

УДК 621.317

## **СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ\***

**Ю.М. Иванов**

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

E-mail: fuego27@rambler.ru

*Рассматривается новый метод измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям гармонических сигналов, обеспечивающий сокращение времени измерения. В отличие от известных методов, основанных на формировании двух 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 квантованием мгновенных значений сигналов. Полученные результаты позволяют выбирать соответствующие аппаратные средства в зависимости от предъявляемых требований по точности и времени измерения.*

**Ключевые слова:** гармонические сигналы, интегральные характеристики, мгновенные значения, дополнительные сигналы, фазосдвигающие блоки, погрешность.

Основной предпосылкой разработки и использования методов и средств измерения интегральных характеристик периодических сигналов (среднеквадратических значений (СКЗ) напряжения и тока, активной (АМ) и реактивной (РМ) мощности) по отдельным мгновенным значениям, не связанным с периодом входного сигнала, является существенное сокращение времени измерения и обеспечение возможности определения данных параметров за долю периода [1].

Однако большинство таких методов предназначено для измерения интегральных характеристик гармонических сигналов (ИХГС), что накладывает ограничения на область их применения. Поэтому подобные методы пригодны для определения характеристик определенного класса сигналов, близких к гармоническим, с последующей оценкой погрешности, обусловленной отклонением модели от реального сигнала [2].

Одним из возможных путей дальнейшего сокращения времени измерения ИХГС является использование дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных на определенный угол, то есть пространственное разделение мгновенных значений сигналов [3].

Если в качестве дополнительных сигналов использовать ортогональные составляющие входных, то это значительно упрощает алгоритм измерения ИХГС. Однако при реализации таких методов может возникнуть существенная частот-

---

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

Юрий Михайлович Иванов (к.т.н.), с.н.с. кафедры «Информационно-измерительная техника».

ная погрешность фазосдвигающего блока (ФСБ), производящего сдвиг входного сигнала на  $90^\circ$ . При изменении частоты угол сдвига фазы ФСБ может отличаться от  $90^\circ$  [4].

Исключение данного вида погрешности обеспечивают методы измерения ИХГС, в которых формируются дополнительные сигналы, сдвинутые относительно входного на произвольный (в общем случае) угол  $\Delta\alpha$ , и используются мгновенные значения как входного, так и дополнительных сигналов. Однако реализация подобных методов может привести к погрешности по напряжению (погрешности по модулю) ФСБ, которая заключается в том, что амплитуда входного сигнала будет отличаться от амплитудного значения сигнала на выходе ФСБ [5].

В [6] предложен метод измерения ИХГС, основанный на формировании двух дополнительных сигналов напряжения: первого – инверсного входному и второго – сдвинутого относительно входного на произвольный угол  $\Delta\alpha$ , который обеспечивает исключение данного вида погрешности.

Метод заключается в том, что в момент равенства дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол  $\Delta\alpha$ , и сигнала, инверсного входному, измеряют первые мгновенные значения входного напряжения и тока; в момент равенства дополнительного и входного напряжений измеряют вторые мгновенные значения входных сигналов напряжения и тока. ИХГС определяют по измеренным значениям.

Недостатком метода является достаточно большое время измерения, которое зависит от соотношения между моментом начала измерения и моментом равенства дополнительного и инверсного напряжений и длительности интервала времени между моментами равенства дополнительного и инверсного напряжений и входного и дополнительного сигналов напряжения.

В статье рассматривается новый метод определения ИХГС, реализация которого обеспечивает сокращение времени измерения.

Метод заключается в формировании двух дополнительных сигналов напряжения, сдвинутых по фазе на углы  $\Delta\alpha$  и  $2\Delta\alpha$  относительно входного, и сигнала, инверсного входному. При этом в момент равенства дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол  $2\Delta\alpha$ , и сигнала, инверсного входному, измеряют первые мгновенные значения входного напряжения и тока; в момент равенства дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол  $\Delta\alpha$ , и сигнала, инверсного входному, измеряют вторые мгновенные значения входного напряжения и тока. ИХГС определяют по измеренным мгновенным значениям входного напряжения и тока.

