

А.М. Гуськов, Е.А. Коровайцева

ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ДИНАМИКИ КВАРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА

Предложена электромеханическая модель кварцевого генератора, позволяющая анализировать влияние механических факторов на его эксплуатационные характеристики. Приведен пример использования предложенной модели при исследовании динамики генератора, находящегося под воздействием внешних низкочастотных вибраций.

E-mail: gouskov_am@mail.ru; katrell@mail.ru

Ключевые слова: кварцевый генератор, кварцевый резонатор, нестабильность частоты, спектр сигнала.

Кварцевый генератор (КГ) представляет собой генератор электрических колебаний, основное требование к которому заключается в обеспечении высокой стабильности частоты. Важнейшим элементом генератора является кварцевый резонатор. Резонатор представляет собой кварцевую пластину с напыленными на ее поверхность электродами, находящуюся в загерметизированном корпусе (рис. 1). Кварцевая пластина соединяется с помощью электродов с электрической цепью генератора. Частота колебаний кварцевой пластины и определяет частоту колебаний выходного сигнала генератора. Кварцевый генератор является нелинейной системой, так как в цепи имеется транзистор — элемент с нелинейной характеристикой.

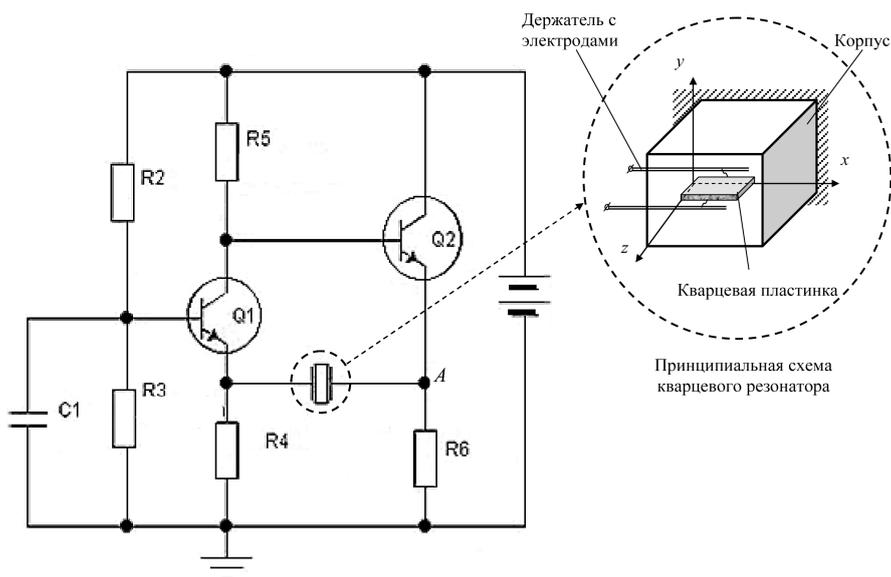


Рис. 1. Типовая схема кварцевого генератора

Типовая схема кварцевого генератора, представленная на рис. 1, включает в себя два транзистора $Q1$ и $Q2$. Выходной сигнал — электрический потенциал в узле A .

Основным показателем качества кварцевого генератора является относительная нестабильность частоты — относительное изменение частоты генератора при воздействии дестабилизирующих факторов в течение определенного времени [1]:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_2 - f_1}{f},$$

где Δf — абсолютная нестабильность; f — частота генератора; f_1 — значение частоты до воздействия дестабилизирующего фактора; f_2 — значение частоты после воздействия дестабилизирующего фактора.

До настоящего времени исследования кварцевого генератора ограничивались рассмотрением его электрической схемы. При таком подходе влияние динамики механической части генератора — кварцевого резонатора — не учитывается, ввиду чего не удастся выявить связь между механическими и электрическими параметрами кварцевого генератора, а также влияние внешних механических воздействий.

