

УДК 621.317

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

© 2016 В.С. Мелентьев, В.В. Муратова, Ю.М. Иванов

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 26.02.2016

В статье рассматривается новый метод, позволяющий определять частоту периодических сигналов за долю периода сигнала. Метод обеспечивает исключение частотной погрешности и погрешности по модулю фазосдвигающих блоков, используемых для формирования дополнительных сигналов. Реализация метода обеспечивает сокращение времени и увеличение точности измерения. Приводятся результаты анализа погрешности измерения частоты из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели и угловой погрешности фазосдвигающих блоков. Полученные результаты позволяют выбирать оптимальный угол сдвига фазы фазосдвигающих блоков и соотношение между образцовым интервалом времени и периодом сигнала исходя из требований по точности и времени измерения.

Ключевые слова: частота, периодический сигнал, гармоническая модель, высшие гармоники, погрешность

Для решения задач автоматизированного управления технологическими процессами в машиностроении, испытаний и контроля параметров электро-механических систем, энергообъектов и электротехнического оборудования, требуется создание методов и средств измерения параметров электрических сигналов, включая частоту, обеспечивающих высокое быстродействие и точность измерения. Кроме того, частота переменного тока является одним из основных видов носителей измерительной информации датчиков различного назначения. Проблема сокращения времени измерения частоты сигнала стоит особенно остро при контроле параметров датчиков положения и перемещения при реализации технологических процессов, а также при определении скорости изменения частоты [1].

Одним из путей решения данной проблемы является привлечение априорной информации о модели измерительного сигнала для определения его частоты. При этом в качестве модели периодического сигнала при определенных условиях часто выбирают гармоническую модель, производя последующую оценку погрешности, обусловленной несоответствием модели виду реального сигнала. Это позволяет существенно сократить время измерения [2]. Дальнейшее сокращение времени измерения частоты обеспечивают методы, основанные на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных по фазе, и использовании мгновенных значений как основных, так и дополнительных сигналов [3]. Если в качестве дополнительных сигналов использовать ортогональные составляющие входных сигналов [4], то это неизбежно приведет к частотной погрешности фазосдвигающих блоков (ФБ), осуществляющих формирование дополнительных сигналов. При изменении частоты угол сдвига фазы ФБ может отличаться от 90° . Этот недостаток устраняется в методах измерения частоты, в которых используется формирование дополнительного сигнала, сдвинутого относительно входного на

произвольный (в общем случае) угол $\Delta\alpha$ [5]. Однако при реализации данных методов используются мгновенные значения как входных, так и дополнительных сигналов, что неизбежно приводит к погрешности по напряжению (погрешности по модулю ФБ) [6]. Амплитуда входного сигнала может отличаться от амплитудного значения сигнала на выходе ФБ.

Исключение погрешности по модулю фазосдвигающих блоков обеспечивает метод [7]. Метод заключается в формировании двух дополнительных сигналов напряжения, сдвинутых по фазе на углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$ относительно входного. В момент перехода через ноль дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на $2\Delta\alpha$, измеряют первые мгновенные значения входного и дополнительного сигнала, сдвинутого относительно входного на угол $\Delta\alpha$. В момент перехода через ноль дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на $\Delta\alpha$, измеряют второе мгновенное значение входного напряжения. Через образцовый интервал времени Δt с момента первого перехода через ноль одновременно измеряют мгновенные значения входного и дополнительного сигнала, сдвинутого относительно входного на $\Delta\alpha$. Частоту определяют по измеренным мгновенным значениям напряжения с учетом вычисленного корректирующего коэффициента, определяющего соотношение между амплитудными значениями входного и дополнительного сигналов. Недостатком метода является необходимость дополнительной коррекции по модулю, что затрудняет его реализацию.

Этот недостаток устраняется в методе [8], который также основан на 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. В момент перехода через ноль дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на $2\Delta\alpha$, измеряют первое мгновенное значение входного сигнала. Через образцовый интервал времени Δt измеряют второе мгновенное значение входного напряжения. В момент перехода через ноль дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на $\Delta\alpha$, измеряют третье мгновенное значение входного сигнала. Через образцовый интервал времени Δt измеряют четвертое мгновенное значение входного напряжения.

Мелентьев Владимир Сергеевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой. E-mail: vs_mel@mail.ru
Муратова Вера Владимировна, преподаватель. E-mail: muratova1991@yandex.ru
Иванов Юрий Михайлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. E-mail: fuego27@rambler.ru

Частоту определяют по измеренным мгновенным значениям входного напряжения. Однако использование двух образцовых интервалов времени значительно увеличивает время измерения.

Известный метод [9] также исключает погрешность по модулю ФСБ и использует только один образцовый интервал времени Δt . 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. 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 Δt с момента перехода через ноль входного напряжения измеряют его мгновенное значение. Частоту определяют по мгновенным значениям входного сигнала. Недостатком метода является достаточно большое время измерения, поскольку образцовый интервал времени отсчитывается с момента перехода входного напряжения через ноль.

В статье рассматривается новый метод и реализующее его средство измерения, обеспечивающие сокращение времени измерения.

