

В. И. Корсун, д-р техн. наук, Н. А. Иконникова
(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ ДВАДЦАТИ ЧЕТЫРЕХ ОРДИНАТ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Спектральный анализ – один из универсальных методов исследования как технических систем вообще, так и качества питающего напряжения в частности [1]. Преобразование сигналов из временной области в частотную должно выполняться в режиме реального времени, что обуславливает необходимость использования дорогих цифровых сигнальных процессоров (ЦСП). Однако рост вычислительной производительности однокристалльных микроконтроллеров общего назначения (ОМК) совместно с разработкой новых подходов к спектральному анализу, учитывающих особенности контролируемых объектов, позволяет отказаться от использования ЦСП. Практическая ценность этого направления состоит и в том, что системы на основе ЦСП как правило имеют в своем составе набор вспомогательных микросхем (в том числе интерфейсных), обеспечивающих работоспособность и функциональную завершенность всей системы в целом, в то же время система минимальной конфигурации на основе ОМК состоит собственно из этой микросхемы и минимального набора пассивных элементов. В этой связи актуальной является задача разработки математических методов спектрального анализа, обеспечивающих достаточную точность при минимальном объеме вычислительных операций без использования комплексных чисел и учитывающих особенности контролируемых технологических и электроэнергетических объектов.

Для спектрального анализа был предложен оптимизированный для вычислений в двоичном коде метод 12-ти ординат [2]. Преимущество его по сравнению с известными алгоритмами быстрого дискретного преобразования Фурье (БПФ) состоит в том, что вычисления выполняются только над действительными числами, а недостаток – возможно определение амплитуд и фаз только лишь 5-ти гармонических составляющих. Значительно повысить информативность контроля позволят вычисления на основе 24-х ординат сигнала.

Представим анализируемую функцию y в виде конечного ряда

$$y = f(x) = a_0 + \sum_{i=1}^{12} a_i \cos ix + \sum_{i=1}^{11} b_i \sin ix, \quad (1)$$

где a_i , b_i – коэффициенты гармоник, определение выражений для которых является предметом статьи; $ix = 2\pi \frac{t}{T_i}$, T_i – период колебаний i -й гармонической составляющей.

Так как период функции y , равный 2π , разделен на 24 части, то интервал дискретизации аргумента x равен 15° , т.е. x принимает значения $0, 15, \dots, 345^\circ$. Определены аналитические представления базисных функций разложения для приведенного выше ряда аргументов.

Для определения коэффициентов гармоник выполним ряд подстановок, иллюстрируемых следующей схемой вычисления коэффициентов в двоичном коде с помощью однокристалльных микроконтроллеров:

$$\begin{array}{cccccccccccc} y_0 & y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 & y_7 & y_8 & y_9 & y_{10} & y_{11} & [8, 10, 12, 16 \text{ бит}] \\ y_{12} & y_{23} & y_{22} & y_{21} & y_{20} & y_{19} & y_{18} & y_{17} & y_{16} & y_{15} & y_{14} & y_{13} \\ \hline n_0 & n_1 & n_2 & n_3 & n_4 & n_5 & n_6 & n_7 & n_8 & n_9 & n_{10} & n_{11} & \text{суммы} & [9, 11, 13, 17] \\ m_0 & m_1 & m_2 & m_3 & m_4 & m_5 & m_6 & m_7 & m_8 & m_9 & m_{10} & m_{11} & \text{разности} \end{array}$$

$$\begin{array}{cccccccccccc} n_0 & n_1 & n_2 & n_3 & n_4 & n_5 & m_1 & m_2 & m_3 & m_4 & m_5 & [9, 11, 13, 17] \\ n_6 & n_{11} & n_{10} & n_9 & n_8 & n_7 & m_{11} & m_{10} & m_9 & m_8 & m_7 \\ \hline p_0 & p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 & v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & \text{суммы} & [10, 12, 14, 18] \\ q_0 & q_1 & q_2 & q_3 & q_4 & q_5 & u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 & \text{разности} \end{array}$$

$$\begin{array}{cccccc} p_0 & p_1 & p_2 & u_1 & u_2 & [10, 12, 14, 18] & k_1 & h_1 & [11, 13, 15, 19] \\ p_3 & p_5 & p_4 & u_5 & u_4 & & k_2 & h_2 \\ \hline k_0 & k_1 & k_2 & d_1 & d_2 & \text{суммы} & s & w & \text{суммы} & [12, 14, 16, 20] \\ l_0 & l_1 & l_2 & h_1 & h_2 & \text{разности} & t & c & \text{разности} \end{array}$$

Величины, входящие в окончательные формулы для определения коэффициентов гармонических составляющих, в данной схеме выделены полужирным шрифтом. В квадратных скобках приведены разрядности промежуточных переменных при использовании 8-, 10-, 12- и 16-разрядных входных данных. Таким образом, максимальная разрядность целочисленных переменных составляет 20 бит, что позволяет производить промежуточные вычисления над 3-байтными операндами. Однако для наиболее распространенных аналого-цифровых преобразователей, интегрированных в кристалл ОМК, разрядность представления данных обычно составляет 8...12 бит, что дает возможность выполнять все промежуточные вычисления над двухбайтными операндами.