Основной целью данной работы является разработка и анализ расчетной модели КГ, позволяющей учесть влияние механических факторов на динамику генератора. В качестве примера рассмотрено влияние одного из важнейших воздействий на генератор — внешней низкочастотной вибрации (порядка десятков или сотен Гц).

Моделирование кварцевого генератора. Представим кварцевый генератор совокупностью механической модели кварцевого резонатора и электрической модели схемы генератора. При этом модель резонатора представлена анизотропной пьезоэлектрической пластинкой SC-среза, для которой колебания сдвига по толщине в плоскости Oxy (см. рис. 1) являются основным типом колебаний. Отметим, что в силу особенностей SC-среза деформации пластинки в направлении оси z пренебрежимо малы по сравнению с деформациями в направлениях осей x и y . При моделировании учитываем также давление в корпусе, в котором находится пластинка.

Уравнения, описывающие динамику предлагаемой модели генератора, можно разбить на три группы.

1. Группа уравнений механики пьезоэлектрической сплошной среды для случая плоского деформированного состояния [2]. Эта группа включает в себя:

уравнения движения

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= \rho \ddot{u}_x, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= \rho \ddot{u}_y;\end{aligned}\tag{1}$$

уравнения вынужденной электростатики

$$\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} = 0, \quad E_y = -\frac{\partial \psi}{\partial y};\tag{2}$$

уравнения состояния

$$\begin{aligned}\sigma_x &= c_{11}^E \varepsilon_x + c_{12}^E \varepsilon_y + c_{16}^E \varepsilon_{xy} - e_{21} E_y, \\ \sigma_y &= c_{12}^E \varepsilon_x + c_{22}^E \varepsilon_y + c_{26}^E \varepsilon_{xy} - e_{22} E_y, \\ \tau_{xy} &= c_{16}^E \varepsilon_x + c_{26}^E \varepsilon_y + c_{66}^E \varepsilon_{xy} - e_{26} E_y, \\ D_x &= e_{12}^S E_y + e_{11} \varepsilon_x + e_{12} \varepsilon_y + e_{16} \varepsilon_{xy}, \\ D_y &= e_{22}^S E_y + e_{21} \varepsilon_x + e_{22} \varepsilon_y + e_{26} \varepsilon_{xy};\end{aligned}\tag{3}$$

соотношения Коши

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}.\tag{4}$$

Здесь в (1)—(4) приняты обозначения: u_x, u_y — компоненты вектора перемещений $\mathbf{u} = \{u_x, u_y\}^T$; $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ — компоненты тензора напряжений; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$ — компоненты тензора деформаций; D_x, D_y — компоненты вектора электрической индукции $\mathbf{D} = \{D_x, D_y\}^T$; E_y — напряженность электрического поля; ψ — функция электростатического потенциала; ρ — плотность материала; $c_{ij}^E (i = \overline{1,6}; j = \overline{1,6})$ — составляющие тензора коэффициентов жесткости, измеренные при постоянном электрическом поле; $e_{ij} (i = \overline{1,3}; j = \overline{1,6})$ — составляющие тензора пьезоэлектрических коэффициентов; $\varepsilon_{ij}^S (i = \overline{1,3}; j = \overline{1,3})$ — составляющие тензора диэлектрических проницаемостей.

2. Волновое уравнение, учитывающее давление воздуха на поверхностях пластинки [3]:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0,\tag{5}$$

где c — скорость звука; p — давление воздуха в текущей точке. Уравнение (5) учитывается в граничных условиях системы (1)—(4).

3. Группа уравнений электростатики и электродинамики для электрической цепи [4]:

для узлов схемы генератора (первый закон Кирхгофа)

$$\pm \sum_{k=1}^n i_k = 0,$$

где i_k — ток, втекающий в узел (вытекающий из него) схемы генератора; n — число токов в узле;

для контуров схемы генератора (второй закон Кирхгофа)

$$\pm \sum_{k=1}^m U_k = \pm \sum_{k=1}^p E_k,$$

где U_k — напряжение на участке цепи рассматриваемого контура схемы генератора; m — число контуров; E_k — ЭДС источника в рассматриваемом контуре; p — число источников;

для типовых элементов цепи (сопротивления R и емкости C)

$$i = \frac{U}{R}, \quad i = C \frac{dU}{dt}.$$

Граничные условия задачи сформулированы отдельно для «электрической» и «механической» групп уравнений. «Электрические» граничные условия описывают равенство потенциалов на поверхностях кварцевой пластины и потенциалов в узлах электрической схемы, к которым подключен резонатор. «Механические» граничные условия обусловлены давлением газа и ускорениями точек на гранях пластины.

