

Рекомендуется выбор лучшей модели осуществлять в следующей последовательности: коэффициент парной корреляции между данными эксперимента и модели, значимость уравнения регрессии по критерию Фишера, наибольшее значение скорректированного коэффициента детерминации, проверка модели на условие гетероскедастичности по критериям Уайта и Дарбина-Уотсона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дровозова Т.И., Игнатъев М.В., Гутенёв В.В., Денисов В.В. Основы энергосберегающей технологии фотохимического обеззараживания воды и напитков на её основе. Монография. – Новочеркасск: НГМА, 2006. – 196с. – Деп. в ВИНТИ. №1414-В2006.
2. Дрейпер Н.Р., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Диалектика, 2007. – 912 с.
3. Фёрстер Э., Рёнц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 302 с.
4. Ниворожкина Л.И., Кокина Е.П., Кравцов В.Б. Эконометрическое моделирование с использованием пакета программ «Econometric Views». – Ростов-на-Дону: РГЭУ, 2005. – 108 с.

Игнатъев Михаил Викторович

Новочеркасская государственная мелиоративная академия (НГМА).
E-mail: mig-77@inbox.ru.
346428, г. Новочеркасск, ул. Пушкинская, 111.
Тел.: 88635222714; 88635242960.

Игнатъев Виктор Михайлович

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ).
E-mail: mig-77@inbox.ru.
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.
Тел.: 88635255628.

Ignatjev Mihail Viktorovich

Novocherkassk State Land Reclamation Academy.
E-mail: mig-77@inbox.ru.
111, Pushkinskay street, Novocherkassk, 346428, Russia.
Phone: +78635222714; +78635242960.

Ignatjev Viktor Mihailovich

Higher Professional Education «South Russia State Technical University».
E-mail: mig-77@inbox.ru
132, Prosvechniy street, Novocherkassk, 346428, Russia.
Phone: +78635255628.

УДК 621.315

В.Л. Земляков

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

Получены соотношения и предложены новые методы определения и контроля параметров пьезоэлектрических резонаторов.

Пьезокерамический элемент; преобразователь; пьезоэлектрический резонатор; определение параметров.

V.L. Zemlyakov

METHODS TO DETERMINE AND CHECK PARAMETERS OF PIEZOELECTRIC RESONATORS

Relations are obtained and new methods to determine and check parameters of piezoelectric resonators are suggested.

Piezoceramic element; transducer; piezoelectric resonator; parameters determination.

Пьезокерамические элементы (ПКЭ) и пьезопреобразователи широко используют в качестве пьезорезонаторов, представляющих собой колебательные системы с резко выраженными резонансными свойствами, в которых механические колебания возникают за счет электрической энергии, получаемой от генератора вследствие пьезоэффекта. В этом случае для анализа их характеристик широко используется метод электромеханических аналогий и представление в виде эквивалентных электромеханической или электрической схем с сосредоточенными параметрами, показанных без учета диэлектрических потерь на рис. 1,а,б.

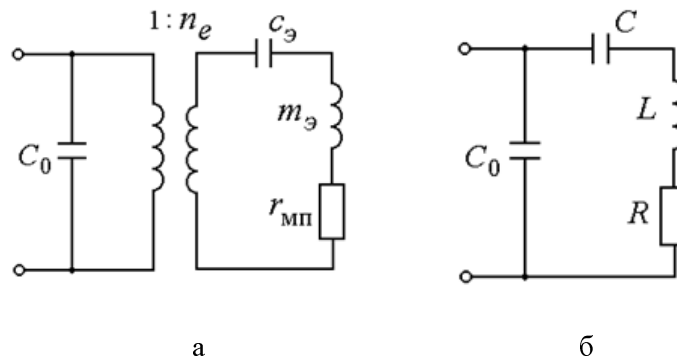


Рис. 1. Эквивалентные электромеханическая (а) и электрическая (б) схемы ПКЭ

Емкость $C = c_э n_e^2$, индуктивность $L = m_э / n_e^2$ и активное сопротивление $R = r_{мп} / n_e^2$, характеризующие динамические свойства, и называют динамическими.