Метод измерения частоты на основе использования мгновенных значений входного сигнала основан на формировании двух дополнительных сигналов напряжения, сдвинутых по фазе относительно входного соответственно на углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$ в сторону опережения. В соответствии с методом 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 с момента перехода второго дополнительного напряжения через ноль измеряют третье мгновенное значение входного сигнала. Частоту определяют по измеренным мгновенным значениям. Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 1.

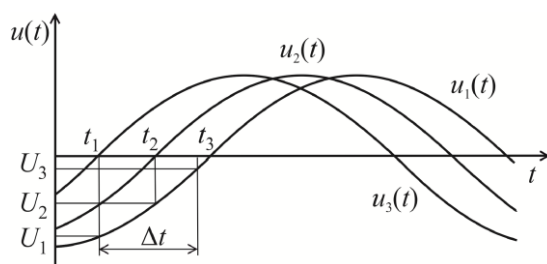


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

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 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 сигнала примет вид $U_2 = U_m \sin(-\Delta\alpha)$. Через образцовый интервал времени Δt после первого перехода второго дополнительного сигнала через ноль (момент времени t_3) мгновенное значение входного напряжения будет равно $U_3 = U_m \sin(\omega\Delta t - \Delta\alpha)$. Используя мгновенные значения напряжения, можно определить частоту сигнала:

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

Анализ выражения (1) показывает, что частота сигнала не зависит от величины угла сдвига фазы $\Delta\alpha$. На рис. 2 представлена схема средства измерения (СИ), реализующего данный метод.

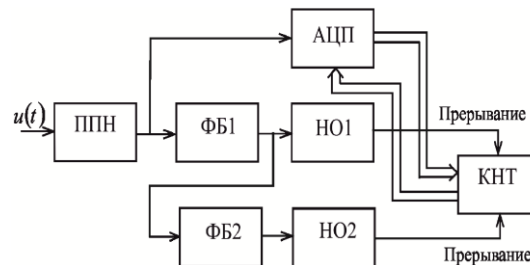


Рис. 2. Средства измерения, реализующие метод

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. Разработанный метод предусматривает измерение частоты гармонических сигналов. Если реальные сигналы отличаются от гармонической модели, то неизбежно возникают погрешности.

Анализ погрешности метода измерения частоты из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели. Проведем анализ погрешности из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели, используя методику, предложенную в [1]. Методика заключается в оценке погрешности результата измерения частоты, как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала. 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. Если в качестве аргументов использовать наибольшие отклонения реального сигнала от гармонической модели, то предельная абсолютная погрешность определения частоты сигнала примет вид:

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

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 -ой гармоники напряжения; $h_k = \frac{U_{mk}}{U_{m1}}$ – коэффициент k -ой гармоники напряжения.

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

$$\delta_f = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_k}{2\omega\Delta t \left| \cos \omega\Delta t \sin^3 \Delta\alpha \cos(\omega\Delta t - 2\Delta\alpha) \right|} \times \left\{ 2 \left| \cos \omega\Delta t \left(\left| \sin \omega\Delta t \right| + \left| \sin^3 \Delta\alpha \right| \right) + \left| \sin \Delta\alpha \right| \times \right. \right. \\ \times \left[\sin(\omega\Delta t - 2\Delta\alpha) \sin(\omega\Delta t - 4\Delta\alpha) - \right. \\ \left. \left. - \cos(2\omega\Delta t - 4\Delta\alpha) \right] + \right. \\ \left. \left. + \cos(\omega\Delta t - 2\Delta\alpha) \sin(\omega\Delta t + \Delta\alpha) \right\}. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что погрешность определения частоты зависит от гармонического состава сигнала, соотношения между длительностью образцового интервала времени Δt и периода сигнала и угла сдвига фазы ФБ $\Delta\alpha$. На рис. 3 представлены графики зависимости погрешности определения частоты от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ при наличии в сигнале первой и третьей гармоники с $h_3 = 0,1\%$. Разрывы графиков на рис. 3 обусловлены значениями $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$, при которых знаменатель в выражении (3) обращается в ноль. Анализ рис. 3 показывает, что при любом соотношении между длительностью образцового интервала времени Δt и периода сигнала погрешность принимает меньшие значения при угле сдвига фазы ФБ $\Delta\alpha = 80 \div 120^\circ$, что приводит к увеличению общего времени измерения.

