

На правах рукописи

КОРОВАЙЦЕВА ЕКАТЕРИНА АНАТОЛЬЕВНА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ
ВЫСОКОТОЧНЫХ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И ИХ ОСНОВНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ**

Специальность

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА – 2012

Работа выполнена на кафедре «Прикладная механика» в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гуськов Александр Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Дмитриев Владимир Георгиевич
Московский государственный открытый университет им. В.С. Черномырдина,
каф. «Детали машин», профессор

доктор технических наук, профессор
Полищук Дмитрий Феофанович
Ижевский государственный технический университет, каф. «Теоретическая механика и ТММ», профессор

Ведущая организация: ОАО «НПО Геофизика – НВ»

Защита диссертации состоится _____ 2012 г. в ____ часов ____ мин.
на заседании Диссертационного совета Д 212.125.05 при Московском
авиационном институте (национальном исследовательском университете) по
адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
авиационного института (национального исследовательского университета).

Автореферат разослан _____ 2012 г.

Учёный секретарь
Диссертационного совета

Г.В. Федотенков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В последние годы в связи с ужесточением требований к параметрам качества кварцевых генераторов остро встает вопрос о возможности моделирования процессов, происходящих в генераторах и их элементах, в том числе при воздействии различных внешних факторов. Прогнозирование динамики генераторов позволяет определить условия, обеспечивающие повышение их эксплуатационных свойств. Существующие на сегодняшний день разработки в области моделирования динамики кварцевых генераторов связаны с представлением генератора только как сложной электрической схемы, состоящей как из обычных элементов электрических схем, так и из эквивалентных свойствам природных материалов типа кварца. Обычно параметры такой схемы устанавливаются экспериментально. При этом кварцевый резонатор в схеме генератора моделируется простейшей эквивалентной электрической схемой. Такой подход не позволяет учитывать влияние на динамику генератора механических факторов, а влияние реологии кварца учитывается лишь с позиций интегрального экспериментального фактора. Влияние таких параметров, как давление воздуха, температура, внешние вибрации, изучается чаще всего экспериментально. Влияние же качества обработки поверхности кварцевой пластины, в частности, на добротность кварцевого генератора, описано в известных работах только качественно. При этом анализ колебаний кварцевых элементов проводится вне схемы генератора, с использованием ряда допущений и только для случая одно- или двумерных колебаний. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что большая часть исследований колебаний кварцевых элементов проводилась в эпоху слабого развития вычислительной техники, и решение задачи о колебаниях пластины с произвольной анизотропией материала было затруднено. Кроме того, расчет кварцевого генератора представляет собой сложную связанную задачу электродинамики и механики пьезоэлектрической сплошной среды, что приводит к необходимости создания специальных программных комплексов. В открытых научных работах нет сведений о таких комплексах или модификации известных комплексов под упомянутые задачи.

Принципиальные результаты экспериментальных исследований влияния различных факторов на качество работы кварцевых резонаторов и генераторов, а также моделирования колебаний кварцевых пластин и динамики кварцевых генераторов связаны в первую очередь с именами таких ученых как: Г.Б. Альтшуллер, В.Т. Гринченко, А.Ф. Улитко, И. Зеленка, А.Н. Малахов, П.Д. Поздняков, А.Г. Смагин, Н.А. Шульга, М.И. Ярославский, T.J. Aprill, R.D. Besson, R. Brendel, D.R. Cowdry, J. Kagawa, R.D. Mindlin, H.F. Tiersten. При этом детальное описание исследований кварцевых пластин и резонаторов относится в основном к 70-м годам двадцатого века, а проводимое и в настоящее время моделирование динамики кварцевых генераторов ограничивается созданием систем автоматизированного проектирования только электронных схем и упрощенных методов расчета кварцевых элементов в этих схемах.

Указанные обстоятельства приводят к невозможности прогресса в развитии кварцевых генераторов без уточненного моделирования кварцевых пластин и резонаторов, а также создания численной модели кварцевого генератора как электромеханической системы, позволяющей комплексно описать влияние как электрических, так и механических факторов на процессы, протекающие в генераторе.

Цель работы. Целью работы являются:

- Решение задачи моделирования динамики кварцевого генератора как системы с распределенными параметрами и демонстрация возможности описания влияния комплекса механических факторов на генератор в рамках предлагаемой модели.

- Численное обоснование гипотез, используемых при аналитическом исследовании моделей пластин из материалов произвольной анизотропии.

- Исследование влияния внешнего вибрационного поля на частоту кварцевого генератора.

