УДК 621.317

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

© 2016 В.С. Мелентьев, В.В. Муратова

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 01.11.2016

Исследуется метод измерения параметров по мгновенным значениям входных и дополнительных гармонических сигналов. Метод обеспечивает определение характеристик по мгновенным значениям сигналов, измеренным одновременно один раз за период в момент перехода одного из дополнительных напряжений через ноль. Приводятся результаты оценки погрешности реализации метода из-за не идеальности фазосдвигающих блоков, формирующих дополнительные сигналы. Полученные результаты позволяют определять оптимальный угол сдвига фазы блоков в зависимости от требований по точности измерения.

Ключевые слова: периодический сигнал, дополнительный сигнал, фазосдвигающий блок, погрешность

В настоящее время получило распространение направление, связанное с разработкой методов и средств измерения параметров гармонических сигналов (ГС) по отдельным мгновенным значениям (МЗ), не связанным с периодом входного сигнала [1]. В отличие от наиболее известных методов, основанных на определении параметров по мгновенным значениям сигналов, равномерно распределенным по периоду входного сигнала [2], данные методы обеспечивают сокращение времени измерения. Одним и путей дальнейшего сокращения времени определения параметров ГС является разделение МЗ в пространстве за счет формирования дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых по фазе относительно входных, и использовании мгновенных значений как входных, так и дополнительных сигналов [3].

В [4] авторами предложен метод измерении параметров ГС, который основан на формировании ортогональных составляющих напряжения и тока и определении информативных параметров по двум мгновенным значениям напряжения и тока, одновременно измеренным в произвольный момент времени. Однако при реализации подобных методов возможно возникновение существенной частотной погрешности фазосдвигающих блоков (ФБ), формирующих дополнительные сигналы, которая обусловлена тем, что с изменением частоты входного сигнала угол сдвига ФБ может отличаться от 90° [5]. Исключение частотной погрешности ФБ обеспечивает метод [6], который основан на определении

Мелентьев Владимир Сергеевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой. E-mail: vs_mel@mail.ru Муратова Вера Владимировна, преподаватель. E-mail: muratova1991@yandex.ru

параметров ГС по трем мгновенным значениям напряжения и тока одновременно измеренным в произвольный момент времени, причем вторые мгновенные значения сигналов сдвинуты относительно первых на угол Δα, а третьи МЗ напряжения и тока сдвинуты относительно вторых также на угол Δα. Однако реализация метода предусматривает использование четырех ФБ и аналого-цифровых преобразователей. Кроме того, применение метода предусматривает анализ МЗ напряжений и токов на ноль и измерение дополнительных мгновенных значений сигналов, если хотя бы одно из значений равно нулю. В нашей статье производится анализ нового метода [7], реализация которого снижает аппаратурные затраты и сокращает время измерения.

Метод измерения параметров с пространственным разделением митовенных значений сигналов. Метод заключается в том, что формируют два дополнительных напряжения, которые сдвинуты относительно входного на углы $\Delta \alpha$ и $2\Delta \alpha$ и дополнительный ток, сдвинутый относительно входного на угол $\Delta \alpha$. В момент, когда дополнительное напряжение, сдвинутое относительно входного на угол $2\Delta \alpha$ переходит через ноль, одновременно измеряют МЗ входных и дополнительных сигналов напряжения и тока. Параметры ГС определяют по измеренным значениям. Временные диаграммы, которые поясняют метод, приведены на рис. 1.

Если входные напряжение и ток имеют гармонические модели $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ и $i_1(t) = I_m \sin (\omega t + \varphi)$, то дополнительные сигналы принимают следующий вид: $u_2(t) = U_m \sin (\omega t + \Delta \alpha)$, $u_3(t) = U_m \sin (\omega t + 2\Delta \alpha)$;

 $i_2(t) = I_m \sin \left(\omega t + \varphi + \Delta \alpha\right)$, где U_m , I_m - амплитудные значения напряжения и тока; ω - угловая частота входного сигнала; φ - угол сдвига фаз между входным напряжением и током. В момент времени, когда напряжение $u_3(t)$ переходит через ноль (момент времени t_1 на рис. 1) МЗ сигналов будут равны: $U_{11} = U_m \sin \left(-2\Delta \alpha\right)$; $U_{21} = U_m \sin \left(-\Delta \alpha\right)$; $I_{11} = I_m \sin \left(\varphi - 2\Delta \alpha\right)$; $I_{21} = I_m \sin \left(\varphi - \Delta \alpha\right)$.

