

УДК 621.317

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПО ОТДЕЛЬНЫМ МГНОВЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ\*

**В.С. Мелентьев, Е.Е. Ярославкина, Е.В. Павленко**

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

E-mails: vs\_mel@mail.ru, muratova1991@yandex.ru, makarovak@inbox.ru, Yaelenkapavlenko@yandex.ru

*Приводятся результаты анализа методов измерения частоты по мгновенным значениям гармонических сигналов, обеспечивающих сокращение времени измерения. Рассматривается новый метод измерения частоты гармонических сигналов, основанный на формировании двух дополнительных сигналов напряжения и выявлении моментов переходов сигналов через ноль. Предлагается структурная схема средства измерения, реализующего метод. Реализация метода обеспечивает исключение погрешности, которая обусловлена неидеальностью фазосдвигающих блоков, осуществляющих формирование дополнительных сигналов. Приводятся результаты анализа погрешности метода, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели. Полученные результаты позволяют выбирать соответствующие аппаратные средства и параметры измерительного процесса в зависимости от предъявляемых требований по точности и времени измерения и заданного диапазона частот.*

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

Задачи измерения и контроля частоты электрических сигналов находят широкое применение в электроэнергетике, технике связи, автоматизированном управлении технологическими процессами, при определении параметров датчиков различных физических величин с частотным выходным сигналом.

Для выявления предаварийных и аварийных режимов работы энергообъектов и электротехнического оборудования, при контроле быстропротекающих процессов требуется создание методов и средств измерения (СИ) частоты, обеспечивающих высокое быстродействие и точность.

Для сокращения времени измерения частоты и других параметров периодических сигналов, форма которых близка к гармонической, может быть использован аппроксимационный подход, основанный на привлечении априорной информации о модели измерительного сигнала для определения его параметров. В качестве модели периодического сигнала обычно выбирают гармоническую с по-

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания ФГБОУ ВПО «СамГТУ» (код проекта: 1392).

Владимир Сергеевич Мелентьев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника».

Екатерина Евгеньевна Ярославкина (к.т.н.), доцент кафедры «Информационно-измерительная техника».

Елена Владиславовна Павленко, аспирант.

следующей оценкой погрешности, обусловленной несоответствием принятой модели виду реального сигнала [1].

Методы и СИ, использующие данный подход и основанные на определении частоты по отдельным мгновенным значениям гармонического сигнала, не связанным с его периодом, могут обеспечить время измерения менее периода входного сигнала [2].

Существенно сократить время измерения частоты позволяют методы, основанные на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных по фазе [3].

Однако при реализации методов, использующих в качестве дополнительного сигнала ортогональную составляющую входного, возникает существенная частотная погрешность фазосдвигающего блока (ФСБ), производящего сдвиг входного сигнала на угол  $90^\circ$ . При изменении частоты угол сдвига фазы ФСБ может отличаться от  $90^\circ$  [4].

Данный недостаток устраняется в методах измерения частоты [5, 6], 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 данных методов может привести к погрешности по напряжению (погрешности по модулю) ФСБ, в соответствии с которой амплитуда входного сигнала будет отличаться от амплитудного значения сигнала на выходе ФСБ [7].

В статье рассматривается новый метод измерения частоты гармонического сигнала, реализация которого обеспечивает исключение как частотной погрешности, так и погрешности по модулю ФСБ.

Метод заключается в формировании двух дополнительных сигналов напряжения, сдвинутых по фазе на углы  $\Delta\alpha$  и  $2\Delta\alpha$  относительно входного, и измерении мгновенных значений только входного напряжения. Причем в момент перехода через ноль дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на  $2\Delta\alpha$ , измеряют первое мгновенное значение входного сигнала. В момент перехода через ноль дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на  $\Delta\alpha$ , измеряют второе мгновенное значение входного сигнала. Через образцовый интервал времени  $\Delta t$  с момента перехода через ноль входного напряжения измеряют его мгновенное значение. Частоту определяют по измеренным мгновенным значениям входного напряжения.

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

Если входное напряжение имеет гармоническую модель  $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ , то дополнительные сигналы примут вид  $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$ ,  $u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha)$ , где  $U_m$  – амплитудное значение напряжения;  $\omega$  – угловая частота.