- Разработка методики учета и исследования влияния качества обработки поверхностного слоя кварцевой пластины в модели кварцевого генератора на его добротность.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- получено уравнение планарных колебаний пластин с произвольной анизотропией материала и проанализировано его решение;

- выполнено сравнение аналитического решения уравнения планарных колебаний с численным решением задачи о трехмерных колебаниях кварцевых пластин;

- разработана и исследована расчетная модель кварцевого генератора, позволяющая учитывать влияние механических факторов на работу генератора. На основании предложенной модели исследовано влияние внешнего вибрационного поля на динамику генератора;

- предложена модель кварцевого резонатора, позволяющая учитывать качество обработки поверхности кварцевой пластины и оценивать влияние неровностей поверхности на изменение эксплуатационных свойств резонатора. Проведены экспериментальные исследования по изучению кинетики повреждений поверхностного слоя кварцевых пластин с различной историей нагружения.

Практическая значимость работы.

Влияние механических факторов на параметры качества кварцевых резонаторов и генераторов не поддается прогнозированию с помощью классического моделирования в системах автоматизированного проектирования в связи с представлением моделей резонаторов и генераторов в этих системах исключительно как электрических схем. Поэтому для определения параметров генератора, обеспечивающих в данных условиях наивысшее качество его работы, требуется многократное создание макетов и проведение экспериментов. Макетирование не позволяет оценить независимо вклад каждого фактора в изменение характеристик кварцевых генераторов и резонаторов, и сопряжено с существенными материальными и временными затратами. В связи с этим решение задачи

математического моделирования генераторов и резонаторов с возможностью изучения их свойств на стадии проектирования является с практической точки зрения важной задачей.

Реализация результатов работы.

- Материалы исследований, содержащиеся в работе, используются для подготовки инженеров по специальности «Динамика и прочность машин» при выполнении курсовых и дипломных проектов, лабораторных работ по дисциплинам «Прикладная теория механических колебаний», «Аналитическая механика и теория колебаний», «Устойчивость механических систем».

- Предложенная методика учета влияния качества поверхностного слоя кварцевой пластины на ее добротность является основой применения методов ускоренных испытаний для оценки качества работы кварцевых генераторов.

Достоверность результатов обеспечивается использованием современных методов численного моделирования связанных задач (с привлечением программного комплекса Comsol Multiphysics). Численные результаты проверяются анализом сходимости решений задач работы. Решение ряда задач сравнивается с экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- франко-российском научном семинаре по прикладной механике (Лион, Франция, 2009 г.);

- XXI, XXII и XXIII Международных инновационно - ориентированных конференциях молодых ученых и студентов (Москва, 2009, 2010, 2011 гг.);

- XVI, XVII и XVIII Международных симпозиумах «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г.Горшкова (Москва, 2010, 2011, 2012 гг.);

- 7-й Европейской конференции по нелинейной динамике ENOC-2011 (Рим, Италия, 2011 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 3 в печатных изданиях, рекомендованных ВАК, и 1 патент.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из четырех глав, введения, заключения и списка литературы и содержит 130 страниц основного текста, 73 рисунка, 10 таблиц, библиографию из 123 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследования, научная новизна и практическая ценность работы, приведено краткое содержание работы по главам.

В первой главе систематизированы известные исследования по влиянию различных параметров на добротность и стабильность частоты кварцевого резонатора, по расчету пластин из анизотропных материалов и компьютерному моделированию кварцевых генераторов.

Кварцевый генератор представляет собой электронное устройство, предназначенное для генерирования электрического сигнала определенной

частоты. Частота сигнала задается кварцевым резонатором – прибором, состоящим из кварцевого элемента (как правило, кварцевой пластины) с электродами, держателя элемента и корпуса.

Основным требованием, предъявляемым к кварцевым генераторам, является обеспечение высокой стабильности частоты. Под стабильностью частоты понимается способность генератора сохранять частоту неизменной в течение заданного периода времени. При сравнении генераторов различных частот, как правило, используют понятие относительной нестабильности частоты:

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

где Δf - абсолютная нестабильность, f - значение частоты генератора до воздействия дестабилизирующего фактора, f_1 - значение частоты после воздействия дестабилизирующего фактора. В зависимости от длительности измерения нестабильность частоты может быть разделена на кратковременную, т.е. нестабильность частоты за очень малые интервалы времени (менее 1 сек.), и долговременную, т.е. нестабильность частоты за длительное время. Кратковременная нестабильность обусловлена флуктуационными процессами в кварцевом генераторе. Долговременная нестабильность частоты генератора зависит, в первую очередь, от добротности кварцевого резонатора.

