

УДК 621.317

В.В. Муратова

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

**АНАЛИЗ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПО МГНОВЕННЫМ
ЗНАЧЕНИЯМ ВХОДНЫХ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ
СИГНАЛОВ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ***

Предложен метод измерения параметров гармонических сигналов, при реализации которого углы сдвига фаз, используемых для формирования дополнительных сигналов напряжения и тока, могут отличаться друг от друга.

Метод заключается в том, что формируются дополнительные сигналы напряжения и тока, сдвинутые относительно сходных по фазе на углы $\Delta\alpha_1$ и $\Delta\alpha_2$ соответственно. В момент перехода входного сигнала напряжения через ноль одновременно измеряют первое мгновенное значение дополнительного напряжения и первые мгновенные значения входного тока и дополнительного сигнала тока; через произвольный (в общем случае) интервал времени Δt одновременно измеряют вторые мгновенные значения входного и дополнительного напряжений и второе мгновенное значение дополнительного тока. Затем ПГС определяют по измеренным мгновенным значениям сигналов.

Приводятся выражения для определения среднеквадратических значений напряжения и тока, а также активной и реактивной мощности и проведен их анализ. Получены выражения для относительных погрешностей измерения СКЗ напряжения и тока и приведенных погрешностей определения АМ и РМ, эти выражения тоже были проанализированы. Построены графики зависимости относительной погрешности измерения СКЗ напряжения от $\Delta\alpha_1$ и $\omega\Delta t$ при наличии в сигнале напряжения 1-й и 3-й гармоник с коэффициентом $h_{u3} = 0,2\%$, а также представлены графики зависимости относительной погрешности определения СКЗ тока и приведенных погрешностей измерения АМ и РМ от $\Delta\alpha_1$ и $\omega\Delta t$ при наличии в сигналах напряжения и тока 1-й и 3-й гармоник с коэффициентами $h_{i3} = h_{i3} = 0,2\%$ для различных значений угла сдвига фаз φ в соответствии.

Ключевые слова: гармонические сигналы, мгновенные значения сигналов, аппроксимационный подход, фазосдвигающий блок, погрешность, фазовый сдвиг, активная мощность, реактивная мощность, среднеквадратическое значение тока, среднеквадратическое значение напряжения.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 14-08-00700-а).

V.V. Muratova

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

**ANALYSIS OF THE METHOD FOR MEASUREMENT
THE PARAMETERS OF HARMONIC SIGNALS ON INSTANT
VALUES OF THE INPUT AND ADDITIONAL SIGNALS,
USING THE TIME DIVISION**

A method of measurement parameters signals – harmonic crystals, the implementation of which the phase angles are used for the formation of additional voltage and current signals may differ from each other.

The method consists in the fact that generated additional voltage and current signals, which are shifted relative to similar in phase angles and $\Delta\alpha_1$ $\Delta\alpha_2$ respectively. At the moment of the transition of the input signal voltage through zero at the same time measure the instantaneous value of the first auxiliary voltage, and the first instantaneous value of the input current and an additional current signal; through arbitrary (generally) time interval Δt simultaneously measured instantaneous values of second input and second supplementary voltage instantaneous value and the additional current. Then CBC is determined by the instantaneous measurement signals.

The paper gives expression to determine the RMS-critical values of voltage and current, as well as active and reactive power. The analysis of these expressions. The expressions for the relative error of measurement RMS voltage and current, and reduced errors determining the AM and PM, these expressions were also analyzed. The graphs of the relative error of measurement of RMS voltage $\Delta\alpha_1$ $\omega\Delta t$ and if the signal voltage of the 1st and 3rd harmonic ratio, as well as the graphs of the relative error in determining the RMS current and reduced error of measurement of AM and PM by $\Delta\alpha_1$ and $\omega\Delta t$ in the presence of voltage and current signals of the 1st and 3rd harmonic coefficients for different of the phase angle φ in line.

Keywords: Harmonic signals, the instantaneous values of signals approximation approach, the phase-shifting block error, phase shift, active power, reactive power, RMS current, RMS voltage.

В настоящее время при измерении параметров периодических сигналов получил распространение аппроксимационный подход, заключающийся в определении информативных параметров по отдельным мгновенным значениям сигналов, в предположении их соответствия известным моделям, с последующей оценкой погрешностей, обусловленных отклонением принятых моделей от реальных сигналов [1]. Это обеспечивает возможность определения параметров за время, меньшее периода входного сигнала.

