

Информационные технологии

УДК 681.518

О КОРРЕКЦИИ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК, СВЯЗАННОЙ С НЕРАВНОМЕРНОСТЬЮ ШАГА ИХ УСТАНОВКИ НА КОЛЕСЕ РОТОРА ТУРБОМАШИНЫ¹

С.Ю. Боровик

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук»
443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

Приведен анализ методической погрешности измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток компрессора или турбины газотурбинного двигателя с помощью кластеров одновитковых вихретоковых датчиков с чувствительными элементами в виде отрезка проводника, обусловленной неравномерным шагом установки лопаток на колесе ротора турбомашин. Рассматривается метод уменьшения указанной погрешности и даются количественные оценки, подтверждающие его работоспособность и эффективность.

Ключевые слова: радиальные и осевые смещения торцов лопаток, кластер одновитковых вихретоковых датчиков, неравномерный шаг установки лопаток, погрешность измерения, уменьшение погрешности.

Введение

Известно, что в системах сбора измерительной информации о радиальных и осевых смещениях торцов лопаток в компрессорах и турбинах газотурбинных двигателей (ГТД) реализуются кластерные методы измерения, предусматривающие использование одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника [1, 2]. В соответствии с указанными методами производится предварительное измерение периода вращения лопаточного колеса ($T_{\text{лк}}$) и по полученным результатам и известному числу лопаток ($n_{\text{л}}$) вычисляются моменты времени, в которые подаются импульсы питания измерительной цепи², период которых $T_0 = T_{\text{лк}}/n_{\text{л}}$. Последовательность импульсов питания синхронизируется с вращением лопаточного колеса с помощью «метки», расположенной на валу ГТД. Это гарантирует получение искомой измерительной информации точно в моменты прохождения основаниями (замками) лопаток определенных точек кластеров ОВТД – геометрического центра (г.ц.) сосредоточенного кластера ОВТД или г.ц. и виртуального г.ц. (в.г.ц.) распределенного кластера ОВТД [4-6].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №11-08-01032а).

² Предусматривается применение измерительной цепи с импульсным питанием, в которой реализован метод первой производной [3].

Следует отметить, что вычисление моментов подачи импульсов питания измерительной цепи, предусмотренное кластерными методами, выполняется в предположении равномерного изначального размещения на колесе оснований (замков) лопаток, что регламентируется соответствующими техническими требованиями. В то же время существует технологический допуск на установку и точность изготовления пера лопаток. Так, в соответствии с [7] точность изготовления пера лопатки находится в пределах ± 0.03 мм, а замковую часть, при помощи которой лопатки крепятся к дискам, изготавливают с точностью $\pm 0.01 \dots \pm 0.02$ мм [8]. Кроме того, в процессе работы силовой установки в зонах концентрации напряжений замковых соединений, особенно первых ступеней, могут возникнуть пластические деформации, а также возможны нарушения формы лопатки вследствие эрозии и попадания посторонних предметов [9]. В этой связи торцевые части лопаток даже на неработающем двигателе могут оказаться на неравном расстоянии друг от друга, что может стать причиной погрешности, которую следует рассматривать как статическую составляющую методической погрешности. В работе [10] приведена методика оценки составляющей погрешности, связанной с неравномерностью шага в торцевой части лопаток, и показано, что при неравномерности шага торцов лопаток в пределах от -0.05 до $+0.05$ мм указанная составляющая погрешности может достигать 6 %.

Очевидно, что погрешности, связанные с неравномерностью шага установки лопаток, могут быть уменьшены с помощью учета в процессе опроса ОВТД конкретного углового положения каждой лопатки на контролируемом колесе ротора компрессора или турбины. Последнее достигается путем формирования специальных корректировочных таблиц. Ниже рассматривается одна из возможных реализаций метода уменьшения указанной погрешности и приводятся результаты его экспериментальной проверки на лабораторном стенде, включающем в себя реальное лопаточное колесо компрессора ГТД с регулируемым электроприводом.

Коррекция погрешности, связанной с неравномерным шагом установки лопаток

Предлагаемый метод предусматривает наличие исходных данных о неравномерном шаге установки лопаток. Исходные данные могут быть получены на этапе сборки ГТД или в процессе холодной прокрутки на испытательном стенде с помощью тех же технических средств, которые используются для измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в компрессоре или в турбине ГТД в рабочем режиме [1, 2]. Однако в отличие от рабочего режима измерений предполагается, что подача импульсов питания измерительной цепи осуществляется с постоянной и максимально возможной частотой (минимально возможным периодом $T_{0,\min}$, который не зависит от скорости вращения лопаточного колеса (периода $T_{\text{лк}}$)).

Методика получения данных о неравномерности шага установки лопаток сводится к вычислению от лопатки к лопатке угловых смещений $\Delta\psi$ реального положения ее торцевой части относительно расчетного, полученного в предположении, что все лопатки на колесе компрессора или турбины установлены равномерно. Вычисленные значения $\Delta\psi$ для каждой лопатки ($\Delta\psi_1, \Delta\psi_2, \dots, \Delta\psi_{n_l}$) и являются искомыми исходными данными, располагая которыми ведут расчет корректирующих интервалов времени $\Delta T_{01}, \Delta T_{02}, \dots, \Delta T_{0n_l}$. Они определяются после вычисления угловой скорости по измеренному значению периода на пер-

вом обороте лопаточного колеса $\omega=2\pi/T_{лк}$. В предположении, что скорость вращения лопаточного колеса не изменяется во времени ($\omega=const$), корректирующие интервалы будут определяться как $\Delta T_{01}=\Delta\psi_1/\omega$, $\Delta T_{02}=\Delta\psi_2/\omega$, ..., $\Delta T_{0n_l}=\Delta\psi_{n_l}/\omega$, причем знак корректирующего интервала времени будет зависеть от знака $\Delta\psi_1$, $\Delta\psi_2$, ..., $\Delta\psi_{n_l}$. Тогда скорректированные моменты прохождения замками лопаток г.ц. сосредоточенного кластера ОВТД [2, 5] можно представить в виде $T_{01,k}=T_{01}+\Delta T_{01}$, $T_{02,k}=T_{02}+\Delta T_{02}$, ..., $T_{0n_l,k}=T_{0n_l}+\Delta T_{0n_l}$, где $T_{01}=T_0=T_{лк}/n_l$, $T_{02}=2T_0$, ..., $T_{0n_l}=n_l \cdot T_0$. В зависимости от знака ΔT_{01} , ΔT_{02} , ..., ΔT_{0n_l} моменты $T_{01,k}$, $T_{02,k}$, ..., $T_{0n_l,k}$ будут опережать моменты T_{01} , T_{02} , ..., T_{0n_l} или отставать от них. Аналогичным образом, но с учетом углового сдвига датчиков в распределенном кластере из двух ОВТД [2, 6], осуществляется коррекция моментов прохождения замками лопаток в.г.ц. распределенного кластера ОВТД ($T_{01,k}^{(PK)}$, $T_{02,k}^{(PK)}$, ..., $T_{0n_l,k}^{(PK)}$).

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма определения угловых смещений ($\Delta\psi$) реальных положений торцевых частей лопаток относительно их расчетных значений.

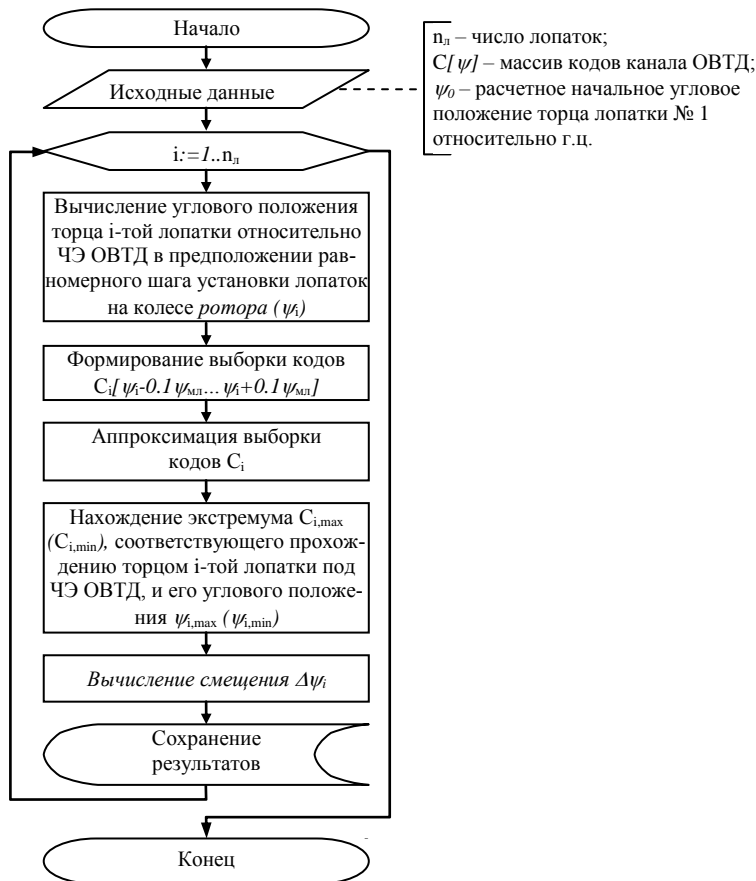


Рис. 1. Алгоритм вычисления угловых смещений реальных положений торцевых частей лопаток относительно их расчетных значений

Исходными данными (блок 2) для алгоритма являются значения числа лопаток контролируемого колеса компрессора или турбины (n_l), массив с кодами, полученными в канале с ОВТД за один период вращения лопаточного колеса ($C[\psi]$) с максимально возможной частотой опроса, а также начальное угловое смещение лопатки под номером 1 относительно г.ц. кластера ОВТД (ψ_0).

Работа алгоритма осуществляется в цикле по всем n_l лопаткам (блоки 3–9). На первом шаге (блок 4) для каждой i -той лопатки производится расчет углового положения ее торцевой части относительно ЧЭ ОВТД в предположении о равномерном шаге установки лопаток на колесе (ψ_i). Расчет ведется с учетом начального углового смещения ψ_0 , размеров и топологии размещения ОВТД в составе кластера.