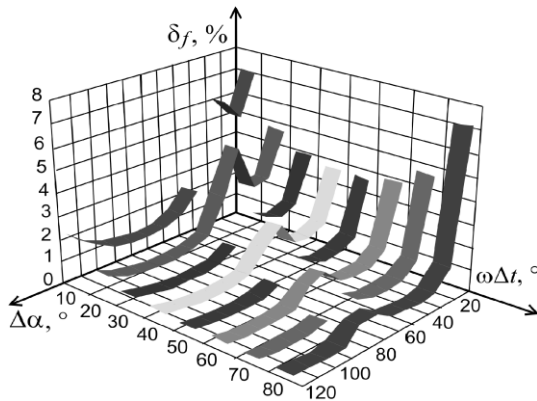


Рис. 3. Графики зависимости погрешности измерения частоты δ_f от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$

Анализ влияния угловой погрешности формирования дополнительных сигналов на результирующую погрешность измерения частоты. Еще одним видом погрешности, который может возникнуть при реализации рассматриваемого метода, является погрешность, обусловленная не идентичностью углов сдвига фаз фазосдвигающих блоков. Если угол сдвига фазы ФБ2 будет отличаться от угла сдвига ФБ1 на $\Delta\beta$, то мгновенные значения входного напряжения примут вид:

$$U'_1 = U_m \sin(\Delta\beta - 2\Delta\alpha) \text{ и} \\ U'_3 = U_m \sin(\Delta\beta - 2\Delta\alpha + \omega\Delta t).$$

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

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

На рис. 4 приведены графики зависимости относительной погрешности измерения частоты от $\Delta\alpha$ и $\omega\Delta t$ для угла $\Delta\beta = 0,05^\circ$ при использовании выражений (1) и (4). Анализ рис. 4 показывает, что погрешность определения частоты, обусловленная различием углов сдвига фаз ФБ, в значительно большей степени от $\Delta\alpha$. Меньшие значения погрешность принимает при угле $\Delta\alpha = 30 \div 90^\circ$.

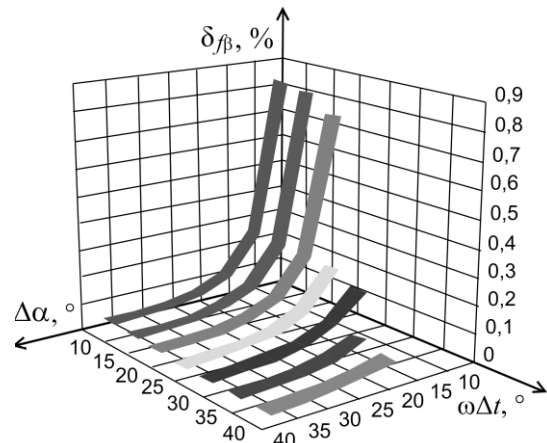


Рис. 4. Графики зависимости δ_{fb} от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ при $\Delta\beta = 0,05^\circ$

Выводы: в разработанном методе измерения частоты производится измерение мгновенных значений только входного напряжения, что исключает погрешность по модулю фазосдвигающих блоков. Использование дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входного на произвольный угол, приводит к отсутствию частотной погрешности ФБ. Полученные результаты анализа влияния погрешностей, обусловленных 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.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-08-00252 А)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Мелентьев, В.С. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов / В.С. Мелентьев, В.И. Батищев. - 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. Метод измерения частоты по мгновенным значениям входного и дополнительного сигналов / В.С. Мелентьев, А.Е. Синицын, А.А. Миронов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: Матер. X-ой междунар. науч.-практ. конф. - Курск: Юго-Зап. гос. ун-т., 2013. С. 187-189.

4. 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. статей. - Самара: Самар. гос. техн. ун-т. 2013. №1(8). С. 75-79.
5. 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.
6. Мелентьев, В.С. Исследование погрешности формирования дополнительных сигналов при измерении параметров гармонических сигналов / В.С. Мелентьев, Е.В. Павленко, А.С. Пескова // Современные тенденции развития науки и технологий: Сборник научных трудов по матер. V Междунар. науч.-практ. конф. – Белгород, 2015. Ч. 2. С. 49-51.
7. Мелентьев, В.С. Повышение точности измерения частоты за счет коррекции мгновенных значений гармонических сигналов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2015. № 2 (46). С. 20-24.
8. Мелентьев, В.С. Исследование аппроксимационного метода измерения частоты сигнала / В.С. Мелентьев, Е.Е. Ярославкина, А.Е. Сеницын, В.В. Муратова // Южно-Сибирский научный вестник. 2014. №3(7). С. 31-33.
9. Мелентьев, В.С. Повышение точности измерения частоты по отдельным мгновенным значениям гармонических сигналов / В.С. Мелентьев, В.В. Муратова, Е.Е. Ярославкина // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2014. № 3 (43). С. 58-62.

METHOD FOR INCREASING THE ACCURACY AND TIME REDUCTION OF MEASUREMENT THE FREQUENCY OF PERIODIC SIGNALS FOR TECHNOLOGICAL PROCESS CONTROL SYSTEMS

© 2016 V.S. Melentyev, V.V. Muratova, Yu.M. Ivanov

Samara State Technical University

In article the new method allowing to determine the frequency of periodic signals for a signal period share is considered. The method provides an exception of a frequency error and an error on module of phase shifting units used for formation the additional signals. Realization of method provides time reduction and increasing in accuracy of measurement. Results of analysis the error of measurement the frequency because of deviation of a real signal from harmonious model and the angular error of phase shifting units are given. The received results allow to select an optimum angle of a phase shift of phase moving units and ratio between the model interval of time and the period of a signal proceeding from requirements for accuracy and time of measurement.

Key words: *frequency, periodic signal, harmonious model, highest harmonicas, error*