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

Если входное напряжение и ток имеют гармонические модели  $u_1(t) = U_m \sin \omega t$  и  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ , то дополнительные напряжения примут вид  $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$ ,  $u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha)$ , а инверсный сигнал –  $u_4(t) = -U_m \sin \omega t$ , где  $U_m$  – амплитудное значение напряжения;  $\omega$  – угловая частота;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между входным напряжением и током.

В момент времени  $t_1$ , когда  $U_{31} = U_{41}$ , мгновенные значения сигналов будут равны:

$$U_{11} = U_m \sin \alpha_1; U_{41} = -U_m \sin \alpha_1; U_{31} = U_m \sin(\alpha_1 + 2\Delta\alpha); I_1 = I_m \sin(\alpha_1 + \varphi),$$

где  $\alpha_1$  – начальная фаза входного напряжения в момент времени  $t_1$ .

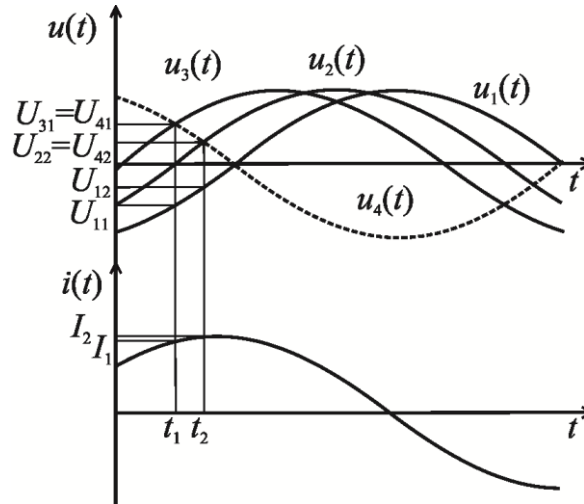


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Равенство мгновенных значений сигналов  $U_{31} = U_{41}$  будет выполняться, если  $-\alpha_1 = \alpha_1 + 2\Delta\alpha$  ( $\Delta\alpha \neq 0$ ), то есть когда  $2\Delta\alpha = 2\pi l - 2\alpha_1$  или  $\alpha_1 = \pi l - \Delta\alpha$ , где  $l=0, 1$ .

Отсюда  $U_{11} = \pm U_m \sin \Delta\alpha$ , а  $I_1 = \pm I_m \sin(\varphi - \Delta\alpha)$ .

В момент времени  $t_2$ , когда  $U_{22} = U_{42}$ , мгновенные значения сигналов примут вид

$$U_{12} = U_m \sin \alpha_2; U_{42} = -U_m \sin \alpha_2; U_{22} = U_m \sin(\alpha_2 + \Delta\alpha); I_2 = I_m \sin(\alpha_2 + \varphi),$$

где  $\alpha_2$  – начальная фаза входного напряжения в момент времени  $t_2$ .

Равенство мгновенных значений сигналов  $U_{22} = U_{42}$  выполняется в том случае, если  $-\alpha_2 = \alpha_2 + \Delta\alpha$ , то есть когда  $\Delta\alpha = 2\pi l - 2\alpha_2$  или  $\alpha_2 = \pi l - \frac{\Delta\alpha}{2}$ .

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

На основе использования мгновенных значений сигналов после преобразований можно получить выражения для определения основных ИХГС:

– СКЗ напряжения и тока

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

$$I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{U_{12}^2(I_1^2 + I_2^2) - U_{11}U_{12}I_1I_2}{4U_{12}^2 - U_{11}^2}}; \quad (2)$$

– активная и реактивная мощности

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

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

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

В состав ИИС входят: первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ, аналого-цифровые преобразователи АЦП1 и АЦП2, компараторы КОМП1 и КОМП2, фазосдвигающие блоки ФСБ1 и ФСБ2, осуществляющие сдвиг напряжения на угол  $\Delta\alpha$ , инвертор ИНВ, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД.

