

В. С. Мелентьев, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, vs_mel@mail.ru,
В. И. Батищев, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, vib@list.ru,
Ю. М. Иванов, ст. науч. сотр., fuego27@rambler.ru
Самарский государственный технический университет, Самара

Анализ и совершенствование методов и систем измерения частоты гармонических сигналов¹

Коротко рассмотрены проблемы, возникающие при измерении частоты сигнала. Для решения задачи сокращения времени измерения в узком диапазоне частот входного сигнала предложено использовать априорную информацию о модели измерительного сигнала. Рассмотрен новый метод измерения частоты гармонического сигнала, основанный на формировании дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на произвольный угол, и использовании мгновенных значений входного и дополнительного сигналов для определения частоты. В отличие от известных, метод позволяет определять частоту за время, значительно меньшее периода входного сигнала. Приведена структурная схема средства измерения, реализующего метод. Проведен анализ погрешности, обусловленной отклонением реального периодического сигнала от гармонической модели. Показано, что значение погрешности в значительной мере определяется не только гармоническим составом реального сигнала, но и длительностью образцового интервала времени и угла сдвига дополнительного сигнала относительно входного. Приведены результаты анализа погрешности, возникающей из-за неидеальности фазосдвигающего блока, предназначенного для формирования дополнительного сигнала. Рассмотрены вопросы уменьшения погрешностей за счет изменения параметров измерительного процесса.

Ключевые слова: частота, гармоническая модель, мгновенные значения сигналов, средство измерения, фазосдвигающий блок, погрешность

Введение

Для решения задач испытаний и контроля энергообъектов и электротехнического оборудования и автоматизированного управления технологическими процессами требуется создание методов и средств измерения параметров электрических сигналов переменного тока, включая частоту. Кроме того, для повышения точности измерений некоторые физические величины предварительно преобразуют в сигналы, пропорциональные частоте [1].

Современные средства измерения (СИ) частоты звукового диапазона основаны, в основном, на преобразовании частоты в интервалы времени, длительность которых затем определяют цифровыми методами. Наиболее распространенными являются метод последовательного счета, а также методы, обеспечивающие повышение точности измерения: метод задержанных совпадений и нониусный метод [2, 3]. Использование данных методов принципиально не может обеспечить время измерения менее периода входного сигнала.

Поэтому задача создания методов и СИ частоты, обеспечивающих высокое быстродействие и точность, является актуальной. Особенно остро стоит проблема сокращения времени измерения частоты при контроле параметров датчиков положения и перемещения с низкочастотным выходным сигналом, а также при определении скорости изменения частоты.

Большинство современных исследований посвящены определению основной частоты [4] сложных периодических сигналов, а также сигналов, искаженных шумами [5], путем обработки дис-

кретных значений сигналов и реализации процедуры на эффективных сигнальных процессорах, что также не обеспечивает высокого быстродействия даже в звуковом диапазоне частот.

Одним из путей решения проблемы сокращения времени измерения в узком диапазоне частот входного сигнала является привлечение априорной информации о модели объекта или измерительного сигнала для определения его параметров. При этом в качестве модели периодического сигнала при определенных условиях часто выбирают гармоническую модель, проводя последующую оценку погрешности, обусловленной несоответствием модели виду реального сигнала [6].

В настоящее время развивается направление, связанное с разработкой методов и средств измерения частоты по отдельным мгновенным значениям гармонических сигналов, не связанным с периодом входного сигнала. Это предполагает два основных способа разделения мгновенных значений: во времени и в пространстве [7].

Второй способ требует формирования дополнительных сигналов напряжения, сдвинутых по фазе относительно входных, и обеспечивает, в общем случае, сокращение времени измерения.

Если в качестве дополнительных сигналов использовать ортогональные составляющие входных [8, 9], то это неизбежно приведет к частотной погрешности фазосдвигающих блоков (ФСБ), осуществляющих формирование дополнительных сигналов. При изменении частоты угол сдвига фазы ФСБ может отличаться от 90°.

Этот недостаток устраняется в методах измерения частоты [10, 11], в которых используется формирование дополнительного сигнала, сдвинутого относи-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 13-08-00173-а).

тельно входного на произвольный (в общем случае) угол $\Delta\alpha$. Однако при реализации данных методов определяются переходы сигналов через ноль. Это значительно увеличивает время измерения, поскольку момент начала измерения и момент перехода сигнала через ноль в общем случае не совпадают.

В статье рассматривается новый метод и реализующее его СИ, обеспечивающие начало измерения в произвольный момент времени.