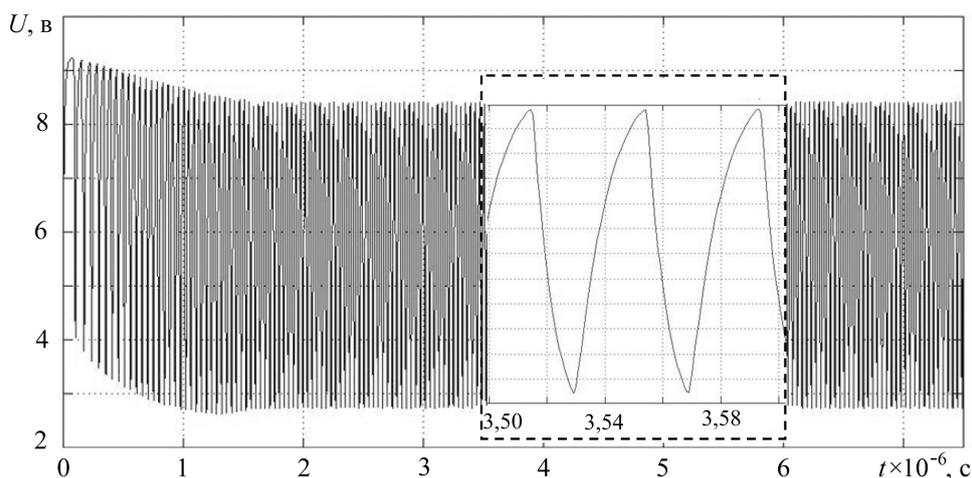


Рис. 2. График генерируемого сигнала во времени

График генерируемого сигнала КГ при отсутствии каких-либо внешних воздействий в зависимости от времени представлен на рис. 2 (в окне приведен график в увеличенном масштабе времени). Наблюдаемое отклонение формы сигнала от синусоидальной является проявлением нелинейности системы; возникновение ненулевого среднего значения объясняется возбуждением автоколебаний.

Анализ спектра генерируемого сигнала (рис. 3) показывает существование выраженной несущей частоты генератора ($f = 25,7$ МГц), а наличие значительных фазовых составляющих вблизи несущей частоты обусловлено отличием формы сигнала от синусоидальной.