Далее (блок 5) из общего массива $C[\psi]$ для каждой i -той лопатки формируется выборка кодов в пределах $\psi_i \pm 0.2\psi_{мл}$ ($\psi_{мл} = 2\pi/n_l$ – угол, соответствующий межлопаточному промежутку) в предположении, что реальное положение торца лопатки не может отличаться от своего расчетного значения более чем на 20 %. Полученная выборка аппроксимируется с помощью интерполяционных многочленов по методу наименьших квадратов (блок 6), а затем локализуются глобальные экстремумы полученной полиномиальной функции одной переменной, соответствующие моментам прохождения i -той лопаткой под ЧЭ ОВТД, и производится уточнение значений переменной и функции в точке экстремума (блок 7)³. Уточненные значения переменной ψ_i и принимаются за реальное угловое положение торцевой части i -той лопатки относительно ЧЭ ОВТД.

На завершающем этапе работы алгоритма для каждой i -той лопатки вычисляется угловое смещение реального положения ее торцевой части относительно расчетного $\Delta\psi_i$ (блок 8) и полученные результаты сохраняются в памяти системы (блок 9).

Экспериментальная проверка метода коррекции погрешности

Проверка работоспособности и эффективности предлагаемого метода коррекции погрешности проводилась в лабораторных условиях на специализированном стенде, содержащем лопаточное колесо компрессора высокого давления двигателя НК-16 со 114 лопатками и электропривод с регулируемой скоростью вращения [2]. Для получения информации об угловых положениях торцов лопаток исследуемого колеса использовались технические и программные средства системы СИ-LCE-02К(Т) с распределенным кластером из двух ОВТД, предназначенной для измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в компрессоре и турбине ГТД [2, 12].

С помощью электропривода колесо компрессора раскручивалось до скорости вращения, равной 360 об/мин, которая затем поддерживалась на указанном постоянном уровне. Система измерения СИ-LCE-02К(Т) запускалась в старто-стопном режиме с максимальной постоянной частотой опроса 400 кГц⁴. Опрос синхронизировался с периодом вращения лопаточного колеса. Результаты аналого-цифрового преобразования выходных напряжений измерительной цепи за

³ Подробное описание алгоритма аппроксимации и поиска экстремальных значений кодов в каналах с ОВТД приведено в работе [11].

⁴ Максимальная частота дискретизации определяется техническими возможностями входящего в состав СИ-LCE-02К(Т) стандартного модуля аналого-цифрового преобразования E14-440 производства фирмы L-Card [13].

полный период вращения лопаточного колеса сохранялись на жесткий диск ПЭВМ и далее обрабатывались в специально разработанной программе, реализующей предлагаемый метод коррекции погрешности.

На рис. 2 представлены результаты определения отклонений реальных угловых положений торцов лопаток относительно их расчетных значений для первого ОВТД в составе распределенного кластера датчиков. Для второго ОВТД они аналогичны по направлению и незначительно отличаются по абсолютным значениям, что связано с неточностью задания углового сдвига датчиков в кластере.

Как видно из диаграммы, максимальные отклонения реальных угловых положений торцов лопаток от их расчетных значений могут достигать $-0.18...+0.14$ угловых градусов ($-1.3...+1.1$ мм в линейных единицах)⁵. В соответствии с градуировочными характеристиками измерительного канала системы СИ-LCE-02К(Т) с распределенным кластером из двух ОВТД [14] такая неравномерность шага торцов лопаток приводит к погрешностям до 38 %. Очевидно, что применение метода, позволяющего существенно уменьшить указанную погрешность измерения, следует признать целесообразным и эффективным.

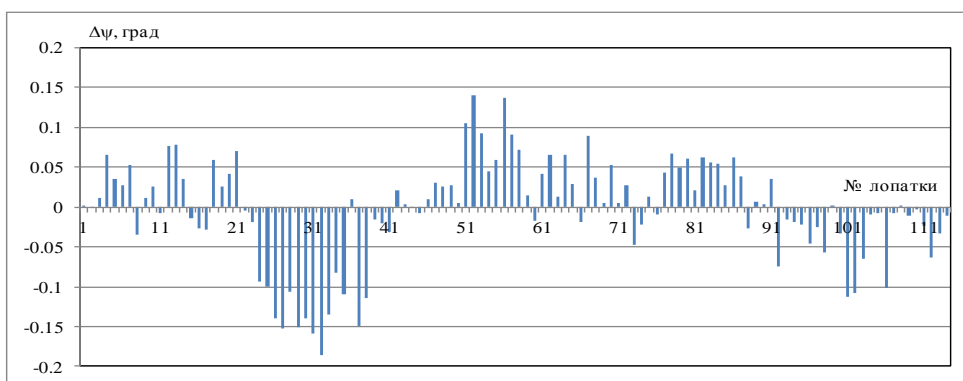


Рис. 2. Отклонения реальных угловых положений торцов лопаток относительно их расчетных значений для первого ОВТД из распределенного кластера датчиков

Заключение

Предложен метод уменьшения методической погрешности измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток компрессора или турбины ГТД, предусматривающий коррекцию моментов опроса ОВТД с учетом неравномерного шага установки лопаток на колесе ротора турбокомпрессора. Метод обеспечивает получение данных о реальном шаге торцов лопаток в процессе холодной прокрутки контролируемого лопаточного колеса с помощью тех же технических средств, которые используются для измерения искомых смещений торцов лопаток в рабочем режиме. Проведенные в лабораторных условиях на специализиро-

⁵ Полученные на лабораторном стенде отклонения существенно (на порядок) превышают величины, указанные во вводной части статьи. Это связано с особенностью используемого в экспериментах лопаточного колеса, которое перед установкой на стенд было снято с реального ГТД и отбраковано после попадания посторонних предметов в газозвдушный тракт двигателя, что привело к существенным нарушениям формы и искривлению лопаток.

ванном стенде экспериментальные исследования подтвердили работоспособность и эффективность предложенного метода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. – 188 с.
2. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / Под общ. ред. О.П. Скобелева. – М.: Машиностроение, 2011. – 298 с.
3. Скобелев О.П. Методы преобразования информации на основе тестовых переходных процессов // Измерение, контроль, автоматизация. – 1980. – № 1-2 (23-24). – С. 11-17.
4. Боровик С.Ю., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Методы получения информации о многокоординатных смещениях торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. VIII Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2006. – С. 232-239.
5. Бельский Л.Б., Боровик С.Ю., Райков Б.К. [и др.]. Метод получения измерительной информации о многокоординатных смещениях торцов лопастей винтовентилятора с одновременным преобразованием сигналов кластерных датчиков. Ч. 1. Обоснование предлагаемого метода и его описание // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – № 1(23). – С. 89-94.
6. Бельский Л.Б., Боровик С.Ю., Райков Б.К. [и др.]. Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Ч. 1. Обоснование предлагаемых методов и их описание // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 4. – С. 16-19.
7. Гейкин В. Совершенство двигателя определяется совершенством технологий // Двигатель. – 2003. – № 3. – С. 11-15.
8. Разработка и анализ технологического процесса обработки сопловых лопаток ТНД. – Режим доступа: <http://new.turbunist.ru/main/turbine/98-razrabotka-i-analiz-tekhnologicheskogo-processa.html>. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
9. Чичков Б.А. Рабочие лопатки авиационных ГТД. Ч. 1. Эксплуатационная повреждаемость рабочих лопаток. – http://airsport.ru/book/file/942/rabochije_lopatki_aviacionnyh_gtd.pdf – Яз. рус.
10. Боровик С.Ю., Скобелев О.П. Методические погрешности систем измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 4. – С. 31-35.
11. Белопухов В.Н., Боровик С.Ю. Алгоритм поиска экстремальных значений кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений лопаток сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XV Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2013. – С. 650-654.
12. Боровик С.Ю. Система измерения смещений торцов лопаток с распределенным кластером одновитковых вихрековых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 4. – С. 36-41.
13. Внешние модули АЦП/ЦАП | E14-440 – Режим доступа: <http://www.lcard.ru/products/external/e-440>. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
14. Боровик С.Ю. Кластерные методы и системы измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях: Дис. ... д-ра техн. наук. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2012. – 306 с.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2013 г.

ON THE ERROR CORRECTION OF MEASUREMENTS OF BLADES TIPS RADIAL AND AXIAL DISPLACEMENTS CAUSED BY IRREGULAR BLADE PITCH ON TURBOMACHINE WHEEL

S. Yu. Borovik⁶

Institute for the Control of Complex Systems of Russian academy of sciences
61, Sadovaya st., Samara, 443020, Russian Federation

The analysis of method error of measuring of blades tips radial and axial displacements in compressor or turbine of gas-turbine engine caused by irregular blade pitch on the turbomachine wheel (measuring methods are realized with the help of clusters of single-coil eddy-current sensors with sensitive element made as a conductor strip) is considered in the paper. The inaccuracy-reduction techniques, as well as quantitative estimates of method efficiency and reliability, are proposed too.

Keywords: blades tips radial and axial displacements, a cluster of single-coil eddy-current sensors, irregular blade pitch, measuring error, inaccuracy-reduction.

⁶*Sergey Yurievich Borovik (Dr. Sci. (Techn.)), Leading Scientist.*

УДК 621.317.1

ВЫЯВЛЕНИЕ НЕДОСТОВЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ АПОСТЕРИОРНОГО АНАЛИЗА

Е.С. Кочнева, А.В. Паздерин

Уральский федеральный университет им. первого президента России Б.Н. Ельцина
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Подчеркивается важность точности и достоверности измерительной информации, полученной от систем учета электроэнергии. Рассматриваются различные математические методы выявления «плохих данных». Различие методов основано на их месте по отношению к решению задачи оценивания состояния. Особое внимание уделено апостериорным подходам достоверизации измерений. Выявление измерений, ошибки которых превышают предельно допустимые уровни, производится с использованием задачи энергораспределения. В отличие от традиционной задачи оценивания состояния, проблема энергораспределения в качестве параметров использует потоки электрической энергии. Приведен пример расчета тестовой схемы, на котором демонстрируется эффективность методики.