Метод измерения частоты на основе использования мгновенных значений входного и дополнительных сигналов

Метод основан на формировании двух дополнительных сигналов напряжения, сдвинутых по фазе относительно входного соответственно на углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$ в сторону опережения и использовании мгновенных значений как входного, так и дополнительных сигналов для определения частоты. В соответствии с методом в произвольный момент времени измеряют первые мгновенные значения входного и дополнительных напряжений. Через образцовый интервал времени Δt измеряют вторые мгновенные значения входного сигнала и дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого относительно входного на $\Delta\alpha$, и определяют частоту по измеренным мгновенным значениям.

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

Для входного гармонического напряжения $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ дополнительные сигналы принимают вид

$$u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha) \text{ и } u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha).$$

В произвольный момент времени t_1 выражения для мгновенных значений сигналов имеют вид

$$U_{11} = U_m \sin \alpha_1; U_{21} = U_m \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha); \\ U_{31} = U_m \sin(\alpha_1 + 2\Delta\alpha),$$

где U_m — амплитудное значение напряжения; α_1 — начальная фаза напряжения в момент времени t_1 ; ω — угловая частота.

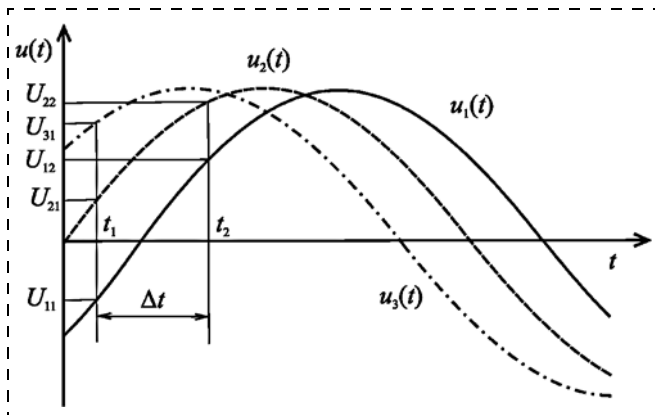


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

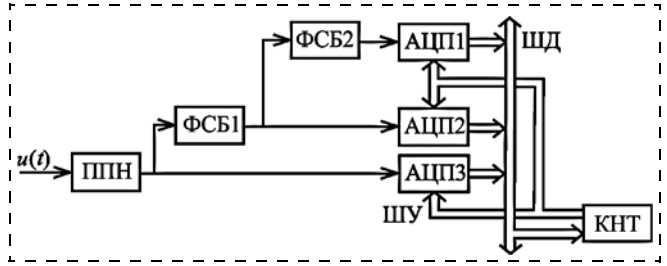


Рис. 2. Схема СИ, реализующего метод

Через интервал времени Δt мгновенные значения сигналов примут вид

$$U_{12} = U_m \sin(\alpha_1 + \omega \Delta t); U_{22} = U_m \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha + \omega \Delta t).$$

Используя мгновенные значения, можно определить искомую частоту:

$$f = \frac{1}{2\pi \Delta t} \arcsin \frac{(U_{21} U_{12} - U_{11} U_{22}) \sqrt{U_{21}^2 - (U_{31} + U_{11})^2}}{2 U_{21} (U_{21}^2 - U_{31} U_{11})}. \quad (1)$$

Схема СИ, реализующего метод, приведена на рис. 2.

СИ содержит: первичный преобразователь напряжения ППН, два фазосдвигающих блока ФСБ1 и ФСБ2, осуществляющих сдвиг сигналов на угол $\Delta\alpha$, три аналого-цифровых преобразователя АЦП1, АЦП2, АЦП3, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД.

Оценка погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели

Рассматриваемый метод предназначен для определения частоты гармонических сигналов. Проведем оценку методической погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели. Для этого используем предложенную в работе [6] методику оценки погрешности результата измерения как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала.