В момент времени  $t_1$ , когда сигнал  $u_3(t)$  переходит через ноль, мгновенное значение входного напряжения будет равно  $U_1 = U_m \sin(-2\Delta\alpha)$ .

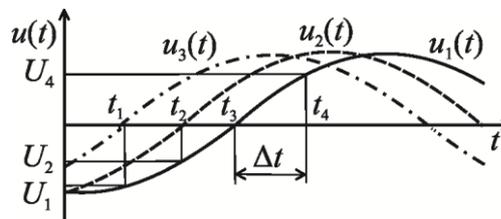


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

В момент времени  $t_2$ , когда сигнал  $u_2(t)$  переходит через ноль, мгновенное значение входного сигнала примет вид  $U_2 = U_m \sin(-\Delta\alpha)$ .

Через образцовый интервал времени  $\Delta t$  с момента перехода через ноль входного напряжения (момент времени  $t_3$ ) в момент времени  $t_4$  его мгновенное значение будет равно  $U_4 = U_m \sin \omega\Delta t$ .

Используя мгновенные значения, можно определить частоту сигнала:

$$f = \frac{1}{2\pi\Delta t} \arcsin \frac{|U_4| \sqrt{4U_2^2 - U_1^2}}{2U_2^2}. \quad (1)$$

Анализ показывает, что частота сигнала не зависит от величины угла сдвига фазы  $\Delta\alpha$ .

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

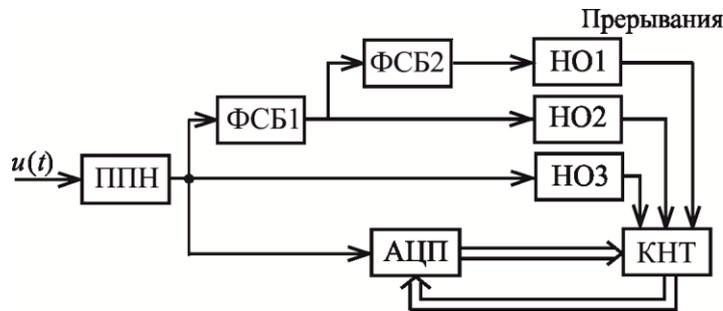


Рис. 2. Схема СИ, реализующего метод

СИ содержит: первичный преобразователь напряжения ППН, два фазосдвигающих блока ФСБ1 и ФСБ2, осуществляющих сдвиг сигналов на угол  $\Delta\alpha$ , аналого-цифровой преобразователь АЦП, три нуля-органа НО1 – НО3 и контроллер КНТ.

Выражение для определения частоты (1) справедливо только для гармонических сигналов.

Проведем анализ погрешности метода из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели, используя методику, предложенную в [8]. Методика заключается в оценке погрешности результата измерения частоты как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала.

Согласно выражению (1) предельная абсолютная погрешность определения частоты сигнала примет вид

$$\Delta f = \left[ \left| \frac{\partial f}{\partial U_1} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_2} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_4} \right| \right] \Delta U_{\max}, \quad (2)$$

где  $\Delta U_{\max} = U_{m1} \sum_{k=2}^{\infty} h_k$  – максимальное отклонение сигнала от гармонической модели;  $U_{m1}$  – амплитудное значение первой гармоники напряжения;  $U_{mk}$  – амплитудное значение  $k$ -й гармоники напряжения;  $h_k = \frac{U_{mk}}{U_{m1}}$  – коэффициент  $k$ -й гармоники напряжения.

В соответствии с (1) и (2) относительная погрешность определения частоты сигнала будет равна

$$\delta_f = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_k \left[ \sin \omega \Delta t (|\cos \Delta \alpha| + 2|\cos 2\Delta \alpha|) + 2|\sin^3 \Delta \alpha| \right]}{2\omega \Delta t |\cos \omega \Delta t \sin^3 \Delta \alpha|}. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что погрешность определения частоты зависит от гармонического состава сигнала, величины образцового интервала времени  $\Delta t$  и угла сдвига фазы ФСБ  $\Delta \alpha$ .