Добротность является основной мерой диссипации энергии в кварцевом резонаторе. Выделяют семь видов потерь энергии в резонаторе. Преобладающими являются потери энергии в поверхностном слое, образующемся в процессе механической обработки. Причиной этих потерь является рассеяние упругих волн в нарушенном слое кристалла. Добротность резонатора тем выше, чем меньше поврежденность поверхностного слоя кварцевой пластины. Существует зависимость, связывающая добротность резонатора с высотой неровностей поверхности, однако она не позволяет описать изменение добротности кристалла с течением времени.

Анализ опубликованных исследований показал, что численное моделирование колебаний кварцевых пластин проводилось только с целью определения собственных частот и с принятием тех или иных гипотез и ограничений. При этом предлагаемые модели исключали возможность определения добротности пластины и тем более исследования ее зависимости от качества обработки поверхности пластины.

Моделирование динамики кварцевого генератора в настоящее время проводится, как правило, при помощи программ электротехнического моделирования. Кварцевый генератор представляет собой нелинейную систему вследствие наличия транзистора в электрической схеме – элемента с нелинейной характеристикой. Используемые в настоящее время методы расчета параметров автоколебаний кварцевого генератора основаны на приближенном решении нелинейных дифференциальных уравнений. При этом кварцевый генератор рассматривается только как электрическая схема. Поэтому кварцевый резонатор представляется эквивалентной электрической схемой (ЭЭС), состоящей из сопротивлений, индуктивностей и емкостей.

Параметры ЭЭС рассчитываются отдельно для каждого типа колебаний пьезоэлемента, формы пьезоэлемента, расположения электродов и степени покрытия электродами – частичное или полное покрытие.

Наиболее распространенная ЭЭС резонатора с одной парой электродов представлена на рис. 1.

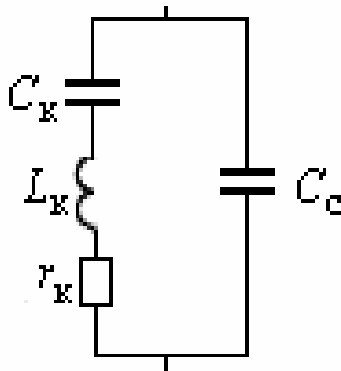


Рис.1. ЭЭС кварцевого резонатора с одной парой электродов

Недостатком методов анализа динамики генератора как исключительно электрической схемы является то, что они не позволяют исследовать влияние механических параметров – давления, ускорения, вибраций, качества поверхностного слоя кварцевой пластины и др., – на динамику кварцевого генератора.

В связи с вышеизложенным в работе сформулированы следующие задачи исследования:

1. аналитическое исследование планарных колебаний пьезоэлектрических пластин с произвольной анизотропией материала;
2. численная проверка пределов применимости ряда допущений, используемых в расчете пьезоэлектрических пластин;
3. разработка модели кварцевого генератора, позволяющей учесть влияние механических факторов, таких как внешние вибрации, качество поверхностного слоя кварцевой пластины, на динамику кварцевого генератора;
4. исследование влияния внешних вибраций на частоту выходного сигнала генератора;
5. численное моделирование кинетики повреждений поверхностного слоя кварцевой пластины;
6. численное моделирование изменения добротности кварцевой пластины во времени в зависимости от качества обработки поверхности кварцевой пластины и связанного с ним развития во времени повреждений в поверхностном слое.

Для их обеспечения, наряду с личным программированием в системе Matlab, избран программный комплекс Comsol Multiphysics. Принципиальным отличием этого комплекса от известных является направленность на решение связанных междисциплинарных задач. Каждая из них имеет объемное описание пре- и постпроцессорной части, которые не включены в текст для рационального уменьшения объема диссертации. Основой является решение механических задач

методом конечного элемента. Для возможности учета многообразных проявлений динамических эффектов кварца в решаемых задачах был использован квадратичный пространственный и плоский лагранжев элемент. В задачах динамики при интегрировании уравнений использован неявный метод Эйлера. Основные проблемы технического использования комплекса связаны с препроцессорной подготовкой по организации совместной работы комплекса задач механики, электродинамики и акустики. Блок-схема этой работы представлена в тексте диссертации.

Во второй главе представлен вывод уравнения планарных колебаний пластин с произвольной анизотропией материала на основании гипотезы о плоском электроупругом состоянии. Уравнение имеет вид

$$\mathbf{B}_x^* \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x^2} + \mathbf{B}_{xy} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x \partial y} + \mathbf{B}_y^* \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial y^2} - \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где $\mathbf{u} = \{u_x \quad u_y\}^T$ - вектор перемещений, ρ – плотность материала, \mathbf{B}_x^* , \mathbf{B}_{xy} , \mathbf{B}_y^* - матрицы, включающие в себя комплекс упругих, пьезоэлектрических и диэлектрических постоянных материала.

