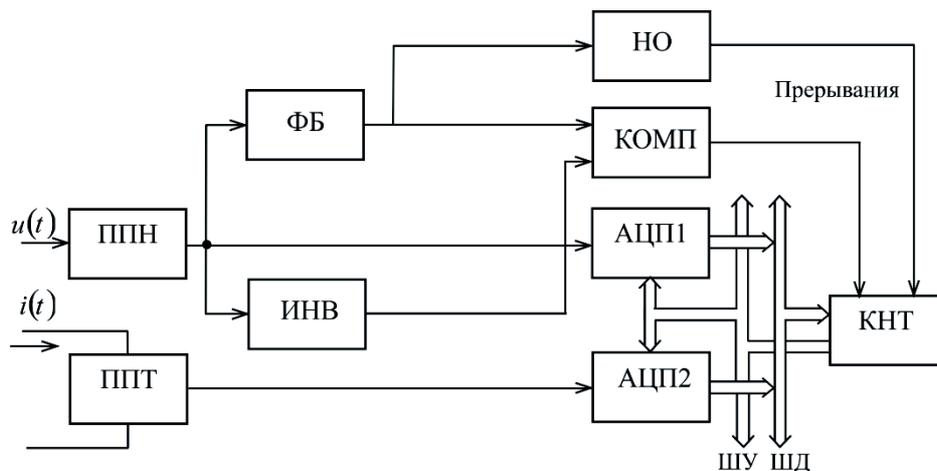


Рис. 2. Схема ИИС, реализующей метод

В состав ИИС входят: первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ, аналого-цифровые преобразователи АЦП1 и АЦП2, компаратор КОМП, фазосдвигающий блок ФБ, производящий сдвиг напряжения на угол $\Delta\alpha$, инвертор ИНВ, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД.

Анализ показывает, что в случае наличия погрешности по модулю фазосдвигающего блока дополнительное напряжение примет вид

$$u'_2(t) = U'_m \sin(\omega t + \Delta\alpha),$$

где U'_m – амплитудное значение напряжения на выходе ФБ.

В этом случае равенство МЗ сигналов напряжения произойдет в момент времени t'_2 :

$$U'_{22} = U'_{32} = U'_m \sin(\alpha'_1 + \Delta\alpha).$$

Поскольку изначально считалось, что угол сдвига $\Delta\alpha$ – произвольный, то это не приведет к погрешности, а сместит моменты равенства сигналов. Таким образом, метод и реализующая его ИИС инвариантны к погрешности по модулю ФБ.

Предлагаемый метод предназначен для измерения параметров сигналов с гармоническими моделями. При искажении формы реальных сигналов возникает методическая погрешность.

Для анализа данной погрешности можно воспользоваться известной методикой оценки погрешности результата измерения параметра как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала. Погрешность вычисления значения функции, у которой аргументы заданы приближенно, может быть найдена с помощью дифференциала этой функции [1].

В случае, когда погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению моделей от реальных сигналов, предельные значения абсолютных погрешностей измерения параметров согласно (1) – (4) примут вид:

$$\Delta U_{СКЗ} = \left(\left| \frac{\partial U_{СКЗ}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial U_{СКЗ}}{\partial U_{12}} \right| \right) \Delta U_{\max}; \quad (5)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left(\left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{12}} \right| \right) \Delta U_{\max} + \left(\left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_2} \right| \right) \Delta I_{\max}; \quad (6)$$

$$\Delta P = \left(\left| \frac{\partial P}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{12}} \right| \right) \Delta U_{\max} + \left(\left| \frac{\partial P}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_2} \right| \right) \Delta I_{\max}; \quad (7)$$

$$\Delta Q = \left(\left| \frac{\partial Q}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{12}} \right| \right) \Delta U_{\max} + \left(\left| \frac{\partial Q}{\partial I_1} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial I_2} \right| \right) \Delta I_{\max}, \quad (8)$$

где ΔU_{\max} , ΔI_{\max} – абсолютные погрешности аргументов, которые в предельном случае соответствуют максимальным отклонениям моделей от реальных сигналов.

