

УДК 621.317

В. С. Мелентьев, Е. Е. Ярославкина, Н. С. Бурдукский, Д. И. Нефедьев

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ¹

V. S. Melent'ev, E. E. Yaroslavkina, N. S. Burdukskiy, D. I. Nefed'ev

ENHANCE THE ACCURACY OF FREQUENCY MEASUREMENT OF HARMONIC SIGNALS

А н н о т а ц и я. Объектом исследования является частота периодического сигнала, предметом исследования – метод определения частоты, основанный на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входного по фазе. Цель работы – исследование нового метода измерения частоты, который исключает возможность возникновения частотной погрешности формирования дополнительного сигнала и погрешности по напряжению фазосдвигающих блоков. Для определения частоты использованы мгновенные значения только входного напряжения, а дополнительные сигналы применены только для сокращения времени измерения. При анализе погрешности, обусловленной отклонением реальных сигналов от гармонической модели, использована методика, основанная на оценке погрешности результата измерения параметра как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала. Предложен подход к определению частоты на основе выявления характерных точек дополнительных напряжений и измерению мгновенных значений входного сигнала в моменты их переходов через ноль. Использование такого подхода позволило разработать метод, который в отличие от большинства известных методов, основанных на формировании дополнительных сигналов, использует только мгновенные значения входного напряжения. Проведена оценка влияния угловой погрешности фазосдвигающих блоков на результирующую погрешность определения частоты. При реализации разработанного метода используется только один аналого-цифровой преобразователь, что сокращает аппаратные затраты. Полученные результаты анализа влияния погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели, и угловой погрешности фазосдвигающего блока на погрешность результата определения частоты, позволяют выбирать оптимальные параметры измерительного процесса в зависимости от требований по точности и времени измерения.

A b s t r a c t. The object of the research is the frequency of the periodic signal. The subject of this study is to determine the method of frequency measurement, based on the formation of additional signals which are shifted in phase relative to the input. The aim is to study a new method of measuring the frequency, which eliminates the possibility of frequency error and the formation of an additional voltage error of phase-shifting units. To determine the frequency used only instantaneous values of the input voltage, and additional signals apply only to reduce measurement time. When analyzing the error due to the deviation of the actual signals from the harmonic model, used a technique based on the estimation of the error of the measurement result parameter as a function whose arguments are given with an accuracy of approximately corresponding to the deviation from the model of a real signal. The approach to determining the frequency based on the detection of characteristic points of the additional signals and measur-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-00173).

ing the instantaneous values of the input signal at its zero crossing. This approach allowed the development of a method which, in contrast, by the majority of the known methods based on the formation of additional signals, use only the instantaneous values of the input voltage. The influence of the angular error of the phase-shifting blocks on the resulting error in determining frequency is considered. When implementing the developed method uses only one analog-to-digital converter, which reduces the hardware expenses. The obtained results of analysis of influence of errors caused by deviation of the actual signal from the harmonic model, and angular error of phase shifting unit for determining the frequency error results, allow to choose the optimal parameters of the measuring process depending on the requirements for accuracy and measurement time.

К л ю ч е в ы е с л о в а: частота, гармоническая модель, мгновенные значения, дополнительные сигналы, фазосдвигающий блок, погрешность, отклонение реального сигнала от модели.

К e y w o r d s: frequency, harmonic model, the instantaneous values, additional signals, the phase-shifting block, an error, deviation of the actual signal from model.

Введение

Для контроля и испытаний энергообъектов, электротехнического оборудования, электромеханических систем, автоматизированного управления технологическими процессами используется измерение параметров электрических сигналов переменного тока, включая частоту. Кроме того, для повышения точности измерений и передачи значений информативных параметров некоторые физические величины предварительно преобразуют в сигналы, пропорциональные частоте [1].

В настоящее время при измерении частоты звукового диапазона в основном используют методы, основанные на преобразовании частоты в интервалы времени, длительность которых затем определяют цифровыми методами. Наиболее простым является метод последовательного счета. Для повышения точности измерения временных интервалов применяются методы задержанных совпадений и нониусный [2]. Однако при использовании данных методов время измерения не может быть менее периода входного сигнала.

