

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

## ДЛЯ ОЦЕНКИ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАТОРОВ

Анализ методов измерения частотных характеристик физических систем и моделирование их аналитических выражений позволили ЗАО "Руднев-Шиляев" создать измерительный комплекс для оценки частотных характеристик резонаторов с высокой добротностью.

Измерительные системы на базе ПК, предлагаемые ЗАО "Руднев-Шиляев", предназначены для инструментального решения широкого спектра задач\*. Подход к формированию измерительных систем, разрабатываемых и изготавливаемых ЗАО, можно рассмотреть на конкретном примере. Исходные данные:

Диапазон исследуемых частот	100 Гц–10 МГц
Диапазон напряжений, подаваемых на вход исследуемого объекта	10 мВ–100 В
Диапазон напряжений, снимаемых с выхода исследуемого объекта	10 мВ–100 В
Мгновенный динамический диапазон	90 дБ
Разрешение по частоте	0,003%

Для этих условий измерения необходимо оценить частотную характеристику резонатора с высокой добротностью.

### АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Пусть дана некоторая линейная система с постоянными параметрами, описываемая дифференциальным уравнением n-го порядка:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 = x(t).$$

Решение этого уравнения по методу интеграла Фурье имеет вид

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{S_x}{Z} e^{j\omega t} d\omega,$$

а выражение для комплексной частотной характеристики линейной системы с постоянными параметрами можно записать как

$$K(\omega) = \frac{1}{Z(\omega)} = \frac{S_y}{S_x}, \quad (1)$$

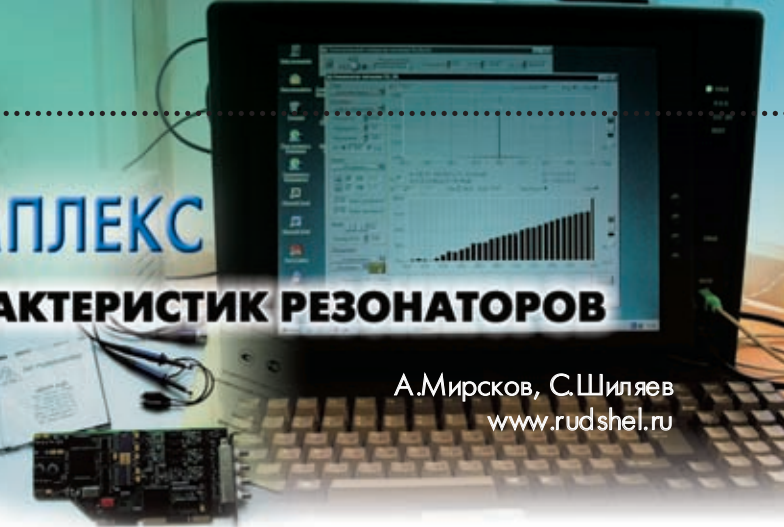
где  $S_x, S_y$  – спектры функций  $x(t), y(t)$ , соответственно.

Согласно выражению (1) для оценки частотной характеристики по методу Фурье необходимо определить комплексные спектры входного воздействия и реакции системы на это воздействие. В случае импульсной нагрузки, когда на систему воздействует единичная дельта-функция  $x(t) = \delta(t)$ , для которой  $S_x = 1$ , выражение (1) примет вид

$$K(\omega) = S_y. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) могут быть использованы для практической оценки частотных характеристик физических линейных систем с постоянными параметрами. При этом в качестве воздействующей на систему функции может быть выбран либо гармонический сигнал с дис-

\* ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №6, с.82–84.



А.Мирсков, С.Шиляев  
www.rudshel.ru

кретно изменяющейся частотой, либо широкополосный шум в ограниченной полосе или импульсный сигнал ограниченной длительности.

Для резонатора как системы с одной степенью свободы при определении частотной характеристики можно воспользоваться дополнительной информацией – аналитическим выражением для комплексной частотной характеристики, которое можно получить, составив и решив дифференциальное уравнение для схемы замещения

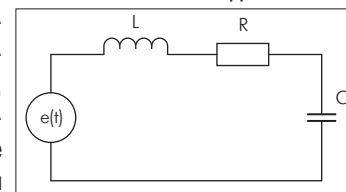


Рис. 1. Схема замещения резонатора

резонатора. Схема замещения состоит из последовательно включенных  $L, R$  и  $C$ . Если подать на резонатор сигнал  $e(t)$  от внешнего источника (рис. 1), то в такой системе возникнет колебательный процесс, который может быть описан дифференциальным уравнением вида

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = e(t).$$

Применив к обеим частям равенства Фурье-преобразование и проведя ряд упрощений, получим аналитическое выражение для модуля частотной характеристики резонатора:

$$|K(\alpha)| = \frac{1}{\sqrt{(1-\alpha^2)^2 + 4\beta^2\alpha^2}} \quad (3)$$

и для фазы:

$$\varphi(\alpha) = -\arctg\left(\frac{2\beta\alpha}{1-\alpha^2}\right). \quad (4)$$