Наиболее целесообразно использовать такой подход в случае, когда реальные сигналы имеют форму, близкую к гармонической модели. Дальнейшее сокращение времени измерения обеспечивают методы измерения параметров гармонических сигналов (ПГС), в которых используется пространственное разделение мгновенных значений за счет формирования дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых относительно входных по фазе на определенный угол [2].

Однако, как показывает анализ, при реализации таких методов может возникнуть погрешность при отличии углов сдвига фазосдвигающих блоков (ФСБ) в каналах тока и напряжения [3].

В [4] предложен метод измерения ПГС, при реализации которого углы сдвига фаз, используемых для формирования дополнительных сигналов напряжения и тока, могут отличаться друг от друга.

Метод заключается в том, что в момент перехода входного сигнала напряжения через ноль одновременно измеряют первое мгновенное значение дополнительного напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол $\Delta\alpha_1$, и первые мгновенные значения входного тока и сдвинутого относительно него по фазе на угол $\Delta\alpha_2$ дополнительного сигнала тока; через произвольный (в общем случае) интервал времени Δt одновременно измеряют вторые мгновенные значения входного и дополнительного напряжений и второе мгновенное значение дополнительного тока. ПГС определяют по измеренным мгновенным значениям сигналов. Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 1.

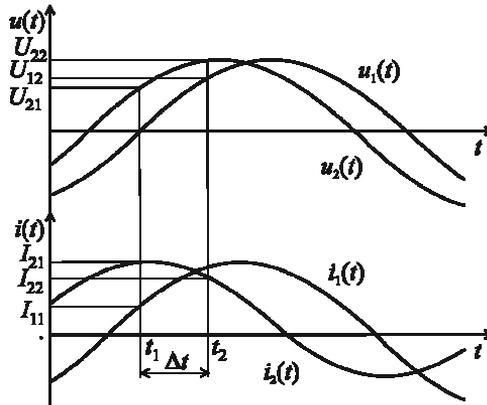


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Если сигналы напряжения и тока являются гармоническими, то входные и дополнительные сигналы напряжения и тока имеют вид:

$$u_1(t) = U_m \sin \omega t ; i_1(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi) ; u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha_1) ;$$

$$i_2(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi + \Delta\alpha_2) .$$

В момент времени t_1 – перехода входного сигнала напряжения через ноль мгновенные значения дополнительного напряжения, входного и дополнительного сигналов тока соответственно определяются как

$$U_{21} = U_m \sin \Delta\alpha_1 ; I_{11} = I_m \sin \varphi ; I_{21} = I_m \sin(\varphi + \Delta\alpha_2) .$$

Через интервал времени Δt в момент времени t_2 мгновенные значения входного и дополнительного сигналов напряжения и второе мгновенное значение тока примут вид:

$$U_{12} = U_m \sin \omega \Delta t; U_{22} = U_m \sin(\Delta \alpha_1 + \omega \Delta t); I_{22} = I_m \sin(\varphi + \omega \Delta t + \Delta \alpha_2).$$

Используя мгновенные значения сигналов, можно получить выражения для определения основных ПГС:

– среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока:

$$U_{СКЗ} = \frac{|U_{12} U_{22} U_{21}|}{\sqrt{2[4U_{22}^2 U_{21}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2]}}; \quad (1)$$

$$I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ I_{21}^2 + \frac{[2I_{22} U_{22} U_{21} - I_{21} (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)]^2}{4U_{22}^2 U_{21}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2} \right\}}; \quad (2)$$

– активная (АМ) и реактивная (РМ) мощности:

$$P = \frac{|U_{12} U_{22} U_{21}|}{4U_{22}^2 U_{21}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2} \left\{ I_{21}^2 - I_{11}^2 [4U_{22}^2 U_{21}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2] + \right. \\ \left. + [2I_{22} U_{22} U_{21} - I_{21} (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{I_{11} |U_{12} U_{22} U_{21}|}{2\sqrt{[4U_{22}^2 U_{21}^2 - (U_{21}^2 - U_{12}^2 + U_{22}^2)^2]}}. \quad (4)$$

Анализ (1)–(4) показывает, выражения для определения СКЗ тока, АМ и РМ инварианты к значениям углов сдвига фаз ФСБ, при этом $\Delta \alpha_1$ и $\Delta \alpha_2$ могут отличаться друг от друга.