Ключевые слова: достоверизация измерительной информации, оценивание состояния, «плохие данные», погрешность, энергораспределение.

Реформирование электроэнергетики существенно повысило значимость систем учета электрической энергии (ЭЭ). У современных систем учета электроэнергии (АИИС КУЭ) ввиду их большой технической сложности неизбежны погрешности измерений и вероятны сбои, которые нелегко обнаружить, чтобы восстановить утраченные измерения. Контроль метрологических характеристик (МХ) таких систем измерений осуществляется путем проведения метрологической поверки один раз в 4–8 лет. Это означает, что при нарушении МХ у любого измерительного комплекса (ИКЭЭ) уже через год-два после проведения поверки показания по расходу ЭЭ будут некорректными и окажутся искаженными до конца межповерочного интервала.

Под недостоверными измерениями ЭЭ («грубыми ошибками», или «плохими данными») следует понимать такие измерения, ошибки в которых существенно превышают допустимые предельные уровни, определяемые согласно методике РД 34.11.225-90 [1] по выражению

$$\delta_W = \pm 1,1 \sqrt{\delta_I^2 + \delta_U^2 + \delta_{MB}^2 + \delta_L^2}, \quad (1)$$

где δ_I – токовая погрешность трансформатора тока (ТТ), % по ГОСТ 7746-89;

δ_U – погрешность напряжения трансформатора напряжения (ТН), % по ГОСТ 1983-89;

δ_{MB} – основная погрешность счетчика, %;

Елена Сергеевна Кочнева, ассистент кафедры «Автоматизированные электрические системы».

Андрей Владимирович Паздерин (д.т.н.), заведующий кафедрой «Автоматизированные электрические системы».

δ_L – погрешность из-за потери напряжения в линии присоединения счетчика к ТН, %.

Выявление недостоверной измерительной информации является важной задачей. Проблема «плохих данных» находится в центре внимания исследователей с 60-х годов XX века, когда появилась возможность на основе удаленных телеизмерений получать математическую модель для режима работы электрической сети. Задача расчета установившегося режима по данным телеизмерений получила название оценивания состояния (ОС) и в настоящее время имеет очень высокую степень научной проработки [2]. Можно говорить о том, что для электроэнергетики разработана теория оценивания состояния и она нашла практическое воплощение в программно-аппаратных комплексах, используемых в управлении режимами работы электроэнергетических систем. Основная суть задачи ОС заключается в расчете параметров установившегося режима, которые в наибольшей степени соответствуют текущим телеизмерениям и текущему режиму энергосистемы.

Уравнения, связывающие измеряемые режимные параметры со всеми остальными параметрами, характеризующими режим работы электроэнергетической системы (ЭЭС), называются уравнениями состояния. В качестве уравнений состояния для решения задачи ОС используются нелинейные уравнения установившегося режима, основанные на первом и втором законах Кирхгофа и законе Ома. Эти уравнения связывают между собой такие параметры установившегося режима, как токи, напряжения, потоки активной и реактивной мощности, а также все параметры схемы замещения электрической сети, которые принимаются известными и относятся к условно-постоянной информации. В связи с тем, что режим энергосистемы, рассчитанный по данным телеизмерений, относится к мгновенному срезу времени и постоянно изменяется, возникает необходимость постоянного обновления текущей модели установившегося режима, то есть решение задачи ОС должно производиться в цикле с дискретностью в 1–5 минут.

В работах [3-5] была сформулирована новая для электроэнергетики задача расчета параметров, характеризующих энергетический режим работы ЭЭС. Данная задача получила название расчета энергораспределения (ЭР), и ее суть сводится к расчету параметров энергетического режима на основе измерительной информации от счетчиков ЭЭ, то есть измерений активных и реактивных потоков ЭЭ. Измерения энергии относятся к конкретным интервалам времени (минуты, часы, сутки, месяцы), поэтому и расчетная модель соответствует периоду измерения. При этом так же, как и в классической задаче ОС, в качестве меры близости расчетных параметров к измеренным используется функция взвешенной суммы квадратов остатков оценивания. Под остатками оценивания понимается разность между измеренным значением параметра \bar{y} и его расчетным аналогом \hat{y} . Различия между расчетными и измеренными параметрами как для электрического, так и для энергетического режима обусловлены наличием погрешностей у измерений и у параметров схемы замещения. В отличие от измерений расчетные параметры полностью удовлетворяют системе уравнений состояния, то есть система уравнений состояния для расчетных параметров имеет нулевые невязки.

В [3] показано, что применение традиционных уравнений установившегося режима к задаче ЭР приводит к неадекватному моделированию [3, 5], особенно при наличии топологических изменений в электрической сети за период измерения. В качестве уравнений состояния задачи ЭР предложено использовать уравнения балансов энергии в узлах и ветвях сети. Кроме этого, в состав уравнений

состояния добавляются выражения для расчета потерь энергии на всех элементах схемы замещения сети. Данные уравнения являются тождествами при любых схемных и режимных изменениях режима работы ЭЭС за период наблюдения.

Анализ достоверности измерительной информации может производиться на основании ЭР [6] при выполнении условий наблюдаемости ЭР, а также избыточного состава измерений. Критерии наблюдаемости ЭР описаны в [7]. При наличии ненаблюдаемых фрагментов сети ЭР позволяет выполнить расстановку минимально необходимого количества измерительных комплексов для достижения полной наблюдаемости сети [8]. С помощью решения задачи ЭР могут быть рассчитаны технические [9], а также локализованы коммерческие потери энергии [10, 11]. В [6, 12, 13] предложена методика повышения достоверности показаний счетчиков электроэнергии расчетным способом без проведения дорогостоящих метрологических поверок. Вопрос оценки качества измерительной информации систем учета промышленных предприятий рассмотрен в [14].

Математические методы обнаружения некорректных измерений можно разделить на три группы. Такое деление связано с местом данных алгоритмов по отношению к задаче оценивания состояния [2].

К первой группе относятся методы априорного анализа, использующие топологические свойства уравнений состояния. Данные методы применяются до начала решения задачи ОС и обычно позволяют разделить все измерения на «плохие», «хорошие», «подозрительные» и «непроверяемые». Метод априорного анализа, основанный на анализе контрольных уравнений (КУ), подробно описан в [6]. Согласно теории ОС, контрольными называются уравнения, в состав которых входят только измеряемые переменные. Исходной для формирования КУ является система балансов ЭЭ в узлах и ветвях электрической схемы (система уравнений состояния ЭР).

Вторую группу в соответствии с [2] образуют методы поиска «плохих данных», используемые непосредственно в ходе решения задачи ОС. При этом квадратичная целевая функция задачи ОС – взвешенная сумма квадратов ошибок измерений – модифицируется так, чтобы снижалась чувствительность к большим ошибкам измерений. Данные методы коротко можно охарактеризовать как неквадратичные критерии ОС.

Третья группа методов основана на анализе остатков оценивания, то есть разницы между измеренными и расчетными значениями параметров [2]. Алгоритмы такого апостериорного анализа обладают достаточно высокой чувствительностью к данным, содержащим грубые ошибки, но являются довольно трудоемкими.

Остатки оценивания определяются согласно

$$\hat{r} = W - \hat{W}, \quad (2)$$

где \hat{r} – вектор остатков;

\hat{W} – вектор оценок измерений;

W – вектор самих измерений.

В свою очередь оценка измерения находится по формуле

$$\hat{W}_i = W_i - R_W \left(\frac{\partial \omega_k}{\partial W_i} \right)^T \left[\frac{\partial \omega_k}{\partial W_i} R_W \left(\frac{\partial \omega_k}{\partial W_i} \right)^T \right]^{-1} \omega_k(W), \quad (3)$$

где R_W – диагональная ковариационная матрица допустимых ошибок измере-

ний, $\omega_k(W)$ обозначает k -ое КУ,

$\left(\frac{\partial\omega_k}{\partial W_i}\right)^T$ – транспонированная матрица наблюдаемости.

Для апостериорного анализа «плохих данных» чаще всего используются взвешенные \hat{r}_W и нормализованные \hat{r}_N остатки оценивания, соответственно равные

$$\hat{r}_W = R_W^{-1/2} \hat{r}, \quad (4)$$

$$\hat{r}_N = D^{-1/2} \hat{r}, \quad (5)$$

где D – ковариационная матрица остатков (формирование данной матрицы рассмотрено ниже).

Линеаризованную систему контрольных уравнений (КУ) можно записать в виде

$$\omega_k(W) - \frac{\partial\omega_k}{\partial W}(W - W_{true}) = 0, \quad (6)$$

где W_{true} – вектор истинных значений, соответствующих измерениям.

С учетом того, что невязки КУ при подстановке в них истинных или эталонных значений измеряемых переменных равны нулю, представим (2) как

$$\hat{r} = R_W \left(\frac{\partial\omega_k}{\partial W}\right)^T \left[\frac{\partial\omega_k}{\partial W} R_W \left(\frac{\partial\omega_k}{\partial W}\right)^T\right]^{-1} \frac{\partial\omega_k}{\partial W} \xi_W, \quad (7)$$

где ξ_W – вектор погрешностей измерений.

Теперь можно определить матрицу, связывающую остатки оценивания с вектором погрешностей измерений ξ_y , т. е. матрицу чувствительности остатков

$$F = R_W \left(\frac{\partial\omega_k}{\partial W}\right)^T \left[\left(\frac{\partial\omega_k}{\partial W}\right) R_W \left(\frac{\partial\omega_k}{\partial W}\right)^T\right]^{-1} \frac{\partial\omega_k}{\partial W}, \quad (8)$$

и ковариационную матрицу остатков оценивания, которая в силу симметричности и идемпотентности матрицы F имеет вид

$$E(\hat{r}\hat{r}^T) = E(F\xi_W\xi_W^T F^T) = FR_W. \quad (9)$$

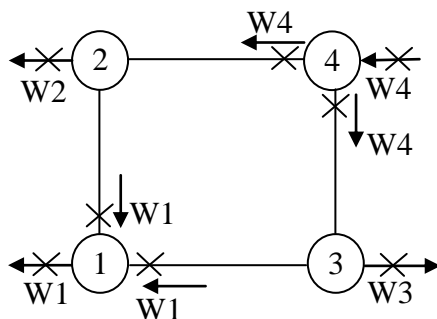
Зная (9), легко определить

$$D = \text{diag}(FR_W) \quad (10)$$

и по (5) – нормализованные остатки оценивания, которые используются для апостериорного анализа измерений. Измерения с наибольшими остатками оценивания отбраковываются и считаются неверными.