Предельное значение абсолютной погрешности измерения частоты равно

$$\Delta f = \left[\left| \frac{\partial f}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_{22}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_{31}} \right| \right] \Delta U_{\max}, \quad (2)$$

где $\Delta U_{\max} = U_{1m} \sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}$ — предельная абсолютная погрешность аргументов, соответствующая наибольшему отклонению модели от реального сигнала;

$h_{uk} = \frac{U_{km}}{U_{1m}}$ — коэффициент k -й гармоники напря-

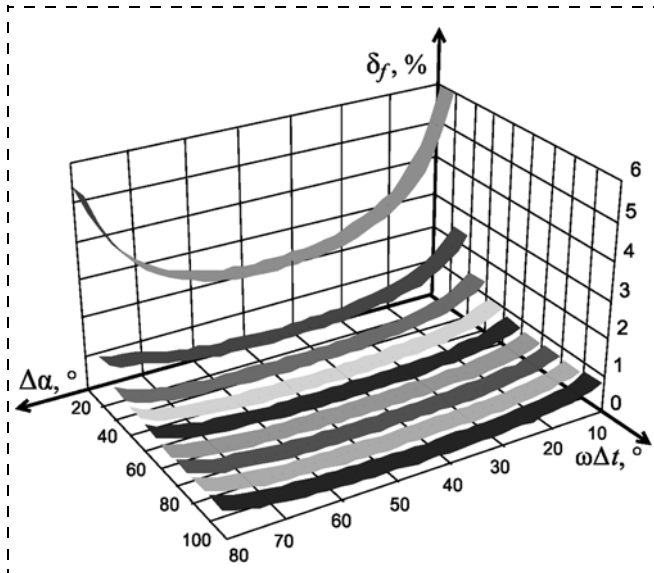


Рис. 3. Графики зависимости δ_f от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ при $\alpha_1 = 0^\circ$

жения; U_{1m} — амплитуда первой гармоники напряжения; U_{km} — амплитуда k -й гармоники напряжения.

Относительная погрешность измерения частоты в соответствии с соотношениями (1) и (2) примет вид

$$\delta_f = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_{uk}}{\omega\Delta t \sin^2 \Delta\alpha |\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha) \cos \omega\Delta t|} \times \\ \times \{ |\sin \Delta\alpha \cos \omega\Delta t + \cos(2\alpha_1 + 2\Delta\alpha) \sin(\omega\Delta t - \Delta\alpha)| + \\ + 2|\sin \Delta\alpha \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha)| [|\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha)| + \\ + |\sin \alpha_1|] + |\sin \omega\Delta t \cos(2\alpha_1 + \Delta\alpha)| \}. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает зависимость погрешности от гармонического состава сигнала, угла сдвига фазы ФСБ $\Delta\alpha$, образцового интервала времени Δt и начальной фазы входного сигнала α_1 .

На рис. 3 и 4 представлены графики зависимости относительной погрешности измерения частоты от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ согласно выражению (3) при наличии в сигнале 1-й и 3-й гармоник с коэффициентом $h_{u3} = 0,2 \%$ для $\alpha_1 = 0^\circ$ и $\alpha_1 = 45^\circ$.

Из рис. 3 и 4 следует, что погрешность измерения частоты существенно зависит от параметров измерительного процесса. При этом погрешность может быть существенно уменьшена за счет соответствующего выбора $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$.

Оценка погрешности, обусловленной неидеальностью фазосдвигающего блока

Одним из основных факторов, ограничивающих точность СИ, использующих формирование дополнительных сигналов, является погрешность по напряжению (погрешность по модулю) ФСБ. Наличие данного вида погрешности приводит к различию амплитуд входного и дополнительного сигналов.

В случае, если амплитудное значение сигнала на выходе ФСБ отличается от амплитуды входного

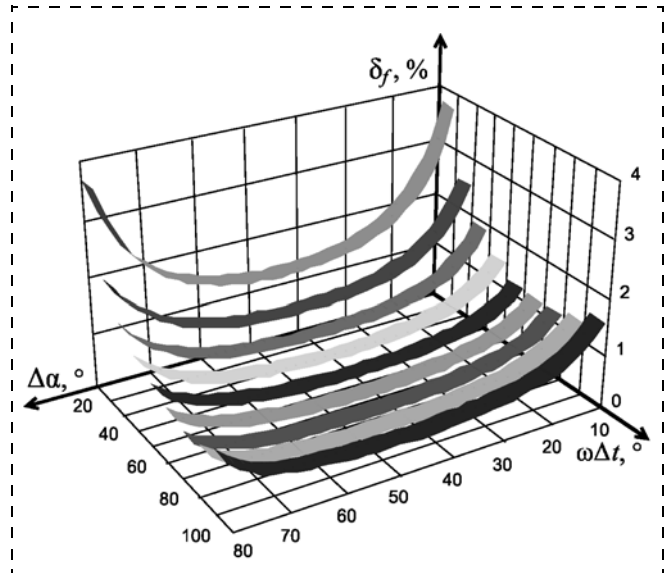


Рис. 4. Графики зависимости δ_f от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ при $\alpha_1 = 45^\circ$