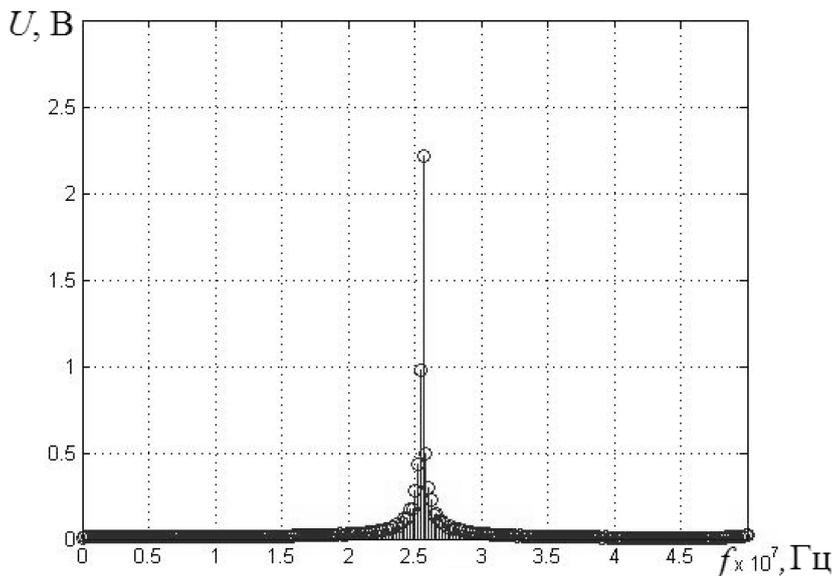


Рис. 3. Спектр выходного сигнала

Исследование влияния внешних низкочастотных вибраций на динамику кварцевого генератора. Примем, что корпус кварцевого генератора подвержен внешнему кинематическому возбуждению. При формировании расчетной модели это возбуждение учитывается в виде переносных сил инерции, приложенных к пластине в направлении оси x или оси y (см. рис. 1).

Будем рассматривать случай низкочастотных по отношению к основной частоте генератора вибраций, так как именно они имеют место в реальных технических системах. Поскольку период внешних воздействий в случае низкочастотных вибраций существенно больше периода колебаний выходного сигнала генератора и временного интервала, на котором проводится оценка его характеристик, то без

особой погрешности можно принять, что эти характеристики не чувствительны к частоте внешнего воздействия, а зависят только от амплитудного значения ускорения a и направления переносной силы инерции.

В работе [5] отмечено, что влияние внешнего кинематического воздействия на частоту кварцевого резонатора может быть определено численно только при использовании нелинейных уравнений механики пьезоэлектрической сплошной среды. При этом тензор деформаций имеет вид

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j}).$$

Расчеты проведены для амплитуд ускорений a в интервалах от 0 до $\pm 5g$ ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения), действующих в направлениях x и y (см. рис. 1). Значения отклонений частоты $\Delta f/f_0 = (f_g - f_0)/f_0$ (f_g — значение частоты при действии ускорения; f_0 — значение частоты при отсутствии ускорения) представлены в таблице.

Значения отклонений частоты для различных ускорений

Отклонение частоты $\Delta f/f_0 \times 10^{10}$	Ускорение						
	-5g	-3g	-g	0	g	3g	5g
Вдоль оси x	-4,382	-2,629	-0,876	—	0,876	2,629	4,382
Вдоль оси y	-26,61	-15,97	-5,321	—	5,321	15,97	26,61

В результате анализа представленных данных выявлено, что значения несущей частоты зависят как от величины, так и от направления воздействия. С ростом амплитуды воздействия отклонение несущей частоты генерируемого сигнала увеличивается, с изменением направления воздействия изменяет знак. Из двух рассмотренных направлений ускорения наибольшая чувствительность к ускорению отмечается в направлении y .

В предложенной электромеханической модели учтена взаимосвязь электрических и механических параметров КГ, данная модель позволяет проанализировать автоколебательные процессы в системе КГ с учетом комплексного влияния как внешних механических воздействий, так и состояния окружающей среды на эксплуатационные свойства и параметры качества генераторов. Показано, что в случае внешнего низкочастотного вибрационного воздействия основное

влияние оказывает амплитуда внешней вибрации, что проявляется в повышении нестабильности частоты генератора.

Работа выполнена при поддержке целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы на период 2009–2011 годы» (проекты 2.1.2/10077 и 2.1.1/9655) и гранта РФФИ 10-08-00640-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтшуллер Г.Б. Кварцевая стабилизация частоты. – М.: Связь, 1974.– 272 с.
2. Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А. Механика связанных полей в элементах конструкций. – Т. 5: Электроупругость. – Киев, Наукова думка, 1989. – 277 с.
3. Морз Ф. Колебания и звук. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1949. – 496 с.
4. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 518 с.
5. Lee P.C.Y., Wang Y.S., Markenscoff X. High-frequency vibrations of crystal plates under initial stresses // J. Acoust. Soc. Am. – 1975. – Vol. 57, no. 1. – P. 95–105.

Статья поступила в редакцию 28.09.2012