Данный метод предназначен для определения параметров гармонических сигналов. При наличии в сигналах высших гармоник неизбежно возникает погрешность.

В [4] была проведена оценка предельного значения методической погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели. Для этого была использована методика оценки погрешности результата измерения интегральной характеристики как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала [5].

Для случая, когда абсолютные погрешности аргументов соответствуют наибольшему отклонению моделей от реальных сигналов, были получены следующие выражения для относительных погрешностей измерения СКЗ напряжения и тока и приведенных погрешностей определения АМ и РМ:

$$\delta_{U_{СКЗ}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} \left[|\cos(\Delta\alpha_1 + \omega\Delta t)| (|\cos \Delta\alpha_1| + |\cos \omega\Delta t|) + |\cos \Delta\alpha_1 \cos \omega\Delta t| \right]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2 |\sin \omega\Delta t \sin \Delta\alpha_1 \sin(\Delta\alpha_1 + \omega\Delta t)|}}; \quad (5)$$

$$\delta_{I_{СКЗ}} = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left[|\cos(\varphi + \Delta\alpha_2 + \omega\Delta t)| + |\cos(\varphi + \Delta\alpha_2)| \right]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 |\sin \omega\Delta t|}} +$$

$$+ \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 |\sin \omega\Delta t \sin \Delta\alpha_1 \sin(\Delta\alpha_1 + \omega\Delta t)|}} |\cos(\varphi + \Delta\alpha_2)| \times$$

$$\times \left[|\cos(\varphi + \Delta\alpha_2 + \omega\Delta t) \cos(\Delta\alpha_1 + \omega\Delta t)| + \right.$$

$$\left. + |\cos(\varphi + \Delta\alpha_2 - \omega\Delta t)| + |\cos(\varphi + \Delta\alpha_2 + \omega\Delta t) \cos \Delta\alpha_1| \right]; \quad (6)$$

$$\gamma_P = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} \left[|\cos(\varphi + \Delta\alpha_2 + \omega\Delta t)| + |\cos(\varphi + \Delta\alpha_2)| \right]}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 |\cos \varphi \sin \omega\Delta t|}} +$$

$$+ \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{2 \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2 |\sin \omega\Delta t \sin \Delta\alpha_1 \sin(\Delta\alpha_1 + \omega\Delta t) \cos \varphi|}} \times$$

$$\times \left\{ \left[|\cos(\Delta\alpha_1 + \omega\Delta t)| + |\cos \Delta\alpha_1| \right] \times \right.$$

$$\times \left[2 \cos \omega\Delta t \cos^2 \varphi + \cos(\varphi + \Delta\alpha_2) \cos(\varphi + \Delta\alpha_2 + \omega\Delta t) \right] +$$

$$\left. + 2 \left[\cos(\Delta\alpha_1 + \omega\Delta t) \cos \Delta\alpha_1 \cos \varphi + \cos(\varphi + \Delta\alpha_2) \cos(\varphi + \Delta\alpha_2 - \omega\Delta t) \right] \right\}; \quad (7)$$

$$\gamma_Q = \frac{2}{\sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik}^2}} \left\{ \sum_{k=2}^{\infty} h_{ik} + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk} |\sin \varphi|}{|\sin \Delta\alpha_1 \sin \omega\Delta t \sin(\Delta\alpha_1 + \omega\Delta t)|} \right\} \times \\ \times \left[|\cos(\Delta\alpha_1 + \omega\Delta t)| (|\cos \Delta\alpha_1| + |\cos \omega\Delta t|) + |\cos \Delta\alpha_1 \cos \omega\Delta t| \right], \quad (8)$$

где h_{uk} и h_{ik} – коэффициенты k -х гармоник напряжения и тока.

Проведенный анализ показывает, что погрешности измерения параметров сигналов зависят от их гармонического состава.

Относительная погрешность измерения СКЗ напряжения, определяемая согласно (5), зависит от угла сдвига фазы ФСБ1 $\Delta\alpha_1$ (канал напряжения) и интервала времени Δt . Приведенная погрешность измерения РМ, которая соответствует выражению (8), зависит от $\Delta\alpha_1$, Δt и угла сдвига фаз между напряжением и током φ . Погрешности определения СКЗ тока и АМ зависят, кроме этого, и от угла сдвига фазы ФСБ2 $\Delta\alpha_2$ (канал тока).

