

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.317

*В. С. Мелентьев, В. И. Батищев, В. В. Муратова*ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ПО МГНОВЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ ВХОДНЫХ
И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ¹*V. S. Melent'ev, V. I. Batishchev, V. V. Muratova*RESEARCH OF THE METHOD FOR MEASURING
THE PARAMETERS ON INSTANTANEOUS VALUES
OF INPUT AND ADDITIONAL HARMONIC SIGNALS

А н н о т а ц и я. Приведены результаты исследования метода измерения параметров по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов, измеренным в произвольный момент времени. При этом время измерения не зависит от угла сдвига фаз между напряжением, током и периода входного сигнала. Проведена оценка погрешности, обусловленной неидеальностью фазосдвигающих блоков, осуществляющих формирование дополнительных сигналов. Приведены результаты анализа влияния квантования мгновенных значений сигналов на погрешность измерения информативных параметров. Представлены аналитические выражения и графики зависимости погрешностей от угла сдвига фаз между напряжением, током и начальной фазы сигналов.

A b s t r a c t. The paper presents the results of a study of the method of measurement parameters on instantaneous values of orthogonal components of harmonic signals, measured at an arbitrary time. Thus, the measurement time does not depend on the phase angle between the voltage and current and the input signal period. The estimation error due to non ideality of phase-shifting units engaged in the formation of additional signals. The results of the analysis of the effect of quantization of the instantaneous values of signals to the error of measurement informative parameters. The analytical expressions and graphs of the errors depending to the phase angle between voltage and current and the initial phase of the signal are presented.

К л ю ч е в ы е с л о в а: гармонический сигнал, параметры сигналов, мгновенные значения, ортогональные составляющие, фазосдвигающий блок, погрешность по модулю, погрешность квантования.

К e y w o r d s: harmonic signal, the signal parameters, the instantaneous values, orthogonal components, phase-shifting unit, the error in magnitude, quantization error.

Введение

В настоящее время перспективными являются методы и средства измерения (СИ), основанные на определении параметров гармонических сигналов (ПГС) по ограниченному числу

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-00173).

мгновенных значений сигналов, не связанных с их периодом [1]. Такой подход позволяет определять основные ПГС: среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока, активную (АМ) и реактивную (РМ) мощности за время менее периода входного сигнала.

Реализация таких методов может быть обеспечена за счет пространственного разделения мгновенных значений сигналов.

Пространственное разделение предусматривает формирование дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных на определенный угол [2].

Сокращение времени измерения и упрощение реализации возможны за счет формирования ортогональных составляющих входного напряжения и тока и определения ПГС по мгновенным значениям как входных, так и дополнительных сигналов [3]. Однако большинство подобных методов использует либо характерные точки (например, переходы сигналов через ноль), либо дополнительное измерение мгновенных значений сигналов через определенный интервал времени, что, в общем случае, увеличивает время измерения.

Метод измерения параметров гармонических сигналов по мгновенным значениям ортогональных составляющих сигналов, измеренным в произвольный момент времени

В [4] авторами предложен метод, основанный на определении ПГС 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° в сторону опережения.

В данном методе время определения параметров сигналов не зависит от момента начала измерения и угла сдвига фаз между напряжением и током, а определяется только временем аналого-цифрового преобразования мгновенных значений сигналов в код и выполнением вычислительных процедур в соответствии с алгоритмом измерения.

Однако реализация метода предусматривает использование ортогональных составляющих напряжения и тока, что может привести к погрешности, обусловленной неидеальностью фазосдвигающих блоков (ФСБ), осуществляющих формирование дополнительных сигналов.

В статье приводятся результаты анализа влияния погрешности формирования дополнительных сигналов на погрешность результата измерения ПГС и погрешности квантования мгновенных значений сигналов.

