

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В.П. Щербаков, Г.И. Волович

METHOD FOR INCREASING OF RATE ACCURACY OF FREQUENCY RESPONSE CHARACTERISTICS OF TECHNICAL OBJECTS

V.P. Shcherbakov, G.I. Volovich

В статье рассматривается метод, позволяющий значительно сократить объем вычислений и требуемых ресурсов измерительно-вычислительного блока, а также повысить точность определения частотных характеристик. Проводится сравнение результатов измерений без использования и с использованием разработанного метода.

Ключевые слова: частотные характеристики, технический объект, повышение точности.

Method, which makes it possible to cut down the amount of calculation and required resources of metric and calculating unit and to increase accuracy of determination of frequency response characteristics, is considered in the article. Comparison of the results of measurement without any use of a developed method and with the use of it is performed.

Keywords: frequency response characteristics, technical object, accuracy increase.

Введение

Определение основных показателей технических объектов и систем путем анализа частотных характеристик позволяет не только определить режимы надежного функционирования этих систем, но и использовать полученную информацию для модернизации существующих объектов и для дальнейшего проектирования более совершенных объектов.

Методы и алгоритмы теории автоматического управления позволяют получать искомые показатели по информации о входном и выходном сигналах исследуемого объекта. При проведении экспериментов с реальными техническими объектами значения входного и выходного сигналов регистрируются аналого-цифровыми преобразователями (АЦП). В отличие от данных, полученных при моделировании исследуемой системы в ускоренном масштабе времени, реальные экспериментальные данные не только регистрируются в реальном масштабе времени, но и содержат как полезный сигнал, так и случайные составляющие, в ряде случаев значительно искажающие полезный сигнал. В связи с этим необходимо рассмотреть основные особенности получения частотных характеристик реальных технических объектов и систем.

Описание метода

Получение частотных характеристик осуществляется путём подачи на вход исследуемой системы сформированного генератором гармонического сигнала U с последующим проведением гармонического анализа входа X и выхода Y исследуемого объекта:

$$U(t) = U_M \sin(\omega t + \psi_U), \quad (1)$$

$$X(t) = X_M \sin(\omega t + \psi_X), \quad (2)$$

$$Y(t) = Y_M \sin(\omega t + \psi_Y), \quad (3)$$

где ω – частота генератора; U_M , ψ_U – амплитуда и смещение фазы генератора; X_M , ψ_X – амплитуда и смещение фазы входного сигнала объекта; Y_M , ψ_Y – амплитуда и смещение фазы выходного сигнала объекта.

Гармонический сигнал $U(t)$ формируется генератором, построенным с применением цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) и позволяющим на основе табличных значений функции синуса с использованием питающего напряжения реализовать функциональную зависимость (1) для требуемых значений амплитуды, частоты и смещения фазы.

Щербаков Василий Петрович – аспирант кафедры систем управления, Южно-Уральский государственный университет; vs_develop@mail.ru

Волович Георгий Иосифович – д-р техн. наук, профессор кафедры систем управления, Южно-Уральский государственный университет; g_volovich@mail.ru

Vasily Petrovich Shcherbakov – postgraduate student of Control Systems Department of South Ural State University; vs_develop@mail.ru

Georgy Iosifovich Volovich – Doctor of Science (Engineering), professor of Control Systems Department of South Ural State University; g_volovich@mail.ru

Сигналы $X(t)$ и $Y(t)$ регистрируются АЦП в виде набора дискретных значений, каждое из которых соответствует текущей фазе генератора.