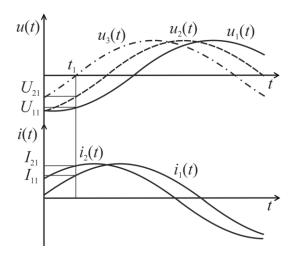


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Используя полученные М3 сигналов, после преобразований можно получить выражения для определения параметров Γ C:

- среднеквадратические значения напряжения (СКЗН) и тока (СКЗТ)

$$\begin{split} U_{CK3} &= \frac{\sqrt{2}U_{11}^2}{\sqrt{4U_{21}^2 - U_{11}^2}}\;; \qquad (1) \\ I_{CK3} &= \sqrt{\frac{I_{21}^2 \left(4U_{21}^2 - U_{11}^2\right) + \left(I_{21}U_{11} - 2I_{11}U_{21}\right)^2}{2\left(4U_{21}^2 - U_{11}^2\right)}}\;; \\ (2) \end{split}$$

- активная (АМ) и реактивная (РМ) мощности

$$P = \frac{|U_{21}|[(U_{11}^2 - 2U_{21}^2)I_{21} + I_{11}U_{11}U_{21}]}{4U_{21}^2 - U_{11}^2}; (3)$$

$$Q = \frac{U_{21}(I_{21}U_{11} - I_{11}U_{21})}{\sqrt{4U_{21}^2 - U_{11}^2}}. (4)$$

Предлагаемый метод можно реализовать с помощью следующей информационно-измерительной системы (ИИС) (рис. 2). В состав ИИС входят следующие блоки: первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ, фазосдвигающие блоки ФБ1 – ФБ3, осуществляющие сдвиги дополнительных сигналов на угол $\Delta\alpha$, аналогоцифровые преобразователи АЦП1 – АЦП4, нуль-

орган HO, контроллер КОНТ с шинами управления ШУ и данных ШД.

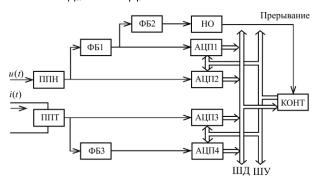


Рис. 2. Схема ИИС, реализующей метод

Одним из видов погрешности, которая может возникнуть при реализации метода, является угловая погрешность фазосдвигающих блоков. Наличие данной погрешности может привести к тому, что углы сдвига фаз ФБ будут различны.

Анализ погрешности реализации метода из-за не идеальности фазосдвигающих блоков. Если считать, что ФБ1 и ФБ2 имеют угол сдвига фазы, соответствующий $\Delta \alpha$, а угол сдвига фазы ФБ3 в канале тока равен $\Delta \alpha$ - $\Delta \beta$, то МЗ дополнительного тока примет вид $I_{21}'' = I_m \sin(\varphi + \Delta \beta - \Delta \alpha)$. Анализ выражения (1) показывает, что СКЗН будут измерены без погрешности.

Погрешности определения остальных параметров ГС в соответствии с (2) - (4) будут равны:

$$\delta_{\beta} = \frac{1}{\sin \Delta \alpha} \left\{ \sin^{2}(\varphi - 2\Delta\alpha) + \sin(\varphi + \Delta\beta - \Delta\alpha) \times \right.$$

$$\times \left[\sin(\varphi + \Delta\beta - \Delta\alpha) - 2\sin(\varphi - 2\Delta\alpha) \cos \Delta\alpha \right] \right\}^{\frac{1}{2}} - 1;$$

$$(5)$$

$$\gamma_{P\beta} = \frac{1}{\sin \Delta\alpha} \left[\sin(\varphi + \Delta\beta - \Delta\alpha) \cos 2\Delta\alpha - \right.$$

$$\left. - \sin(\varphi - 2\Delta\alpha) \cos \Delta\alpha \right] - \cos\varphi;$$

$$\gamma_{Q\beta} = 2\sin(\varphi + \Delta\beta - \Delta\alpha) \cos \Delta\alpha - \right.$$

$$\left. - \sin(\varphi - 2\Delta\alpha) - \sin\varphi. \right.$$

$$(7)$$

Из выражений (5) - (7) видно, что погрешности измерения СКЗТ, АМ и РМ зависят не только от значения угла $\Delta \beta$, но и от угла сдвига фазы ФБ $\Delta \alpha$ и угла сдвига фаз между входным напряжением и током ϕ . Графики зависимости относительной погрешности измерения СКЗТ и приведенных погрешностей определения АМ и РМ от $\Delta \alpha$ и ϕ при $\Delta \beta$ =0,1°, построенные согласно (5) - (7), показаны на рис. 3-5. Из анализа рис. 3-5 следует, что при небольших значениях угла $\Delta \alpha$ погрешности достаточно малы и при соответствующем

выборе значений угла сдвига фазы ФБ ими можно пренебречь практически во всем диапазоне изменения угла φ . При этом минимальные значения погрешностей измерения параметров ГС будут при $\Delta\alpha$ =90°.