Возникает задача разработки методов и средств измерения (СИ) частоты, обеспечивающих высокое быстродействие и точность. Наиболее актуальна проблема сокращения времени измерения частоты при контроле параметров датчиков положения и перемещения с низкочастотным выходным сигналом, а также при определении скорости изменения частоты.

Данная проблема может быть решена при измерении частоты в узком диапазоне за счет привлечения априорной информации о модели измерительного сигнала. При определенных условиях в качестве модели периодического сигнала часто выбирают гармоническую модель, производя последующую оценку погрешности, обусловленной несоответствием модели виду реального сигнала [3].

При этом дальнейшее сокращение времени измерения частоты обеспечивают методы, использующие пространственное разделение мгновенных значений за счет формирования дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных по фазе [4].

Упрощение алгоритма вычисления и сокращение аппаратных затрат обеспечивают использование в качестве дополнительных – ортогональных составляющих входных сигналов [5]. Однако это неизбежно приведет к частотной погрешности фазосдвигающих блоков (ФБ), осуществляющих формирование дополнительных сигналов. При изменении частоты угол сдвига фазы ФБ будет отличаться от 90° .

Этот недостаток устраняется в методах измерения частоты [6, 7], в которых используется формирование дополнительного сигнала, сдвинутого относительно входного на произвольный (в общем случае) угол $\Delta\alpha$. Однако при реализации данных методов может возникнуть погрешность по напряжению (погрешность по модулю) фазосдвигающего блока, в результате которой амплитудное значение входного сигнала будет отличаться от амплитуды сигнала на выходе ФБ.

В [8] авторами предложен новый метод измерения частоты, реализация которого включает данный вид погрешности за счет использования мгновенных значений только входного сигнала.

**Метод измерения частоты гармонических сигналов
на основе формирования дополнительных напряжений**

Метод заключается в формировании двух дополнительных напряжений, сдвинутых по фазе на углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$ относительно входного, и выявлении переходов дополнительных сигналов через ноль. Причем в момент перехода второго дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на $2\Delta\alpha$, измеряют первое мгновенное значение входного напряжения. В момент перехода первого дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на $\Delta\alpha$, измеряют второе мгновенное значение входного напряжения. Через образцовый интервал времени Δt измеряют третье мгновенное значение входного сигнала. Частоту определяют по измеренным мгновенным значениям.

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

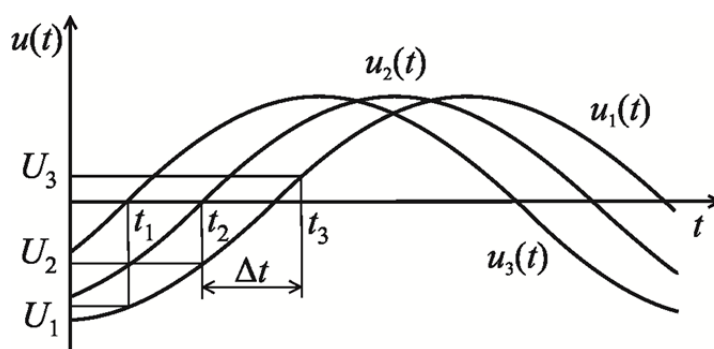


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Для входного гармонического напряжения $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ дополнительные сигналы имеют 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; ω – угловая частота.

В момент перехода второго дополнительного сигнала напряжения через ноль (момент времени t_1) мгновенное значение входного напряжения будет равно $U_1 = U_m \sin(-2\Delta\alpha)$.

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

Через образцовый интервал времени Δt (момент времени t_3) мгновенное значение входного сигнала будет равно $U_3 = U_m \sin(\omega\Delta t - \Delta\alpha)$.