Основная особенность эквивалентной электрической схемы ПКЭ, показанной на рис. 1,б – наличие двух резонансных цепей и двух колебательных контуров: последовательного RLC контура и параллельного $RLCC_0$ контура. Это приводит к тому, что эта электрическая схема обладает двумя видами резонансов: механическим резонансом f_p или $\omega_p = 2\pi f_p$ (последовательный колебательный контур) и электромеханическим (параллельный колебательный контур). Поскольку проводимость последовательного колебательного контура на частоте механического резонанса максимальна, а проводимость параллельного колебательного контура на частоте его резонанса, наоборот, минимальна, то электромеханический резонанс называют антирезонансом и соответствующую резонансную частоту – частотой антирезонанса ω_a . Справедливы соотношения

$$\omega_p^2 = \frac{1}{LC}, \quad \omega_a^2 = \frac{1}{L} \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C_0} \right). \quad (1)$$

Пьезорезонаторы характеризуется тремя видами параметров:

- ◆ электрические параметры: емкость на низкой частоте

$$C^T = C_0 + C, \quad (2)$$

- ◆ механические параметры: механическая добротность

$$Q_M = \frac{1}{\omega_p RC}, \quad (3)$$

- ◆ параметры, связывающие электрическую и механическую стороны и характеризующие процесс преобразования электрической энергии в механическую (и наоборот, механической в электрическую).

К последнему виду параметров, во-первых, относится коэффициент электро-механической трансформации n_e , во-вторых, эффективный коэффициент электромеханической связи k_e , и, в-третьих, фактор качества M . Справедливы следующие соотношения [1]:

$$k_e^2 = \frac{C}{C_0 + C} = \frac{C}{C^T} = \frac{1}{r_c + 1}, \quad (4)$$

$$n_e^2 = m_э \omega_p^2 C = m_э \omega_p^2 C^T k_e^2, \quad (5)$$

$$M = \frac{1}{\omega_p RC_0} = \frac{Q_M}{r_c} = \frac{k_e^2}{1 - k_e^2} Q_M, \quad (6)$$

где $r_c = C_0/C$ – емкостное отношение.

До недавнего времени для определения и контроля параметров пьезорезонаторов использовали метод «резонанса–антирезонанса» и метод круговых диаграмм [1], основанные на определении характерных точек на частотной характеристике проводимости ПКЭ или пьезопреобразователя. В частности, определив точки максимума и минимума модуля проводимости и отождествляя их с частотами резонанса и антирезонанса, эффективный коэффициент электромеханической связи определялся формулой [1]

$$k_e^2 = \frac{\omega_a^2 - \omega_p^2}{\omega_a^2}, \quad (7)$$

по которой при дополнительном измерении емкости на низкой частоте определялся и коэффициент электромеханической трансформации.

Определение параметров пьезорезонаторов по характерным точкам частотной характеристики проводимости затруднено, когда четкая локализация этих точек отсутствует. Кроме того, процедура поиска характерных точек и последующие расчеты не позволяют создавать простые автоматизированные средства измерений для экспресс-диагностики пьезорезонаторов.

Используя методы определения параметров элементов эквивалентной электрической схемы, в частности, динамической емкости, приведенные в [2], можно сформулировать другие методы определения параметров пьезорезонаторов, свободные от указанных выше недостатков. Например, можно записать формулы

$$n_e^2 = m_{\text{э}} \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} G(\omega) d\omega, \quad (8)$$

$$n_e^2 = m_{\text{э}} \frac{2}{U_0} \left(- \frac{di_{\text{д}}(t)}{dt} \Big|_{t=0} \right), \quad (9)$$

где $m_{\text{э}}$ – эквивалентная масса, $G(\omega)$ – активная составляющая проводимости,

$\left(- \frac{di_{\text{д}}(t)}{dt} \Big|_{t=0} \right)$ – скорость изменения тока по огибающей в переходном процессе

при воздействии на пьезорезонатор радиоимпульсом.

Опираясь на формулу (8), можно сформулировать следующий метод определения коэффициента электромеханической трансформации: возбуждают одномерные моды колебаний в пьезорезонаторе путем воздействия на него электрическим напряжением с переменной частотой, измеряют площадь под кривой активной составляющей проводимости (интеграл), по которой определяют n_e .