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

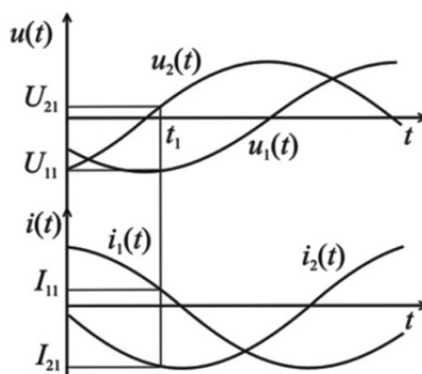


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Входные и дополнительные сигналы напряжения и тока имеют вид

$$u_1(t) = U_m \sin \omega t; \quad u_2(t) = U_m \cos \omega t; \quad i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \phi); \quad i_2(t) = I_m \cos(\omega t + \phi),$$

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

Мгновенные значения сигналов в момент времени t_1 будут равны

$$U_1 = U_m \sin \alpha_1; \quad U_2 = U_m \sin \left(\alpha_1 + \frac{\pi}{2} \right) = U_m \cos \alpha_1; \quad I_1 = I_m \sin \alpha_2;$$

$$I_2 = I_m \sin\left(\alpha_2 + \frac{\pi}{2}\right) = I_m \cos \alpha_2,$$

где α_1, α_2 – начальные фазы сигналов $u_1(t)$ и $i_1(t)$ в момент времени t_1 .

Используя мгновенные значения сигналов, можно определить выражения для ПГС:

– СКЗ напряжения и тока:

$$U_{\text{СКЗ}} = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2}{2}}; \quad (1)$$

$$I_{\text{СКЗ}} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2}{2}}; \quad (2)$$

– АМ и РМ:

$$P = \frac{U_1 I_1 + U_2 I_2}{2}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{U_1 I_2 - U_2 I_1}{2}. \quad (4)$$

Схема средства измерения, реализующего метод, представлена на рис. 2.

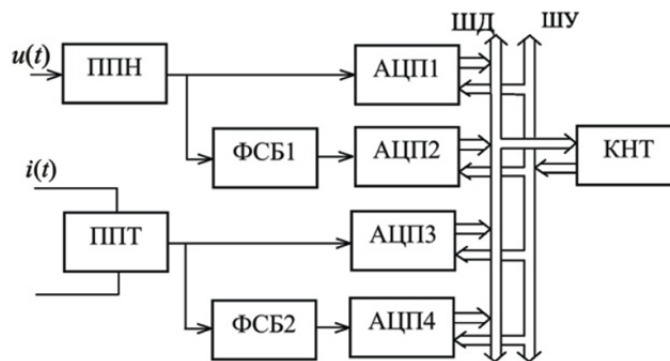


Рис. 2. СИ, реализующее метод

В состав СИ входят первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ, два фазосдвигающих блока ФСБ1 и ФСБ2, четыре аналого-цифровых преобразователя АЦП1 – АЦП4, контроллер КНТ с шинами управления ШУ и данных ШД.

Оценка погрешности измерения ПГС, обусловленной неидеальностью фазосдвигающих блоков

Одним из существенных недостатков СИ, реализующих данный метод и использующих мгновенные значения как входных, так и дополнительных сигналов, является погрешность по напряжению (погрешность по модулю) ФСБ [5].

В случае, если амплитудное значение напряжения на выходе фазосдвигающего блока ФСБ1 отличается от амплитуды входного сигнала на величину ΔU_M , а амплитуда тока на выходе ФСБ2 отличается от амплитуды входного тока на величину ΔI_M , то мгновенные значения дополнительных сигналов примут вид

$$U_2 = (U_m + \Delta U_M) \cos \alpha_1 \text{ и } I_2 = (I_m + \Delta I_M) \cos \alpha_2.$$

Для оценки точности измерения ПГС используется методика определения результирующей погрешности как погрешности вычисления значения функции, аргументы которой заданы приближенно, с погрешностями, соответствующими разности амплитудных значений сигнала на входе и выходе ФСБ [6].

Если пренебречь погрешностью измерения мгновенных значений входных сигналов, то предельные значения абсолютных погрешностей измерения ПГС примут вид

$$\Delta U_{\text{СКЗМ}} = \left| \frac{\partial U_{\text{СКЗ}}}{\partial U_2} \right| \Delta U_M; \quad (5)$$

$$\Delta I_{\text{СКЗМ}} = \left| \frac{\partial I_{\text{СКЗ}}}{\partial I_2} \right| \Delta I_M; \quad (6)$$

$$\Delta P_M = \left| \frac{\partial P}{\partial U_2} \right| \Delta U_M + \left| \frac{\partial P}{\partial I_2} \right| \Delta I_M; \quad (7)$$

$$\Delta Q_M = \left| \frac{\partial Q}{\partial U_2} \right| \Delta U_M + \left| \frac{\partial Q}{\partial I_2} \right| \Delta I_M. \quad (8)$$

Используя (1)–(4) и (5)–(8), можно определить относительные погрешности измерения СКЗ сигналов и приведенные погрешности измерения АМ и РМ:

$$\delta_{U_{\text{СКЗМ}}} = h_U |\cos \alpha_1|; \quad (9)$$

$$\delta_{I_{\text{СКЗМ}}} = h_I |\cos \alpha_2|; \quad (10)$$

$$\gamma_{P_M} = \gamma_{Q_M} = h_U |\cos \alpha_2| + h_I |\cos \alpha_1|, \quad (11)$$

где $h_U = \Delta U_M / U_m$; $h_I = \Delta I_M / I_m$.