Используя мгновенные значения напряжения, можно определить частоту сигнала:

$$f = \frac{1}{2\pi\Delta t} \arcsin \left\{ \frac{\sqrt{4U_2^2 - U_1^2} \left[\sqrt{4U_2^4 - U_3^2(4U_2^2 - U_1^2)} - U_1U_3 \right]}{4|U_2^3|} \right\}. \quad (1)$$

Анализ выражения (1) показывает, что частота сигнала не зависит от величины угла сдвига фазы $\Delta\alpha$.

На рис. 2 представлена схема средства измерения, реализующего данный метод.

В состав СИ входят первичный преобразователь напряжения ППН, два фазосдвигающих блока ФБ1 и ФБ2, имеющих одинаковые углы сдвига фазы $\Delta\alpha$, два нуля-органа НО1 и НО2, аналого-цифровой преобразователь АЦП, контроллер КНТ.

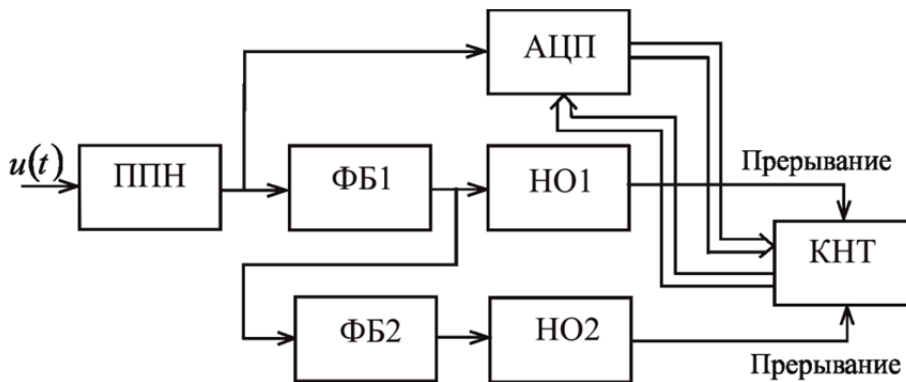


Рис. 2. СИ, реализующее метод

Недостатком средств измерения, реализующих данный метод, является возможность возникновения угловой погрешности, обусловленной отличием углов сдвига фаз фазосдвигающих блоков.

Предлагаемый метод предназначен для определения частоты гармонических сигналов. Если реальные сигналы отличаются от гармонической модели, то неизбежно возникнет погрешность.

Оценка погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели

Для анализа данного вида погрешности можно использовать методику оценки погрешности результата измерения параметра как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала [9]. Погрешность вычисления значения какой-либо функции, аргументы которой заданы приближенно, может быть оценена с помощью дифференциала этой функции. Погрешности функции соответствует ее возможное приращение, которое она может получить, если аргументам дать приращения, равные их погрешностям.

Абсолютная погрешность измерения частоты равна

$$\Delta f = \left[\left| \frac{\partial f}{\partial U_1} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_2} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_3} \right| \right] \Delta U_{\max}, \quad (2)$$

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 -той гармоники напряжения; U_{1m} – амплитуда первой гармоники напряжения; U_{km} – амплитуда k -той гармоники напряжения.

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

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

Анализ выражения (3) показывает, что погрешность зависит не только от гармонического состава напряжения, но и от соотношения между длительностью образцового интервала времени Δt и периода сигнала, а также от угла сдвига фазы ФБ $\Delta\alpha$.

На рис. 3 приведены графики зависимости относительной погрешности измерения частоты от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ при наличии в сигнале первой и третьей гармоник с $h_{u3} = 0,2\%$.

