

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 681.518

ПОГРЕШНОСТИ АЛГОРИТМА ВЫЧИСЛЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ В СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ В ТУРБИНЕ

С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев

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

Рассматривается семейство функций преобразования в виде зависимостей цифровых кодов от координат смещений в радиальном и осевом направлениях, заданных аналитически (в виде формул), и подобное ему семейство градуировочных характеристик, полученных экспериментально. Функции преобразования используются для построения градуировочных таблиц с выбранным шагом как в радиальном, так и в осевом направлении, которые, в свою очередь, используются для количественных оценок искомых погрешностей алгоритма вычисления. Приведены результаты таких оценок в зависимости от величины шага в обоих направлениях. Приведены также результаты исследований распределения погрешностей внутри ячейки градуировочной таблицы с размерами сторон, равными выбранным значениям шага.

Ключевые слова: лопатки сложной формы, одновитковый вихретоковый датчик, функция преобразования, градуировочная таблица, погрешности.

Введение

Известно, что радиальные зазоры (РЗ) между торцами лопаток рабочего колеса компрессора и турбины авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и внутренней поверхностью статорных оболочек являются важнейшими параметрами, от величины которых зависят экономичность и надежность силовых установок [1–3]. Необходимо отметить, что в стендовых испытаниях ГТД была подтверждена работоспособность одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника, размещенными непосредственно в газозоудушном тракте двигателя [4]. Включенные в состав системы измерения с ПЭВМ для обработки данных ОВТД обеспечивали получение текущей информации о РЗ в предположении об отсутствии многомерных (многокоординатных) смещений

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-08-00802).

Сергей Юрьевич Боровик (д.т.н.), ведущий научный сотрудник.

Марина Михайловна Кутейникова, научный сотрудник.

Юрий Николаевич Секисов (д.т.н.), заведующий лабораторией.

Юрий Николаевич Секисов (д.т.н.), заведующий лабораторией.

Олег Петрович Скобелев (д.т.н.), профессор, главный научный сотрудник.

торцов лопаток (в системе отсчета OXYZ, где точка O (начало отсчета) размещена на внутренней поверхности статора, смещениям в направлении оси Y соответствуют PЗ, оси X – осевые смещения рабочего колеса, оси Z – изгибы лопаток в направлении вращения).

Особенность ОВТД состоит в том, что при наличии многомерных смещений индуктивность ЧЭ реагирует не только на изменения искомым PЗ (координата y), но и на изменения координат x и z, которые при этом можно рассматривать как мешающие факторы (МФ). Чтобы избежать влияния таких МФ, в [5] предложены методы измерения всех без исключения составляющих многомерных смещений торцов лопаток, предусматривающие применение кластера (группы) ОВТД, число которых равно числу составляющих. В частности, при измерении PЗ (y) и наличии осевых смещений рабочего колеса (x) достаточно двух ОВТД в составе кластера. В измерительных цепях (ИЦ) систем измерения, реализующих кластерный метод, радиальные и осевые смещения (координаты y и x соответственно) преобразуются в изменения индуктивностей ОВТД₁ и ОВТД₂ и далее в соответствующие цифровые коды C₁ и C₂, причем в составе программного обеспечения (ПО) предусмотрена процедура вычисления искомым координат путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} C_1 = C_1(x, y); \\ C_2 = C_2(x, y), \end{cases} \quad (1)$$

где C₁(x, y) и C₂(x, y) – градуировочные характеристики (ГХ), полученные экспериментально.

Если функции C₁(x, y) и C₂(x, y) монотонны, то система (1) решается с помощью алгоритма на основе метода Ньютона [6, 7]. Однако применение кластера ОВТД для измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы с повышенной кривизной поверхности пера, а также в расширенном диапазоне изменений осевых смещений рабочего колеса в турбине сопровождается немонотонным характером изменений кодов ГХ по координате x [8]. При этом алгоритм на основе метода Ньютона неприменим, но можно воспользоваться алгоритмом, предложенным в работах [9, 10].

В графической интерпретации предложенного алгоритма, где коды C₁ и C₂ могут быть представлены плоскостями, параллельными плоскости OXY системы отсчета COXY, а семейство ГХ (C₁(x, y) и C₂(x, y) – двумя поверхностями в той же самой системе отсчета, пересечение плоскостей C₁ и C₂ с поверхностями C₁(x, y) и C₂(x, y) происходит по кривым линиям, и их проекции на плоскость OXY также являются кривыми. При этом координаты x и y точки пересечения проекций кривых согласно рассматриваемому алгоритму являются решением системы уравнений (1). Последующие операции предусматривают поиск ячейки градуировочной таблицы (ГТ) и сетки прямоугольной формы, где находится точка пересечения (стороны ячейки равны шагу по каждой из координатных осей (x_ш, y_ш) ГТ). Далее в пределах найденной ячейки определяются координаты точки пересечения, причем внутри ячейки отрезки кривых заменяются отрезками прямых.

Представляется очевидным, что координаты точки пересечения отрезков кривых (x_к, y_к) будут отличаться от координат точки пересечения прямых (x_п, y_п), а их разности можно считать погрешностями такого алгоритма.

В работах [9, 10], а также в других известных публикациях отсутствуют какие-либо сведения о погрешностях вычисления координат x, y торцов лопаток. Поэтому целью настоящей статьи являются исследования и количественные оценки этих погрешностей.

Графическое представление погрешностей вычисления координат x , y и выбор семейства функций преобразования (ФП), заданных аналитически

Как отмечалось во введении, искомые погрешности определяются разностью координат точек пересечения отрезков кривых (x_k, y_k) и прямых (x_n, y_n):

$$\Delta x = x_k - x_n; \quad \Delta y = y_k - y_n. \quad (2)$$

Из рис. 1 следует, что в пределах одной ячейки наибольшие значения Δx и Δy наблюдаются в окрестностях центра ячейки. Кроме того, вполне ожидаемым является их рост в каждой ячейке ГТ с увеличением шага ($x_{ш}$, $y_{ш}$), и наоборот – снижение с уменьшением шага. Количественные оценки таких погрешностей определяют содержание первой серии (1) вычислительных экспериментов. Содержание второй серии (2) определяют исследования распределения погрешностей внутри ячеек, в т. ч. поблизости границ, где они стремятся к нулевым значениям. Результаты планируемых вычислительных экспериментов должны подтвердить сделанные предположения. Однако на предварительном этапе, предшествующем проведению исследований в рамках серий 1 и 2, производится выбор семейства ФП в виде зависимостей кодов от координат x , y , заданных аналитически, т. е. формулами, которые используются для получения ГТ с различными значениями $x_{ш}$, $y_{ш}$. Важным условием выбора такого семейства ($C_{1ан}(x, y)$ и $C_{2ан}(x, y)$) является подобие семейству ГХ ($C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$), полученному экспериментально с использованием турбинной лопатки. В свою очередь, прототип выбран из множества семейств ГХ по нескольким критериям.

Во-первых, каждая из функций семейства ГХ – как $C_1(x)$, так и $C_2(x)$ – при $y = \text{const}$ должна быть немонотонна при наличии наиболее выраженных экстремальных значений. При этом в изменениях кодов по координате x должен наблюдаться рост C_1 до максимума с последующим спадом, и наоборот – спад C_2 с последующим ростом.

Во-вторых, диапазоны изменений координат x , y должны быть одинаковыми, а хотя бы приближенное равенство желательно в чувствительности кодов к изменениям координат, и в первую очередь к изменениям координаты y (РЗ)¹.

И, наконец, в-третьих, координаты экстремальных значений кодов C_1 и C_2 по оси X должны соответствовать расстоянию между центрами ЧЭ₁ и ЧЭ₂ ОВТД в составе кластера (около 2 мм). Семейство ГХ прототипа представлено на рис. 2, а подобное ему базовое семейство ФП, предназначенное для получения ГТ, имеет вид

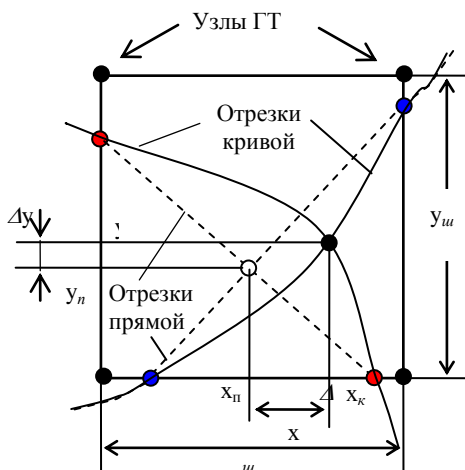


Рис. 1. Графическое представление погрешностей вычисления координат x , y в ячейке ГТ

¹ Среди имеющихся в наличии прототипов далеко не все соответствуют перечисленным критериям, что связано с некоторыми отличиями формы и размеров турбинных лопаток, использованных в процессе получения семейств ГХ, рассматриваемых как возможные прототипы.

$$\begin{cases} C_{1ан}(x, y) = A_{0,0} - A_{0,1} \cdot x + A_{0,2} \cdot x^2 + A_{1,0} \cdot y - A_{1,1} \cdot x \cdot y + A_{1,2} \cdot x^2 \cdot y + \\ + A_{2,0} \cdot y^2 - A_{2,1} \cdot x \cdot y^2 + A_{2,2} \cdot x^2 \cdot y^2; \\ C_{2ан}(x, y) = B_{0,0} - B_{0,1} \cdot x + B_{0,2} \cdot x^2 + B_{1,0} \cdot y - B_{1,1} \cdot x \cdot y + B_{1,2} \cdot x^2 \cdot y + \\ + B_{2,0} \cdot y^2 - B_{2,1} \cdot x \cdot y^2 + B_{2,2} \cdot x^2 \cdot y^2, \end{cases} \quad (3)$$

где А и В – коэффициенты.

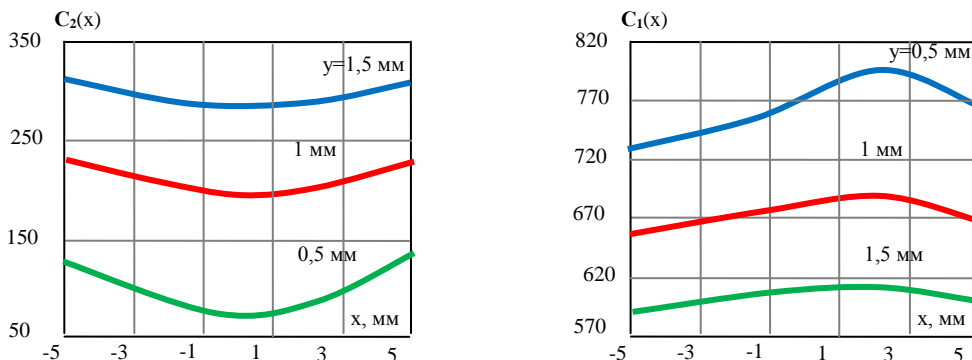


Рис. 2. Семейство GX, полученное экспериментально (прототип)

Семейства $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$, приведенные на рис. 3, получены для значений $A_{0,0} = 1087,9$; $A_{0,1} = 15,08$; $A_{0,2} = -2,648$; $A_{1,0} = -395,6$; $A_{1,1} = 11,76$; $A_{1,2} = 2,1716$; $A_{2,0} = 92,358$; $A_{2,1} = 2,648$; $A_{2,2} = -0,513$ и $B_{0,0} = -89,06$; $B_{0,1} = 4,5331$; $B_{0,2} = 1,6848$; $B_{1,0} = 417,54$; $B_{1,1} = -6,666$; $B_{1,2} = -0,942$; $B_{2,0} = -97,92$; $B_{2,1} = 1,7533$; $B_{2,2} = 0,1853$.

