ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕГО ВИБРАЦИОННОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИКУ КВАРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА*

А.М. Гуськов, Е.А. Коровайцева, Г.Я. Пановко, А.Е. Шохин

Статья посвящена исследованию динамики кварцевого генератора, находящегося в условиях внешнего вибрационного воздействия. Предложена электромеханическая модель кварцевого генератора, учитывающая его основные динамические свойства. Проанализированы автоколебательные процессы в структурнонеоднородной системе, подверженной внешнему низкочастотному вибрационному воздействию. Показано, что на спектральные характеристики системы основное влияние оказывает амплитуда внешнего воздействия, что проявляется в виде дрейфа несущей частоты, повышения нестабильности, увеличения фазовых шумов.

Ключевые слова: кварцевый генератор, пьезоэлектрическая сплошная среда, кратковременная нестабильность частоты, вибрационное воздействие, автоколебания, спектр выходного сигнала.

Введение

Практика применения кварцевого генератора (КГ) показала выраженную зависимость генерируемого сигнала от внешней вибрации, когда относительная нестабильность частоты КГ увеличивается. Однако до настоящего времени исследования кварцевого генератора в основном ограничивались рассмотрением его электрической схемы [1-3]. При таких подходах динамика механической части генератора – кварцевого резонатора - не учитывается, что не позволяет выявить реальное напряженнодеформированное состояние кварцевой пластинки как пьезоэлектрической сплошной среды, частотные характеристики резонатора, связь между механическими и электрическими параметрами КГ, влияние внешних механических возлействий.

Основной целью настоящей работы является разработка и анализ расчетной модели КГ, учитывающей влияние внешней низкочастотной вибрации (порядка десятков или сотен герц) на показатели нестабильности частоты КГ.

Принцип работы кварцевого генератора

Кварцевый генератор (рис. 1) представляет собой генератор электрических колебаний вы-

сокой частоты, в котором роль резонансного контура играет кварцевый резонатор. Основным элементом резонатора является кварцевая пластинка, вырезанная определенным образом из кристалла кварца. В одном случае на боковые поверхности кварцевой пластинки наносится слой серебра или золота, и они играют роль электродов. В другом случае пластинку помещают в специальный держатель, представляющий собой обкладки конденсатора. Кварцевая пластинка помещается в герметичный корпус и с помощью электродов или держателя соединяется с электрической цепью, питание которой осуществляется от источника постоянного напряжения. Транзисторы О1 и О2, поддерживают автоколебательный механизм генерации сигнала, который определяется электрическим потенциалом в узле А.

При подаче напряжения кварцевая пластинка за счет пьезоэлектрического эффекта деформируется, что, в свою очередь, вызывает появление электрических зарядов [1–8].

Частота колебаний КГ зависит от размеров кварцевой пластинки, механических свойств и пьезоэлектрических постоянных кварца, а также от ориентации плоскостей (среза) пластинки относительно кристаллографических осей кварца.

26

^{*} 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.

Для снижения энергетических потерь при колебаниях пластинки на внешнее трение и для получения высокой добротности системы резонатор обычно помещают в герметичный корпус, в котором поддерживают постоянное давление порядка 10⁻² Па.

С точки зрения механики КГ представляет собой достаточно сложную электромеханическую автоколебательную систему, функциональные качества которой зависят от различных внешних дестабилизирующих факторов (температуры, давления, внешней вибрации) [5].

Основным показателем качества кварцевого генератора является относительная нестабильность частоты – относительное изменение частоты генератора при воздействии дестабилизирующих факторов в течение определенного времени [3]:

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

где Δf – абсолютная нестабильность; f – частота генератора; f_1, f_2 – частоты до воздействия дестабилизирующего фактора и после него соответсвенно.

Моделирование динамики кварцевого генератора

Примем, что корпус КГ подвержен внешнему кинематическому возбуждению. При построении расчетной модели это возбуждение учитывается в виде переносных сил инерции, приложенных к пластинке в направлении оси xили y (рис. 1). В силу особенностей *SC* среза деформации пластинки в направлении оси zпренебрежимо малы по сравнению с деформациями в направлениях осей x и y.