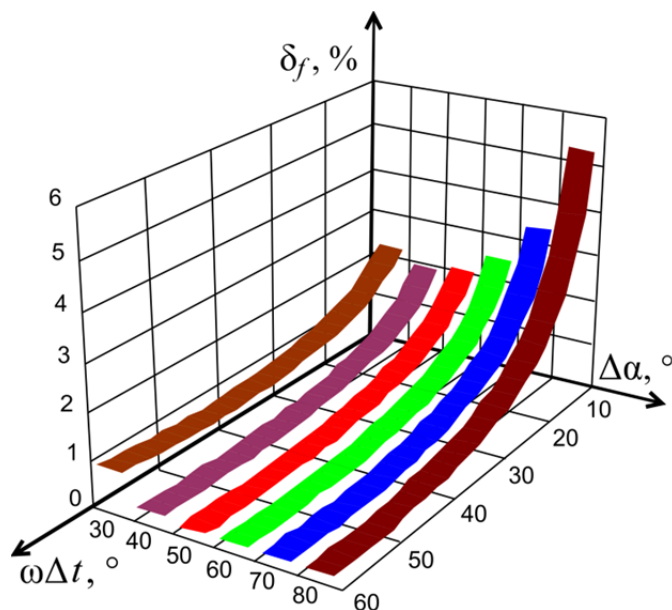


Рис. 3. Графики зависимости δ_f от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$

Из рис. 3 следует, что для уменьшения погрешности следует выбирать $\Delta\alpha = 30 - 60^\circ$.

Анализ влияния угловой погрешности фазосдвигающих блоков на погрешность определения частоты

Еще одним видом погрешности, который может возникнуть при реализации рассматриваемого метода, является погрешность, обусловленная неидентичностью углов сдвига фаз фазосдвигающих блоков.

Если угол сдвига фазы ФБ2 будет отличаться от угла сдвига ФБ1 на $\Delta\beta$, то мгновенное значение входного напряжения в момент времени t_1 примет вид $U'_1 = U_m \sin(\Delta\beta - 2\Delta\alpha)$.

В этом случае выражение для определения частоты в соответствии с (1) будет равно

$$f = \frac{1}{2\pi\Delta t} \arcsin \left\{ \frac{\sqrt{4U_2^2 - U_1'^2} \left[\sqrt{4U_2^4 - U_3^2(4U_2^2 - U_1'^2)} - U_1'U_3 \right]}{4|U_2^3|} \right\}. \quad (4)$$

Тогда, используя (4), можно определить относительную погрешность измерения частоты

$$\delta_{f\beta} = \frac{1}{\omega\Delta t} \arcsin \frac{\sqrt{4\sin^2 \Delta\alpha - \sin^2(\Delta\beta - 2\Delta\alpha)}}{4|\sin^3 \Delta\alpha|} \times \left\{ -\sin(\omega\Delta t - \Delta\alpha) \sin(\Delta\beta - 2\Delta\alpha) + \sqrt{4\sin^4 \Delta\alpha - \sin^2(\omega\Delta t - \Delta\alpha) [4\sin^2 \Delta\alpha - \sin^2(\Delta\beta - 2\Delta\alpha)]} \right\} - 1. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что погрешность зависит не только от угловой погрешности фазосдвигающего блока $\Delta\beta$, но и от соотношения между длительностью образцового интервала времени Δt и периода сигнала, а также от угла сдвига фазы ФБ $\Delta\alpha$.

На рис. 4 приведены графики зависимости данного вида погрешности от $\Delta\alpha$ и $\omega\Delta t$ для угла $\Delta\beta = 0,05^\circ$.