В общем случае предельные абсолютные погрешности 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 k -тых гармоник напряжения и тока;

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

U_{km} и I_{km} – амплитуды k -тых гармоник напряжения и тока.

Используя (1) – (8), можно определить относительные погрешности измерения СКЗН и СКЗТ и приведенные погрешности измерения АМ и РМ:

$$\delta_{U_{CK3}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \left(\left| \cos \frac{\Delta\alpha}{2} \right| + 2|\cos \Delta\alpha| \right)}{2 \left| \sin^3 \frac{\Delta\alpha}{2} \right| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2}}; \quad (9)$$

$$\delta_{I_{CK3}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left[\left| \cos(\varphi - \Delta\alpha) \right| + \left| \cos\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right) \right| \right]}{\left| \sin \frac{\Delta\alpha}{2} \right| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \left[\left| \cos\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right) \cos(\varphi - \Delta\alpha) \right| + 2 \left| \cos^2\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right) - \sin^2(\varphi - \Delta\alpha) \right| \right]}{2 \left| \sin^3 \frac{\Delta\alpha}{2} \right| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}}; \quad (10)$$

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

$$\times \left[\left| \cos\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right) + \cos(\varphi - \Delta\alpha)\cos\frac{\Delta\alpha}{2} \right| + \left| \cos(\varphi - \Delta\alpha)(2 + \cos\Delta\alpha) + \cos\varphi(2 - \cos\Delta\alpha) \right| \right]; \quad (11)$$

$$\gamma_Q = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left(1 + 2 \left| \cos\frac{\Delta\alpha}{2} \right| \right)}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2 \left| \sin^3 \frac{\Delta\alpha}{2} \right| \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} \times$$

$$\times \left[\left| \sin\frac{\Delta\alpha}{2} \cos(\varphi - \Delta\alpha) - \sin\left(\varphi + \frac{\Delta\alpha}{2}\right) \right| + 2 \left| 2 \sin^3 \frac{\Delta\alpha}{2} \cos\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right) - \sin\varphi \right| \right]. \quad (12)$$

Из выражений (9) – (12) следует, что погрешность измерения СКЗН зависит от угла сдвига фазы $\Delta\alpha$, а погрешности определения остальных параметров находятся в зависимости еще и от угла сдвига фазы между напряжением и током φ .

Зависимость относительной погрешности измерения СКЗН от $\Delta\alpha$ в соответствии с (9) при наличии в сигнале 1-й и 3-й гармоник с $h_{U3} = 0,2\%$ приведена на рис. 3.

На рис. 4–6 представлены графики погрешности измерения СКЗТ, АМ и РМ в зависимости от $\Delta\alpha$ и φ согласно (10)–(12) при наличии в сигналах 1-й и 3-й гармоник с $h_{U3} = h_{I3} = 0,2\%$.

Разработанный метод измерения параметров ГС использует формирование дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого на произвольный угол относительно входного, и сигнала, инверсного входному. Поскольку инверторы, используемые для этих целей, могут обеспечивать погрешность в сотые доли процента, то это позволяет исключить угловую погрешность и погрешность по напряжению ИНВ.