Из (9) и (10) следует, что погрешность определения СКЗ сигналов зависит только от погрешности по модулю фазодвигающего блока и начальной фазы сигнала α_1 (α_2).

График зависимости относительной погрешности определения СКЗ сигнала от α_1 (α_2) при $h_U = h_I = 0,1\%$ приведен на рис. 3.

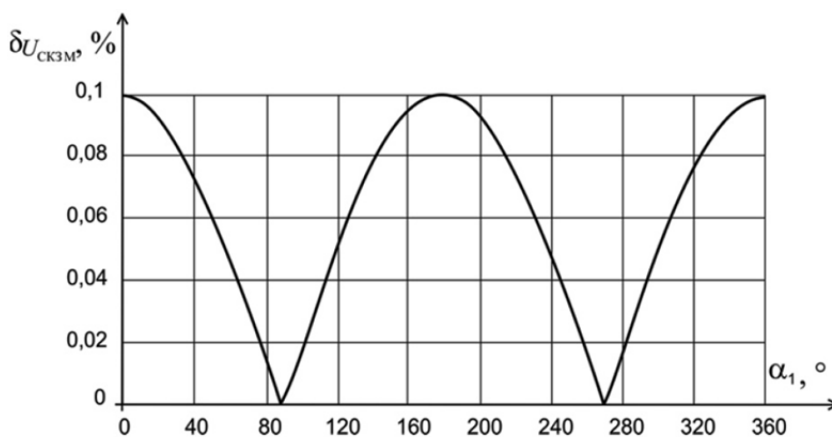


Рис. 3. Зависимость погрешности $\delta_{U_{\text{СКЗМ}}}$ от α_1 при $h_U = 0,1\%$

Выражение (11) показывает, что погрешности измерения АМ и РМ зависят не только от погрешности по модулю ФСБ и α_1 , но и от угла сдвига фаз между напряжением и током.

Погрешности определения АМ и РМ зависят не только от погрешности по модулю ФСБ и α_1 , но и от угла сдвига фаз между напряжением и током φ .

На рис. 4 представлены графики зависимости приведенной погрешности определения АМ (РМ) от начальной фазы сигнала α_1 и φ при $h_U = h_I = 0,1\%$ согласно (11).

Анализ рис. 4 показывает существенную зависимость погрешностей определения АМ и РМ как от α_1 , так и от φ .

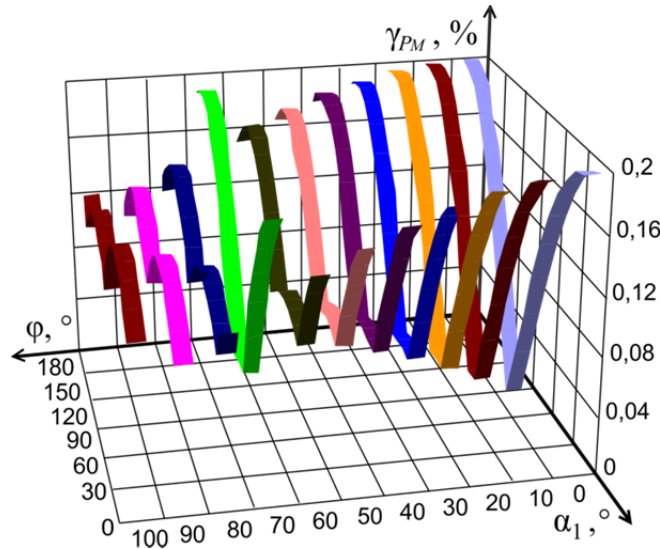


Рис. 4. Зависимость погрешности γ_{PM} от α_1 и ϕ при $h_U = h_I = 0,1\%$

**Оценка погрешности измерения ПГС,
обусловленной квантованием мгновенных значений сигналов**

В рассматриваемом методе определения ПГС используется измерение мгновенных значений сигналов с последующей обработкой пропорциональных им цифровых кодов. Использование в цифровых методах и средствах измерения квантования по уровню неизбежно приводит к погрешности квантования. Погрешность обусловлена округлением значения непрерывной неизвестной измеряемой величины до какого-либо значения известной дискретной величины.