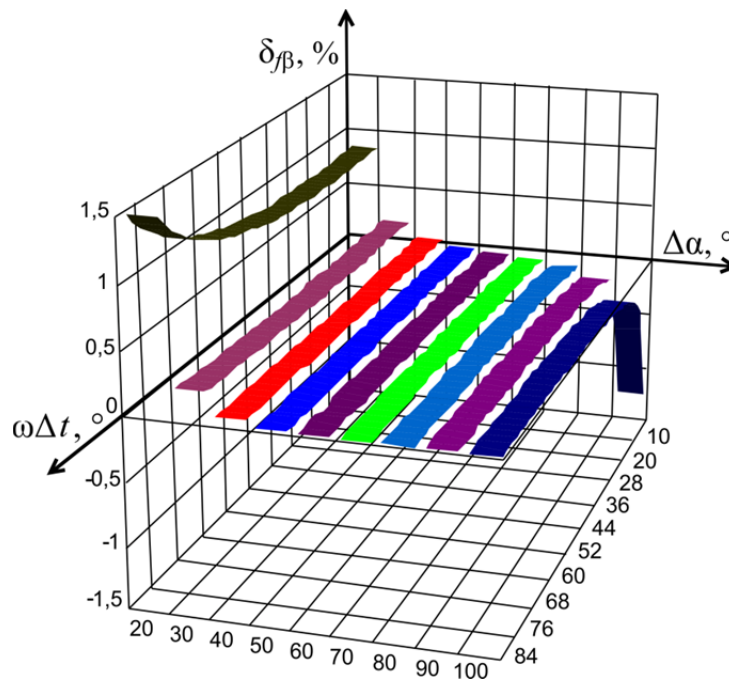


Рис. 4. Графики зависимости δ_{β} от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ $\Delta\beta = 0,05^\circ$

Анализ рис. 4 показывает, что погрешность определения частоты, обусловленная различием углов сдвига фаз ФБ, в значительной степени зависит от $\Delta\alpha$. Меньшие значения погрешности принимает при угле $\Delta\alpha = 40 - 70^\circ$.

Заключение

В исследуемом методе измерения частоты производится измерение мгновенных значений только входного напряжения, что исключает погрешность по модулю фазосдвигающего блока.

Использование дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входного на произвольный угол, приводит к отсутствию частотной погрешности ФБ.

Полученные результаты анализа влияния погрешности, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели, и угловой погрешности фазосдвигающего блока на погрешность результата определения частоты позволяют выбирать оптимальные параметры измерительного процесса в зависимости от требований по точности и времени измерения.

Список литературы

1. Ратхор, Т. С. Цифровые измерения. АЦП/ЦАП / Т. С. Ратхор. – М. : Техносфера, 2006. – 350 с.
2. Зайцев, С. Цифровые методы времячастотных измерений / С. Зайцев // Современная электроника. – 2009. – № 6. – С. 20–23.
3. 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. – Vol. 54, № 4. – P. 407–411.
4. Мелентьев, В. С. Исследование метода измерения частоты гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, Ю. М. Иванов, А. А. Миронов // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 198–201.
5. Мелентьев, В. С. Методы измерения частоты на основе сравнения гармонических сигналов, сдвинутых в пространстве и разделенных во времени / В. С. Мелентьев, А. Е. Сеницын, А. А. Миронов // Информационно-измерительные и управляющие системы : сб. науч. ст. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – № 1 (8). – С. 75–79.
6. Мелентьев, В. С. Повышение точности измерения частоты по отдельным мгновенным значениям гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, Е. Е. Ярославкина, Е. В. Павленко // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки». – 2014. – № 3 (43). – С. 58–62.

7. Мелентьев, В. С. Исследование метода измерения частоты выходных сигналов датчиков / В. С. Мелентьев, А. Е. Сеницын, Е. Е. Ярославкина // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 1 (5). – С. 54–56.
8. Мелентьев, В. С. Метод измерения частоты по мгновенным значениям гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, Е. Е. Ярославкина, 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. 9–11.
9. 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

Ярославкина Екатерина Евгеньевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-измерительной техники,
Самарский государственный
технический университет
E-mail: makarovak@inbox.ru

Yaroslavkina Ekaterina Evgen'evna

candidate of technical sciences,

associate professor,
sub-department of information
and measuring technique,
Samara State Technical University

Бурдукский Никита Сергеевич

магистрант,
Самарский государственный
технический университет
E-mail: deadmaster65@gmail.com

Burdukskiy Nikita Sergeevich

master degree student,
Samara State Technical University

Нефедьев Дмитрий Иванович

доктор технических наук,
заведующий кафедрой
информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
E-mail: iit@prnzgu.ru

Nefed'ev Dmitriy Ivanovich

doctor of technical sciences,
head of sub-department
of information and measuring equipment
and metrology,
Penza State University

УДК 621.317

Мелентьев, В. С.

Повышение точности измерения частоты гармонических сигналов / В. С. Мелентьев, Е. Е. Ярославкина, Н. С. Бурдукский, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 3 (13). – С. 47–53.