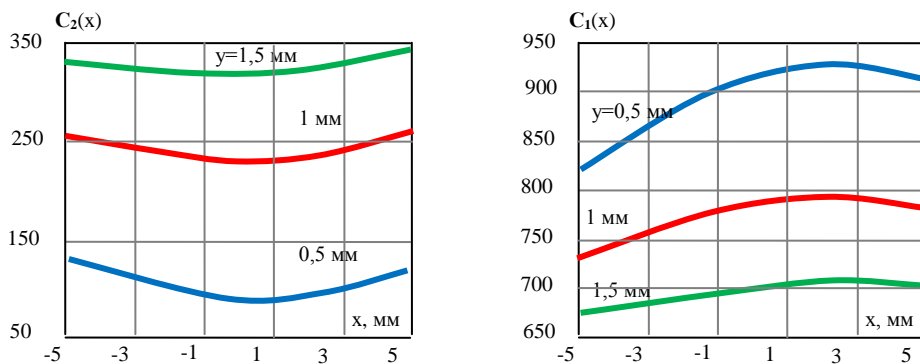


Рис. 3. Семейства ФП, полученные аналитически для определения погрешности алгоритма вычисления

Результаты исследований погрешностей

Вычислительные эксперименты серии 1 начинаются с построения ГТ с заданными $x_{ш}$, $u_{ш}$. Для этого используется семейство ФП, представленное выражениями (3). Выбирается одна из «ячеек» ГТ, и для ее центра с координатами $x_{ц}$, $y_{ц}$ (промежуточными значениями между «узлами» ГТ) с помощью выражения (3) находятся коды $C_{1ц}$ и $C_{2ц}$. Полученные ГТ и коды $C_{1ц}$ и $C_{2ц}$ как исходные данные вводятся

в программу, реализующую алгоритм [9, 10], в которой выходными данными являются расчетные значения координат $x_{цр}$ и $y_{цр}$. Можно утверждать, что заданным и расчетным значениям координат ($x_{ц}$, $y_{ц}$ и $x_{цр}$, $y_{цр}$) в выражении (2) соответствуют координаты точки пересечения отрезков кривых и прямых (x_k , y_k и $x_{п}$, $y_{п}$). С учетом этого искомую погрешность можно записать в виде

$$\begin{aligned}\Delta x &= x_k - x_{п} = x_{ц} - x_{цр}, \\ \Delta y &= y_k - y_{п} = y_{ц} - y_{цр}.\end{aligned}\quad (4)$$

Выражение (4) используется для вычисления погрешности в выбранной ячейке, а затем процедура повторяется для остальных ячеек в данной ГТ и других ГТ с иными значениями $x_{ш}$, $y_{ш}$.

Они представляются в виде приведенных погрешностей и определяются по формулам

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot 100\%; \quad \delta_y = \frac{\Delta y}{y_{\max} - y_{\min}} \cdot 100\%,$$

где $x_{\max} - x_{\min}$, $y_{\max} - y_{\min}$ – диапазоны изменений координат x и y .

В процессе последующих вычислительных экспериментов исследовались погрешности δ_x в зависимости от координаты x ($\delta_x(x)$) при постоянных значениях координаты y ($y = \text{const}$) для выбранных значений $x_{ш} = 0,2$ мм при $y_{ш} = \text{var}$ (0,1; 0,2; 0,3; 0,5 мм), а также последовательно для $x_{ш}$, равных 0,3; 0,5 и 1 мм при изменениях $y_{ш}$ в указанном выше диапазоне.

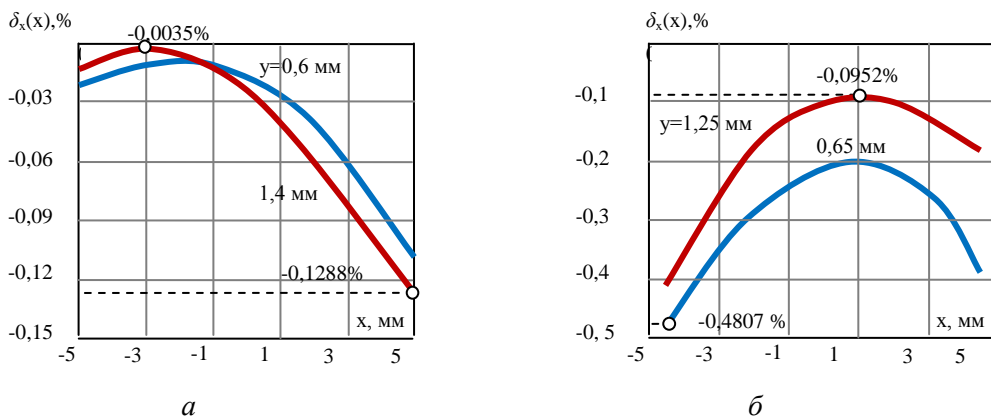


Рис. 4. Семейства $\delta_x(x)$ при $y = \text{const}$ и $x_{ш} = y_{ш} = 0,2$ мм (а), а также $x_{ш} = 1$ мм, $y_{ш} = 0,3$ мм (б)

Из всего множества проведенных вычислительных экспериментов на рис. 4 представлены всего лишь два семейства $\delta_x(x)$. Первое из них (а) – для y , равного 0,6 и 1,4 мм при $x_{ш} = y_{ш} = 0,2$ мм; второе (б) – для y , равного 0,65 и 1,25 мм при $x_{ш} = 1$ мм, $y_{ш} = 0,3$ мм. Общим для обоих семейств $\delta_x(x)$ (как, впрочем, и для всех остальных, оставшихся «за кадром») является одинаковый характер изменения δ_x по координате x , проявляющийся в наличии перегиба и экстремального значения на каждой из функций (наличие экстремальных значений кодов характерно и для семейств ФП и ГХ, представленных на рис. 2 и 3). При этом большая часть из множества исследованных погрешностей δ_x имеет отрицательный знак, в т. ч.

и те, что представлены на рис. 4.

Следует отметить, что отличительная особенность семейств $\delta_x(x)$, представленных на рис. 4, – это одинаковые значения погрешности δ_x для двух значений функции $\delta_x(x)$ при y , равном 0,6 и 1,4 мм (точка пересечения обеих функций).

Следует также отметить, что на рис. 4 обозначены границы изменения погрешностей для каждого из представленных семейств $\delta_x(x)$. Эти значения погрешностей размещены в табл. 1 наряду с теми значениями, которые были получены в вычислительных экспериментах при всех ранее перечисленных значениях $x_{ш}$, $y_{ш}$.

Таблица 1

Граничные значения погрешностей δ_x , %

$y_{ш}$, мм	$x_{ш}$, мм			
	0,2	0,3	0,5	1
0,1	-0,0392	-0,0529	-0,1282	-0,4533
	-0,0051	-0,008	-0,0043	0,05858
0,2	-0,1288	-0,1206	-0,1607	-0,4853
	-0,0035	-0,0128	-0,0289	-0,022
0,3	-0,2538	-0,2428	-0,2611	-0,4807
	-0,0011	-0,0139	-0,0434	-0,0952
0,5	-0,7165	-0,6894	-0,6836	-0,6602
	0,01795	0,00269	-0,0412	-0,1642

Как и ожидалось, с увеличением шага $x_{ш}$ и $y_{ш}$ до 1 мм и 0,5 мм соответственно погрешности δ_x по модулю (без учета знака) остаются менее 1,0 % (рассматриваемые значения δ_x расположены по диагонали таблицы и тонированы).

Далее в рамках первой серии исследовались погрешности δ_y в зависимости от координаты y ($\delta_y(y)$) при постоянных значениях координаты x ($x=\text{const}$) для тех же значений шага $x_{ш}$, $y_{ш}$ и в той же последовательности, в которой определялись погрешности δ_x .

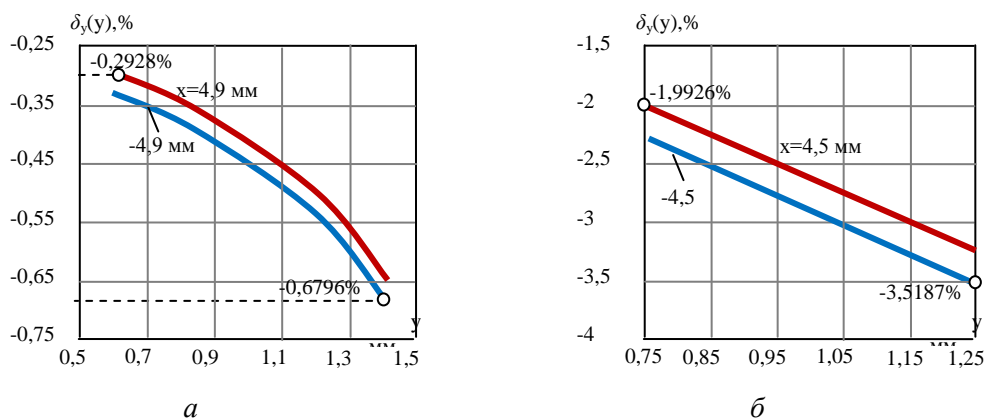


Рис. 5. Семейства $\delta_y(y)$ при $x = \text{const}$ и $x_{ш} = y_{ш} = 0,2$ мм (а), а также $x_{ш} = 1$ мм, $y_{ш} = 0,5$ мм (б)

На рис. 5 представлены семейства $\delta_y(y)$ при x , равном -4,9 и +4,9 мм, $x_{ш} = y_{ш} = 0,2$ мм (а), а также при x , равном -4,5 и +4,5 мм, $x_{ш} = 1$ мм, $y_{ш} = 0,5$ мм (б).

На обоих графиках погрешность δ_y отрицательна и возрастает по модулю

с увеличением y , причем такой характер изменений сохраняется во всех остальных вычислительных экспериментах, проводимых в оставшихся сочетаниях $x_{ш}$, $y_{ш}$ (за исключением значений $x_{ш} = 1,0$ мм, $y_{ш} = 0,1$ мм знак погрешности δ_y остается отрицательным).

Следует отметить также монотонный характер изменений погрешности $\delta_y(y)$, что соответствует характеру изменений кодов от y на графиках семейства ГХ прото-типа и ФП на рис. 2 и 3.

Количественные оценки погрешностей δ_y (по результатам вычислительных экспериментов, проведенных в полном объеме) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Граничные значения погрешностей δ_y , %

$y_{ш}$, мм	$x_{ш}$, мм			
	0,2	0,3	0,5	1
0,1	-0,1825	-0,1824	-0,1803	-0,1533
	-0,0636	-0,0545	-0,021	0,11724
0,2	-0,6796	-0,6797	-0,6785	-0,6567
	-0,2928	-0,2865	-0,2552	-0,1277
0,3	-1,2707	-1,2715	-1,273	-1,2655
	-0,6955	-0,693	-0,6637	-0,5477
0,5	-3,5319	-3,5276	-3,5273	-3,5187
	-2,101	-2,1091	-2,0813	-1,9926

Как видно из таблицы, погрешность δ_y при выбранном значении $y_{ш}$ незначительно зависит от $x_{ш}$. Напротив, при выбранном $x_{ш}$ погрешность δ_y существенно возрастает (примерно до 3,5 % по модулю). При этом указанный рост δ_y наблюдается при всех выбранных значениях $x_{ш}$ (0,2; 0,3; 0,5; 1,0 мм).

Полученные результаты вычислительных экспериментов серии 1 могут иметь важную практическую значимость при выборе шага в процессе экспериментального получения семейства ГХ и соответствующих ГТ при заданных погрешностях вычисления искомых координат. Пусть (к примеру) δ_y и δ_x не могут быть больше 1 %. Тогда по данным табл. 2 $y_{ш}$ не может превышать 0,2 мм (при любом значении $x_{ш}$ – от 0,2 мм до 1 мм включительно). При этом согласно табл. 1 δ_x также не превышает 1 % при тех же значениях $x_{ш}$, $y_{ш}$.

Методика проведения вычислительных экспериментов серии 2 в целом аналогична серии 1, но отличается тем, что исследуется распределение погрешностей δ_x^* и δ_y^* только в границах одной ячейки, т. е. в пределах $x_{ш}$, $y_{ш}$ ГТ.