Для оценки влияния квантования на погрешность определения ИХГС может быть использована предложенная методика, при условии, что предельные абсолютные погрешности аргументов соответствуют погрешностям квантования мгновенных значений сигналов [7].

Если пренебречь погрешностью от нелинейности, то можно считать, что основной погрешностью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) является абсолютная погрешность квантования в канале напряжения $\Delta U = U_{пр}/2^n$ и тока $\Delta I = I_{пр}/2^n$, где $U_{пр}$, $I_{пр}$ – максимально допустимые напряжение и ток на входе АЦП; n – число двоичных разрядов.

В этом случае абсолютные погрешности ИХГС в соответствии с (1)–(4) примут вид

$$\Delta U_{СКЗ} = \left[\left| (U_{СКЗ})'_{U_1} \right| + \left| (U_{СКЗ})'_{U_2} \right| \right] \Delta U; \quad (12)$$

$$\Delta I_{СКЗ} = \left[\left| (I_{СКЗ})'_{I_1} \right| + \left| (I_{СКЗ})'_{I_2} \right| \right] \Delta I; \quad (13)$$

$$\Delta P = \left[\left| (P)'_{I_1} \right| + \left| (P)'_{I_2} \right| \right] \Delta I + \left[\left| (P)'_{U_1} \right| + \left| (P)'_{U_2} \right| \right] \Delta U; \quad (14)$$

$$\Delta Q = \left[\left| (Q)'_{I_1} \right| + \left| (Q)'_{I_2} \right| \right] \Delta I + \left[\left| (Q)'_{U_1} \right| + \left| (Q)'_{U_2} \right| \right] \Delta U. \quad (15)$$

Используя (1)–(4) с учетом абсолютных погрешностей квантования АЦП (12)–(15), можно определить предельные относительные погрешности вычисления СКЗ сигналов и приведенные погрешности измерения АМ и РМ:

$$\delta_{U_{СКЗ}} = \frac{1}{2^n} (|\sin \alpha_1| + |\cos \alpha_1|); \quad (16)$$

$$\delta_{I_{СКЗ}} = \frac{1}{2^n} (|\sin \alpha_2| + |\cos \alpha_2|); \quad (17)$$

$$\gamma_P = \gamma_Q = \frac{1}{2^n} (|\sin \alpha_1| + |\cos \alpha_1| + |\sin \alpha_2| + |\cos \alpha_2|). \quad (18)$$

Из (16) и (17) следует, что относительная погрешность вычисления СКЗ сигналов зависит только от разрядности АЦП и начальной фазы сигнала.

На рис. 5 приведен график зависимости $\delta_{СКЗ}$ от начальной фазы сигнала α_1 при 12-разрядных АЦП в соответствии с выражениями (16) и (17).

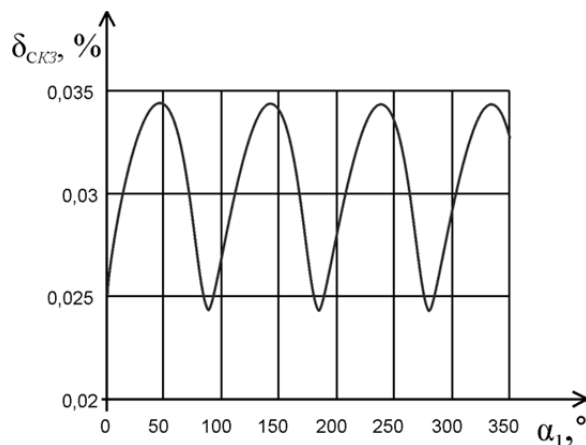


Рис. 5. Зависимость погрешности $\delta_{СКЗ}$ от α_1 (α_2) при $n = 12$

В общем случае приведенная погрешность вычисления АМ и РМ зависит от разрядности АЦП, начальной фазы сигнала и угла сдвига фаз между напряжением и током.

На рис. 6 приведен график зависимости γ_P от начальной фазы сигнала напряжения α_1 и угла сдвига фаз между напряжением и током φ в соответствии с выражениями (18) при 12-разрядном АЦП.