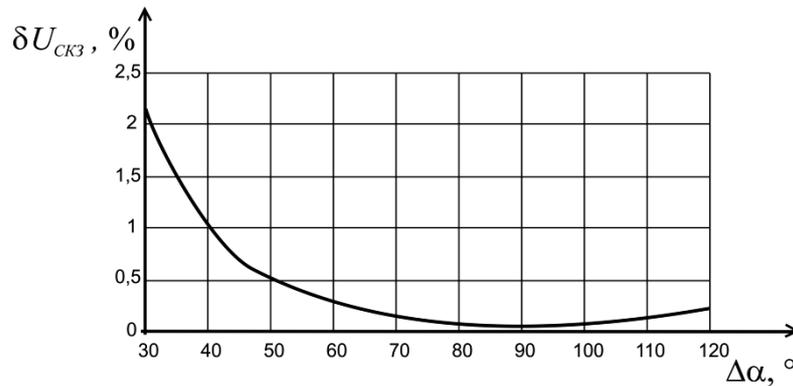


Рис. 3. График зависимости $\delta U_{СКЗ}$ от $\Delta\alpha$

Анализ показывает, что при наличии в сигналах гармонических составляющих погрешности измерения параметров существенно увеличиваются. При этом меньшие значения погрешностей имеют в общем случае место при $\Delta\alpha$, близком к 90° . При определении СКЗТ, АМ и РМ погрешности снижаются при $\Delta\alpha > 90^\circ$.

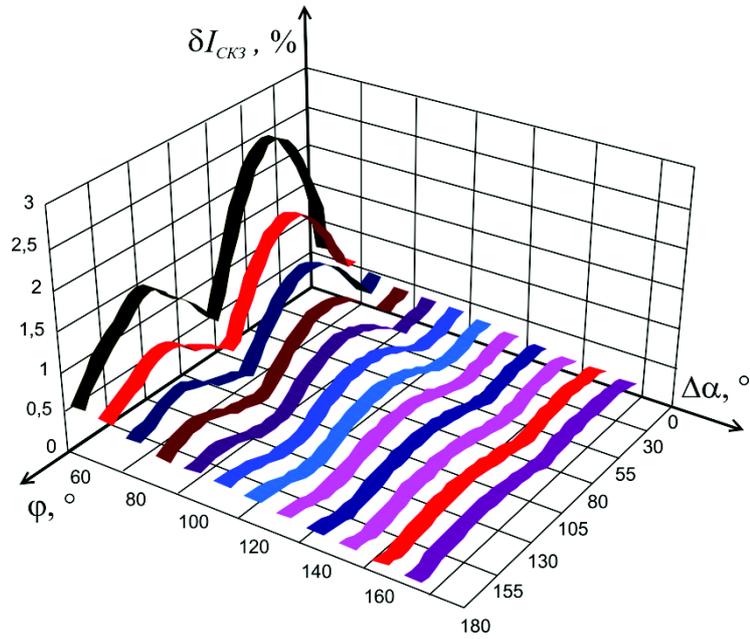


Рис. 4. Графики зависимости δI_{CK3} от $\Delta\alpha$ и φ

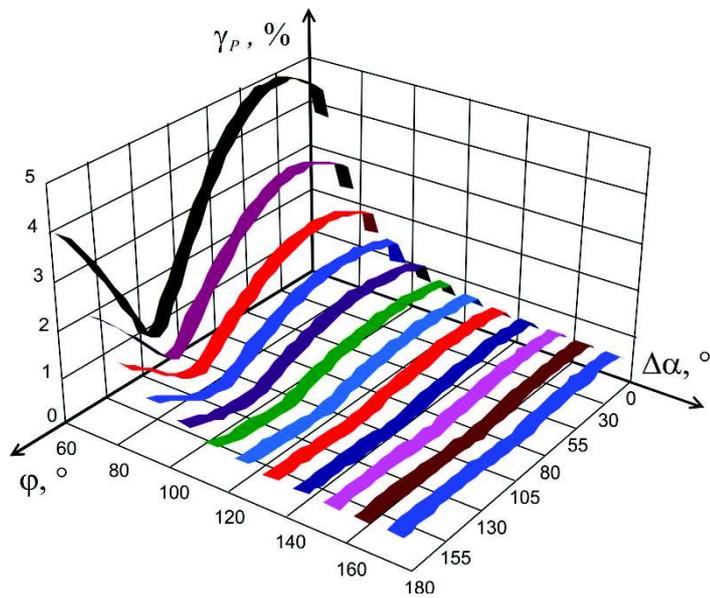


Рис. 5. Графики зависимости γ_P от $\Delta\alpha$ и φ

Полученные результаты позволяют осуществлять выбор области использования метода при соответствующем спектре сигналов и предъявляемых требованиях по точности измерения, а также подбирать оптимальные параметры измерительного процесса для обеспечения наименьшей погрешности.