При этом исследуются $\delta_x^*(x)$ при постоянстве координаты y , соответствующей центру выбранной ячейки ($y_{ц}$) и с заданным шагом $x_{ш}^*$, равным, например, десятой части $x_{ш}$ ГТ ($x_{ш}^* = 0,1 \cdot x_{ш}$). Кроме того, исследуется $\delta_y^*(y)$ при постоянстве координаты x , соответствующей центру выбранной ячейки ($x_{ц}$) и с заданным шагом $y_{ш}^*$, выбранным, например, равным $0,1 \cdot y_{ш}$ ГТ. На рис. 6 представлены погрешности $\delta_x^*(x)$ (а) и $\delta_y^*(y)$ (б), полученные в результате вычислительных экспериментов в ячейке ГТ с координатами ее центра $x_{ц} = -3,5$ мм, $y_{ц} = 0,75$ мм и шагами $x_{ш} = 1$ мм, $y_{ш} = 0,5$ мм.

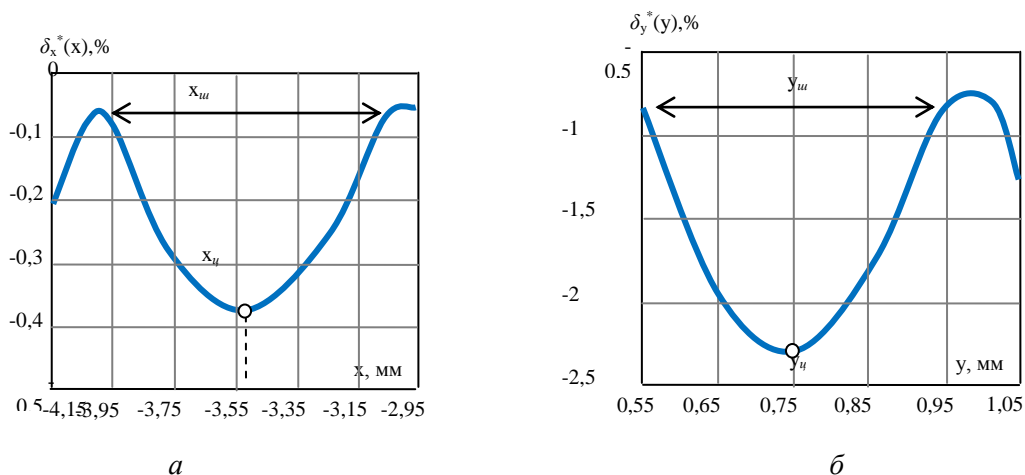


Рис. 6. Распределение погрешности $\delta_x^*(x)$ и $\delta_y^*(y)$ в границах выбранной ячейки ГТ

Как и ожидалось, погрешности δ_x^* и δ_y^* достигают максимума в центре ячейки и стремятся к нулю на ее границах.

Заключение

Дано графическое представление погрешностей алгоритма вычисления координат x , y смещений торцов лопаток сложной формы, применяемых в турбинах. Для исследований таких погрешностей и их количественной оценки осуществлен выбор семейства ФП в виде зависимостей кодов от координат x , y , заданных аналитически, которые используются для получения ГТ с варьируемыми значениями шага ($x_{ш}$ и $y_{ш}$). При этом важным условием выбора являлось подобие семейству ГХ, полученных экспериментально, которое, в свою очередь, выбрано из множества семейств ГХ по нескольким критериям подобия.

Показано, что при изменении $x_{ш}$ в пределах от 0,2 до 1 мм и $y_{ш}$ от 0,1 до 0,5 мм погрешность вычисления по координате x возрастает, но остается менее 1 %. В тех же диапазонах изменений $x_{ш}$ и $y_{ш}$ погрешность вычисления y -координаты при выбранном $y_{ш}$ незначительно зависит от $x_{ш}$ и, напротив, при выбранном $x_{ш}$ существенно возрастает примерно до 3,5 %, причем указанный рост наблюдается при всех выбранных значениях $x_{ш}$.

Проведены дополнительные исследования распределения погрешностей вычисления координат x , y внутри «ячеек» ГТ. При выбранном шаге, составляющем малые доли $x_{ш}$ и $y_{ш}$, показано, что погрешности возрастают до максимального значения в центре «ячейки» и уменьшаются до нуля на ее границе.

Полученные количественные оценки погрешностей вычисления координат x , y имеют важную практическую значимость при экспериментальном получении семейства ГХ, когда указанная погрешность не должна превышать допустимых значений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов Н.Д., Данильченко В.П., Резник В.Е. Управление радиальными зазорами в турбокомпрессорах авиационных ГТД. – Самара: Самар. авиац. и-т, 1991. – 109 с.
2. Прокопец А., Ревзин Б., Рожков А. Необходимость диагностирования радиальных зазоров в проточной части газотурбинных двигателей // Газотурбинные технологии. – 2004. – № 4. – С. 5–7.
3. Lattime S., Steinetz B. Turbine Engine Clearance Control Systems: Current Practices and Future Directions // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Indianapolis, Indiana, July 7-10. – 2002.
4. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых уста-

- новок / Под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. – 188 с.
5. 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.
 6. Волков Е.А. Численные методы: Учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2008. – 248 с.
 7. Тулупова В.В., Филлимонов Р.В. Алгоритмические и программные средства аппроксимации градуировочных характеристик систем измерения полиномиальными функциями нескольких переменных // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. III Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2001. – С. 573–577.
 8. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы с повышенной чувствительностью и в расширенном диапазоне // Автометрия. – 2015. – № 3. – С. 104–112.
 9. Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XII Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2010. – С. 323–327.
 10. Кутейникова М.М. Вычисление координат смещения торцов лопаток в системе измерения радиальных зазоров // Управление большими системами: Материалы X Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Т. 3. – Уфа: УГАТУ, 2013. – С. 157–161.

Статья поступила в редакцию 24 мая 2016 г.

COMPLEX SHAPED BLADES TIPS' RADIAL AND AXIAL DISPLACEMENTS CALCULATION ERRORS IN THE SYSTEMS FOR MEASURING OF RADIAL CLEARANCES IN TURBINE

S.Yu. Borovik, M.M. Kuteynikova, Yu.N. Sekisov, O.P. Skobelev

Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences
61, Sadovaya str., Samara, 443020, Russian Federation

Analytically given conversion function set as a digital code dependence on coordinate displacements in radial and axial direction is considered. Experimentally obtained set of calibration characteristics similar to conversion function set is considered, too. Conversion functions are used for construction of calibration charts with given subintervals in radial and axial directions. These calibration charts are used for quantitative estimation of the errors of calculation algorithms. The estimate results in dependence of subintervals in both directions are given. The results of errors' distribution investigation inside of the calibration chart's cell with side dimension equals to given subintervals are considered, too.

Keywords: *complex shaped blades, single-coil eddy-current sensor, conversion function, calibration grid, errors.*

This work was supported by grant #14-08-00802 from the Russian Foundation for Basic Research.

Sergey Y. Borovik (Dr. Sci. (Techn.)), Leading Researcher.

Marina M. Kuteynikova, Research fellow.

Yuriy N. Sekisov (Dr. Sci. (Techn.)), Head of Laboratory

Oleg P. Skobelev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Chief Scientist.

УДК 621.317

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Ю.М. Иванов

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

E-mail: fuego27@rambler.ru

Исследуется новый метод измерения частоты по мгновенным значениям входного и дополнительных гармонических сигналов. Метод обеспечивает определение частоты по мгновенным значениям сигналов, измеренным одновременно в произвольный момент времени и через образцовый интервал времени. Приводятся результаты анализа влияния угловой погрешности блоков формирования фазы сигналов, которые формируют дополнительные напряжения, на погрешность результата определения частоты. Установлено, что данный вид погрешности зависит от угла сдвига фазы дополнительных сигналов и длительности образцового интервала времени. Полученные результаты позволяют определять оптимальные параметры измерительного процесса в зависимости от требований по точности и времени измерения.

Ключевые слова: гармонический сигнал, частота, дополнительный сигнал, мгновенные значения, блок формирования сдвига фазы, погрешность.

Частота периодического сигнала является одним из основных параметров, которые используются для решения задач испытаний и контроля энергообъектов и электротехнического оборудования, автоматизированного управления технологическими процессами, а также для повышения точности измерений некоторых физических величин, которые предварительно преобразуются в сигналы, пропорциональные частоте [1].

Используемые в настоящее время методы и средства измерения (СИ) частоты звукового диапазона основаны на преобразовании частоты в интервалы времени с последующим определением их длительности [2]. При использовании таких методов время измерения частоты не может быть менее периода входного сигнала.

В настоящее время получили распространение аппроксимационные методы измерения частоты, при реализации которых считается, что входной сигнал является гармоническим, что обеспечивает сокращение времени определения частоты до долей периода контролируемого сигнала [3].

Использование пространственного разделения мгновенных значений сигналов за счет формирования дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно входных, обеспечивает сокращение времени измерения [4].

Использование в качестве дополнительных сигналов ортогональных составляющих входных [5, 6] неизбежно приводит к частотной погрешности блоков формирования сдвига фазы (БФСБ), которые производят формирование дополнительных

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-08-00252 А).

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

сигналов. При изменении частоты угол сдвига фазы БФСБ будет отличаться от 90° .

Частотная погрешность устраняется в методах измерения частоты [7–9], которые используют формирование дополнительного сигнала, сдвинутого относительно входного на произвольный угол $\Delta\alpha$.

Реализация большинства подобных методов предусматривает определение переходов сигналов через ноль, что значительно увеличивает время измерения частоты. Это обусловлено тем, что момент начала измерения и момент перехода сигнала через ноль в общем случае не совпадают [10].

В статье исследуется новый метод измерения частоты, который обеспечивает начало измерения в произвольный момент времени [11].

В основу метода положено формирование двух дополнительных сигналов напряжения, сдвинутых по фазе относительно входного на углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$, и использование мгновенных значений входного и дополнительных сигналов для определения частоты. Согласно методу в произвольный момент времени измеряют первые мгновенные значения входного и дополнительных сигналов. Через образцовый интервал времени Δt производят измерение вторых мгновенных значений входного и дополнительного сигнала, сдвинутого относительно входного на $\Delta\alpha$. Частоту сигнала определяют по полученным мгновенным значениям.

Метод можно пояснить с помощью временных диаграмм (рис. 1).

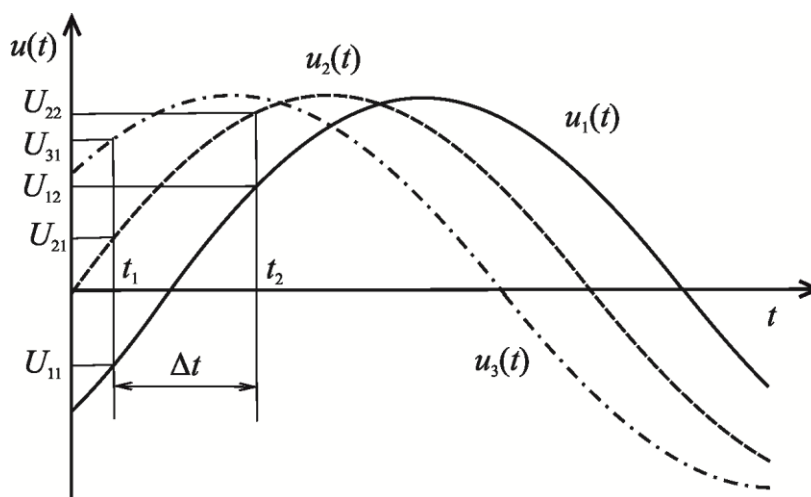


Рис. 1. Временные диаграммы для метода измерения частоты

Если входной сигнал равен $u_1(t) = U_m \sin \omega t$, то дополнительные сигналы будут иметь следующий вид: $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$ и $u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha)$.

В произвольный момент начала определения частоты t_1 мгновенные значения сигналов будут равны $U_{11} = U_m \sin \alpha_1$; $U_{21} = U_m \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha)$; $U_{31} = U_m \sin(\alpha_1 + 2\Delta\alpha)$, где U_m – амплитудное значение напряжения; α_1 – фаза сигнала напряжения в момент времени t_1 ; ω – угловая частота.

Через интервал времени Δt с момента первого измерения мгновенные значения сигналов будут равны

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

При использовании полученных мгновенных значений можно найти частоту

входного сигнала:

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

Метод можно реализовать с помощью следующей информационно-измерительной системы (ИИС) (рис. 2).