Анализ выражения (8) показывает, что при $\varphi = 0^\circ$ погрешность γ_Q является постоянной величиной, определяемой только гармоническим составом сигналов. Из (7) следует, что при $\varphi = 90^\circ$ знаменатель данного выражения обращается в ноль и погрешность γ_P стремится к бесконечности.

Однако для оптимального выбора значений углов сдвига фазы фазосдвигающих блоков и соотношения между интервалом времени Δt и периодом входного сигнала необходимо построить графики зависимости погрешностей в соответствии с (5)–(8).

На рис. 2 приведены графики зависимости относительной погрешности измерения СКЗ напряжения от $\Delta\alpha_1$ и $\omega\Delta t$ при наличии в сигнале напряжения 1-й и 3-й гармоники с коэффициентом $h_{u3} = 0,2$ % согласно (5). Анализ рис. 2 показывает, что при $\omega\Delta t = 60 \dots 90^\circ$, погрешность существенно снижается.

На рис. 3–8 представлены графики зависимости относительной погрешности определения СКЗ тока и приведенных погрешностей измерения АМ и РМ от $\Delta\alpha_1$ и $\omega\Delta t$ при наличии в сигналах напряжения и тока 1-й и 3-й гармоник с коэффициентами $h_{u3} = h_{i3} = 0,2$ % для различных значений угла сдвига фаз φ в соответствии с (10)–(12). При этом считалось, что углы сдвига фаз ФСБ1 и ФСБ2 равны между собой.

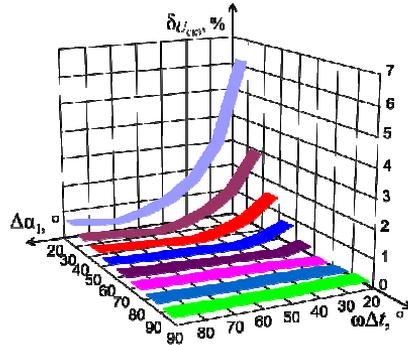


Рис. 2. Графики зависимости $\delta_{I_{СКЗ}}$ от $\Delta\alpha_1$ и $\omega\Delta t$

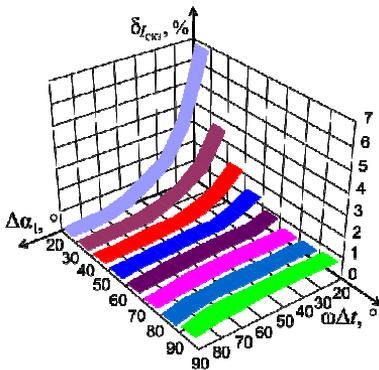


Рис. 3. Графики зависимости $\delta_{I_{СКЗ}}$ от $\Delta\alpha_1$ и $\omega\Delta t$ при $\varphi = 0^\circ$

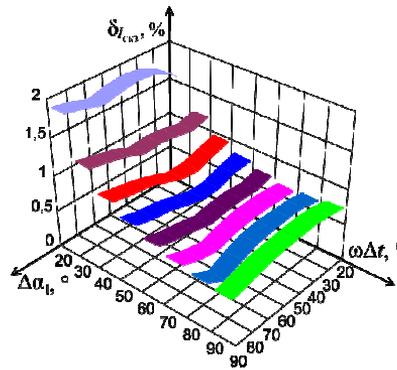


Рис. 4. Графики зависимости $\delta_{I_{СКЗ}}$ от $\Delta\alpha_1$ и $\omega\Delta t$ при $\varphi = 90^\circ$

Из рис. 4 следует, что погрешность измерения СКЗ тока при угле сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = 90^\circ$ практически не зависит от величины угла $\Delta\alpha_1$, но существенно зависит от $\omega\Delta t$. При этом меньшие значения погрешности имеют место для того же диапазона $\omega\Delta t$, что и при определении СКЗ напряжения.

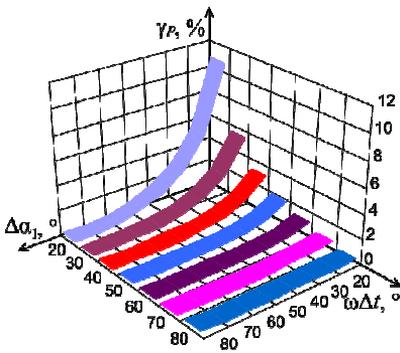


Рис. 5. Графики зависимости γ_P от $\Delta\alpha_1$ и $\omega\Delta t$ при $\varphi = 0^\circ$