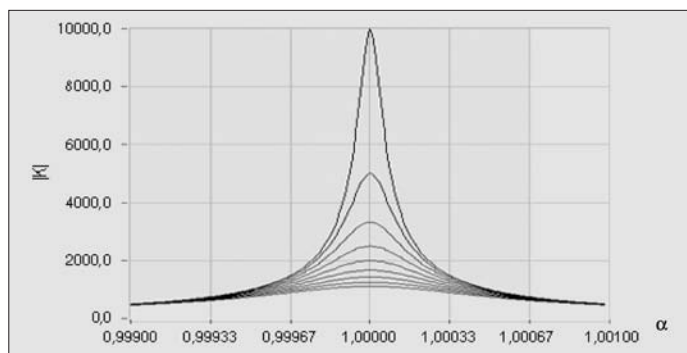
Применив обратное преобразование Фурье и допустив, что  $\beta \ll 0$ , можно получить приближенное равенство для импульсной реакции резонатора  $g(t) = e^{-\omega\beta t} \sin \omega_0 t$ .

На рис.2 приведены результаты моделирования выражения (3) для значений  $\alpha = 0,999 \div 1,001$  при параметре, характеризующем демпфирование,  $\beta = 0,00005 \div 0,0005$ .

Согласно выражениям (3) и (4) для описания частотной характеристики резонатора достаточно определить два параметра:  $2\beta$ , характеризующий демпфирование, и  $f_0$  – собственную частоту колебаний системы. Причем максимум модуля частотной характеристики резонатора  $\mu$  соответствует условию  $\alpha = 1$ , т.е.  $f = f_0$  и равен:

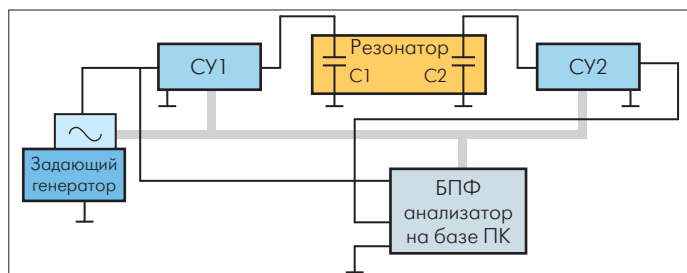
$$\mu = |K(\alpha = 1)| = \frac{1}{2\beta}.$$

Следовательно, если двигаться по оси абсцисс, дискретно изменяя частоту гармонического сигнала, подаваемого на вход исследуемого резонатора, и фиксируя при этом отношение действующих значений сигналов выхода и входа, то максимальное отношение  $\mu$  будет соответствовать собственной частоте резонатора  $f_0$ , а демпфирование можно оценить как  $1/\mu$ .



**Рис.2. Модуль передаточной функции резонатора  $K(\alpha)$  для  $\beta = 0,00005 \div 0,0005$**

Измерительный комплекс для оценки частотных характеристик резонаторов (рис.3) включает в себя персональный компьютер (ПК), который обеспечивает управление задающим генератором гармонических сигналов, согласующими усилителями (СУ1 и СУ2), а также БПФ-обработкой гармонических сигналов генератора и реакцией резонатора на входное гармоническое воздействие.



**Рис.3. Блок-схема измерительного комплекса для оценки частотных характеристик резонаторов высокой добротности**

Для отыскания  $\mu$ -максимума модуля частотной характеристики резонатора и определения параметров  $f_0$  и  $2\beta$  можно пользоваться ручным сканированием частоты или градиентным методом поиска (автоматический режим).

#### Технические характеристики комплекса

Полоса пропускания.....	10 МГц
Диапазон напряжений, подаваемых на вход исследуемого объекта.....	10 мВ–20 В
Диапазон напряжений, снимаемых с выхода исследуемого объекта.....	10 мВ–100 В
Мгновенный динамический диапазон.....	>100 дБ
Разрешение по частоте.....	0,0025 Гц
Режимы измерений.....	ручной, автоматический

#### КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ И СОСТАВ СИСТЕМЫ

Измерительный комплекс построен на базе переносного компьютера типа Portable, в который установлена двухканальная плата аналого-цифрового преобразования ЛА-н20-12РС1 (АЦП 12 разрядов; два синхронных канала; частота дискретизации 50; 25; 12,5; 0,391 МГц; диапазоны входных напряжений  $\pm 2$  В;  $\pm 1$  В;  $\pm 0,4$  В;  $\pm 0,2$  В, буфер 128 кСлов на канал), задающий генератор гармонических сигналов на основе DDS – прямого синтеза сигналов (напряжение выхода 0,05–5 В, полоса 10 МГц, разрешение по частоте 0,0025 Гц), входной и выходной согласующие усилители (напряжение входа 10 мВ–100 В, напряжение выхода 50 мВ–2 В, полоса пропускания 0–10 МГц, коэффициенты усиления 0,1; 1; 10).

Модули согласующих усилителей и генератора сигнала выполнены в виде отдельных внешних блоков со своими источниками питания. Управление этими модулями, сбор и обработку данных обеспечивает программная оболочка – интерфейс пользователя.

Питание измерительного комплекса – от стандартной сети переменного тока 220 В, 50 Гц. ○