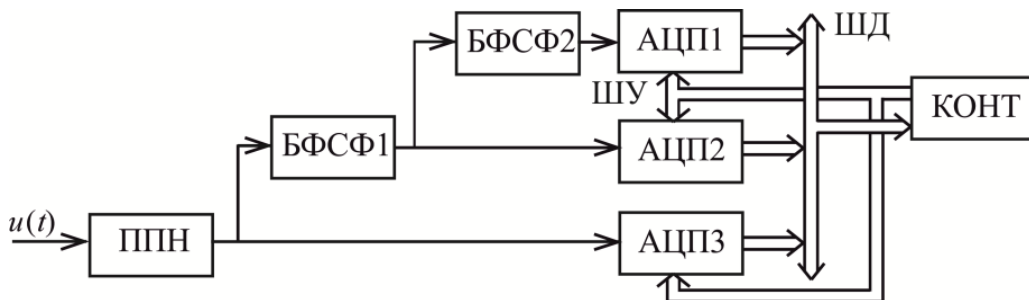


Рис. 2. Функциональная схема ИИС, реализующей метод

В состав ИИС входят: первичный преобразователь напряжения ППН, два блока формирования сдвига фазы БФСФ1 и БФСФ2, которые осуществляют сдвиг сигналов на угол $\Delta\alpha$, три аналого-цифровых преобразователя АЦП1–АЦП3, контроллер КОНТ, шины управления ШУ и данных ШД.

Одним из факторов, оказывающим влияние на точность метода определения частоты при его реализации, является угловая погрешность блоков формирования сдвига фазы [12].

Будем считать, что угол сдвига фазы БФСФ2 будет отличаться от угла сдвига БФСФ1 на $\Delta\beta$. В этом случае мгновенное значение второго дополнительного напряжения примет вид

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

Учитывая мгновенные значения напряжений, в соответствии с (1) можно определить относительную погрешность определения частоты сигнала:

$$\delta_{f\beta} = \frac{1}{\omega\Delta t} \arcsin \left| \frac{\sin \Delta\alpha \sin \omega\Delta t}{2 \sin(\alpha_1 + \Delta\alpha) [\sin^2(\alpha_1 + \Delta\alpha) - \sin \alpha_1 \sin(\alpha_1 + 2\Delta\alpha + \Delta\beta)]} \right| \times \\ \times \sqrt{4 \sin^2(\alpha_1 + \Delta\alpha) - [\sin(\alpha_1 + 2\Delta\alpha + \Delta\beta) + \sin \alpha_1]^2} - 1. \quad (2)$$

Из анализа (2) следует, что относительная погрешность зависит от угловой погрешности, характеризуемой $\Delta\beta$, угла сдвига фазы БФСФ $\Delta\alpha$, образцового интервала времени Δt и начальной фазы входного напряжения α_1 .

На рис. 3 показаны графики зависимости погрешности измерения частоты от $\Delta\alpha$ и $\omega\Delta t$ для угла $\Delta\beta=0,1^\circ$ и $\alpha_1 = 45^\circ$, которые получены согласно выражению (2).

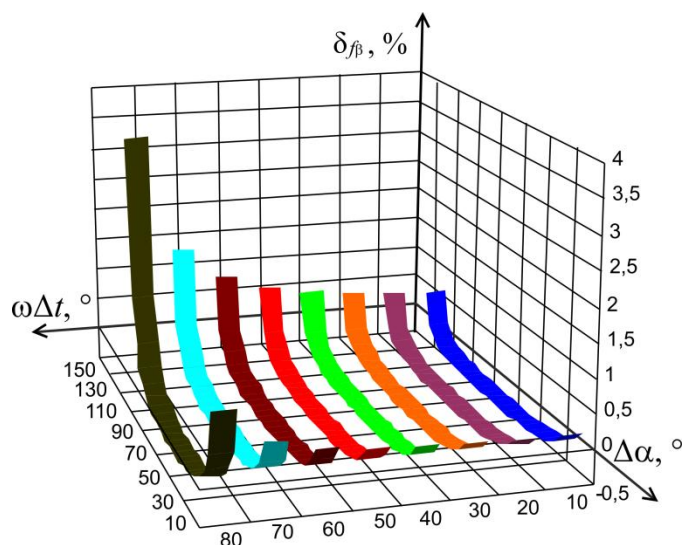


Рис. 3. Графики зависимости δ_{β} от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ при $\alpha_1 = 45^\circ$

Анализ рис. 3 показывает, что если выбирать углы сдвига фазы БСФ $\Delta\alpha$ в диапазоне от 20 до 80°, а $\omega\Delta t = 10 \div 50^\circ$, то δ_{β} будет меньше 0,15 %.

Большим достоинством разработанного метода является малое время измерения, которое зависит только от длительности образцового интервала времени Δt .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зайцев С.* Цифровые методы время-частотных измерений // Современная электроника. – 2009. – № 6. – С. 20–23.
2. *Ратхор Т.С.* Цифровые измерения. АЦП/ЦАП. – М.: Техносфера, 2006.
3. *Мелентьев В.С.* Измерительно-моделирующий подход к определению частоты сигналов // Современные информационные технологии: Тр. междунар. науч.-техн. конф. – Вып. 2. – Пенза: ПГТА, 2005. – С. 49–51.
4. *Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Миронов А.А.* Метод измерения частоты гармонических сигналов / Измерения, контроль, информатизация: Матер. XIV междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. – Т. 1. – С. 55–57.
5. *Мелентьев В.С., Сеницын А.Е., Муратова В.В.* Анализ метода измерения частоты гармонического сигнала по мгновенным значениям ортогональных составляющих напряжения / Информационно-измерительные и управляющие системы: Сб. науч. статей. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – № 1(9). – С. 89–92.
6. *Мелентьев В.С., Сеницын 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.
7. *Мелентьев В.С., Сеницын А.Е., Миронов А.А.* Метод измерения частоты по мгновенным значениям входного и дополнительного сигналов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: Матер. X Междунар. науч.-практ. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2013. – С. 187–189.
8. *Мелентьев В.С., Сеницын А.Е., Бурдукский Н.С.* Повышение точности измерения частоты гармонических сигналов // Современные материалы, техника и технологии. – 2015. – № 1(1). – С. 142–145.
9. *Мелентьев В.С., Муратова В.В., Ярославкина Е.Е.* Повышение точности измерения частоты по отдельным мгновенным значениям гармонических сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 3 (43). – С. 58–62.
10. *Мелентьев В.С., Серов К.С., Бурдукский Н.С.* Исследование метода измерения частоты по мгновенным значениям гармонического сигнала с использованием переходов дополнительных

- сигналов через ноль / Информационно-измерительные и управляющие системы: Сб. науч. статей. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2015. – № 2(12). – С. 61–67.
11. Мелентьев В.С., Батищев В.И., Иванов Ю.М. Анализ и совершенствование методов и систем измерения частоты гармонических сигналов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – № 1. Т. 17. – С. 32–36.
 12. Мелентьев В.С., Ярославкина Е.Е., Симицын А.Е. Исследование влияния погрешности фазосдвигающего блока на точность измерения частоты гармонического сигнала // Техника и технологии: пути инновационного развития: Матер. III Междунар. науч.-практ. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2013. – С. 126–129.

Статья поступила в редакцию 4 июня 2016 г.

THE EFFECT OF QUANTIZATION OF INSTANT VALUES OF SIGNALS AT THE ERROR OF DETERMINATION OF THEIR INTEGRAL CHARACTERISTICS

JU.M. Ivanov

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

Investigated a method of measuring the integral characteristics on the instantaneous values of the input and additional harmonic signals. A method provides defining characteristics on instantaneous values of signals, measured simultaneously once per period at the moment of transition of one of the additional voltage through zero. The results of the analysis of influence of quantization of instant values of signals at the error of the result of the determination of informative parameters are shown. It is established that this type of error depends not only on the width of analog-to-digital converters but also the phase angle of the additional signals. The obtained results allow to determine the optimum angle of phase shift depending on the requirements of measurement accuracy.

Keywords: *characteristics of periodic signals, an additional signal, instantaneous value, phase shift, analog-to-digital converter, the error*

УДК 621.317

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В.С. Мелентьев, Е.Е. Ярославкина, Е.В. Поздеева

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

E-mail: vs_mel@mail.ru

Исследуется новый метод измерения параметров по мгновенным значениям гармонических сигналов. Метод предусматривает формирование двух дополнительных напряжений и выявление их переходов через ноль. При реализации метода производится измерение только мгновенных значений входных сигналов, что исключает погрешность по модулю блоков формирования сдвига фазы. Приводятся результаты анализа влияния угловой погрешности блоков на результат определения информативных параметров, обусловленного отличием их углов сдвига фазы. Полученные результаты позволяют определять оптимальный угол сдвига фазосдвигающих блоков в зависимости от требований по точности и времени измерения.

Ключевые слова: *параметры периодических сигналов, гармоническая модель, мгновенные значения, блок формирования сдвига фазы, погрешность.*

В настоящее время при измерении интегральных параметров (ИП) по отдельным мгновенным значениям гармонических сигналов широкое распространение получили методы, основанные на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых по фазе относительно входных [1].

Использование пространственного разделения мгновенных значений сигналов вместо их временного разделения в большинстве случаев обеспечивает сокращение времени измерения [2].

Обычно при синтезе методов определения ИП, основанных на формировании дополнительных сигналов, их разделяют на методы, в которых используются либо ортогональные составляющие сигналов, либо сигналы, сдвинутые относительно входных на произвольный угол [3].

Если в качестве дополнительных сигналов применять ортогональные составляющие входных, то это очень часто обеспечивает минимальное время измерения [4]. Однако в этом случае возможно возникновение существенной частотной погрешности блоков формирования сдвига фазы (БФСФ), обеспечивающих создание ортогональных составляющих сигналов [5]. Наличие данной погрешности характеризуется тем, что угол сдвига фазы БФСФ будет отличаться от 90° .

Данную погрешность можно исключить, если применять в качестве дополни-

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-08-00252 А).

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

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

Елена Владиславовна Поздеева, аспирант.

тельных сигналы, сдвинутые относительно входных на произвольный угол, и определять ИП по мгновенным значениям, соответствующим как входным, так и дополнительным сигналам [6].

Использование такого подхода может привести к возникновению дополнительной погрешности, которая обусловлена несовершенством БФСФ и заключается в том, что амплитудное значение сигнала, действующего на входе блока, будет отличаться от амплитуды сигнала, формируемого на его выходе [7].

Этот недостаток может быть устранен в методах, в которых для определения ИП используются только мгновенные значения входного напряжения и тока.

В статье исследуется погрешность реализации нового метода определения интегральных параметров [8], исключающего погрешность по модулю.

Сущность метода заключается в использовании двух дополнительных напряжений, которые сдвинуты относительно входного по фазе на углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$ соответственно. В момент, когда второе дополнительное напряжение переходит через ноль, производят измерение первых мгновенных значений входного напряжения и тока. В момент перехода первого дополнительного напряжения через ноль измеряют вторые мгновенные значения входного напряжения и тока. Определение ИП гармонических сигналов производят по измеренным мгновенным значениям.

Сущность метода характеризуется временными диаграммами (рис. 1).

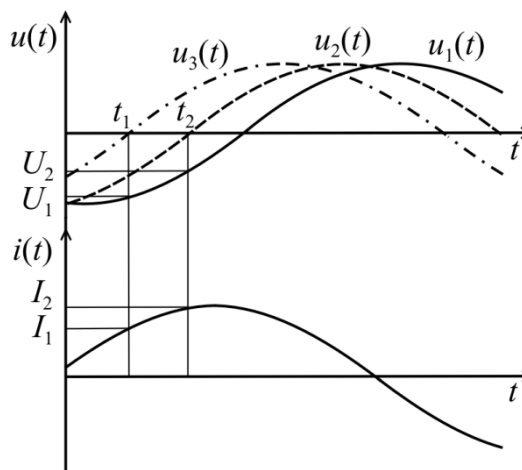


Рис. 1. Временные диаграммы, описывающие метод

Для гармонических моделей входного напряжения $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ и тока $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ дополнительные напряжения будут соответствовать следующим выражениям: $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$ и $u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha)$ (где U_m и I_m – амплитудные значения напряжения и тока, ω – угловая частота, φ – угол сдвига фаз между напряжением и током).