Кварцевый резонатор моделируется анизотропной пьезоэлектрической пластинкой *SC* среза, для которой основным типом колебаний являются колебания сдвига по толщине в плоскости *Oxy* (см. рис. 1). При моделировании учитывается также давление в корпусе, в котором находится пластинка.

Полная система уравнений, описывающая динамику КГ как электромеханической системы, подверженной внешнему вибрационному воздействию, состоит из трех групп.

1. Группа уравнений механики пьезоэлектрической сплошной среды [7], которые для случая плоского деформированного состояния имеют вид:

- уравнения движения:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \rho \frac{d^2 u_x}{dt^2};$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = \rho \frac{d^2 u_y}{dt^2};$$
(1)

– уравнения вынужденной электростатики:

$$\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial x} = 0, \quad E_y = -\frac{\partial \Psi}{\partial y};$$
 (2)



Рис. 1. Схема кварцевого генератора: 1 - держатель с электродами; 2 – корпус; 3 – кварцевая пластина

- уравнения состояния:

$$\sigma_{x} = c_{11}^{E} \varepsilon_{x} + c_{12}^{E} \varepsilon_{y} + c_{16}^{E} \varepsilon_{xy} - e_{21} E_{y},$$

$$\sigma_{y} = c_{12}^{E} \varepsilon_{x} + c_{22}^{E} \varepsilon_{y} + c_{26}^{E} \varepsilon_{xy} - e_{22} E_{y},$$

$$\tau_{xy} = c_{16}^{E} \varepsilon_{x} + c_{26}^{E} \varepsilon_{y} + c_{66}^{E} \varepsilon_{xy} - e_{26} E_{y},$$

$$D_{x} = \varepsilon_{12}^{S} E_{y} + e_{11} \varepsilon_{x} + e_{12} \varepsilon_{y} + e_{16} \varepsilon_{xy},$$

$$D_{y} = \varepsilon_{22}^{S} E_{y} + e_{21} \varepsilon_{x} + e_{22} \varepsilon_{y} + e_{26} \varepsilon_{xy};$$

(3)

- соотношения Коши:

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

Здесь σ_x , σ_y , τ_{xy} – нормальные и касательная компоненты тензора напряжений соответственно; u_x , u_y – компоненты вектора перемещений; t – время; ε_x , ε_y , ε_{xy} – компоненты тензора деформаций; ε_{ij}^S ($i = \overline{1}, \overline{3}; j = \overline{1}, \overline{3}$) – компоненты тензора диэлектрических проницаемостей; D_x , D_y – компоненты вектора электрической индукции; E_y – напряженность электрического поля; ψ – функция электростатического потенциала; ρ – плотность материала; c_{ij}^E ($i = \overline{1}, \overline{6}; j = \overline{1}, \overline{6}$) – компоненты тензора коэффициентов жесткости, измеренные <u>при</u> постоянном электрическом поле; e_{ij} ($i = \overline{1}, 3; j = \overline{1}, \overline{6}$) – компоненты тензора пьезоэлектрических коэффициентов.

2. Волновое уравнение, учитывающее давление воздуха на поверхностях пластинки [7]:

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

где *с* – скорость звука; *р* – давление воздуха в текущей точке.

Это уравнение 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 – сила тока, втекающего (вытекающего) в узел схемы генератора; n – число токов в узле;

– для контуров схемы генератора (второй закон Кирхгофа)

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

где U_k – напряжение на участке цепи рассматриваемого контура схемы генератора; m – количество контуров; E_k – ЭДС источника

в рассматриваемом контуре; *l* – количество источников;

– для участков цепи, содержащих резисторы и конденсаторы:

$$i_r = \frac{U_r}{R_r}, \quad i_q = C_q \frac{dU_q}{dt},$$

где i_r , U_r – сила тока и напряжение на участке с резистором; R_r – сопротивление резистора; i_q , U_q – сила тока и напряжение на участке с конденсатором; C_q – емкость конденсатора.