Существует ряд примеров, когда алгоритм апостериорного анализа способен выявлять плохие данные, неразличимые алгоритмом априорного анализа, т. е. апостериорный анализ, хотя и более трудоемок из-за процедуры оценивания состояния и вычисления матриц (8),(9), обладает более сильной разрешающей способностью.

Рассмотрим пример. На рисунке изображена расчетная сеть. W_i обозначает наличие измерения ЭЭ.



Расчетная сеть

Как можно увидеть, в данной сети отсутствуют измерения в линиях со стороны узлов 2 и 3. Тем не менее данная сеть имеет избыточный набор измерений за счет наличия ИКЭЭ на другом конце линий. Технические потери в этих линиях также известны. Исходная информация по измерениям представлена в табл. 1.

Таблица 1

Исходная информация

Наименование	W1	W2	W3	W4	W12	W13	W42	W43
ЭЭ, МВтч*	-427,5	-200	-300	1000	171	256,5	-400	-600
Доп. ошибка измерения σ , МВтч	± 5	± 2	± 3	± 10	$\pm 1,71$	$\pm 2,57$	± 3	$\pm 5,5$

*Минус означает, что поток ЭЭ вытекает из узла.

Представленная в табл. 1 информация является сбалансированной и не содержит ошибок и погрешностей.

Потери ЭЭ ΔW по ветвям 1–2, 2–4, 1–3 и 3–4 соответственно равны 9; 20; 13,5 и 30.

Внесем грубую ошибку в некоторые измерения так, что $W1=-500$, $W42=-300$ и $W43=-550$. Для данной сети система КУ имеют следующий вид:

$$\begin{cases} W1 + W12 + W13 = 0; \\ W2 - W12 - \Delta W12 - W42 - \Delta W24 = 0; \\ W3 - W13 - \Delta W13 - W43 - \Delta W34 = 0; \\ W4 + W42 + W43 = 0. \end{cases}$$

Алгоритм априорного обнаружения «плохих данных», описанный в [11], в данном случае не позволяет определить измерения с ошибками, т. к. невозможно составить КУ, не содержащие эти измерения ($W1$, $W42$, $W43$). Следовательно, невязка любого КУ превышает допустимое значение и тем самым измерения не могут быть разбиты на «плохие» и «хорошие», все они относятся к «подозрительным».

Помимо априорного анализа, для определения «плохих» измерений могут быть применены методы апостериорного анализа.

Матрица наблюдаемости $\frac{\partial \omega_k}{\partial W}$ для примера 1 имеет вид:

$$\frac{\partial \omega_k}{\partial W} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix},$$

диагональные элементы матрицы ошибок измерений R_W равны

$$\text{diag}(R_W) = (5 \quad 2 \quad 3 \quad 10 \quad 1,71 \quad 2,57 \quad 3 \quad 5,5).$$

Здесь элемент r_{W_i} определяется согласно выражению

$$r_{W_i} = W_i \cdot \delta_i.$$

Предельно допустимые погрешности ИКЭЭ, определяемые согласно формуле (1), приняты равными 1 %. Погрешности вычисления потерь ЭЭ приняты равными 5 %.

Согласно выражениям (2) и (3) рассчитываются оценки измерений и остатки оценивания:

$$\hat{W} = \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \\ W_{12} \\ W_{13} \\ W_{42} \\ W_{43} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -443,6 \\ -174,3 \\ -288,2 \\ 951,5 \\ 168,3 \\ 275,3 \\ -353,1 \\ -598,4 \end{pmatrix}, \hat{r} = \begin{pmatrix} -56,4 \\ -25,7 \\ -11,8 \\ 48,5 \\ 2,7 \\ -18,8 \\ 53,1 \\ 48,4 \end{pmatrix}.$$

Затем вычисляется матрица чувствительности остатков (8), диагональные элементы которой равны

$$\text{diag}(F) = (0,13 \quad 0,14 \quad 0,09 \quad 0,07 \quad 0,20 \quad 0,16 \quad 0,15 \quad 0,10).$$

Теперь можно перейти к вычислению весовых и нормализованных остатков оценивания (4), (5), так для измерения W_2

$$\hat{r}_{w2} = \frac{|-25,7|}{\sqrt{2}} = 18,15;$$

$$\hat{r}_{N2} = \frac{|-25,7|}{\sqrt{2 \cdot 0,14}} = 48,65.$$

Аналогичным образом вычислены остатки оценивания для остальных измерений (табл. 2).

Остатки оценивания для измерений

Измерение	\hat{W}	\hat{r}	\hat{r}_w	\hat{r}_N
W1	-443,6	-56,4	25,2	72,3
W2	-174,3	-25,7	18,1	48,6
W3	-288,2	-11,8	6,8	22,3
W4	951,5	48,5	15,4	59,0
W12	168,3	2,7	2,0	4,6
W13	275,3	-18,8	11,7	29,6
W42	-353,1	53,1	30,6	78,7
W43	-598,4	48,4	20,6	65,2

Три максимальных как взвешенных, так и нормализованных остатка соответствуют измерениям с грубыми ошибками. Рекомендуется на каждом этапе расчета отбраковывать по одному некорректному измерению, соответствующему наибольшему остатку (нормализованному или взвешенному), затем повторять цикл расчетов для достоверизации остальных измерений.

Выводы:

1. Разработанные в рамках теории оценивания состояния методы выявления грубых ошибок, успешно применяемые для телеизмерений, могут быть применены для достоверизации измерений электрической энергии в рамках модели энергораспределения.

2. В соответствии с местом методов выявления некорректных данных по отношению к решению задачи оценивания состояния различают три их типа: априорные, то есть те, которые применяются до ОС; выполняемые непосредственно в процессе решения задачи ОС; апостериорные, то есть используемые после выполнения ОС. Представленные результаты показывают возможность выявления «плохих» измерений на основе апостериорного анализа в случаях, когда априорные методы бессильны.

3. Наиболее чувствителен к «плохим данным» анализ нормализованных остатков оценивания на основе \hat{r}_N -теста.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. РД 34.09.101-94. Типовая инструкция по учету электроэнергии при ее производстве, передаче и распределении. – М.: ОРГРЭС, 1995.
2. Гамм А.З., Колосок И.Н. Обнаружение грубых ошибок телеизмерений в электроэнергетических системах. – Новосибирск: Наука, 2000. – 152 с.
3. Паздерин А.В. Проблема моделирования распределения потоков электрической энергии в сети // Электричество. – 2004. – № 10. – С. 2-8.
4. Паздерин А.В. Решение задачи энергораспределения в электрической сети на основе методов оценивания состояния // Электричество. – 2004. – № 12. – С. 2-7.
5. Бартоломей П.И., Егоров А.О., Машалов Е.В., Паздерин А.В. Решение комплексной задачи распределения электроэнергии в энергосистеме // Электричество. – 2007. – № 2. – С. 8-13.
6. Егоров А.О., Кочнева Е.С., Паздерин А.В., Скворцов П.Г. Использование метода контрольных уравнений для анализа достоверности и наблюдаемости измерений электроэнергии // Электрические станции. – 2011. – № 11. – С. 42-46.
7. Бартоломей П.И., Паздерин А.В. Наблюдаемость распределения потоков электрической энергии в сетях // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2004. – № 9-10. – С. 24-33.

8. *Егоров А.О., Кочнева Е.С., Паздерин А.В., Шерстобитов Е.В.* Расстановка измерительных комплексов электроэнергии в сетях на основе теории наблюдаемости // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 7-8. – С. 53-59.
9. *Паздерин А.В.* Расчет технических потерь электроэнергии на основе решения задачи энергораспределения // Электрические станции. – 2004. – № 12. – С. 44-49.
10. *Паздерин А.В.* Локализация коммерческих потерь электроэнергии на основе решения задачи энергораспределения // Промышленная энергетика. – 2004. – № 9. – С. 6-20.
11. *Паздерин А.В.* Повышение достоверности показаний счетчиков электроэнергии расчетным способом // Электричество. – 1997. – № 12. – С. 30.
12. *Егоров А.О., Кочнева Е.С., Паздерин А.В.* Достоверизация измерений электроэнергии расчетными методами // Разработки молодых специалистов в области электроэнергетики 2008: Сб. докладов науч.-практ. конф. – М.: Диалог Электро, 2008. – С. 146-148.
13. *Скворцов П.Г., Егоров А.О., Паздерин А.В.* Метод диагностики системы учета электроэнергии на основе задачи энергораспределения // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сб. мат. науч.-практ. конф. и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых 14-18 декабря 2009. – С. 282-285.
14. *Колосок И.Н., Евдокимов Е.Ю.* Повышение достоверности измерительной информации в системе учета электроэнергии крупного промышленного предприятия на основе статистических методов обработки данных // Промышленная энергетика. – 2009. – № 12. – С. 27-34.

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2013 г.

REVEALING OF BAD DATA MEASUREMENTS BASED ON A POSTERIORI ANALYSIS

E.S. Kochneva, A.V. Pazderin

Ural Federal University named after first President of Russia B.N. Eltsyn
19, Mira st, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

The importance of accuracy and reliability of the systems of power accounting metering information is emphasized in the article. Various mathematical methods of bad data identification are examined. Position of the method relative to the state estimation is the basis for methods separation into different types. Special attention is paid to the a posteriori bad data analysis. Applying of energy flow problem to reveal measurements with errors which exceeds admissible limits is described. In contradiction to traditional state estimation, energy flow problem variables are flows of energy. Test case is calculated to demonstrate the efficiency of the method.