Тогда для входного (2) и выходного (3) сигналов путём Фурье-анализа [1] рассчитываются синфазные и квадратурные составляющие сигналов:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} X &= \int_T X(t) \cos(\omega t) dt = \\ &= \sum_{j=1}^N \frac{X_{j-1} \cos((j-1)\omega\Delta t) + X_j \cos(j\omega\Delta t)}{2} \Delta t, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im} X &= \int_T X(t) \sin(\omega t) dt = \\ &= \sum_{j=1}^N \frac{X_{j-1} \sin((j-1)\omega\Delta t) + X_j \sin(j\omega\Delta t)}{2} \Delta t, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} Y &= \int_T Y(t) \cos(\omega t) dt = \\ &= \sum_{j=1}^N \frac{Y_{j-1} \cos((j-1)\omega\Delta t) + Y_j \cos(j\omega\Delta t)}{2} \Delta t, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im} Y &= \int_T Y(t) \sin(\omega t) dt = \\ &= \sum_{j=1}^N \frac{Y_{j-1} \sin((j-1)\omega\Delta t) + Y_j \sin(j\omega\Delta t)}{2} \Delta t, \end{aligned} \quad (7)$$

где T – время интегрирования; N – число значений сигналов за время интегрирования; Δt – шаг интегрирования.

Построение логарифмической амплитудной и частотной характеристик осуществляется по значениям модуля и аргумента для исследуемых частот, которые определяются по следующим выражениям:

$$L = 10 \lg \frac{(\operatorname{Re} Y)^2 + (\operatorname{Im} Y)^2}{(\operatorname{Re} X)^2 + (\operatorname{Im} X)^2} \quad (8)$$

и $\varphi = \arctg\left(\frac{\operatorname{Im} Y}{\operatorname{Re} Y}\right) - \arctg\left(\frac{\operatorname{Im} X}{\operatorname{Re} X}\right).$

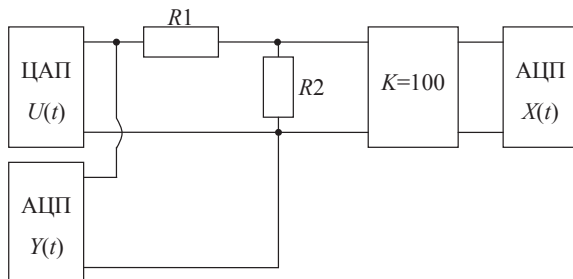


Рис. 1. Схема исследования технического объекта

Рассмотрим результаты применения формул с (4) по (7) к получаемым сигналам без использования и с использованием дополнительных расчётов. Для получения результатов проведём эксперимент с техническим объектом, схема исследования которого представлена на рис. 1.

С целью упрощения расчётов выберем значения сопротивлений $R1$ и $R2$ равными соответственно 10000 и 101,0101 Ом. Величина аргумента равна нулю, а величина логарифмического модуля рассчитывается по формуле

$$L = 20 \lg(1 + R1 / R2). \quad (9)$$

Подставляя значения сопротивлений, получим теоретическое значение логарифмического модуля, равное 40 дБ. Рассмотрим результаты практического исследования технического объекта. Предположим, что ЦАП генерирует гармонический сигнал высокой точности единичной амплитуды без фазового смещения, блоки АЦП являются 16-разрядными устройствами, а в канале X включён усилитель с коэффициентом усиления 100.

Проведем исследование на генерируемой частоте 3 Гц в течение одной секунды. Графики входного и выходного сигналов представлены на рис. 2.

Для полученной выборки сигналов последовательно применяются формулы с (4) по (8). Получим результаты вычислений и рассчитаем погрешность результатов относительно их теоретических значений:

$$\begin{aligned} L_{R1} &= 36,852 \text{ дБ}, \varphi_{R1} = 0,809^\circ, \\ \delta_{R1} &= \left| \frac{L_{R1} - L}{L} \right| \cdot 100 \% = 7,87\%, \Delta\varphi_{R1} = 0,809^\circ. \end{aligned}$$

Погрешности измерения обусловлены включением в измерительную цепь канала X усилителя, который не только усиливает полезный входной сигнал, в котором присутствуют помехи, но и вносит случайные составляющие. Кроме того, вычисление значений функций синуса и косинуса для каждого значения выборки приводит к накопле-