сигнала на величину ΔU , мгновенные значения дополнительного напряжения примут вид

$$U'_{21} = (U_m + \Delta U) \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha);$$

$$U'_{31} = (U_m + \Delta U) \sin(\alpha_1 + 2\Delta\alpha);$$

$$U'_{22} = (U_m + \Delta U) \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha + \omega\Delta t).$$

Проведем оценку влияния погрешности ФСБ на погрешность результата измерения частоты, используя методику, предложенную в работе [6], рассматривая частоту как функцию, аргументы которой (мгновенные значения сигналов) заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению мгновенных значений дополнительного напряжения на величину ΔU .

Если считать, что мгновенные значения входного напряжения измерены без погрешности, а погрешности по модулю обоих ФСБ равны, то можно определить предельное значение абсолютной погрешности измерения частоты:

$$\Delta f_M = \left[\left| \frac{\partial f}{\partial U'_{21}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U'_{22}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U'_{31}} \right| \right] \Delta U. \quad (4)$$

Используя соотношение (1), (4), можно найти относительную погрешность определения частоты:

$$\delta_{f_M} = \frac{h_m}{\omega\Delta t \sin^2 \Delta\alpha |\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha) \cos \omega\Delta t|} \times \\ \times [2|\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha) \sin \alpha_1 \sin(\Delta\alpha - \omega\Delta t) + \\ + \cos(\alpha_1 + 2\Delta\alpha) \sin \omega\Delta t \cos \alpha_1| + \\ + 2|\sin \Delta\alpha \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha) \sin \alpha_1| + |\sin \omega\Delta t \cos(2\alpha_1 + \Delta\alpha)|], \quad (5)$$

$$\text{где } h_m = \frac{\Delta U}{U_m}.$$

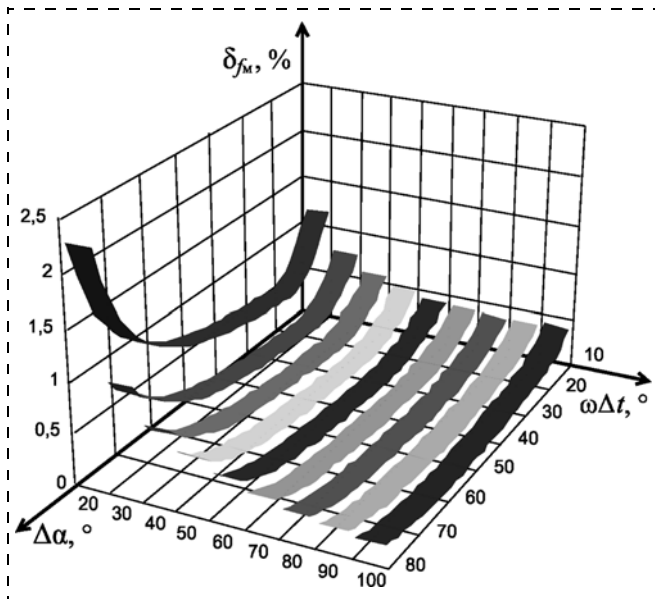


Рис. 5. Графики зависимости δ_{fm} от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ при $\alpha_1 = 45^\circ$

Анализ выражения (5) показывает, что погрешность измерения частоты пропорциональна h_m . Однако погрешность зависит не только от погрешности по модулю, вносимой ФСБ, но и от угла сдвига фазы ФСБ, интервала времени Δt и начальной фазы входного сигнала α_1 .

На рис. 5 представлены графики зависимости относительной погрешности измерения частоты от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ согласно (5) при $h_m = 0,05$ для $\alpha_1 = 45^\circ$.

Анализ рис. 5 показывает, что погрешность измерения частоты можно существенно снизить за счет оптимального выбора $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$.

Очевидно, что отличие углов сдвига фаз первого и второго ФСБ также может привести к погрешности измерения частоты.

Закключение

Разработанный метод и реализующее его СИ позволяют начинать измерение в произвольный момент времени, что обеспечивает сокращение времени определения частоты.

Проведенная оценка погрешности, обусловленной неидеальностью фазосдвигающих блоков, осуществляющих формирование дополнительных сигналов, обнаружила значительное влияние данного вида погрешности на результирующую погрешность определения частоты.

Полученные в работе результаты позволяют выбирать оптимальные значения углов сдвига фаз ФСБ, а также параметры измерительного процесса в соответствии с требованиями по точности и времени измерения.