Keywords: *validation of metering information, state estimation, bad data, error, energy flow problem.*

*Elena S. Kochneva, Assistant.
Andrey V. Pazderin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

УДК 621.317

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ИНВАРИАНТНЫЕ К ПОГРЕШНОСТЯМ ФОРМИРОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ*

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

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

E-mail: vs_mel@mail.ru.

Проводится анализ методов и средств измерения, основанных на определении интегральных характеристик по мгновенным значениям входных и дополнительных гармонических сигналов. Предлагаются пути исключения погрешностей фазосдвигающих блоков, используемых для формирования дополнительных сигналов, с коррекцией и без последующей коррекции мгновенных значений сигналов. Рассматриваются методы измерения интегральных характеристик гармонических сигналов, инвариантные к погрешностям формирования дополнительных сигналов. Анализируются методы, в которых в качестве дополнительных сигналов применяются ортогональные составляющие входных сигналов, а также методы, использующие формирование дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных на произвольный угол. Приводятся структурные схемы средств измерений, реализующих методы.

Ключевые слова: интегральные характеристики сигналов, гармонические сигналы, мгновенные значения, дополнительные сигналы, фазосдвигающие блоки, погрешность.

Для измерения параметров сигналов, вид которых априорно известен, может быть использован 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].

Привлечение априорной информации о форме сигнала позволяет заменить интегральные преобразования арифметическими операциями с точечными оценками, а также обобщить известные методы, алгоритмы и средства измерения параметров периодических сигналов и разрабатывать новые.

В настоящее время успешно развивается направление, связанное с разработкой методов и средств измерения интегральных характеристик гармонических

* 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».

Юрий Михайлович Иванов (к.т.н.), с.н.с. кафедры «Информационно-измерительная техника»

Вера Владимировна Муратова, аспирант.

сигналов (ИХГС) по отдельным мгновенным значениям, не связанным с периодом входного сигнала.

Одним из направлений, используемых для реализации методов, является разделение мгновенных значений в пространстве за счет формирования дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых по фазе относительно входных. Это обеспечивает существенное сокращение времени определения ИХГС [2].

Одним из основных факторов, которые ограничивают точность средств измерений (СИ), использующих формирование дополнительных сигналов, является погрешность по напряжению (погрешность по модулю) фазосдвигающих блоков (ФСБ). Наличие данного вида погрешности приводит к различию амплитуд входного и дополнительного сигналов [3].

В статье рассматриваются методы и средства измерения ИХГС, использующие формирование дополнительных сигналов и инвариантные к погрешностям фазосдвигающих блоков.

Все методы, инвариантные к погрешностям формирования дополнительных сигналов, можно условно разделить на методы с коррекцией и без последующей коррекции мгновенных значений сигналов.

Рассмотрим метод и СИ, использующие коррекцию мгновенных значений сигналов для исключения погрешности ФСБ.

Метод заключается в том, что в момент перехода дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на произвольный угол $\Delta\alpha$, через ноль измеряют мгновенное значение входного напряжения; в момент перехода входного напряжения через ноль одновременно измеряют мгновенное значение дополнительного напряжения и мгновенное значение тока; через интервал времени Δt одновременно измеряют мгновенные значения входного и дополнительного сигналов напряжения и тока. ИХГС определяют по измеренным значениям [4].

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

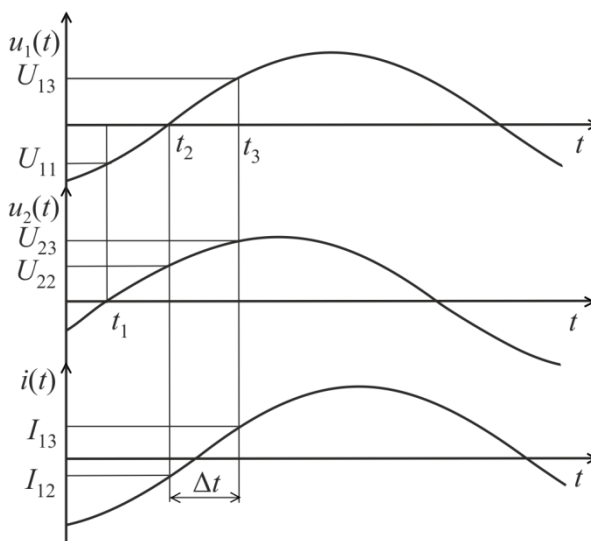


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие первый метод

Если входные напряжение и ток и дополнительный сигнал напряжения имеют гармонические модели $u_1(t) = U_{m1} \sin \omega t$; $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ и $u_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \Delta\alpha)$, то в момент времени, когда дополнительный сигнал напряжения переходит через ноль, выражение для мгновенного значения напряжения примет вид

$$U_{11} = U_{m1} \sin(-\Delta\alpha),$$

где U_{m1} , U_{m2} , I_m – амплитудные значения входного и дополнительного сигналов напряжения и тока;

ω – угловая частота входного сигнала;

φ – угол сдвига фаз между напряжением и током.

В момент времени, когда входное напряжение переходит через ноль, мгновенные значения сигналов будут равны

$$U_{22} = U_{m2} \sin \Delta\alpha; I_{12} = I_m \sin \varphi.$$

Через образцовый интервал времени Δt мгновенные значения сигналов будут определяться выражениями

$$U_{13} = U_{m1} \sin \omega \Delta t; U_{23} = U_{m2} \sin(\Delta\alpha + \omega \Delta t); I_{13} = I_m \sin(\varphi + \omega \Delta t).$$

Погрешность по напряжению ФСБ может быть оценена коэффициентом

$$k_m = \frac{U_{m1}}{U_{m2}} = \left| \frac{U_{11}}{U_{22}} \right|.$$

С помощью данного коэффициента можно скорректировать мгновенные значения дополнительного напряжения:

$$U'_{22} = k_m U_{22} = U_{m1} \sin \Delta\alpha; U'_{23} = k_m U_{23} = U_{m1} \sin(\Delta\alpha + \omega \Delta t).$$

Используя скорректированные мгновенные значения сигналов, после преобразований можно получить выражения для определения основных ИХГС в случае, если $\Delta\alpha \leq 90^\circ$:

– среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока

$$U_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2} |U_{13} U'_{22} U'_{23}|}{\sqrt{4U_{22}'^2 U_{23}'^2 - (U_{22}'^2 - U_{13}^2 + U_{23}'^2)^2}};$$

$$I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{U_{22}' U'_{23} [2U_{22}' U'_{23} (I_{12}^2 + I_{13}^2) - I_{12} I_{13} (U_{22}'^2 - U_{13}^2 + U_{23}'^2)]}{4U_{22}'^2 U_{23}'^2 - (U_{22}'^2 - U_{13}^2 + U_{23}'^2)^2}};$$

– активная (АМ) и реактивная (РМ) мощности

$$P = \frac{|U_{13} U'_{22} U'_{23}| [2I_{13} U'_{22} U'_{23} - I_{12} (U_{22}'^2 - U_{13}^2 + U_{23}'^2)]}{[4U_{22}'^2 U_{23}'^2 - (U_{22}'^2 - U_{13}^2 + U_{23}'^2)^2]};$$

$$Q = \frac{I_{12} |U_{13} U'_{22} U'_{23}|}{\sqrt{4U_{22}'^2 U_{23}'^2 - (U_{22}'^2 - U_{13}^2 + U_{23}'^2)^2}}.$$

СИ, реализующее метод, представлено на рис. 2.

В состав СИ входят: первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ, аналого-цифровые преобразователи АЦП1–АЦП3, нуль-органы НО1 и НО2, фазосдвигающий блок ФСБ, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД.

При реализации метода время измерения зависит от соотношения между моментом начала измерения и переходом дополнительного сигнала напряжения через ноль, а также от угла сдвига $\Delta\alpha$ и длительности интервала времени Δt . Длительность интервала времени Δt ограничена снизу в общем случае только временем аналого-цифрового преобразования мгновенных значений сигналов.

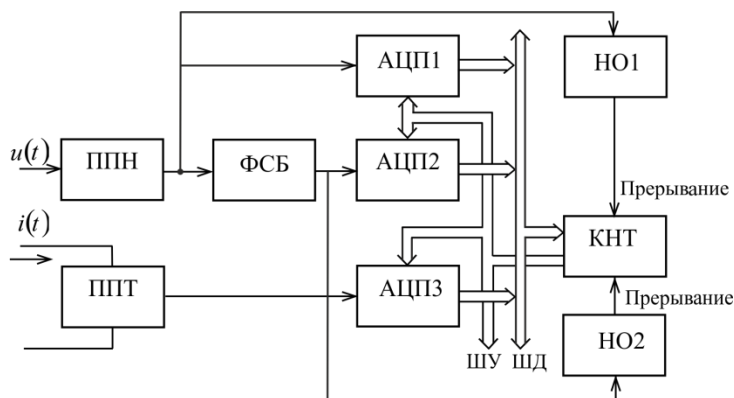


Рис. 2. Схема СИ, реализующего первый метод

Следующие методы не требуют специальной коррекции мгновенных значений сигналов, поскольку для определения ИХГС в них используют только мгновенные значения входных сигналов.

Упрощение реализации могут обеспечить методы измерения ИХГС, в которых в качестве дополнительных сигналов используются ортогональные составляющие сигналов [5].

В соответствии с разработанным авторами методом формируют дополнительный сигнал напряжения, сдвинутый относительно входного на 90° ; в момент перехода дополнительного сигнала через ноль измеряют мгновенные значения входных сигналов напряжения и тока; в момент перехода входного сигнала напряжения через ноль измеряют мгновенное значение тока. Информативные параметры определяют по измеренным мгновенным значениям [6].

Временные диаграммы, поясняющие метод, приведены на рис. 3.