Граничные условия задачи формулируются отдельно для «электрической» и «механической» групп уравнений. «Электрические» граничные условия описывают потенциалы на поверхностях пластинки. Поскольку условия закрепления пластинки. Поскольку условия закрепления пластинки не влияют на ее деформацию сдвига, то «механические» граничные условия на гранях пластинки зависят только от давления воздуха, определяемого решением уравнения (5). Следует отметить, что условия на торцевых гранях пластинки могут оказаться различными при несимметричной установке пластинки в корпусе (см. рис. 1).

Моделирование выполнялось численно в программном математическом пакете *COMSOL Multiphysics*, предназначенном для решения подобных междисциплинарных связанных задач [9].

Анализ результатов

В связи с тем, что период внешних воздействий существенно больше периода колебаний выходного сигнала генератора и временного интервала, на котором проводится оценка его характеристик, то можно принять, что эти характеристики не чувствительны к частоте внешнего воздействия, а зависят только от амплитуды *а* и направления ускорения переносной силы инерции.

Расчеты проводились для амплитуд ускорений *а* в интервалах от 0 до $\pm 5g$, (g – ускорение свободного падения), действующих в направлениях осей *х* и *у* (см. рис. 1). Были приняты следующие значения основных параметров физической модели: размер пластинки (длина×ширина×высота) 6×6×0,07 мм; размер корпуса $11\times8\times2,6$ мм; начальное давление в корпусе $p_0 = 1,33\cdot10^{-2}$ Па; емкость конденсатора $C_1=64$ пФ; сопротивления резисторов $R_2=R_3=22,7$ кОм, $R_4=R_5=1,52$ кОм, $R_6=1,0$ кОм.

График генерируемого сигнала КГ при отсутствии воздействия (a = 0) в зависимости от

28



времени представлен на рис. 2 (в окне – график в увеличенном масштабе времени). Наблюдаемое отклонение формы сигнала от синусоидальной является проявлением нелинейности системы; возникновение ненулевого среднего значения обусловлено возбуждением автоколебаний.

Спектр генерируемого сигнала (рис. 3) показывает существование выраженной несущей частоты генератора (f = 24,6 МГц), а наличие значительных фазовых составляющих вблизи несущей частоты обусловлено отличием формы сигнала от синусоидальной.

Из анализа полученных спектров генерируемых сигналов при внешнем воздействии вдоль осей *x* и *y* (рис. 4 и 5) следует, что значения несущей частоты и появление фазовых шумов (дополнительных гармонических составляющих) зависят как от величины, так и от направления воздействия. С увеличением амплитуды воздействия несущая частота генерируемого сигнала несколько уменьшается (на 1,9 %). Одновременно, при воздействии в направлении, противоположном оси x, заметно увеличиваются фазовые шумы, что является недопустимым для прецизионных КГ. По всей видимости, это связано с различием давлений на гранях пластины, вызванным несимметричностью ее установки в корпусе резонатора вдоль оси x (см. рис. 1).

В работе также определялась кратковременная нестабильность частоты (КНЧ) кварцевого генератора, рассчитываемая за интервал времени порядка 10⁻⁶ с (см. таблицу). Значение КНЧ представляет собой вариацию Аллана [10]:

$$\Delta f(\tau) = \sqrt{\sum_{i=1}^{2} \left[\overline{f_i} - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{2} \overline{f_j}\right]^2} / f_0,$$

где $\overline{f_i}$ – среднее значение частоты в *i*-м измерении; $\overline{f_j}$ – среднее значение частоты в *j*-м измерении (интервалы времени между *i*-м и *j*-м измерениями выбираются произвольно); f_0 – среднее значение частоты за два измерения; τ – временной интервал измерения частоты.

Полученные значения КНЧ при изменении ускорения от 0 до 5g, действующего в направлении оси x, изменяются на 4 %, а в направлении оси y – на 29 %, что указывает на влияние внешнего воздействия на показатели стабильности и необходимость вибрационной защиты кварцевого генератора.