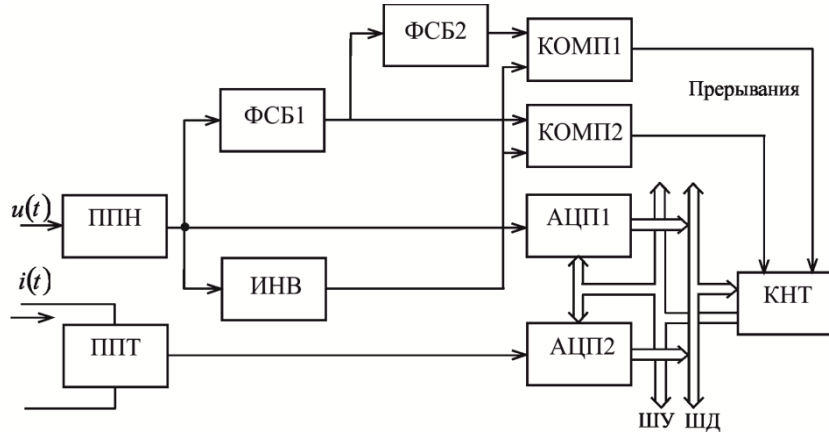


Рис. 2. Схема ИИС, реализующей метод

Анализ показывает, что если ФСБ1 и ФСБ2 идентичны, то в случае наличия погрешности по модулю фазосдвигающих блоков дополнительные напряжения примут вид

$$u'_2(t) = U'_m \sin(\omega t + \Delta\alpha); \quad u'_3(t) = U'_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha),$$

где  $U'_m$  – амплитудное значение напряжения на выходе фазосдвигающего блока.

В этом случае равенство мгновенных значений сигналов напряжения произойдет в моменты времени  $t'_1$  и  $t'_2$ :

$$U'_{31} = U'_{41} = U'_m \sin(\alpha'_1 + 2\Delta\alpha) \quad \text{и} \quad U'_{22} = U'_{42} = U'_m \sin(\alpha'_2 + \Delta\alpha).$$

Поскольку изначально считалось, 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 ФСБ.

Для ИИС характерна погрешность квантования, которая неизбежно возникает при реализации цифровых методов измерения. Для анализа влияния квантования мгновенных значений сигналов на погрешность определения ИХГС можно использовать известный подход к оценке погрешности вычисления значения функции, аргументы которой заданы приближенно, с помощью дифференциала этой функции [7]. Для получения предельных значений данного вида погрешности будем считать, что абсолютные погрешности аргументов соответствуют погрешностям квантования мгновенных значений.

В этом случае абсолютные погрешности определения СКЗ напряжения и тока, АМ и РМ в соответствии с (1) – (4) примут вид:

$$\Delta U_{СКЗ} = \left[ \left| (U_{СКЗ})'_{U_{11}} \right| + \left| (U_{СКЗ})'_{U_{12}} \right| \right] \Delta U; \quad (5)$$

$$\Delta I_{СКЗ} = \left[ \left| (I_{СКЗ})'_{I_1} \right| + \left| (I_{СКЗ})'_{I_2} \right| \right] \Delta I + \left[ \left| (I_{СКЗ})'_{U_{11}} \right| + \left| (I_{СКЗ})'_{U_{12}} \right| \right] \Delta U; \quad (6)$$

$$\Delta P = \left[ \left| (P)'_{I_1} \right| + \left| (P)'_{I_2} \right| \right] \Delta I + \left[ \left| (P)'_{U_{11}} \right| + \left| (P)'_{U_{12}} \right| \right] \Delta U; \quad (7)$$

$$\Delta Q = \left[ \left| (Q)'_{I_1} \right| + \left| (Q)'_{I_2} \right| \right] \Delta I + \left[ \left| (Q)'_{U_{11}} \right| + \left| (Q)'_{U_{12}} \right| \right] \Delta U, \quad (8)$$

где  $\Delta U = U_{np} / 2^n$ ;  $\Delta I = I_{np} / 2^n$ ;  $U_{np}$ ,  $I_{np}$  – максимально допустимые напряжение и ток;  $n$  – число двоичных разрядов АЦП.