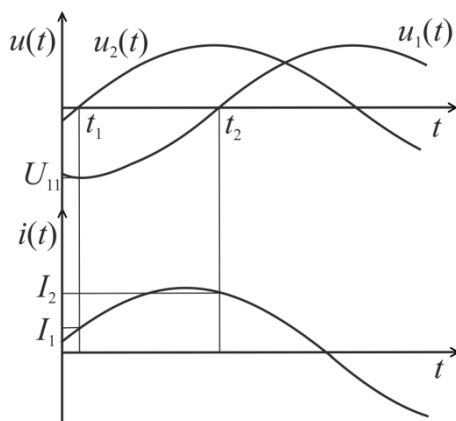


Рис. 3. Временные диаграммы, поясняющие второй метод

При этом дополнительный сигнал напряжения принимает вид

$$u_2(t) = U_{m2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \cos \omega t.$$

В момент времени t_1 , когда дополнительный сигнал напряжения переходит через ноль, мгновенные значения входного напряжения и тока равны

$$U_{11} = U_m \sin\left(\pi l - \frac{\pi}{2}\right); I_1 = I_m \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{2} + \pi l\right),$$

где $l = 0, 1$.

Переменная l принимает соответствующее значение в зависимости от того, каким образом осуществлялся переход через ноль дополнительного сигнала напряжения.

Если происходил переход дополнительного сигнала $u_2(t)$ из отрицательной полуволны в положительную, то $l = 0$, $U_{11} = -U_m$ и $I_1 = -I_m \cos \varphi$.

Если в момент времени t_1 сигнал $u_2(t)$ переходил через ноль из положительной полуволны в отрицательную, то $l = 1$, $U_{11} = U_m$ и $I_1 = I_m \cos \varphi$.

В момент времени t_2 , когда входной сигнал напряжения переходит через ноль, мгновенное значение тока будет равно $I_2 = I_m \sin(\varphi + \pi l)$.

При $l = 0$ $I_2 = I_m \sin \varphi$, а при $l = 1$ $I_2 = -I_m \sin \varphi$.

С учетом мгновенных значений сигналов ИХГС будут равны:

– СКЗ напряжения и тока

$$U_{СКЗ} = \frac{|U_{11}|}{\sqrt{2}}; I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2}{2}};$$

– АМ и РМ

$$P = \frac{U_{11}I_1}{2}; Q = -\frac{U_{11}I_2}{2}.$$

Данные выражения показывают, что для определения ИХГС используются простые арифметические операции.

СИ, реализующее метод, представлено на рис. 4.

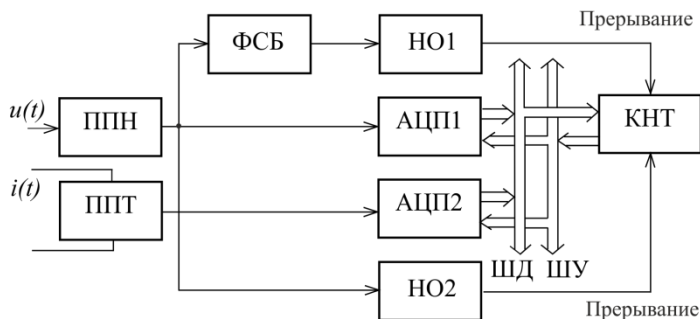


Рис. 4. Схема СИ, реализующего второй метод

При реализации метода время измерения также зависит от соотношения между моментом начала измерения и переходом дополнительного сигнала напряжения через ноль и может достигать $3/4$ периода входного сигнала.

В отличие от СИ, реализующего первый метод, ФСБ осуществляет сдвиг дополнительного сигнала на 90° .

Однако использование ортогональных составляющих входных сигналов может привести к частотной погрешности фазосдвигающих блоков, осуществляющих формирование дополнительных сигналов. В результате этого при изменении частоты входного сигнала ФСБ производят сдвиг сигнала на угол, отличный от $\pi/2$ [7].

Исключение влияния частотной погрешности ФСБ обеспечивает метод, который основан на формировании дополнительных сигналов напряжения и тока, сдвинутых относительно входных на произвольный в общем случае угол [8].

Метод заключается в том, что в момент перехода входного сигнала тока через ноль измеряют первое мгновенное значение входного напряжения; в момент перехода дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на произвольный (в общем случае) угол $\Delta\alpha$, через ноль одновременно измеряют второе мгновенное значение входного напряжения и первое мгновенное значение тока; в момент перехода входного сигнала напряжения через ноль измеряют второе мгновенное значение тока. ИХГС определяют по измеренным мгновенным значениям сигналов [9].

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 5.

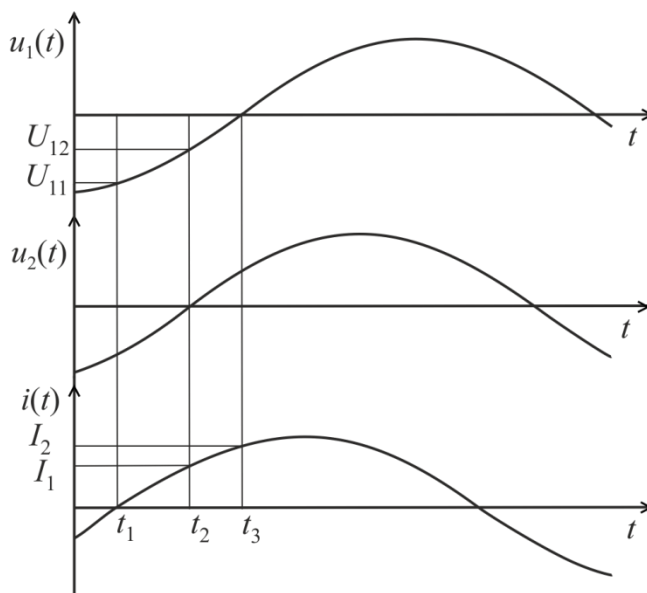


Рис. 5. Временные диаграммы, поясняющие третий метод

В момент времени t_1 перехода сигнала тока через ноль мгновенное значение входного напряжения $U_{11} = U_{m1} \sin(-\varphi)$.

В момент времени t_2 перехода дополнительного сигнала напряжения через ноль мгновенные значения входного напряжения и тока соответственно равны

$$U_{12} = U_{m1} \sin(-\Delta\alpha); I_2 = I_m \sin(\varphi - \Delta\alpha).$$

В момент времени t_3 перехода входного сигнала напряжения через ноль мгновенное значение тока $I_3 = I_m \sin \varphi$.

Определим следующий коэффициент $p = \left| \frac{U_{11}}{I_3} \right| = \frac{U_{m1}}{I_m}$, отражающий соотношение между амплитудными значениями напряжения и тока.

С помощью данного коэффициента можно вычислить значение напряжения

$$U'_{14} = p|I_2| = U_{m1}|\sin(\varphi - \Delta\alpha)|.$$

Используя мгновенные значения сигналов и выбирая угол сдвига фаз дополнительного сигнала $\Delta\alpha < 90^\circ$, можно получить выражения для определения основных ИХГС:

– среднеквадратические значения напряжения и тока:

$$U_{CK3} = \frac{\sqrt{2}|U_{11}U_{12}U'_{14}|}{\sqrt{4U'^2_{14}U^2_{11} - (U'^2_{14} + U^2_{11} - U^2_{12})^2}}; \quad (1)$$

$$I_{CK3} = \frac{\sqrt{2}|I_3U_{12}U'_{14}|}{\sqrt{4U'^2_{14}U^2_{12} - (U'^2_{14} + U^2_{12} - U^2_{11})^2}}; \quad (2)$$

– активная и реактивная мощности:

$$P = \frac{|U_{11}U_{12}U'_{14}| \left| I_3(U'^2_{14} + U^2_{11} - U^2_{12}) - 2I_2U'_{14}|U_{11}| \right|}{\sqrt{4U'^2_{14}U^2_{11} - (U'^2_{14} + U^2_{11} - U^2_{12})^2}}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{I_3|U_{11}U_{12}U'_{14}|}{\sqrt{4U'^2_{14}U^2_{11} - (U'^2_{14} + U^2_{11} - U^2_{12})^2}}. \quad (4)$$

Определение ИХГС в соответствии с (1) – (4) справедливо только в том случае, если $\varphi \neq \pi q$, где $q = 0; 1$.

В случае, если $\varphi = \pi q$, измерение параметров производится следующим образом.

Временные диаграммы для угла сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = 0$ приведены на рис. 6.

Если в момент времени t_1 входные сигналы напряжения и тока одновременно переходят через ноль, то производится измерение мгновенных значений сигналов через произвольный (в общем случае) интервал времени Δt .

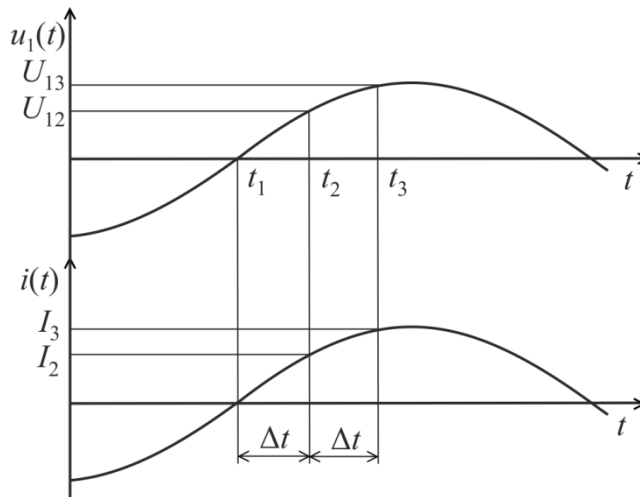


Рис. 6. Временные диаграммы, поясняющие третий метод, при $\varphi = 0$

Через интервал времени Δt (в момент времени t_2) мгновенные значения входного напряжения и тока будут равны

$$U'_{12} = U_{m1} \sin \omega t ; I'_2 = I_m \sin \omega t .$$

Через интервал времени $2\Delta t$ (в момент времени t_3) мгновенные значения сигналов примут вид

$$U'_{13} = U_{m1} \sin 2\omega t ; I'_3 = I_m \sin 2\omega t .$$

Используя мгновенные значения сигналов, можно определить СКЗ напряжения и тока:

$$U_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2}U'_{12}}{\sqrt{4U'_{12}{}^2 - U'_{13}{}^2}} ; I_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2}|I'_2 U'_{12}|}{\sqrt{4U'_{12}{}^2 - U'_{13}{}^2}} .$$

Если знаки вторых мгновенных значений входных сигналов напряжения и тока совпадают ($sign U_{12} = sign I_2$), то $\varphi = 0$. При этом активная мощность $P = U_{СКЗ} I_{СКЗ}$, а реактивная мощность $Q = 0$.