В момент времени t_1 , когда второе дополнительное напряжение $u_3(t)$ переходит через ноль, мгновенные значения входных сигналов примут вид $U_1 = U_m \sin(-2\Delta\alpha)$ и $I_1 = I_m \sin(\varphi - 2\Delta\alpha)$.

В момент перехода первого дополнительного напряжения $u_2(t)$ через ноль (момент времени t_2) мгновенные значения входных сигналов будут равны $U_2 = U_m \sin(-\Delta\alpha)$ и $I_2 = I_m \sin(\varphi - \Delta\alpha)$.

Для угла сдвига БФСФ $\Delta\alpha \leq \frac{\pi}{2}$, используя мгновенные значения сигналов, после преобразований можно найти выражения для определения основных информативных параметров:

– среднеквадратические значения (СКЗ) напряжения и тока

$$U_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2}U_2^2}{\sqrt{4U_2^2 - U_1^2}}; \quad (1)$$

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

– активная (АМ) и реактивная (РМ) мощности

$$P = \frac{U_2[(I_2U_1 - I_1U_2)U_1 - 2U_2^2I_2]}{4U_2^2 - U_1^2}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{(I_2U_1 - I_1U_2)U_2}{\sqrt{4U_2^2 - U_1^2}}. \quad (4)$$

Один из вариантов схемы информационно-измерительной системы (ИИС), с помощью которой можно реализовать рассматриваемый метод, приведен на рис. 2.

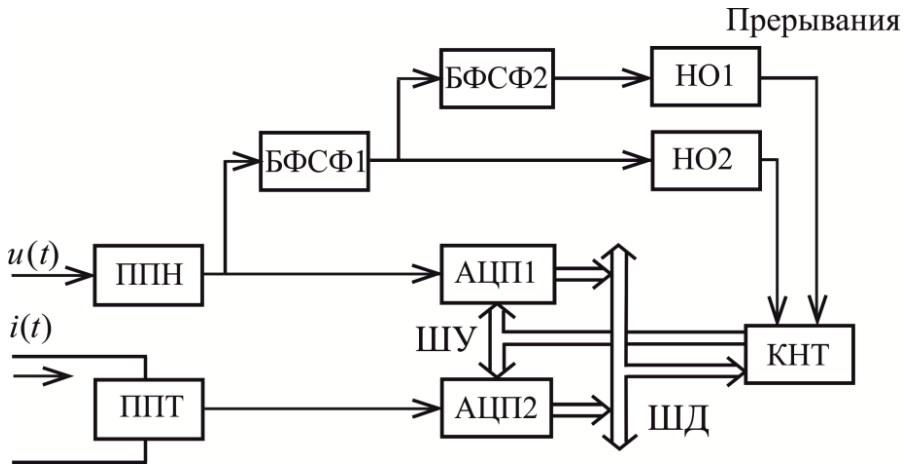


Рис. 2. Вариант ИИС, реализующей метод

В ИИС используются: первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ; блоки формирования сдвига фазы БФСФ1 и БФСФ2; аналого-цифровые преобразователи в каналах напряжения АЦП1 и тока АЦП2; нуль-органы НО1 и НО2; контроллер КНТ с шинами данных ШД и управления ШУ.

Если углы сдвига фаз первого и второго БФСФ различны, то моменты переходов второго и первого дополнительного напряжений через ноль будут смещены, что приведет к возникновению погрешности измерения ИП сигналов.

Предположим, что угол сдвига фазы БФСФ1 соответствует $\Delta\alpha$, а БФСФ2 – $\Delta\alpha + \Delta\beta$. В этом случае первые мгновенные значения напряжения и тока примут следующий вид:

$$U'_1 = U_m \sin(-2\Delta\alpha - \Delta\beta); I'_1 = I_m \sin(\varphi - 2\Delta\alpha - \Delta\beta).$$

Вторые мгновенные значения входного напряжения и тока останутся без изменения.

Используя полученные мгновенные значения сигналов и выражения (1)–(4), можно найти погрешности определения информативных параметров:

– относительные погрешности измерения СКЗ сигналов

$$\delta_{U\beta} = \frac{2 \sin^2 \Delta\alpha}{\sqrt{4 \sin^2 \Delta\alpha - \sin^2(2\Delta\alpha + \Delta\beta)}} - 1; \quad (5)$$

$$\delta_{I\beta} = \left\{ \sin^2(\varphi - \Delta\alpha) + \frac{[\cos(\Delta\alpha + \Delta\beta - \varphi) - \cos(\varphi - \Delta\alpha)\cos(2\Delta\alpha + \Delta\beta)]^2}{4 \sin^2 \Delta\alpha - \sin^2(2\Delta\alpha + \Delta\beta)} \right\}^{\frac{1}{2}} - 1; \quad (6)$$

– приведенные погрешности измерения АМ и РМ

$$\gamma_{P\beta} = \frac{2 \sin \Delta\alpha [2 \sin^2 \Delta\alpha \sin(\varphi - \Delta\alpha) - \sin \varphi \sin(\Delta\alpha + \Delta\beta) \sin(2\Delta\alpha + \Delta\beta)]}{4 \sin^2 \Delta\alpha - \sin^2(2\Delta\alpha + \Delta\beta)} - \cos \varphi; \quad (7)$$

$$\gamma_{Q\beta} = \frac{2 \sin \Delta\alpha \sin \varphi \sin(\Delta\alpha + \Delta\beta)}{\sqrt{4 \sin^2 \Delta\alpha - \sin^2(2\Delta\alpha + \Delta\beta)}} - \sin \varphi. \quad (8)$$

Из анализа выражений (5)–(8) следует, что погрешности определения ИП гармонических сигналов зависят от угла сдвига фазы БФСФ $\Delta\alpha$ и отклонения углов блоков $\Delta\beta$. Кроме того, относительная погрешность определения СКЗ тока и приведенные погрешности измерения АМ и РМ находятся в зависимости еще и от угла сдвига фаз φ .

Построенный в соответствии с (5) график зависимости относительной погрешности определения СКЗ напряжения от $\Delta\alpha$ при $\Delta\beta = 0, 1^\circ$ приведен на рис. 3.

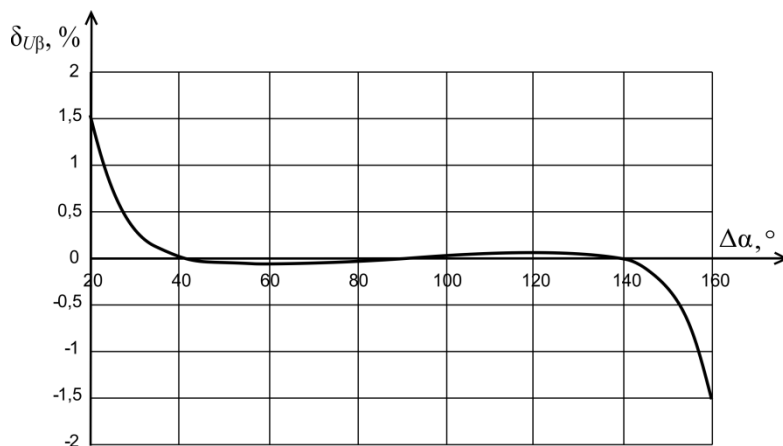


Рис. 3. График зависимости $\delta_{U\beta}$ от $\Delta\alpha$

Графики зависимости относительной погрешности измерения СКЗ тока и приведенных погрешностей определения АМ и РМ от φ и $\Delta\alpha$ при $\Delta\beta = 0,1^\circ$, полученные согласно (6)–(8), показаны на рис. 4–6.

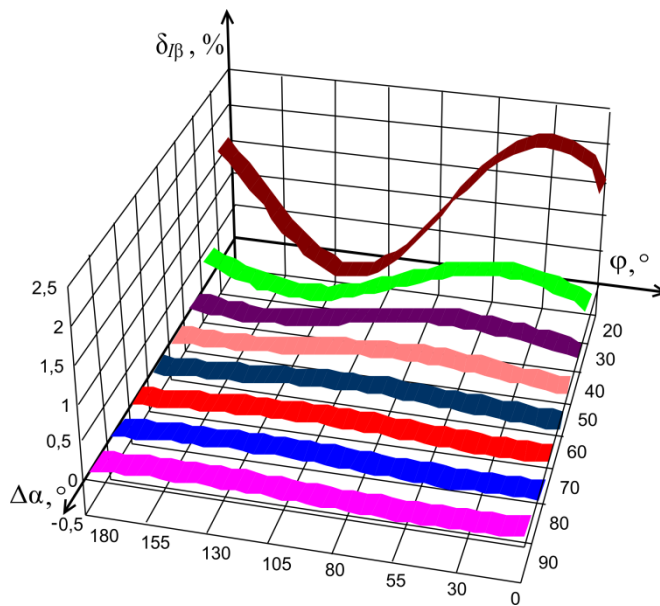


Рис. 4. Графики зависимости $\delta_{I\beta}$ от $\Delta\alpha$ и φ

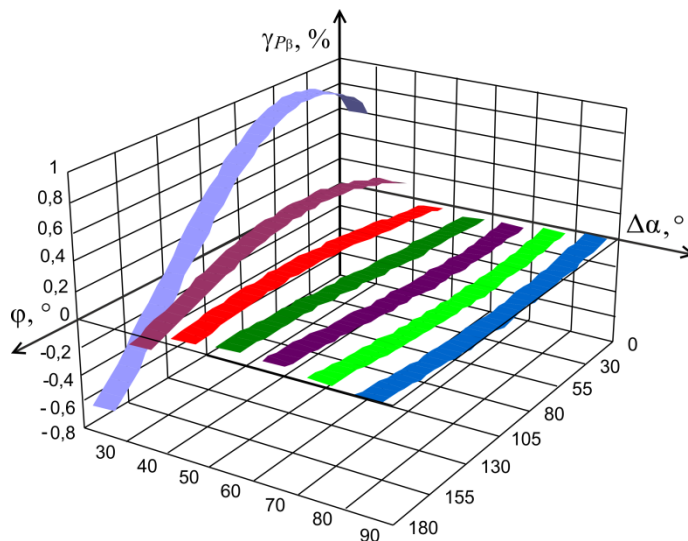


Рис. 5. Графики зависимости $\gamma_{P\beta}$ от $\Delta\alpha$ и φ

Из анализа рис. 3–6 следует, что за счет выбора угла сдвига фазы БФСФ можно значительно сократить погрешности. Меньшие значения погрешностей будут иметь место, если угол сдвига $\Delta\alpha = 40 \div 90^\circ$. Однако дальнейшее увеличение угла сдвига фазы БФСФ приводит к возрастанию общего времени измерения.