Рис. 3. Спектр выходного сигнала при отсутствии внешнего воздействия

а		-5g	-3g	-g	0	g	3g	5g
$\Delta f \cdot 10^{10}$	вдоль оси <i>х</i>	1,380	1,427	1,315	1,375	1,397	1,429	1,433
	вдоль оси <i>у</i>	1,933	1,917	1,924	1,375	1,924	1,917	1,933

КНЧ для различных ускорений внешнего воздействия

25

25

26

f, МГц

26

f, МГц

А.М. Гуськов, Е.А. Коровайцева, Г.Я. Пановко, А.Е. Шохин





Заключение

0,8

0.4

0

U, **B**

1,6

1,2

0,8

0,4

 U, \mathbf{B}

1,6

1.2

0,8

0,4

0199

22

23

24

д

25

26

f, МГц

0

22

23

24

в

22

23

24

а

Предложенная электромеханическая модель учитывает основные динамические свойства КГ и позволяет проанализировать автоколебательные процессы в структурно-неоднородной системе КГ, подверженной внешнему низкочастотному вибрационному воздействию. Показано, что на спектральные характеристики системы основное влияние оказывает амплитуда внешнего воздействия, что проявляется в виде дрейфа несущей частоты, повышения нестабильности, увеличения фазовых шумов.

Список литературы

- Adachi T., Hirose M., Tsuzuki Y. Computer analysis of colpitts crystal oscillator // Proc. of 39th IEEE Annual Frequency Control Symposium, 1985. P. 176–182.
- ADOQ: a quartz crystal oscillator simulation software / M. Addouche, N. Ratier, D. Gillet, R. Brendel, F. Lardet-Vieudrin, J. Delporte // Proc. of 2001 IEEE IFCS and PDA Exhibition, 2001. P. 753–757.
- 3. *Альтшуллер Г.Б.* Кварцевая стабилизация частоты. М.: Связь, 1974.– 272 с.

Машиностроение и инженерное образование, 2011, № 3





- 4. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника: учеб. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 518 с.
- Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т. 5. Электроупругость. – Киев: Наукова думка, 1989. – 277 с.
- Губарев А.А. Анализ схем кварцевых генераторов и расчет их параметров методом численно-аналитического моделирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2004. – 137 с.
- 7. Гуськов А.М., Коровайцева Е.А., Шохин А.Е. Особенности численного моделирования

собственных колебаний кварцевой пластины // Машиностроение и инженерное образование. 2010. № 3(24). С. 37–43.

26

26

26

f, МГц

f, MГц

f, MLu

- Морз Ф. Колебания и звук. М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1949. – 496 с.
- COMSOL Multiphysics. Режим доступа: http://www.comsol.com/products/multiphysics/ (дата обращения: 15.04. 2011).
- Allan D.W. Statistics of atomic frequency standards // Proc. IEEE. 1966. No. 54. P. 221– 230.

Материал поступил в редакцию 21.05.2011

ГУСЬКОВ	Доктор технических наук, профессор кафедры прикладной механики Москов-			
Александр	ского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сфера			
Михайлович	научных интересов – прикладная механика, динамика технологических систем,			
E-mail: gouskov_am@mail.ru	теория устойчивости движения и нелинейная механика. Автор более 100 на-			
Тел.: +7 (499) 263-6487	учных работ.			
КОРОВАЙЦЕВА	Аспирант и ассистент кафедры прикладной механики Московского государ-			
Екатерина	ственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сфера научных инте-			
Анатольевна	ресов – нелинейная динамика кварцевого генератора, динамика механических			
Е-mail: katrell@mail.ru	систем, численные методы математического моделирования. Автор четырех			
Тел.: +7 (499) 263-6487	научных публикаций.			
ПАНОВКО Григорий Яковлевич E-mail: gpanovko@yandex.ru Тел.: +7 (499) 135-3047	Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор. Заведующий лабораторией вибромеханики Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов – прикладная механика, динамика технологических систем и процессов, вибрационная техника и тех- нологии. Автор более 100 научных работ.			
ШОХИН	Научный сотрудник лаборатории вибромеханики Института машиноведения			
Александр Евгеньевич	им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов – динамика механи-			
E-mail: shohinsn@mail.ru	ческих систем, виброзащита, методы компьютерного моделирования. Автор			
Тел.: +7 (499) 135-3047	четырех научных публикаций.			