Если вторые мгновенные значения входных сигналов напряжения и тока имеют противоположные знаки ($sign U_{12} \neq sign I_2$), то $\varphi = \pi$. При этом АМ $P = -U_{СКЗ} I_{СКЗ}$, а РМ $Q = 0$.

Схема СИ, реализующего метод, приведена на рис. 7.

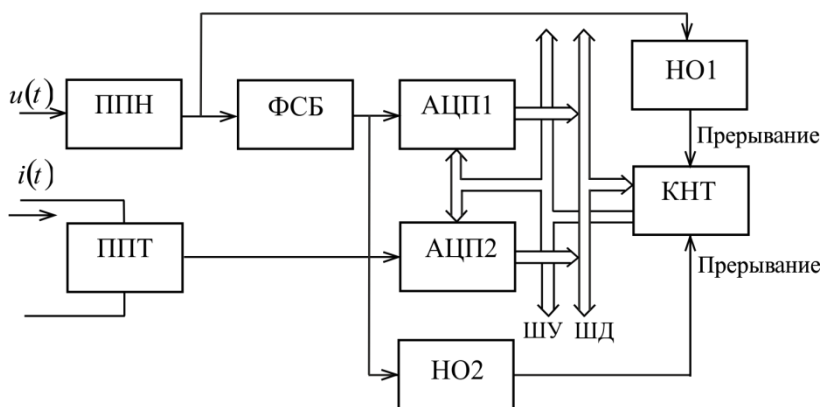


Рис. 7. СИ, реализующее третий метод

При реализации метода в случае, когда $\varphi \neq \pi q$, время измерения также зависит от соотношения между моментом начала измерения и переходом тока или дополнительного сигнала напряжения через ноль и угла сдвига фазы ФСБ, а также от угла сдвига фаз между напряжением и током φ .

Кроме того, к недостаткам метода можно отнести невозможность определе-

ния ИХГС в случае, если значение тока равно нулю.

Следующий метод основан на том, что формируют первый и второй дополнительные сигналы напряжения, сдвинутые относительно входного по фазе на углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$ соответственно в сторону опережения. В момент перехода второго дополнительного сигнала напряжения через ноль измеряют первые мгновенные значения входного напряжения и тока. В момент перехода первого дополнительного сигнала напряжения через ноль измеряют вторые мгновенные значения входного напряжения и тока. ИХГС определяют по измеренным мгновенным значениям сигналов напряжения и тока [10].

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 8.

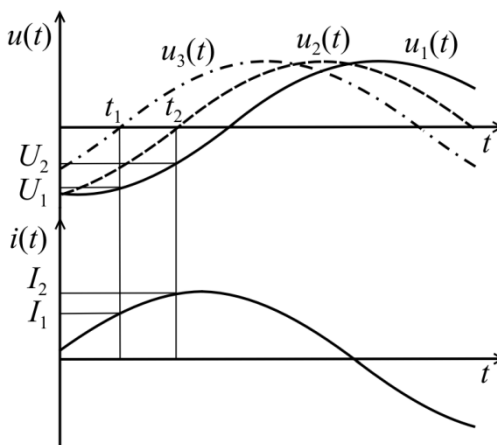


Рис. 8. Временные диаграммы, поясняющие четвертый метод

При этом дополнительные сигналы напряжения примут вид: $u_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \Delta\alpha)$, $u_3(t) = U_{m3} \sin(\omega t + 2\Delta\alpha)$, где U_{m2} , U_{m3} – амплитудные значения дополнительных сигналов напряжения.

В момент времени t_1 , когда второй дополнительный сигнал напряжения переходит через ноль из отрицательной полуволны в положительную, мгновенные значения напряжения и тока будут равны $U_1 = U_{m1} \sin(-2\Delta\alpha)$ и $I_1 = I_m \sin(\varphi - 2\Delta\alpha)$.

В момент времени t_2 , когда первый дополнительный сигнал напряжения переходит через ноль из отрицательной полуволны в положительную, мгновенные значения напряжения и тока принимают следующий вид: $U_2 = U_{m1} \sin(-\Delta\alpha)$ и $I_2 = I_m \sin(\varphi - \Delta\alpha)$.

Используя мгновенные значения сигналов при угле сдвига ФСБ $\Delta\alpha \leq \frac{\pi}{2}$, получим выражения для определения основных ИХГС:

– СКЗ напряжения и тока

$$U_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2}U_2^2}{\sqrt{4U_2^2 - U_1^2}}; I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[I_2^2 + \frac{(2I_1U_2 - I_2U_1)^2}{4U_2^2 - U_1^2} \right]};$$

– АМ и РМ

$$P = \frac{U_2 \left[(I_2 U_1 - I_1 U_2) U_1 - 2 U_2^2 I_2 \right]}{4 U_2^2 - U_1^2}, \quad Q = \frac{(I_2 U_1 - I_1 U_2) U_2}{\sqrt{4 U_2^2 - U_1^2}}.$$

В данном методе время измерения также зависит от соотношения между моментом начала измерения и переходом второго дополнительного сигнала напряжения через ноль и угла сдвига $\Delta\alpha$.

СИ, реализующее метод, представлено на рис. 9.

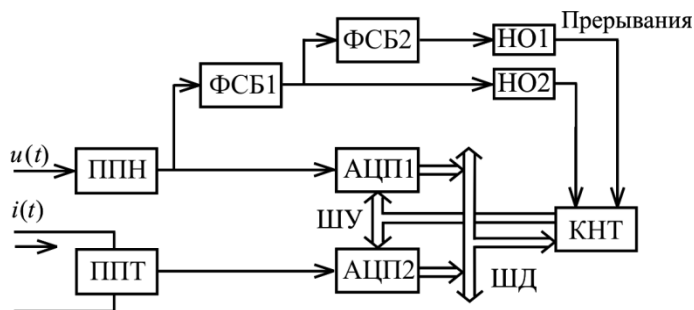


Рис. 9. Схема СИ, реализующего четвертый метод

При реализации метода может возникнуть дополнительная погрешность в случае, если углы сдвига фазы ФСБ1 и ФСБ2 будут отличаться друг от друга.

Рассмотренные в статье методы инвариантны к погрешности формирования дополнительного напряжения, и реализация каждого из них имеет свои достоинства и недостатки. Общим недостатком методов является достаточно большое время измерения, обусловленное необходимостью использования характерных точек сигналов (перехода сигнала через ноль).

Анализ показывает, что предпочтение следует отдать первому методу с коррекцией мгновенных значений сигналов, поскольку его реализация исключает как частотную погрешность, так и погрешность по модулю ФСБ.

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., Сеницын А.Е. Методы измерения интегральных характеристик на основе формирования дополнительных сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 2 (38). – С. 56-63.
3. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Сеницын А.Е. Анализ влияния погрешностей формирования дополнительных сигналов на погрешность измерения интегральных характеристик гармонических сигналов // Информационные технологии в науке и производстве: Матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – С. 86-90.
4. Мелентьев В.С., Муратова В.В., Иванов Ю.М. Метод повышения точности измерения характеристик периодических процессов // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2013. – Т. 15. – № 4(2): Темат. выпуск. – С. 376-380.
5. Мелентьев В.С., Иванов, Ю.М., Сеницын А.Е. Синтез методов измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2012. – № 3 (35). – С. 84-89.
6. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Использование характерных точек для повышения точности измерения параметров гармонических сигналов // Перспективное развитие науки, техники и технологий: Матер. III Междунар. науч.-практ. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2013. – Т. 2. – С. 331-334.
7. 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. статей междунар. науч.-техн.

- конф. – Пенза: ПГТА, 2013. – Вып. 17. – С. 79-82.
8. *Melentiev V.S., Batishchev V.I., Kamyshnikova A.N., Rudakov D.V.* An improvement in the methods used for the measurement of the integrated characteristics of harmonic signals // *Measurement Techniques*. – 2011. – V. 54, No. 4. – pp. 407-411.
 9. *Мелентьев В.С., Муратова В.В.* Повышение точности измерения параметров гармонических сигналов на основе формирования дополнительного напряжения // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. – 2013. – № 3(39). – С. 79-85.
 10. *Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В.* Метод измерения параметров гармонических сигналов на основе использования характерных точек дополнительных сигналов напряжения // *Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2013. – 4(6). – С. 16-22.

Статья поступила в редакцию 5 марта 2014 г.

THE METHODS AND TOOLS FOR MEASURING THE INTEGRAL CHARACTERISTICS THAT ARE INVARIANT TO ERRORS IN THE FORMATION OF ADDITIONAL HARMONIC SIGNALS

V.S. Melent'ev, JU.M. Ivanov, V.V. Muratova

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

The analysis of methods and means of measurement, based on the definition of the integral characteristics of instant values of input and additional harmonic signals is considered. The ways of exclusion errors of phase-shifting blocks used to generate additional signals with correction and without subsequent correction of the instant values of signals are provided. Discusses methods for measuring the integral characteristics of harmonic signals that are invariant to errors in the formation of additional signals. Analyzes methods in which additional signals are applied as orthogonal components of the input signal, as well as methods using the generation of additional signals which are shifted relative to the input at an arbitrary angle. The block diagrams of measurement tools that implement the methods are provided.