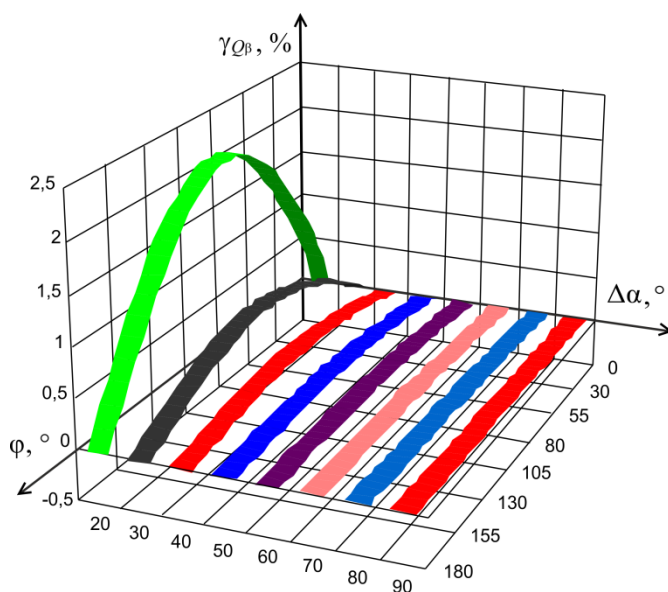


Рис. 6. Графики зависимости $\gamma_{Q\beta}$ от $\Delta\alpha$ и φ

Если значения $\Delta\beta$ достаточно малы, то при соответствующем выборе угла сдвига фазы $\Delta\alpha$ данной погрешностью можно пренебречь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Melent'ev V.S., Ivanov Yu.M. Study of the method of measurement of parameters of periodic signals by their instantaneous values using feature points / Science and Education: Materials of the XI International research and practice conference. – Munich, Germany, 2016. – Vol. 1. – P. 99–106.
2. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Сокращение времени определения параметров за счет пространственного разделения мгновенных значений гармонических сигналов / Измерения, контроль, информатизация: матер. XVI междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. – С. 61–63.
3. Melent'ev V.S., Ivanov Yu.M., Lychev A.O. A method of measuring integral characteristics from the instantaneous values of signals separated in time and space // Measurement Techniques: Volume 57, No. 9, October, 2014. P. 979–984.
4. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Исследование метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих сигналов // Ползуновский вестник. – 2014. – № 2(4). – С. 24–26.
5. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Павленко Е.В. Анализ погрешности реализации метода измерения параметров сигналов на основе формирования ортогональных составляющих напряжений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 1. – С. 23–30.
6. Мелентьев В.С., Ярославкина Е.Е., Поздеева Е.В., Нефедьев Д.И. Сокращение времени измерения параметров за счет использования мгновенных значений входных и дополнительных гармонических сигналов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1 (15). – С. 48–55.
7. Мелентьев В.С., Павленко Е.В., Пескова А.С. Исследование погрешности формирования дополнительных сигналов при измерении параметров гармонических сигналов / Современные тенденции развития науки и технологий: Сборник науч. трудов по матер. V Междунар. науч.-практ. конф. – Белгород: АПНИ, 2015. – Ч. 2. – С. 49–51.
8. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Метод измерения параметров гармонических сигналов на основе использования характерных точек дополнительных сигналов напряжений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 4(6). – С. 16–22.

Статья поступила в редакцию 4 июня 2016 г.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE ERROR OF FORMING ADDITIONAL SIGNALS ON THE MEASUREMENT RESULT OF THE INTEGRAL PARAMETERS OF HARMONIC SIGNALS

V.S. Melent'ev, E.E. Jaroslavkina, E.V. Pozdeeva

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

Investigated a new method of measuring the parameters on the instantaneous values of harmonic signals. The method involves the formation of two additional voltages and identifying their transitions through zero. When implementing the method only the instantaneous values of the input signals should measure, that eliminates the module error of the blocks of the formation of the phase shift. The results of the analysis of the influence of the angular error of the blocks on the result of the determination of informative parameters, due to the difference of their angles of phase shift, are shown. The obtained results allow to determine the optimal shift angle of the phase-shifting blocks depending on requirements for accuracy and measurement time.

Keywords: *the parameters of periodic signals, harmonic model, the instantaneous values, the block of formation of the phase shift, the error.*

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

УДК 621.317

ВЛИЯНИЕ КВАНТОВАНИЯ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ СИГНАЛОВ НА ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В.В. Муратова

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

E-mail: muratova1991@yandex.ru

Исследуется метод измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям входных и дополнительных гармонических сигналов. Метод обеспечивает определение характеристик по мгновенным значениям сигналов, измеренным одновременно один раз за период в момент перехода одного из дополнительных напряжений через ноль. Приводятся результаты анализа влияния квантования мгновенных значений сигналов на погрешность результата определения информативных параметров. Установлено, что данный вид погрешности зависит не только от разрядности аналого-цифровых преобразователей, но и от угла сдвига фазы дополнительных сигналов. Полученные результаты позволяют определять оптимальный угол сдвига фазы в зависимости от требований по точности измерения.

Ключевые слова: характеристики периодических сигналов, дополнительный сигнал, мгновенные значения, блок сдвига фазы, аналого-цифровой преобразователь, погрешность.

Определение интегральных характеристик гармонических сигналов (ИХС) находит очень широкое применение в информационно-измерительной технике. Среди большого количества методов измерения ИХС можно выделить методы, представляющие достаточно новое направление, связанное с использованием отдельных мгновенных значений сигналов, которые не имеют непосредственной связи с периодом входного сигнала. При этом можно обеспечить время измерения характеристик менее длительности периода сигнала [1].

Обычно методы, представляющее данное направление, принято разделять на методы, использующие и не использующие формирование дополнительных сигналов, параметры которых связаны с информативными параметрами входных сигналов [2–4].

Методы, реализация которых предусматривает формирование дополнительных сигналов напряжения и тока, обеспечивают в ряде случаев сокращение времени измерения ИХС за счет пространственного разделения мгновенных значений сигналов [5].

В статье исследуется новый метод измерения ИХС, который заключается в том, что формируют два дополнительных напряжения, сдвинутые относительно входного сигнала на углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$, а также дополнительный ток, сдвинутый относительно входного на угол $\Delta\alpha$. В момент перехода через ноль второго дополнительного напряжения, которое сдвинуто относительно входного на угол $2\Delta\alpha$, производят од-

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-08-00252 А).

Вера Владимировна Муратова, аспирант.

новременное измерение мгновенных значений входных и дополнительных сигналов напряжения и тока. Для определения ИХС используют измеренные мгновенные значения сигналов [6].

Для пояснения метода могут быть использованы временные диаграммы (рис. 1).

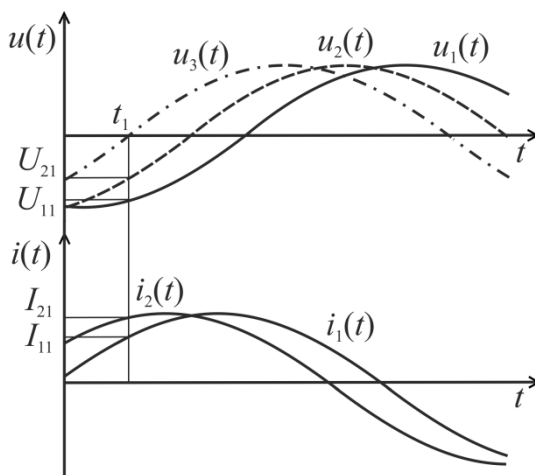


Рис. 1. Временные диаграммы для метода измерения ИХС

Из рис. 1 следует, что определение ИХС производится одновременно и один раз за период.

Если входные напряжение и ток имеют вид $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ и $i_2(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, то дополнительные сигналы будут равны $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$, $u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha)$; $i_2(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi + \Delta\alpha)$.

Когда второе дополнительное напряжение $u_3(t)$ переходит через ноль (момент времени t_1), мгновенные значения входных и дополнительных сигналов напряжения и тока примут вид

$$U_{11} = U_m \sin(-2\Delta\alpha); U_{21} = U_m \sin(-\Delta\alpha); I_{11} = I_m \sin(\varphi - 2\Delta\alpha); \\ I_{21} = I_m \sin(\varphi - \Delta\alpha).$$

При использовании мгновенных значений сигналов можно найти выражения для определения основных ИХС:

– при измерении среднеквадратических значений (СКЗ) напряжения и тока

$$U_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2}U_{11}^2}{\sqrt{4U_{21}^2 - U_{11}^2}}; \quad (1)$$

$$I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{I_{21}^2(4U_{21}^2 - U_{11}^2) + (I_{21}U_{11} - 2I_{11}U_{21})^2}{2(4U_{21}^2 - U_{11}^2)}}; \quad (2)$$

– при измерении активной (АМС) и реактивной (РМС) мощности сигналов

$$P = \frac{|U_{21}| \left[(U_{11}^2 - 2U_{21}^2) I_{21} + I_{11} U_{11} U_{21} \right]}{4U_{21}^2 - U_{11}^2}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{U_{21}(I_{21}U_{11} - I_{11}U_{21})}{\sqrt{4U_{21}^2 - U_{11}^2}}. \quad (4)$$

Метод можно реализовать, используя следующую информационно-измерительную систему (ИИС) (рис. 2).

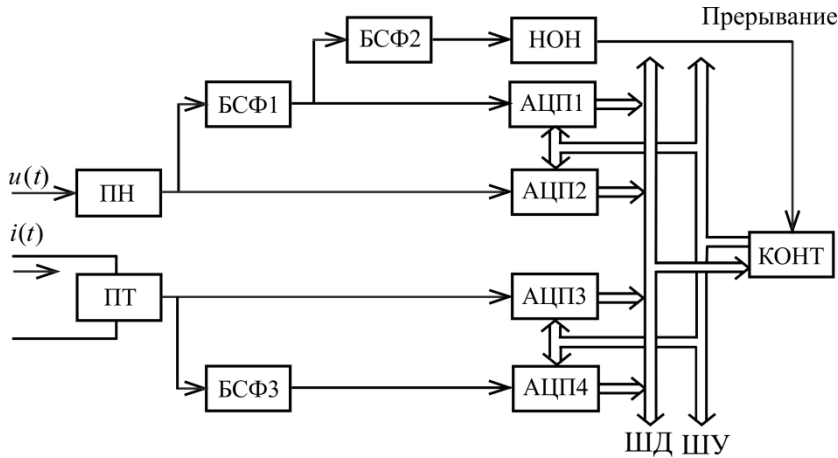


Рис. 2. Функциональная схема ИИС, реализующей метод

Основными блоками ИИС являются: первичные преобразователи напряжения ПН и тока ПТ, блоки сдвига фазы БСФ1–БСФ3, осуществляющие сдвиги дополнительных сигналов на угол $\Delta\alpha$, аналого-цифровые преобразователи АЦП1–АЦП3, нуль-орган НОН, контроллер КОНТ с шинами управления ШУ и данных ШД.

Реализация цифровых методов измерений предусматривает возникновение погрешности квантования мгновенных значений сигналов. Для анализа влияния квантования на результирующую погрешность определения ИХС используем методику оценки погрешности вычисления значения функции, аргументы которой заданы приближенно, с помощью дифференцирования этой функции [7]. При этом будем считать, что максимальные абсолютные погрешности аргументов равны погрешностям квантования мгновенных значений.

Выражения для определения предельных значений абсолютных погрешностей определения ИХС согласно (1)–(4) имеют вид

$$\Delta U_{CK3} = \left(\left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial U_{CK3}}{\partial U_{21}} \right| \right) \Delta U_m; \quad (5)$$

$$\Delta I_{CK3} = \left(\left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{21}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial I_{11}} \right| \right) \Delta I_m + \left(\left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial I_{CK3}}{\partial U_{21}} \right| \right) \Delta U_m; \quad (6)$$

$$\Delta P = \left(\left| \frac{\partial P}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial U_{21}} \right| \right) \Delta U_m + \left(\left| \frac{\partial P}{\partial I_{21}} \right| + \left| \frac{\partial P}{\partial I_{11}} \right| \right) \Delta I_m; \quad (7)$$

$$\Delta Q = \left(\left| \frac{\partial Q}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial U_{21}} \right| \right) \Delta U_m + \left(\left| \frac{\partial Q}{\partial I_{21}} \right| + \left| \frac{\partial Q}{\partial I_{11}} \right| \right) \Delta I_m, \quad (8)$$

где $\Delta U_m = U_{пр}/2^n$; $\Delta I_m = I_{пр}/2^n$; $U_{пр}$, $I_{пр}$ – максимально допустимые напряжение и ток; n – число двоичных разрядов АЦП.