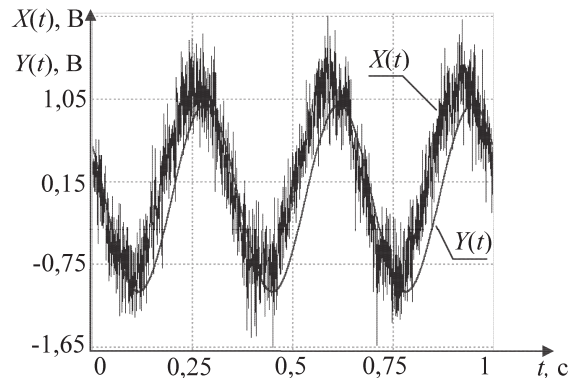


Рис. 2. Графики входного и выходного сигналов объекта

нию дополнительной погрешности, связанной с неточностью представления значений функций в вычислительном устройстве.

Для снижения погрешностей возможно применение дополнительных расчётов, состоящих в накоплении фиксированного числа выборок и с последующим нахождением их среднего значения. Полученное от АЦП дискретное значение сигнала с учётом значения текущей фазы генератора добавляется к 32-разрядному значению в массиве (значение фазы генератора является номером элемента массива), который до начала измерения принимается нулевым. Кроме того, для каждого элемента массива ставится в соответствие 16-разрядная переменная, равная числу накопленных значений входных выборок в текущем элементе массива. Тогда на хранение каждого элемента требуется минимум 48 бит или, в случае хранения значений функции синус для четверти периода, 52 бит. По окончании измерения каждое накопленное значение необходимо разделить на их число для получения усредненного значения для текущей фазы.

Так как в системе используются 16-разрядные устройства АЦП и ЦАП, то дискретное значение фазы генератора находится в диапазоне от 0 до 65535. В связи с необходимостью хранения информации объёмом более 384 кБ следует уменьшить данный диапазон до приемлемых величин. Уменьшение размера массива до 2048 элементов приведет к некоторому увеличению погрешности, но позволит значительно сократить требуемый объём памяти до 13 кБ и ускорить процесс вычислений в 32 раза. Полученные усреднённые значения элементов массива представляются в виде функциональной зависимости амплитуды от фазы (рис. 3).

Заключение

Сравнивая результаты двух экспериментов, следует, что применение дополнительных расчётов позволяет снизить относительную погрешность измерений логарифмического модуля до 0,21 %.

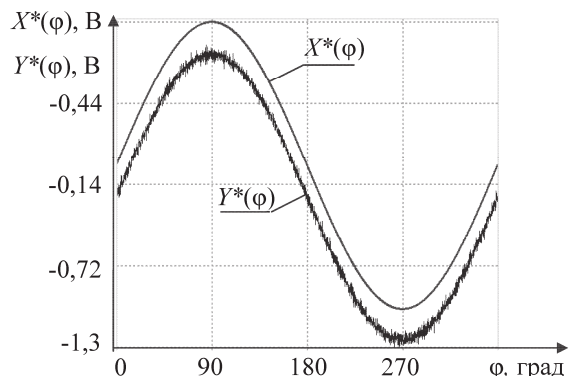


Рис. 3. Графики преобразованных сигналов объекта

Получим результаты применения дополнительного расчёта:

$$L_{R2} = 39,916 \text{ дБ}, \varphi_{R2} = 0,0002^\circ,$$

$$\delta_{R2} = \left| \frac{L_{R2} - L}{L} \right| \cdot 100 \% = 0,21 \%, \Delta\varphi_{R2} = 0,0002^\circ.$$

Таким образом, предложенный метод позволяет значительно повысить точность определения частотных характеристик технических объектов.

Литература

1. Вавилов, А.А. Экспериментальное определение частотных характеристик автоматических систем / А.А. Вавилов, А.И. Солодовников. — М.: Госэнергоиздат, 1963. — С. 171–179.

Поступила в редакцию 12 сентября 2012 г.