Список литературы

1. Ратхор Т. С. Цифровые измерения. АЦП/ЦАП. М.: Техносфера, 2006.
2. Зайцев С. Цифровые методы время-частотных измерений // Современная электроника. 2009. № 6. С. 20–23.
3. Petrovic P., Marjanovic S., Stevanovic M. New algorithm for measuring 50/60 Hz AC values based on the usage of slow A/D converters // IEEE Trans, on Instrum. and Meas. 2000. Vol. 49, Iss. 1. P. 166–171.
4. Belega D., Dallet D., Petri D. Accuracy of the Normalized Frequency Estimation of a Discrete-Time Sine-Wave by the Energy-Based Method // IEEE Trans, on Instrum. and Meas. 2012. Vol. 61, Iss. 1. P. 111–121.
5. Zhu L. M., Song X. M., Li H. X., Ding H. High accuracy estimation of multi-frequency signal parameters by improved phase linear regression // Signal Processing. 2007. Vol. 87, Iss. 5. P. 1066–1077.
6. Мелентьев В. С., Батищев В. И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. М: ФИЗМАТЛИТ, 2011.
7. А. с. 1185260 (СССР). Устройство определения частоты переменного напряжения / А.-С. С. Саухатас, Я. Я. Приедите (СССР). Опубл. 30.10.88, Бюл. № 40.
8. Мелентьев В. С., Силицын А. Е., Миронов А. А. Методы измерения частоты на основе сравнения гармонических сигналов, сдвинутых в пространстве и разделенных во времени // Информационно-измерительные и управляющие системы. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. № 1 (8). С. 75–79.
9. Мелентьев В. С., Иванов Ю. М., Миронов А. А. Исследование метода измерения частоты гармонических сигналов // Ползуновский вестник. 2013. № 2. С. 198–201.
10. Мелентьев В. С., Ярославкина Е. Е., Силицын А. Е., Муратова В. В. Исследование методов измерения частоты выходных сигналов датчиков // Южно-Сибирский научный вестник. 2014. № 1 (5). С. 54–56.
11. Мелентьев В. С., Иванов Ю. М., Муратова В. В. Исследование метода измерения частоты гармонических сигналов по мгновенным значениям сигналов // Южно-Сибирский научный вестник. 2014. № 2 (6). С. 32–34.

Analysis and Improvement of the Methods and Systems for Measurement of the Frequencies of the Harmonic Signals

V. S. Melentiev, vs_mel@mail.ru✉, V. I. Batishchev, vib@list.ru, Yu. M. Ivanov, fuego27@rambler.ru, Samara State Technical University, Samara, 443100, Russian Federation

Corresponding author: Melentiev Vladimir S., D. Sc. Head of Department, Samara State Technical University, Samara, 443100, Russian Federation, e-mail: vs_mel@mail.ru

Received on July 08, 2015

Accepted on July 15, 2015

The article presents briefly the problems involved in measurement of the frequency of a signal. For solving the task of reduction of the time in the narrow frequency range of a signal input a priori information is used about the model of the measuring signal, a new method for measurement of the frequency of a harmonic signal. The method is based on the formation of the secondary voltage shifted in relation to the input at an arbitrary angle and on the use of the instantaneous and additional input signals for determination of the frequency. In contrast to the already known methods it enables us to define the frequency in the period of time considerably less than the period of the input signal. A block diagram of the measurement tools which implements the method is presented. An analysis was done of the errors due to deviation of the real heartbeat of the harmonic model. It was demonstrated that the error value was largely determined by not only the harmonic structure of a real signal, but also by the duration of exemplary time interval and the angle of the shift of the additional signal in relation to the input one. The article presents the results of the analysis of the error arising due to imperfect phase-shifting block not intended for formation of an additional signal. Opportunities for reduction of the errors by modifying the parameters of the measuring process were considered. The obtained results allow us to evaluate a possibility of using the method and means of its implementation, depending on the spectral composition of the input signal and requirements for the measurement accuracy. The analysis showed that the most appropriate areas for application of the method were: control of the parameters of the position and moving sensors with a low-frequency output, as well as determination of the rate of the frequency change.

Keywords: frequency, harmonic model, instantaneous values, means of measurement, signals of phase-shifting units, error

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 13-08-00173-a.

For citation:

Melentiev V. S., Batishchev V. I., Ivanov Yu. M. Analysis and Improvement of the Methods and Systems for Measurement of the Frequencies of the Harmonic Signals, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 32–36.