Окончательные формулы для определения коэффициентов гармонических составляющих примут вид:

$$a_0 = \frac{1}{24}(k_0 + s), a_1 = \frac{1}{12} \left(m_0 + \frac{\sqrt{2+\sqrt{3}}}{2} q_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} q_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} q_3 + \frac{1}{2} q_4 + \frac{\sqrt{2-\sqrt{3}}}{2} q_5 \right), \dots,$$

$$a_{12} = \frac{1}{24}(l_0 - t); \quad b_1 = \frac{1}{12} \left(m_6 + \frac{\sqrt{2-\sqrt{3}}}{2} v_1 + \frac{1}{2} v_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} v_3 + \frac{\sqrt{3}}{2} v_4 + \frac{\sqrt{2+\sqrt{3}}}{2} v_5 \right); \dots,$$

$$b_{11} = \frac{1}{12} \left(-m_6 + \frac{\sqrt{2-\sqrt{3}}}{2} v_1 - \frac{1}{2} v_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} v_3 - \frac{\sqrt{3}}{2} v_4 + \frac{\sqrt{2+\sqrt{3}}}{2} v_5 \right).$$

Используя полученные коэффициенты гармоник a_i и b_i , можем определить амплитуды гармоник и коэффициент несинусоидальности напряжения.

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}; \quad K_{НС} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_{ном}} 100, \quad (2)$$

где U_i - действующее значение напряжения i -й гармоники в исследуемом напряжении; n - номер последней из учитываемых гармоник.

Для выпрямленных сигналов можно определить коэффициент пульсаций по гармонике максимальной амплитуды и по сумме 11 гармоник [3]:

$$k_{II} = \frac{A_i^{max}}{a_0}; \quad k_{II11} = \frac{\sum_{i=1}^{11} A_i}{a_0}, \quad (3)$$

где k_{II} , k_{II11} - коэффициенты пульсаций; a_0 - постоянная составляющая.

При спектральном анализе по методу 24-х ординат сигнал не должен содержать гармоники с частотой большей, чем частота 11-й гармоники. Поэтому необходимо выполнить сглаживание сигнала с шириной окна $\frac{n}{24}$ точек. Например, если на один период сигнала приходится 672 отсчета, а нужно использовать 24 ординаты, то следует выполнить сглаживание по $\frac{672}{24} = 28$ точкам.

Для этого использованы выражения:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{k=n-(13-i)}^{n-1} y_k + \sum_{k=0}^{14+i} y_k}{28} \quad \text{при } i = 0..12,;$$

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{k=i-13}^i y_k + \sum_{k=i}^{n-1} y_k + \sum_{k=0}^{14-(n-i)} y_k}{28} \quad \text{при } (n-14)..(n-1),$$

где k - промежуточная индексная переменная.

Формулы (4) выведены исходя из соображения, что для получения начальных усредненных ординат периодического сигнала можно использовать конечные точки периода. Аналогично, для получения усредненных ординат периодического сигнала в конце периода можно использовать начальные точки (рис. 1).

Для сравнения получим симметричный комплексный и амплитудный спектры:

$$c_i = \frac{1}{n} \sum_k y_k e^{-j(2\pi i/n)k}; \quad A_i = |c_i|, \quad (5)$$



Рис. 1. Усреднение начальных точек периодического сигнала

где i, k – индексные переменные; j – комплексный вектор единичной длины; A_i – амплитуда i -й гармоники.

На рис. 2 представлены графики исследуемых сигналов, удвоенные симметричные амплитудные спектры и спектры, полученные методом 24-х ординат с помощью разработанной вычислительной схемы.

Итак, разработана вычислительная схема определения гармонического состава технологических и электрических сигналов по методу 24-х ординат, позволяющая обеспечить контроль энергетических и технологических параметров в режиме реального времени с помощью цифровых систем на основе ОМК общего назначения. С помощью предложенной схемы выполнен анализ сигналов выпрямленного напряжения и тока при оперативном контроле полупроводниковых выпрямителей с различными схемами силовых частей, оценено влияние выпрямителей на сеть.

Список литературы

1. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1971. – Т. 1. – 316с.; 1972.-Т. 2.-288с.
2. Ткачев В.В., Яланский Алекс.А. Реализация быстрого преобразования Фурье методом двенадцати ординат с помощью однокристалльных микроконтроллеров // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 1999. – Вип.3 (67). – С. 61-67.
3. Овчаренко А. С., Розинский Д. И. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий. - К.:Техника, 1989.-287 с.