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

*Vladimir S. Melent'ev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Yurie M. Ivanov (Ph. D. (Techn.)), Senior Researcher.
Vera V. Muratova, Postgraduate Student.*

УДК 621.317

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ СРАВНЕНИЯ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВХОДНОГО И ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ*

А.Е. Синицын¹, А.О. Лычев², Е.Е. Ярославкина²

¹ ООО «Метрология и Автоматизация»
Россия, 443013, г. Самара, ул. Киевская, 5А

² Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mails: antonsinitsyn@yandex.ru, alexlychev@yandex.ru, makarovak@inbox.ru

Проводится краткий анализ методов измерения частоты по мгновенным значениям гармонических сигналов, обеспечивающих сокращение времени измерения. Рассматривается новый метод измерения частоты гармонических сигналов, основанный на формировании дополнительных сигналов напряжения и сравнении мгновенных значений входного и одного из дополнительных сигналов. При этом для определения частоты используется временное разделение мгновенных значений дополнительного сигнала на образцовый интервал времени. Предлагается структурная схема средства измерения, реализующего метод. Приводятся результаты анализа погрешности метода, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели. Полученные результаты позволяют выявить образцовые интервалы времени, которые обеспечат снижение погрешности.

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

Измерение и контроль электрических параметров гидро- и турбогенераторов, силовых подстанций, высоковольтных линий электропередачи общего назначения, определение параметров ряда электромеханических систем предусматривают измерение частоты сигналов. Особенностью перечисленных выше объектов является то, что сигналы в их измерительных цепях имеют форму, близкую к гармонической модели.

Кроме того, частота 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.

В настоящее время успешно развивается направление, связанное с определением параметров гармонических сигналов (ГС), включая и частоту, по отдель-

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

Антон Евгеньевич Синицын, руководитель проектов ООО «Метрология и Автоматизация».

Александр Олегович Лычев, аспирант.

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

ным мгновенным значениям сигналов, не связанным с их периодом, что позволяет значительно сократить время измерения [1].

Дальнейшее сокращение времени измерения параметров обеспечивают методы, основанные на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных по фазе, и использовании мгновенных значений как основных, так и дополнительных сигналов [2].

В [3] предложены методы измерения частоты ГС, использующие в качестве дополнительного сигнала ортогональную составляющую входного сигнала и сравнение основного и дополнительного сигналов.

Однако при реализации данных методов возникает частотная погрешность фазосдвигающего блока (ФСБ), производящего сдвиг входного сигнала на угол 90° . При изменении частоты угол сдвига фазы ФСБ может отличаться от 90° .

Исключение частотной погрешности обеспечивает метод [4], согласно которому в произвольный момент времени одновременно измеряют три мгновенных значения напряжения, причем вторые мгновенные значения напряжения сдвинуты относительно первых на произвольный угол $\Delta\alpha$, а третьи мгновенные значения сдвинуты относительно вторых на угол $\Delta\alpha$; через образцовый интервал времени Δt одновременно измеряют три мгновенных значения напряжения, также сдвинутые друг относительно друга на угол $\Delta\alpha$, и определяют частоту сигнала.

Недостатком данного алгоритма частоты является сложность вычисления частоты и то, что знаменатель выражения для определения частоты при определенных мгновенных значениях может принимать нулевое значение. Это предполагает контроль мгновенных значений на ноль и измерение при необходимости дополнительных мгновенных значений сигналов через интервал времени Δt , что увеличивает время измерения. Кроме того, реализация метода требует достаточно больших аппаратных затрат.

Данные недостатки устраняются в разработанном авторами новом методе измерения частоты ГС.

Метод заключается в формировании двух дополнительных сигналов напряжения, сдвинутых по фазе на углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$ относительно входного, и сравнении входного и второго дополнительного сигналов. Причем в момент их равенства измеряют мгновенное значение первого дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного сигнала на угол $\Delta\alpha$. Через образцовый интервал времени Δt снова измеряют мгновенное значение первого дополнительного напряжения. Частоту определяют по измеренным мгновенным значениям сигналов.

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

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 времени t_1 , когда $U_{11} = U_{31}$, мгновенное значение входного напряжения равно $U_{11} = U_m \sin \alpha_1$ (где α_1 – начальная фаза сигнала $u_1(t)$ в момент времени t_1), а мгновенные значения первого и второго дополнительных сигналов соответственно примут вид: $U_{21} = U_m \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha)$ и $U_{31} = U_m \sin(\alpha_1 + 2\Delta\alpha)$.

Равенство мгновенных значений сигналов $U_{11} = U_{31}$ выполняется в том случае, если $\alpha_1 + 2\Delta\alpha = \alpha_1$ ($\Delta\alpha \neq 0$), то есть когда $2\Delta\alpha = \pi + 2\pi l - 2\alpha_1$ или

$\alpha_1 = \frac{\pi}{2}(2l+1) - \Delta\alpha$, где $l=0, 1$. Отсюда

$$U_{21} = U_m \sin\left[\frac{\pi}{2}(2l+1)\right] = \pm U_m. \quad (1)$$

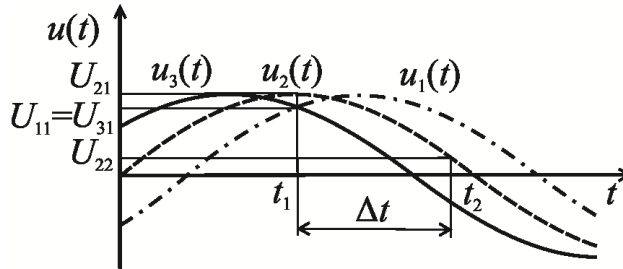


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Через образцовый интервал времени Δt (момент времени t_2) мгновенное значение первого дополнительного сигнала будет равно

$$U_{22} = U_m \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha + \omega\Delta t) = U_m \sin\left[\frac{\pi}{2}(2l+1) + \omega\Delta t\right] = \pm U_m \cos\omega\Delta t. \quad (2)$$

Используя (1) и (2), можно определить частоту ГС:

$$f = \frac{1}{2\pi\Delta t} \arccos\left|\frac{U_{22}}{U_{21}}\right|. \quad (3)$$

Анализ (1) – (3) показывает, что частота сигнала не зависит от величины угла сдвига фазы $\Delta\alpha$.

Выражение (3) справедливо только для гармонических сигналов напряжения.

Для оценки погрешности метода из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели используем методику, предложенную в [5].

В соответствии с выражением (3) предельная абсолютная погрешность определения частоты сигнала примет вид

$$\Delta f = \left[\left| \frac{\partial f}{\partial U_{21}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_{22}} \right| \right] \Delta U_{\max}, \quad (4)$$

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 (3) и (4) относительная погрешность определения частоты сигнала будет равна

$$\delta_f = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_k (1 + |\cos \omega \Delta t|)}{\omega \Delta t |\sin \omega \Delta t|}. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что погрешность определения частоты зависит только от гармонического состава сигнала и величины образцового интервала времени Δt .

На рис. 2 приведен график зависимости погрешности определения частоты от $\omega \Delta t$ при наличии в сигнале первой и пятой гармоники с коэффициентом $h_5 = 0,2 \%$.

Анализ рис. 2 показывает, что погрешность определения частоты существенно зависит от длительности образцового интервала времени Δt по отношению к периоду входного сигнала. При этом минимальное значение погрешности имеет место при $\omega \Delta t = 90^\circ$, однако это приводит к увеличению времени измерения.

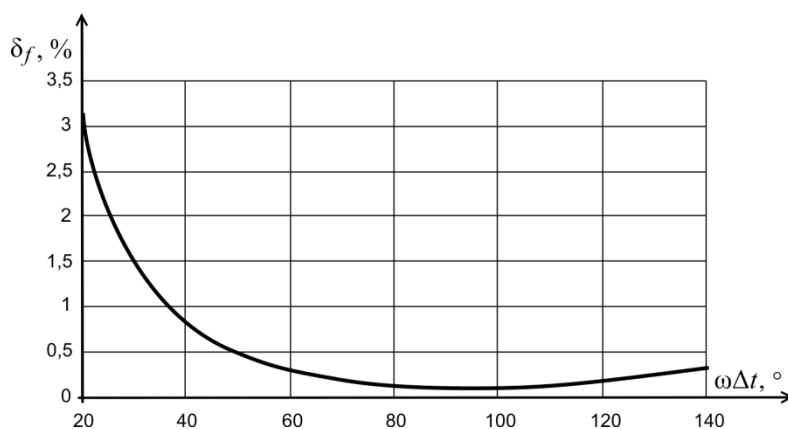


Рис. 2. График зависимости погрешности измерения частоты от $\omega \Delta t$

Полученные в работе результаты позволяют выбирать соответствующие аппаратные средства и параметры измерительного процесса в зависимости от предъявляемых 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., Миронов А.А. Исследование метода измерения частоты гармонических сигналов // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 198-201.
3. Мелентьев В.С., Симицын 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. Батищев В.И., Мелентьев В.С. Аппроксимационные методы и системы промышленных измерений, контроля, испытаний, диагностики. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 393 с.
5. Мелентьев В.С., Миронов А.А., Муратова В.В. Анализ погрешности метода измерения частоты из-за отклонения сигнала от гармонической модели // Математическое моделирование и краевые задачи: Тр. IX Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Ч. 2. – Самара: СамГТУ, 2013. – С. 111-114.

Статья поступила в редакцию 5 марта 2014 г.

THE METHOD FOR MEASURING A FREQUENCY BASED ON THE COMPARISON OF THE INSTANT VALUES OF INPUT AND ADDITIONAL HARMONIC SIGNALS

A.E. Sinitsyn¹, A.O. Lychev², E.E. Yaroslavkina²

¹ LLC «Metrology and Automation»
5A, Kievskaya st., Samara, 443013, Russian Federation

² Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

A brief analysis of methods for measuring the frequency on instant values of harmonic signals that reduce the measurement time is considered. A new method of measuring the frequency of the harmonic signals based on the formation of additional voltage signals and comparing the instantaneous values of the input and one of the additional signals is described. In order to determine the frequency is used the temporal separation of the instant values of an additional signal on the exemplary time interval. The block diagram of measurement tool that implement the methods is provided. The results of the analysis of the method's error due to the deviation of the actual signal from the harmonic model are considered. The obtained results allow to identify exemplary intervals that will ensure reduction of error.

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

*Anton E. Sinitsyn, Project Manager.
Alexander O. Lychev, Postgraduate Student.
Ekaterina E. Jaroslavkina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*