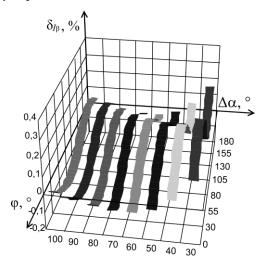


Рис. 3. Графики зависимости δ_{I_B} от $\Delta \alpha$ и ϕ

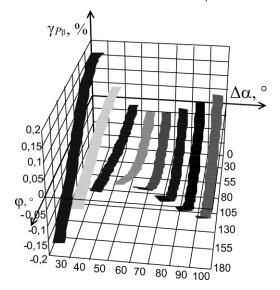


Рис. 4. Графики зависимости $\gamma_{P\beta}$ от $\Delta\alpha$ и ϕ

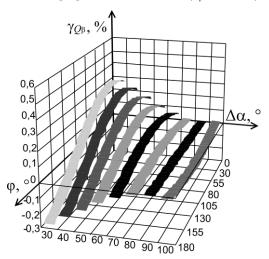


Рис. 5. Графики зависимости γ_{OB} от $\Delta\alpha$ и ϕ

Если считать, что ФБ1 и ФБ3 имеют угол сдвига фазы $\Delta \alpha$, а угол сдвига фазы ФБ2 будет равен $\Delta \alpha + \Delta \beta$, то М3 дополнительных сигналов будут равны:

$$U_{11}''' = U_m \sin(-\Delta\beta - 2\Delta\alpha); U_{21}''' = U_m \sin(-\Delta\beta - \Delta\alpha);$$

$$I_{11}''' = I_m \sin(\varphi - \Delta\beta - 2\Delta\alpha); I_{21}''' = I_m \sin(\varphi - \Delta\beta - \Delta\alpha).$$

Погрешности определения параметров ГС в соответствии с (1) - (4) будут равны:

$$\delta_{U\beta} = \frac{2\sin^{2}(\Delta\alpha + \Delta\beta)}{\sqrt{4\sin^{2}(\Delta\alpha + \Delta\beta) - \sin^{2}(2\Delta\alpha + \Delta\beta)}} - 1; \quad (8)$$

$$\delta_{I\beta} = \frac{1}{\sqrt{4\sin^{2}(\Delta\alpha + \Delta\beta) - \sin^{2}(2\Delta\alpha + \Delta\beta)}} \times \left[\sin^{2}(\phi - \Delta\beta - \Delta\alpha) \left[4\sin^{2}(\Delta\alpha + \Delta\beta) - \sin^{2}(2\Delta\alpha + \Delta\beta) - \sin^{2}(2\Delta\alpha + \Delta\beta)\right] + \left[\sin\phi\sin\Delta\alpha - \sin(\phi - \Delta\beta - 2\Delta\alpha)\sin(\phi + \Delta\beta)\right]^{2}\right]^{\frac{1}{2}} - 1; \quad (9)$$

$$\gamma_{P\beta} = \frac{2\left[\sin(\Delta\alpha + \Delta\beta)\right]}{4\sin^{2}(\Delta\alpha + \Delta\beta) - \sin^{2}(2\Delta\alpha + \Delta\beta)} \times \left[\sin^{2}(2\Delta\alpha + \Delta\beta) - 2\sin^{2}(\Delta\alpha + \Delta\beta)\right] \times \left[\sin^{2}(2\Delta\alpha + \Delta\beta) - \sin(\phi - \Delta\beta - 2\Delta\alpha) \times \sin(\phi - \Delta\beta - \Delta\alpha) - \sin(\phi - \Delta\beta - 2\Delta\alpha) \times \sin(\Delta\beta + \Delta\alpha)\sin(\Delta\beta + 2\Delta\alpha)\right] - \cos\phi; \quad (10)$$

$$\gamma_{Q\beta} = \frac{2\sin(\Delta\alpha + \Delta\beta)\sin\phi\sin\Delta\alpha}{\sqrt{4\sin^2(\Delta\alpha + \Delta\beta) - \sin^2(2\Delta\alpha + \Delta\beta)}} - \sin\phi$$
(11)