За счет использования выражений для абсолютных погрешностей (5)–(8) можно найти относительные погрешности измерения СКЗ сигналов и приведенные погрешности определения АМС и РМС:

$$\delta_{U_{СКЗ}} = \frac{|\cos 2\Delta\alpha| + |\sin 2\Delta\alpha|}{2^n \sin^2 \Delta\alpha}; \quad (9)$$

$$\delta_{I_{СКЗ}} = \frac{1}{2^{n+1} |\sin^3 \Delta\alpha|} \left\{ 2 \sin^2 \Delta\alpha [|\cos(\varphi - \Delta\alpha)| + |\cos(\varphi - 2\Delta\alpha)|] + \right. \\ \left. + (1 + 2|\cos \Delta\alpha|) |\cos(\varphi - \Delta\alpha) \cos(\varphi - 2\Delta\alpha)| \right\}; \quad (10)$$

$$\gamma_P = \frac{1}{2^n |\sin^3 \Delta\alpha|} \left[\sin^2 \Delta\alpha (|\cos(\Delta\alpha)| + |\sin^3 \Delta\alpha|) + |\cos^2 \Delta\alpha \cos(\varphi - \Delta\alpha) + \right. \\ \left. + 0,5 \sin \varphi \sin \Delta\alpha| + |\sin \Delta\alpha \sin(\Delta\alpha - \varphi) - 2 \cos^3 \Delta\alpha \cos(\Delta\alpha - \varphi)| \right]; \quad (11)$$

$$\gamma_Q = \frac{1}{2^n |\sin^3 \Delta\alpha|} \left[\sin^3 \Delta\alpha (1 + 2|\cos \Delta\alpha|) + \right. \\ \left. + |\sin \varphi \cos^3 \Delta\alpha + \cos \varphi \sin^3 \Delta\alpha| + 2|2 \sin^3 \Delta\alpha \cos(\varphi - \Delta\alpha) - \sin \varphi| \right]. \quad (12)$$

Анализ выражения (9) указывает на то, что погрешность измерения СКЗ напряжения зависит только от разрядности АЦП и угла сдвига БСФ $\Delta\alpha$.

График зависимости погрешности $\delta_{U_{СКЗ}}$ от $\Delta\alpha$ для 12-разрядного АЦП, построенный в соответствии с выражением (9), приведен на рис. 3.

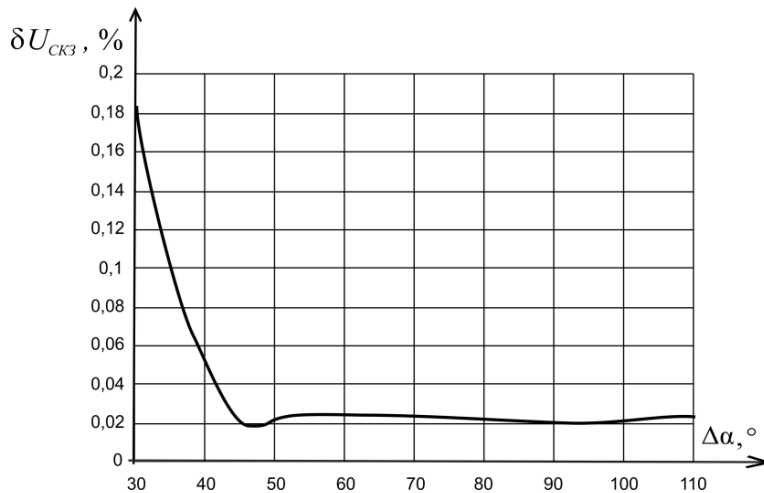


Рис. 3. График зависимости $\delta_{U_{СКЗ}}$ от $\Delta\alpha$

Погрешности измерения остальных ИХС зависят еще и от угла сдвига фаз между напряжением и током φ .

На рис. 4–6 показаны графики зависимости $\delta I_{СКЗ}$, γ_P и γ_Q от $\Delta\alpha$ и φ , которые построены соответственно с (10)–(12) для $n = 12$.

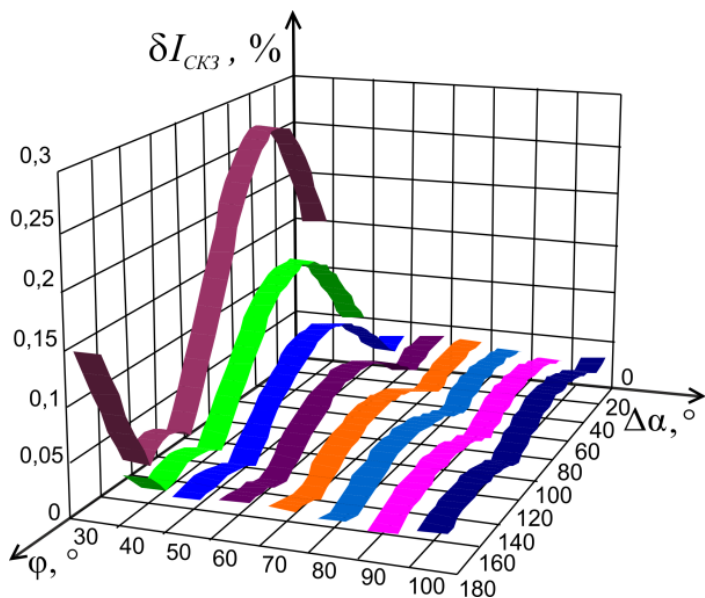


Рис. 4. Графики зависимости $\delta I_{СКЗ}$ от $\Delta\alpha$ и φ

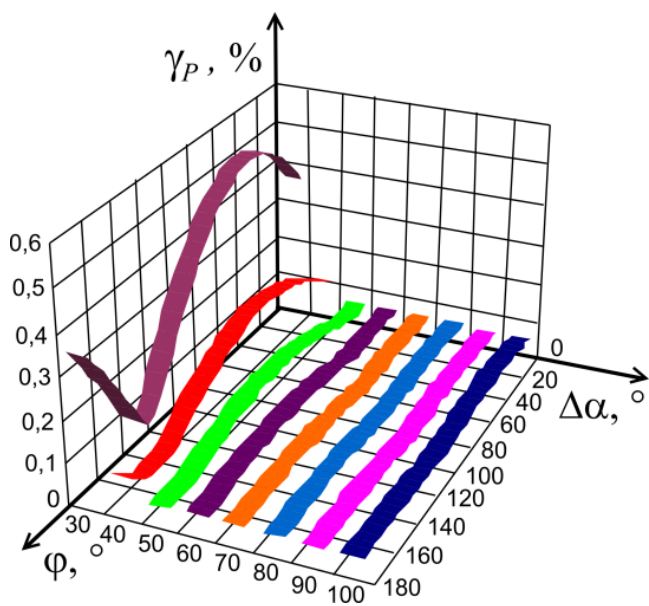


Рис. 5. Графики зависимости γ_P от $\Delta\alpha$ и φ

Анализ графиков, которые приведены на рис. 3–6, показывает, что погрешности можно значительно уменьшить, выбирая соответствующие углы сдвига фазы БСФ.

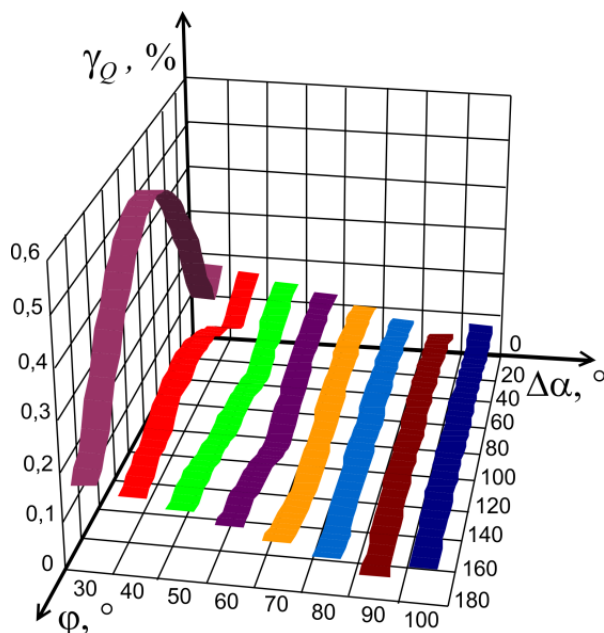


Рис. 6. Графики зависимости γ_Q от $\Delta\alpha$ и φ

Если принять $\Delta\alpha = 90^\circ$, то погрешности определения ИХС будут меньше 0,05 % и при соответствующей разрядности АЦП ими можно пренебречь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Синтез и анализ методов оперативного измерения параметров периодических процессов на основе формирования дополнительных сигналов / Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVI междунар. конф. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2014. – С. 717–722.
2. Мелентьев В.С., Муратова В.В., Таштабанов Б.Н. Новый подход к повышению точности измерения параметров периодических сигналов / Теория и практика современной науки: Матер. XVII науч.-практ. конф. – М.: Институт стратегических исследований, 2015. – С. 127–134.
3. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Исследование метода измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям сигналов, разделенным в пространстве // Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. – 2014. – Т. 9, № 10 (137). – С. 52–55.
4. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Метод измерения параметров гармонических сигналов на основе использования характерных точек дополнительных сигналов напряжения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 4(6). – С. 16–22.
5. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Сеницын А.Е., Пескова А.С. Использование пространственно-временного разделения мгновенных значений для определения параметров гармонических сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 1.
6. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Сокращение времени определения параметров за счет пространственного разделения мгновенных значений гармонических сигналов / Измерения, контроль, информатизация: матер. XVI междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. – С. 61–63.
7. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В., Павленко Е.В. Оценка влияния квантования

- мгновенных значений сигналов на погрешность измерения параметров гармонических сигналов // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 3(7). – С. 34–36.
8. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Анализ влияния квантования мгновенных значений сигналов на погрешность измерения параметров гармонических сигналов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2(8). – С. 3–9.

Статья поступила в редакцию 5 июня 2016 г.

THE EFFECT OF QUANTIZATION OF INSTANT VALUES OF SIGNALS AT THE ERROR OF DETERMINATION OF THEIR INTEGRAL CHARACTERISTICS

V.V. Muratova

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

Investigated a method of measuring the integral characteristics on the instantaneous values of the input and additional harmonic signals. A method provides defining characteristics on instantaneous values of signals, measured simultaneously once per period at the moment of transition of one of the additional voltage through zero. The results of the analysis of influence of quantization of instant values of signals at the error of the result of the determination of informative parameters are shown. It is established that this type of error depends not only on the width of analog-to-digital converters but also the phase angle of the additional signals. The obtained results allow to determine the optimum angle of phase shift depending on the requirements of measurement accuracy.

Keywords: *characteristics of periodic signals, an additional signal, instantaneous value, phase shift, analog-to-digital converter, the error*

УДК 536.6, 544.332

МОДЕЛЬ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО ЗВЕНА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО СКАНИРУЮЩЕГО КАЛОРИМЕТРА***А.С. Нечаев, Р.Р. Хуснутдинова, И.Н. Нечаева, Е.А. Дмитриева, В.Н. Митрошин***Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматривается вопрос уменьшения динамической погрешности измерений тепловых характеристик вещества при протекании в нем эндо- и экзотермических реакций путем коррекции информационного сигнала в дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК). С помощью метода тепловых эквивалентов было получено уравнение для корректирующего звена в операторном виде. Полученная зависимость отражает основные тепловые инерционности частей измерительного блока и расход тепловой энергии в окружающее пространство. Данное уравнение позволяет предложить электрическую схему для коррекции сигнала, пришедшего с первичных преобразователей, аппаратным способом в измерительном блоке ДСК, что обеспечивает уменьшение влияния динамической погрешности на процесс измерения.

Ключевые слова: дифференциальный сканирующий калориметр, динамическая погрешность, модель, метод тепловых эквивалентов, коррекция сигнала.

Измерительный блок дифференциального сканирующего калориметра (ДСК) включает в себя ряд элементов, влияющих на процесс распространения тепла внутри него. Под элементами здесь можно понимать как конструктивные части блока (нагревательный элемент, подложка, измерительная ячейка, датчик температуры), так и неотъемлемую часть проведения реального эксперимента – воздушную среду в рабочем пространстве печи.

Процесс измерения дифференциальной температуры заключается в одновременном снятии показаний датчиков, расположенных в измерительных ячейках с исследуемым и эталонным образцами. Ячейки считаются равноудаленными от нагревателя и симметричными относительно центра рабочей области измерительного блока. Это допущение позволяет утверждать, что при равных геометрических размерах проводящих сред и равномерном тепловом потоке температура в измерительных ячейках будет равна в каждый момент времени эксперимента, а следовательно, дифференциальная температура определяется нулевой. Нарушение какого-либо условия симметричности ведет, соответственно, к ненулевому показателю разностной температуры. Данная процедура измерения дает возможность исследовать,

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-08-00252 А).