В результате применения метода за одно качание частоты в области механического резонанса формируется напряжение постоянного уровня, равное площади под кривой активной составляющей проводимости и пропорциональное квадрату n_e . Это напряжение позволяет автоматически управлять исполнительными механизмами для разбраковки пьезорезонаторов.

Наиболее быстродействующий метод определения n_e можно сформулировать, опираясь на формулу (9).

Возбуждают в пьезорезонаторе механические колебания путем подачи на его электроды радиоимпульса известной амплитуды с прямоугольной огибающей и частотой заполнения, равной частоте механического резонанса. В момент окончания радиоимпульса замыкают электроды и регистрируют возникающий переходной процесс. Выделяют огибающую переходного процесса. Измеряют по этой огибающей скорость изменения тока вначале переходного процесса, а n_e определяют по формуле (9).

Представленные результаты позволяют при известной емкости на низкой частоте определять эффективный коэффициент электромеханической связи. Для этого достаточно воспользоваться соотношением

$$k_e^2 = \frac{C}{C^T} = \frac{1}{m_{\text{э}} \omega_p^2} \frac{n_e^2}{C^T}.$$

На рис. 2 в обобщенном виде представлены методы определения параметров пьезорезонаторов.



Рис. 2. Методы определения параметров пьезорезонаторов

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / под ред. С.И. Пугачева. – Л.: Судостроение, 1984. – 356 с.
2. Земляков В.Л. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении: Монография. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ. 2009. – 180 с. (Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 5).

Земляков Виктор Леонидович

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет».

E-mail: decanat@fvf.sfedu.ru.

344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42.

Тел.: 88632633158; 88632638498.

Zemlyakov Victor Leonidovich

Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University".

E-mail: decanat@fvt.sfedu.ru.

105/42, Bolshaya Sadovaya street, 344006, Rostov-on-Don, Russia.

Phone: +78632633158; +78632638498.

УДК 681.2

А.В. Вовна, А.А. Зори, В.П. Тарасюк

**АЛГОРИТМ И ИМИТАЦИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

Предложен алгоритм и имитационная математическая модель измерительного канала температуры, которые позволяют производить альтернативный выбор вариантов схемных решений и дают возможность подбора наиболее приемлемых элементов структуры для различных измерительных каналов информационно-измерительных приборов и систем.

Алгоритм; математическая модель; имитационное моделирование; измерительный канал.

A.V. Vovna, A.A. Zory, V.P. Tarasyk

**ALGORITHM AND SIMULATION MATHEMATICAL MODEL
OF MEASURING CHANNEL OF TEMPERATURE FOR THE
EXPERIMENTAL DATA PROCESSING**

An algorithm and simulation mathematical model measuring channel of temperature is offered, which allow to produce the alternative choice of variants of scheme decisions and enable selection of the most acceptable elements of structure for different measuring channels of informatively-measuring devices and systems.

Algorithm; mathematical model; imitation design; measuring channel

Общая постановка проблемы. В данный момент в промышленности актуальным вопросом является диагностика технического состояния оборудования, например, перегрева рабочих органов. Своевременное обнаружение аномального состояния препятствует созданию аварийной ситуации и остановке производства, благодаря быстрдействию системы мониторинга. В ряде случаев влияние температуры на рабочие органы приводит к изменению их физических параметров, например, температурного коэффициента линейного расширения металла, что приводит к аварийным ситуациям.

Постановка задач исследования. Данную проблему позволяют решать методы неразрушающего контроля, в основе которых лежит принцип обработки сигналов измерительных каналов (виртуальный и реальный). Как правило, измерительный канал представляет собой высокоточный (прецизионный) измерительный преобразователь с датчиками, которые могут быть включены непосредственно или посредством мостовых схем. Расчеты и обеспечение требуемых метрологических характеристик и параметров измерительного канала целесообразно проводить с использованием математической модели и имитационного моделирования [1].

Основным вопросом при составлении математической модели является обеспечение ее адекватности реальному объекту. Разработанная математическая модель должна, с одной стороны, отражать свойства реального измерительного кана-