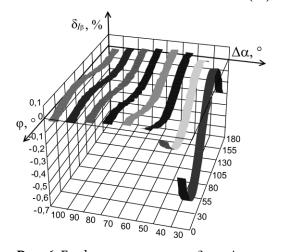


Рис. 6. Графики зависимости $\delta_{\mathit{I}\beta}$ от $\Delta\alpha$ и ϕ

Анализ выражения (8) показывает, что погрешность определения СКЗН зависит только от отклонения угла сдвига ФБ Δ β и угла Δ α. Из выражений (9) - (11) следует, что погрешности измерения СКЗТ, АМ и РМ зависят еще и от угла сдвига фаз между входным напряжением и током φ . Графики зависимости относительной погрешности измерения СКЗТ и приведенных погрешностей определения АМ и РМ от Δ α и φ при Δ β=0,1°, построенные в соответствии с (9) - (11),

приведены на рис. 6-8. Анализ графиков, показанных на рис. 6-8, позволяет сделать вывод о том, что погрешности определения параметров ГС существенно зависят от угла $\Delta\alpha$. При выборе данного угла в диапазоне значений $\Delta\alpha$ =70÷100° погрешности не превышают 0,05% при $\Delta\beta$ =0,1°.

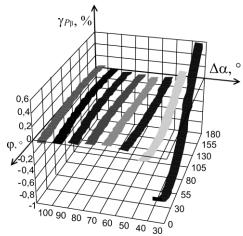


Рис. 7. Графики зависимости γ_{PB} от $\Delta \alpha$ и ϕ

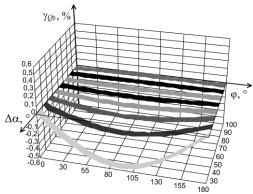


Рис. 8. Графики зависимости $\gamma_{Q\beta}$ от $\Delta\alpha$ и ϕ

Выводы: реализация разработанного метода определения параметров гармонических сигналов позволяет снизить аппаратурные затраты и сократить время измерения. Проведенный в статье анализ показывает, что погрешность измерения информативных параметров существенно зависит от идентичности используемых для формирования дополнительных сигналов

фазосдвигающих блоков. Полученные результаты позволяют определять оптимальные углы сдвига фазы фазосдвигающих блоков в зависимости от требований по точности измерения.

Работа выполнена при финансовой поддержке $P\Phi\Phi U$ (грант № 16-08-00252 A)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1. *Melentiev, V.S.* 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. V. 54, No.4. P. 407-411.
- 2. *Petrovic, P.B.* A method of measuring the integral characteristics of a signal // Measurement Techniques. 2013. V. 56, No. 2. P. 185-194.
- 3. *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. 2014. V. 57, No.9. P. 979-984.
- Мелентьев, В.С. Синтез методов измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, А.Е. Синицын // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2012. № 3 (35). С. 84-89.
- Мелентьев, В.С. Исследование метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих сигналов / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, В.В. Муратова // Ползуновский вестник. 2014. №2(4). С. 24-26.
- 6. Мелентьев, В.С. Метод определения интегральных характеристик гармонических сигналов по мгновенным значениям напряжения и тока, сдвинутым в пространстве / В.С. Мелентьев, Е.Г. Кожевникова // Измерение, контроль, автоматизация: Матер. 12-ой междунар. науч.-техн. конф. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. С. 115-118.
- 7. *Мелентьев, В.С.* Сокращение времени определения параметров за счет пространственного разделения мгновенных значений гармонических сигналов / В.С. Мелентьев, Ю.М. Иванов, В.В. Муратова // Измерения, контроль, информатизация: матер. XVI междунар. науч.-техн. конф. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. С. 61-63.

USING THE MATHEMATICAL MODELLING FOR ASTIMATION THE ERROR OF MEASUREMENT THE HARMONIC SIGNALS INFORMATIVE PARAMETERS

© 2016 V.S. Melentyev, V.V. Muratova Samara State Technical University

The method of measurement the parameters on instant values of entrance and additional harmonic signals is investigated. The method provides determination of characteristics on the instant values of signals measured at the same time once for the period at the time of transition of one of additional tension through zero. Results of estimation the error of method realization because of not ideality the phase-shifting blocks forming additional signals are given. The received results allow to determine an optimum angle of phase blocks shift depending on requirements for measurement accuracy.

Key words: periodic signal, additional signal, phase-shift block, error

Vladimir Melentyev, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department. E-mail: vs_mel@mail.ru: Vera Muratova, Teacher. E-mail: muratova1991@yandex.ru