Александр Сергеевич Нечаев (к.т.н.), доцент кафедры «Радиотехнические устройства». Резеда Рамильевна Хуснутдинова, магистрант.

Ирина Николаевна Нечаева, аспирант.

Елизавета Анатольевна Дмитриева, аспирант.

Владимир Николаевич Митрошин (д.т.н.), заведующий кафедрой «Автоматика и управление в технических системах».

например, процессы теплового выделения или поглощения при фазовом переходе в веществе во время его нагрева, исключая влияние внешних возмущений, воздействующих на всю систему.

Кроме задач анализа экзотермических и эндотермических реакций при фазовом переходе вещества нередко ставится вопрос определения его динамической теплоемкости. Одним из способов косвенного измерения данного параметра является периодическое выдерживание показателя температуры измерительной ячейки в процессе нагрева в течение некоторого времени. Вследствие этого можно оценить теплоемкость исследуемого вещества по инерционности его перехода в установившееся температурное состояние.

Практическое решение данной задачи возможно при регулировании теплового потока, идущего от нагревателя, по закону, приведенному на рис. 1, где q_c является тепловым потоком, определяющим скорость нагрева ячейки до поставленной температуры, а q_0 – тепловым потоком, необходимым для поддержания температуры ячейки на заданном уровне.

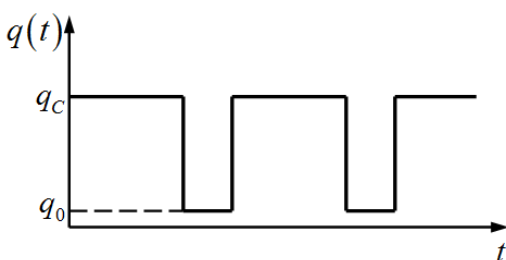


Рис. 1. Закон изменения теплового потока

Нагреватель и измерительная ячейка расположены на некотором расстоянии друг от друга. Это приводит к потере тепла при его передаче от нагревателя к ячейке в окружающее пространство и на нагрев элементов измерительного блока. Таким образом, необходимо регулировать процесс выделения теплового потока от нагревателя с учетом указанных потерь. Закон регулирования теплового потока в данном случае должен опираться на модель процесса распространения тепла в измерительном блоке.

Модель процесса изменения температуры в заданной точке измерительного блока может быть получена с помощью метода эквивалентных тепловых схем. Данный метод основан на использовании аналогии теплового потока $q(t)$ и электрического тока $I(t)$ ввиду подобия формы закона Фурье (1) и закона Ома (2) [1, 2]:

$$q(t) = \frac{\lambda \cdot F_T \cdot \Delta\theta(t)}{\delta} = \frac{\Delta\theta(t)}{R_T}; \quad (1)$$

$$I(t) = \frac{k \cdot F_{ПП} \cdot \Delta U(t)}{l} = \frac{\Delta U(t)}{R_{Э}}, \quad (2)$$

- где λ – коэффициент теплопроводности;
 k – удельная электрическая проводимость;
 F_T – площадь сечения, перпендикулярная распространению тепла;
 $F_{ПП}$ – сечение токопроводящего проводника;
 $\Delta\theta(t)$ – изменение температуры среды на расстоянии δ от источника тепла;
 $\Delta U(t)$ – изменение разности потенциалов на длине проводника l ;
 R_T и $R_{Э}$ – тепловое сопротивление данного участка и электрическое сопротивление соответственно.

На рис. 2 схематично отражены составляющие теплового баланса в измерительной ячейке печи ДСК. Из рисунка видно, что тепловой поток, формируемый нагревателем печи, расходуется при распространении его через металлическую подложку к тиглю с образцом $Q_{П}$ на нагрев самого образца $Q_{ОБ}$, также часть тепла поглощается окружающим пространством через конвекцию $Q_{КОН}$ и тепловое излучение $Q_{ИЗЛ}$. В ходе измерения температуры образца датчиком (термопарой) часть тепловой энергии расходуется непосредственно на нагрев самого термодатчика $Q_{Д}$ и отвод тепла через него.

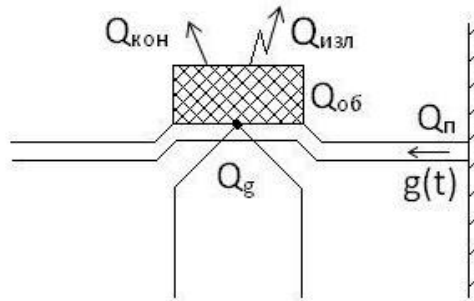


Рис. 2. Схематичное представление составляющих теплового баланса в измерительной ячейке ДСК

Метод эквивалентных тепловых схем подразумевает возможность замены тепловых характеристик системы эквивалентными электрическими параметрами. В работе [1] указано, что аналогом теплоемкости можно считать электрическую емкость, а тепловому сопротивлению – электрическое. Анализируя принципы распространения тепла в измерительном блоке, примем следующие гипотезы:

- тепло, распространяющееся от нагревателя к ячейке, формируется с учетом инерционности, связанной с теплоемкостью и тепловым сопротивлением металлической подложки;
- образец вещества в тигле нагревается инерционно, поскольку имеет определенную массу, размеры и теплоемкость;
- потери тепла в окружающее пространство посредством свободной конвекции несущественны, что определяется относительно малыми объемами свободного пространства в печи;
- потери тепла, вызванные эффектом излучения, не имеют существенной зависимости от теплоемкости газовой среды, а связаны только с ее тепловым сопротивлением [3];
- термодатчик является инерционным звеном, имеющим свое тепловое сопротивление и теплоемкость.

С учетом приведенных гипотез была предложена электрическая модель, эквивалентная тепловой модели распространения тепла от нагревателя к измерительной ячейке (рис. 3). В ней элементы $R_{П}$ и $C_{П}$ определяют модель теплового поведения металлической подложки измерительного блока, $R_{ИЗЛ}$ – показатель сопротивления газовой среды в зависимости от интенсивности излучения, $R_{ОБ}$ и $C_{ОБ}$ характеризуют тепловую модель поведения тигля с исследуемым образцом, $R_{Д}$ и $C_{Д}$ определяют инерционность термодатчика.

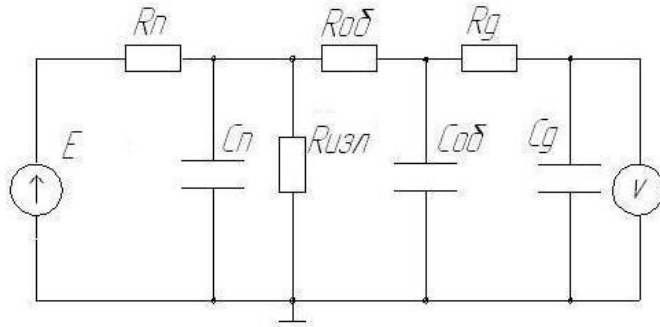


Рис. 3. Эквивалентная электрическая модель

Полученная эквивалентная электрическая модель позволяет получить передаточную функцию инструмента исследования $W_{И}(p)$, а именно каналов утечки тепла – нагрев подложки, тепловое излучение и инерционность датчика:

$$W_{И}(p) = \frac{[R_{ИЗЛ} / (R_{ИЗЛ} + R_{П})]}{[R_{ИЗЛ} R_{П} C_{П} / (R_{ИЗЛ} + R_{П})] p + 1} \cdot \frac{1}{R_{Д} C_{Д} p + 1}. \quad (3)$$

Данная модель позволяет воспользоваться методом аппаратной коррекции динамической погрешности в ДСК для установления характеристик исследуемого объекта. Из возможных способов подключения корректирующего звена [4] в данном случае наиболее подходящим с точки зрения простоты практической реализации можно считать последовательное подключение к термодатчику. При такой реализации передаточная функция скорректированного звена будет иметь вид

$$W_{К}(p) = W(p) \cdot W_{КЗ}(p) = \frac{1}{R_{ОБ} C_{ОБ} p + 1}, \quad (4)$$

где $W(p)$ – передаточная функция всей системы, приведенной на рис. 3; $W_{КЗ}(p)$ – передаточная функция корректирующего звена, которая в условиях поставленной задачи должна скорректировать влияние инструмента исследования на процесс измерения, а значит, будет выражаться как $1/W_{И}(p)$.

Из вида уравнения (3) следует, что передаточная функция корректирующего звена должна представлять собой последовательное соединение двух идеальных форсирующих звеньев типа $W_{Ф}(p) = Tp + 1$. Реализация таких звеньев физически невозможна, однако использование схем с передаточными функциями вида $(T_1 p + 1)/(T_2 p + 1)$ при условии $T_1 \ll T_2$ может с заданной мерой точности считаться форсирующим. В таком случае передаточная функция корректирующего звена может быть представлена как

$$W_{КЗ}(p) = \frac{[R_{ИЗЛ} R_{П} C_{П} / (R_{ИЗЛ} + R_{П})] p + 1}{[R_{ИЗЛ} / (R_{ИЗЛ} + R_{П})] [T_{П} p + 1]} \cdot \frac{R_{Д} C_{Д} p + 1}{T_{Д} p + 1}, \quad (5)$$

где $T_{П}$ и $T_{Д}$ – постоянные времени инерционных составляющих реальных форсирующих звеньев, намного меньших значений $R_{ИЗЛ} R_{П} C_{П} / (R_{ИЗЛ} + R_{П})$ и $R_{Д} C_{Д}$ соответственно.

Таким образом, при измерении количества выделившегося или поглощенного при фазовом переходе тепла в исследуемом веществе, а также определении его ди-

намической теплоемкости для уменьшения влияния динамической погрешности можно использовать электрическую схему корректирующего звена, имеющую передаточную функцию (5), подключенную последовательно к термодатчику.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Alaoui C.* Peltier Thermoelectric Modules Modeling and Evaluation / International Journal of Engineering (IJE). – Volume (5): Issue (1). – 2011. – p. 114–121.
2. *Кузнецов В.П., Скоробогатов А.С., Горгоц В.Г.* Математическая модель теплофизики двухконтурной теплоотводящей системы инструмента для наноструктурирующего выглаживания деталей // Сборник трудов Межд. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы современного машиностроения». Секция 2: Математическое моделирование прикладных задач. – 2014. – С. 149–155.
3. *Мощенский Ю.В., Нечаев А.С., Макаров И.В.* Распространение тепла в печи дифференциально-сканирующего калориметра // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 2(46). – С. 99–105.
4. *Зори А.А.* Теория, методы и средства повышения точности информационно-измерительных систем вертикального зондирования океана: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.11.16 // – СПб.: ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), 1992. – 34 с.

Статья поступила в редакцию 19 августа 2016 г.

MODEL TO REDUCE CORRECTION LINK DYNAMIC INACCURACY OF THE MEASURING CELL DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETER

A.S. Nechaev, R.R. Khusnutdinova, I.N. Nechaeva, E.A. Dmitrieva, V.N. Mitroshin

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

This paper considers the question of reducing the dynamic error of measurement of thermal characteristics of the substance during the flow of it endothermic and exothermic reactions, by correcting the information signal in a differential scanning calorimeter (DSC). Using the method of the thermal equivalent equation was obtained for the correction level in operator form. The resulting dependence reflects the major thermal inertia of the parts of the measuring unit and consumption of thermal energy in the surrounding space. This equation allows us to offer an electrical circuit for signal correction, coming from primary converters in hardware in the measuring unit DSC, reducing dynamic error effect on the measurement process

Keywords: *differential scanning calorimeter, dynamic error model, the method of thermal equivalents, correction signal.*

Alexander S. Nechaev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Rezeda R. Khusnutdinova, Graduate student.

Irina N. Nechaeva, Postgraduate Student.

Elizaveta A. Dmitrieva, Postgraduate Student.

Vladimir N. Mitroshin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.