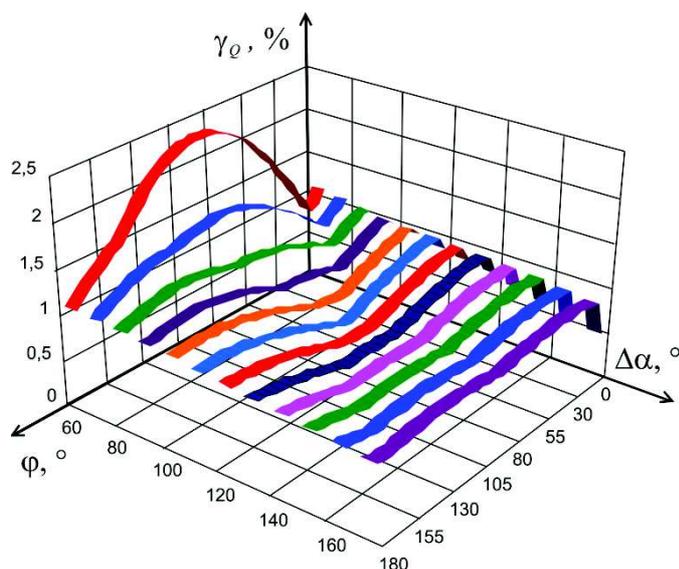


Рис. 6. Графики зависимости γ_Q от $\Delta\alpha$ и φ

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. 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.
3. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Исследование метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям сигналов, разделенным в пространстве // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. – 2014. – Т. 9. – № 10 (137). – С. 52-55.
4. Мелентьев В.С., Ярославкина Е.Е., Павленко Е.В. Исследование влияния погрешности формирования ортогональных составляющих на результат измерения параметров гармонических сигналов / Теоретические и прикладные аспекты современной науки: Сб. науч. трудов по матер. VII Междунар. науч.-практ. конф. – Белгород: АПНИ, 2015. – Ч. 3. – С. 80-82.
5. Мелентьев В.С., Муратова В.В., Таштабанов Б.Н. Новый подход к повышению точности измерения параметров периодических сигналов / Теория и практика современной науки: Матер. XVII науч.-практ. конф. – Москва: Изд.-во «Институт стратегических исследований», 2015. – С. 127-134.
6. Мелентьев В.С. Оценка влияния погрешности формирования дополнительного напряжения на точность измерения параметров гармонических сигналов // Современные материалы, техника и технологии: Науч.-практ. журнал. – 2015. – №1 (11). – С. 146-151.
7. Мелентьев В.С., Муратова В.В., Иванов Ю.М. Метод измерения характеристик периодических сигналов, инвариантный к погрешностям формирования дополнительного сигнала // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т. 16. – № 1(2). – С. 439-443.
8. Иванов Ю.М. Сокращение времени измерения характеристик периодических сигналов на основе формирования дополнительных напряжений // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 3 (43). – С. 47-52.

Статья поступила в редакцию 27 мая 2015 г.

THE USE OF INVERTING THE INPUT SIGNAL TO REDUCE THE TIME MEASUREMENT OF HARMONIC SIGNALS PARAMETERS

V.S. Melent'ev, E.E. Jaroslavkina, E.V. Pavlenko

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) by the harmonic- signal instantaneous values which provides the measurement time reduction is considered. In contrast to the methods known which are based on the formation of additional voltage signals, identifying the moments of signal zero crossings, and comparing their instantaneous values, the method realization eliminates modulo errors of the phase-shifting units. A block diagram of the information-measuring system implementing the method is offered. The results of the analysis of the system error due to the actual signal deviation from the harmonic model are given. The results obtained allow to select the appropriate equipment depending on the measurement accuracy requirements.

Keywords: *harmonic signals, instant values, additional signals, phase-shifting units, harmonic model, an error.*

Vladimir S. Melent'ev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Ekaterina E. Jaroslavkina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Elena V. Pavlenko, Postgraduate Student.