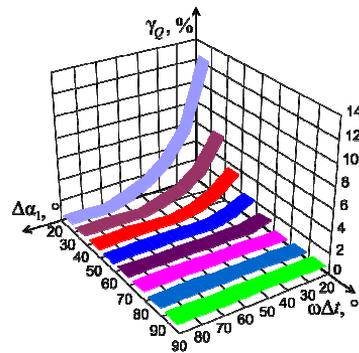


Рис. 6. Графики зависимости γ_Q от $\Delta\alpha_1$ и $\omega\Delta t$ при $\varphi = 90^\circ$

Анализ рис. 5 и 6 показывает, что при $\omega\Delta t = 60\dots 90^\circ$, погрешности измерения АМ и РМ имеют меньшие значения.

Полученные результаты позволяют оптимально выбрать как аппаратные (углы сдвига фаз ФСБ) средства, так и параметры измерительного процесса в зависимости от требований по точности и времени измерения.

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., Муратова В.В. Синтез и анализ методов оперативного измерения параметров периодических процессов на основе формирования дополнительных сигналов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. XVI Междунар. конф. / Самарский науч. центр РАН. – Самара, 2014. – С. 717–722.

3. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Сеницын А.Е. Анализ погрешности измерения интегральных характеристик гармонических сигналов из-за отклонения углов сдвига фаз в каналах напряжения и тока // Современные информационные технологии: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. технолог. ун-та, 2013. – Вып. 17. – С. 79–82.

4. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Анализ погрешности метода измерения интегральных характеристик, обусловленной отклонением формы сигнала от гармонической модели // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физико-математические науки. – 2013. – № 2 (31). – С. 80–84.

5. Муратова В.В. Анализ погрешности метода измерения интегральных характеристик из-за отклонения сигналов от гармонической модели // Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. – Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2014. – С. 198–200.

References

1. Melent'ev V.S., Batishchev V.I. Approksimatsionnye metody i sistemy izmereniia i kontrolya parametrov periodicheskikh signalov [Approximate methods and measuring and control systems for periodic signals performance]. Moscow: Fizmatlit, 2011. 240 p.

2. Melent'ev V.S., Ivanov Iu.M., Muratova V.V. Sintez i analiz metodov operativnogo izmereniia parametrov periodicheskikh protsessov na osnove formirovaniia dopolnitel'nykh signalov [Synthesis and analysis of efficient measuring methods of periodic processes performance based on the additional signals creation]. *Trudy XVI Mezhdunarodnoi konferentsii "Problemy upravleniia i modelirovaniia v slozhnykh sistemakh"*. Samarskii nauchnyi tsentr Rossiiskoi Akademii Nauk, 2014, pp. 717-722.

3. Melent'ev V.S., Ivanov Iu.M., Sinitsyn A.E. Analiz pogreshnosti izmereniia integral'nykh kharakteristik garmonicheskikh signalov iz-za otkloneniia uglov sdviga faz v kanalakh napriazheniia i toka [Analysis of measurement error of the integral characteristics of harmonic signals due to deviation angle of phase shift in the voltage and current channels]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sovremennye informatsionnye tekhnologii"*. Penzenskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet, 2013, iss. 17, pp. 79-82.

4. Melent'ev V.S., Ivanov Iu.M., Muratova V.V. Analiz pogreshnosti metoda izmereniia integral'nykh kharakteristik, obuslovlennoi otkloneniem formy signala ot garmonicheskoi modeli [Analysis of procedural error of the integral characteristics due to the signal waveform deviation from the harmonic model]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2013, no. 2 (31), pp. 80-84.

5. Muratova V.V. Analiz pogreshnosti metoda izmereniia integral'nykh kharakteristik iz-za otkloneniia signalov ot garmonicheskoi modeli [Analysis of procedural error of the integral characteristics due to signals deviation from the harmonic model]. *Sbornik nauchnykh trudov 4 Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Tekhnika i tekhnologii: puti innovatsionnogo razvitiia"*. Kursk: Iugo-zapadnyi gosudarstvennyi universitet, 2014, pp. 198-200.

Сведения об авторе

Муратова Вера Владимировна (Самара, Россия) – аспирант Самарского государственного технического университета (443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, e-mail: Muratova1991@yandex.ru).

About the author

Muratova Vera Vladimirovna (Samara, Russian Federation) post-graduate student Samara State Technical University (443100, Samara, Molodogvardeyskaya St., e-mail: Muratova1991@yandex.ru).

Получено: 15.04.2015