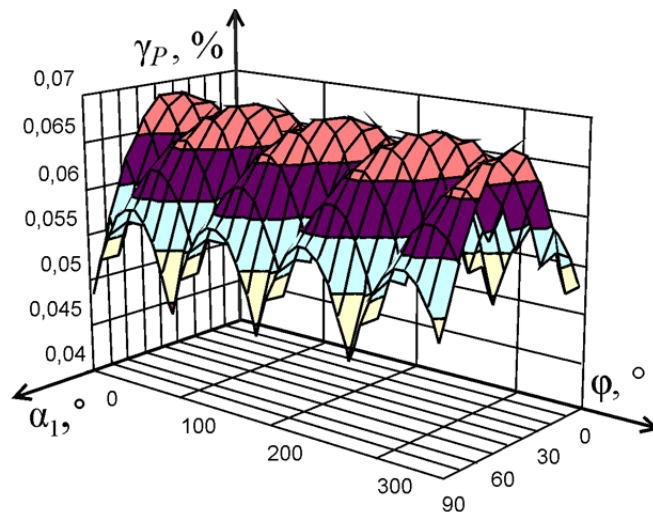


Рис. 6. Зависимость погрешности γ_P от α_1 и φ при $n = 12$

Заключение

Предложенный метод, в отличие от известных методов, использующих формирование ортогональных составляющих сигналов, обеспечивает возможность начала измерения в произвольный момент времени. Кроме того, время измерения не зависит от угла сдвига фаз между напряжением, током и периода входного сигнала, а ограничено только временем аналого-цифрового преобразования мгновенных значений сигналов, ввода, пропорциональных им кодов в контроллер и выполнения вычислительных операций.

Полученные в работе результаты позволяют оценивать погрешность измерения при известных допустимых значениях погрешностей фазосдвигающих блоков и разрядности АЦП.

Список литературы

1. An improvement in the methods used for the measurement of the integrated characteristics of harmonic signals / V. S. Melentiev, V. I. Batishchev, A. N. Kamyshnikova, D. V. Rudakov // Measurement Techniques. – 2011. – Vol. 54, № 4. – P. 407–411.
2. Melent'ev, V. S. A method of measuring integral characteristics from the instantaneous values of signals separated in time and space / V. S. Melent'ev, Yu. M. Ivanov, A. O. Lychev // Measurement Techniques. – 2012. – Vol. 57, № 9. – P. 979–984.
3. Мелентьев, В. С. Синтез методов измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, Ю. М. Иванов, А. Е. Сеницын // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2012. – № 3 (35). – С. 84–89.
4. Мелентьев, В. С. Синтез методов и систем измерения интегральных характеристик с использованием ортогональных составляющих гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, А. О. Лычев, А. А. Миронов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. XIV Междунар. конф. – Самара : Самар. науч. центр РАН, 2012. – С. 625–633.
5. Анализ влияния погрешностей формирования дополнительных сигналов на погрешность измерения интегральных характеристик гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, Ю. М. Иванов, А. Е. Сеницын, В. В. Муратова // Информационные технологии в науке и производстве : материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – С. 86–90.
6. Мелентьев, В. С. Оценка влияния погрешности, обусловленной формированием дополнительных сигналов, на результат измерения параметров гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, В. И. Батищев, В. В. Муратова // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. «Шлядинские чтения – 2014». – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – С. 12–15.
7. Мелентьев, В. С. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов / В. С. Мелентьев, В. И. Батищев. – М. : Физматлит, 2011. – 240 с.

Мелентьев Владимир Сергеевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
информационно-измерительной техники,
Самарский государственный
технический университет
E-mail: vs_mel@mail.ru

Melent'ev Vladimir Sergeevich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of information
and measuring equipment,
Samara State Technical University

Батищев Виталий Иванович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
информационных технологий,
Самарский государственный
технический университет
E-mail: vib@list.ru

Batishchev Vitaliy Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of information technology,
Samara State Technical University

Муратова Вера Владимировна

аспирант,
Самарский государственный
технический университет
E-mail: muratova1991@yandex.ru

Muratova Vera Vladimirovna

postgraduate student,
Samara State Technical University

УДК 621.317

Мелентьев, В. С.

Исследование метода измерения параметров по мгновенным значениям входных и дополнительных гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, В. И. Батищев, В. В. Муратова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 1 (11). – С. 4–10.