DOI: 10.17587/mau/17.32-36

References

1. Rathor T. S. *Cifrovye izmereniya*. ACP/CAP (Digital measurement. ADC/DAC), Moscow, Tehnosfera, 2006 (in Russian).
2. Zajcev S. *Cifrovye metody vremja-chastotnyh izmerenij* (Digital methods of time-frequency measurements), *Sovremennaja jelektronika*, 2009, no. 6, pp. 20–23 (in Russian).
3. Petrovic P., Marjanovic S., Stevanovic M. New algorithm for measuring 50/60 Hz AC values based on the usage of slow A/D converters, *IEEE Trans, on Instrum. and Meas*, 2000, vol. 49, iss. 1, pp. 166–171.
4. Belega D., Dallet D., Petri D. Accuracy of the Normalized Frequency Estimation of a Discrete-Time Sine-Wave by the Energy-Based Method, *IEEE Trans, on Instrum. and Meas*, 2012, vol. 61, iss. 1, pp. 111–121.
5. Zhu L. M., Song X. M., Li H. X., Ding H. High accuracy estimation of multi-frequency signal parameters by improved phase linear regression, *Signal Processing*, 2007, vol. 87, iss. 5, pp. 1066–1077.
6. Melent'ev V. S., Batishchev V. I. *Approximacionnye metody i sistemy izmereniya i kontrolja parametrov periodicheskikh signalov* (Ap-

proximation methods and systems for measuring and monitoring the parameters of periodic signals), Moscow, FIZMATLIT, 2011 (in Russian).

7. Sauhatas A.-S. S., Priedite Ja. Ja. A. s. 1185260 (USSR). *Us-trojstvo opredelenija chastoty peremennogo naprijazhenija* (The device for determining the frequency of alternating voltage), Opubl. 30.10.88, Bjul. № 40 (in Russian).

8. Melent'ev V. S., Sinicyn A. E., Mironov A. A. *Metody izme-reniya chastoty na osnove sravnenija garmonicheskikh signalov, sdvinutyh v prostranstve i razdelennyh vo vremeni* (Method for measuring the frequency based on the comparison of harmonic signals which are shifted in space and separated in time), *Informacionno-Izmeritel'nye i Upravljajushhie Sistemy*, Samara, Publishing house of Samar. gos. tehn. un-t, 2013, no. 1 (8), pp. 75–79 (in Russian).

9. Melent'ev V. S., Ivanov Ju. M., Mironov A. A. *Issledovanie metoda izmereniya chastoty garmonicheskikh signalov* (The research of the method for measuring the frequency of harmonic signals), *Pol-zunovskij Vestnik*, 2013, no. 2, pp. 198–201 (in Russian).

10. Melent'ev V. S., Jaroslavkina E. E., Sinicyn A. E., Mura-tova V. V. *Issledovanie metodov izmereniya chastoty vyhodnyh signalov datchikov* (The research of the method for measuring the frequency of the sensor output signals), *Juzhno-Sibirskij Nauchnyj Vestnik*, 2014, no. 1 (5), pp. 54–56 (in Russian).

11. Melent'ev V. S., Ivanov Ju. M., Muratova V. V. *Issledovanie metoda izmereniya chastoty garmonicheskikh signalov po mgnovennym znachenijam signalov* (The research of the method for measuring the frequency of harmonic signals on instantaneous values of signals), *Juzhno-Sibirskij Nauchnyj Vestnik*, 2014, no. 2 (6), pp. 32–34 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ

11–14 марта 2016 г.

на базе Алтайского государственного университета состоится

VI Международная научно-практическая конференция

"МНОГОЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ, ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ, ПЛИС, СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ" (МППОС–2016)

Тематические направления конференции

- Многоядерные процессоры, ПЛИС и обработка сигналов
- Параллельное программирование и моделирование явлений и процессов с использованием параллельных вычислений
- Робототехника и автоматизация технологических процессов и научного эксперимента

КОНТАКТНЫЕ АДРЕСА И ТЕЛЕФОНЫ:

Тел.: каф. ВТиЭ АлтГУ: 8-(3852) 38-07-51

Иордан Владимир Иванович, e-mail: iordan@phys.asu.ru , тел.: +7-960-937-89-00

Калачев Александр Викторович, e-mail: kalachev@phys.asu.ru , тел.: +7-913-027-84-06

Белозерских Василий Вениаминович, e-mail: bww@phys.asu.ru , тел.: +7-903-947-71-15