На рис. 3 представлен график зависимости погрешности определения частоты от  $\omega \Delta t$  и  $\Delta \alpha$  при наличии в сигнале первой и третьей гармоники с  $h_k = 0,1 \%$

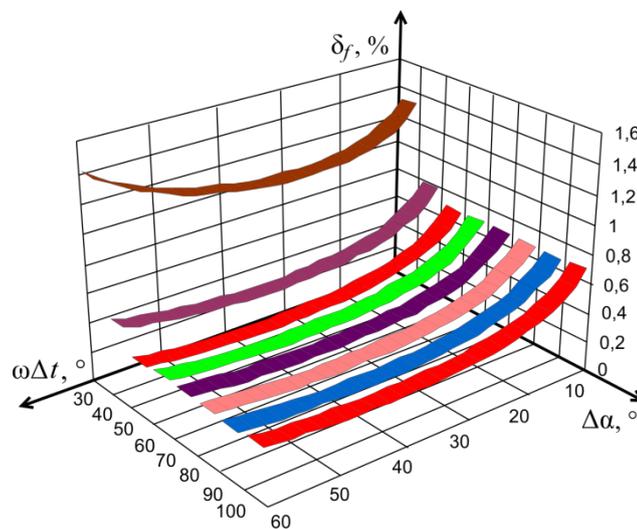


Рис. 3. Графики зависимости погрешности измерения частоты от  $\omega \Delta t$  и  $\Delta \alpha$

Анализ рис. 3 показывает, что погрешность определения частоты существенно зависит от угла сдвига фазы ФСБ, однако при  $\Delta \alpha \geq 50^\circ$  практически не изменяется. Кроме того, погрешность зависит от длительности образцового интервала времени  $\Delta t$  по отношению к периоду входного сигнала. При этом минимальные значения погрешности имеют место при  $20^\circ < \omega \Delta t < 50^\circ$ .

Полученные результаты позволяют выбирать соответствующие аппаратные средства и параметры измерительного процесса в зависимости от предъявляемых требований по точности и времени измерения и заданного диапазона частот.

#### 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. Измерительно-моделирующий подход к определению частоты сигналов // Современные информационные технологии: Тр. междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГТА, 2005. – Вып. 2. – С. 49-51.
3. Мелентьев В.С., Синецын 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: Сб. науч. статей. – Самара: Самар. гос. техн.

- ун-т, 2013. – № 1(8). – С. 75-79.
4. Мелентьев В.С., Сеницын А.Е., Муратова В.В. Анализ метода измерения частоты гармонического сигнала по мгновенным значениям ортогональных составляющих напряжения // Информационно-измерительные и управляющие системы: Сб. науч. статей. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – № 1(9). – С. 89-92.
  5. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Миронов А.А. Исследование метода измерения частоты гармонических сигналов // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 198-201.
  6. 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.
  7. Мелентьев В.С., Ярославкина Е.Е., Сеницын А.Е. Исследование влияния погрешности фазосдвигающего блока на точность измерения частоты гармонического сигнала // Техника и технологии: пути инновационного развития: Матер. III Междунар. науч.-практ. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2013. – С. 126-129.
  8. Мелентьев В.С., Миронов А.А., Муратова В.В. Анализ погрешности метода измерения частоты из-за отклонения сигнала от гармонической модели // Математическое моделирование и крайние задачи: Тр. IX Всерос. науч. конф. с междунар. участием. – Ч. 2. – Самара: СамГТУ, 2013. – С. 111-114.

*Статья поступила в редакцию 1 июля 2014 г.*

## **INCREASE THE FREQUENCY ACCURACY MEASUREMENT ON SEPARATE INSTANT VALUES OF HARMONIC SIGNALS**

***V.S. Melent'ev, E.E. Jaroslavkina, E.V. Pavlenko***

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

*The results of the analysis of methods for measuring the frequency on instant values of harmonic signals that reduce the measurement time. A new method of measuring the frequency of harmonic signals, based on the formation of two additional voltage signals and identifying the moments of transitions through zero is considered. The block diagram of measurement tool that implement the method is provided. Implementation of the method provides an exception of the error caused not ideal phase-shifting units engaged in shaping of additional signals. The results of the analysis of the method error due to the deviation of the actual signal from the harmonic model. The obtained results allow to select the appropriate hardware and parameters of the measurement process, depending on the requirements of accuracy and measurement time and the specified frequency range.*

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

---

*Vladimir S. Melent'ev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Ekaterina E. Jaroslavkina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Elena V. Pavlenko, Postgraduate Student.*