Используя (5) – (8), можно определить относительные погрешности вычисления СКЗ напряжения и тока и приведенные погрешности измерения АМ и РМ:

$$\delta_U = \frac{\left| \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \right| + 2 \left| \cos \Delta \alpha \right|}{2^{n+1} \left| \sin^3 \frac{\Delta \alpha}{2} \right|}; \quad (9)$$

$$\delta_I = \frac{1}{2^{n+1} \left| \sin^3 \frac{\Delta \alpha}{2} \right|} \left[ 2 \sin^2 \frac{\Delta \alpha}{2} \left( 2 \left| \sin \frac{\Delta \alpha}{2} \sin \varphi \right| + \left| 2 \sin \frac{\Delta \alpha}{2} + \cos \varphi \right| \right) + \left| \cos \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} \right) \right| \times \right. \\ \left. \times \cos(\varphi - \Delta \alpha) + 2 \left| \sin^2 \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} \right) - \cos^2(\varphi - \Delta \alpha) \right| \right]; \quad (10)$$

$$\gamma_P = \frac{1}{2^n \sin^2 \frac{\Delta \alpha}{2}} \left[ 2 \left| \sin \frac{\Delta \alpha}{2} \right| \left( \left| \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \right| + \left| \cos \Delta \alpha \right| \right) + \left| 2 \sin \varphi + \sin(\varphi - \Delta \alpha) + 2 \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \cos \varphi \right| + \right. \\ \left. + \left| \sin \left( \varphi - \frac{3\Delta \alpha}{2} \right) + 4 \sin \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} \right) - 2 \cos \varphi \right| \right]; \quad (11)$$

$$\gamma_Q = \frac{1 + 2 \left| \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \right| + \left| \sin^2 \frac{\Delta \alpha}{2} \sin \left( \varphi - \frac{\Delta \alpha}{2} \right) + \sin \varphi \cos \frac{\Delta \alpha}{2} \right| + \left| \sin \varphi \cos^2 \frac{\Delta \alpha}{2} \right|}{2^n \left| \sin^3 \frac{\Delta \alpha}{2} \right|}. \quad (12)$$

Анализ выражений (9) – (12) показывает, что погрешность определения СКЗ напряжения зависит только от числа разрядов АЦП  $n$  и угла сдвига фазы ФСБ  $\Delta \alpha$ . Погрешности измерения СКЗ тока, АМ и РМ определяются еще и углом сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi$ . Полученные результаты позволяют выявлять оптимальные параметры фазосдвигающих блоков, при которых погрешности измерения ИХГС минимальны.

#### 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., Иванов Ю.М., Сеницын А.Е. Оценка погрешности метода измерения интегральных характеристик с использованием пространственного и временного разделения мгновенных значений гармонических сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – 2012. – № 3 (28). – С. 199-202.
3. 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 науч. центр РАН, 2014. – С. 717-722.
4. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Сеницын А.Е. Синтез методов измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 3 (35). – С. 84-89.
  5. Иванов Ю.М., Сеницын А.Е., Симонов А.В. Оценка погрешности средства измерения интегральных характеристик гармонических сигналов с фазосдвигающими блоками // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 1 (37). – С. 48-52.
  6. Мелентьев В.С., Муратова В.В., Иванов Ю.М. Метод измерения характеристик периодических процессов, инвариантный к погрешностям формирования дополнительного сигнала // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т. 16, №1(2). – С. 439-443.
  7. Иванов Ю.М. Анализ влияния погрешности квантования на результат измерения интегральных характеристик гармонических сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – № 4 (40). – 2013. – С. 67-71.

*Статья поступила в редакцию 1 июля 2014 г.*

## **THE REDUCTION OF MEASUREMENT TIME OF PERIODIC SIGNALS CHARACTERISTICS BASED ON THE FORMATION OF ADDITIONAL VOLTAGE SIGNALS**

***Ju.M. Ivanov***

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

*A new measurement method of the integral characteristics on the instant values of harmonic signal, providing reduction of measurement time, is considered. In contrast to known methods based on two additional voltage signals formation, identifying the transition moments through zero and comparing their instant values, the development of the method eliminates modulo errors of phase-shifting units. A block diagram of the information-measuring system is offered as a result of the method. The results of the analysis of system error caused by the quantization of the instantaneous values of signals are given. The obtained results allow to choose the appropriate hardware, depending on the imposed requirements of the accuracy and measurement time.*

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

---

*Yurie M. Ivanov (Ph. D. (Techn.)), Senior Researcher.*