Решение полученного уравнения выполнено для случая прямоугольной пластины, заделанной по контуру (рис. 2).

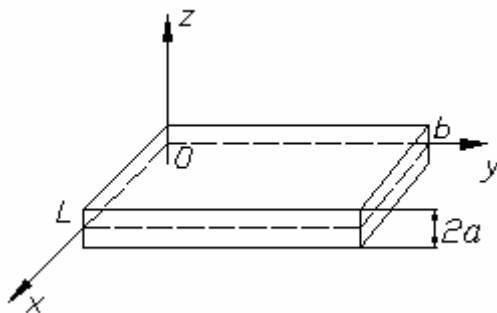


Рис. 2. К выводу уравнения планарных колебаний пьезоэлектрической пластины

Граничные условия имеют вид
 при $x = 0, x = L$ $\mathbf{u}(0) = 0, \mathbf{u}(L) = 0$;
 при $y = 0, y = b$ $\mathbf{u}(0) = 0, \mathbf{u}(b) = 0$.

Для решения краевой задачи используется метод Бубнова – Галеркина. Решение представлено в виде ряда Фурье:

$$\mathbf{u}(x, y, t) = \Phi(x)\mathbf{u}(t)\mathbf{F}(y)$$

где

$$\Phi(x) = \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) & \sin\left(\frac{3\pi x}{L}\right) & \dots & \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) & \sin\left(\frac{3\pi x}{L}\right) & \dots & \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} u_{x,1,1}(t) & u_{x,1,3}(t) & \dots & u_{x,1,m}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{x,n,1}(t) & u_{x,n,3}(t) & \dots & u_{x,n,m}(t) \\ u_{y,1,1}(t) & u_{y,1,3}(t) & \dots & u_{y,1,m}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{y,n,1}(t) & u_{y,n,3}(t) & \dots & u_{y,n,m}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}(y) = \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \\ \sin\left(\frac{3\pi y}{b}\right) \\ \dots \\ \sin\left(\frac{\pi m y}{b}\right) \end{bmatrix}.$$

При выборе координатных функций учтен тот факт, что в пьезоэлектрических пластинах колебания возбуждаются только на нечетных гармониках.

После выполнения процедуры ортогонализации уравнение собственных колебаний пластины имеет вид

$$\left(\frac{\pi^2}{\rho} \left(\frac{i^2}{L^2} \mathbf{B}_x^* + \frac{j^2}{b^2} \mathbf{B}_y^* \right) - \omega^2 \mathbf{I} \right) \mathbf{u}_{i,j} = 0 \quad (2)$$

где i, j – номера гармоник колебаний по осям x и y соответственно, ω – круговая частота колебаний, \mathbf{I} – единичная матрица, $\mathbf{u}_{i,j} = \{u_{x,i,j} \quad u_{y,i,j}\}^T$.

Значения частот собственных колебаний квадратной кварцевой пластины SC среза, рассчитанные по уравнению (2), представлены в табл. 1.

Таблица 1

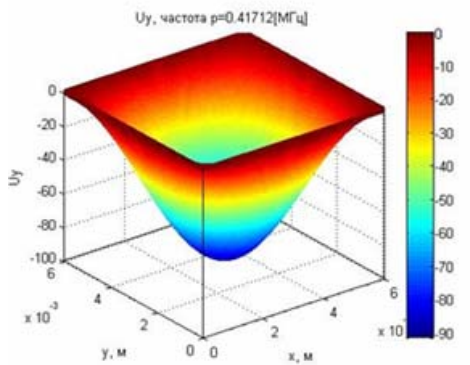
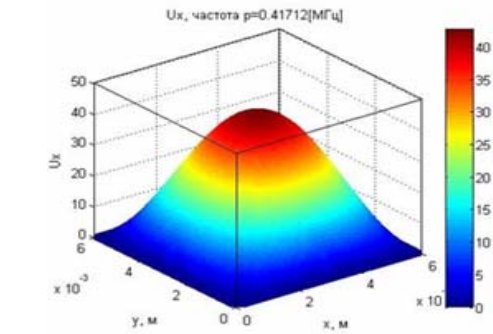
Значения частот планарных колебаний кварцевой пластины

Номер гармоники		Частота, МГц
по оси X, i	по оси Y, j	
1	1	0.417
		0.498
1	3	0.821
		1.16
3	1	1.22
		0.894
3	3	1.25
		1.49

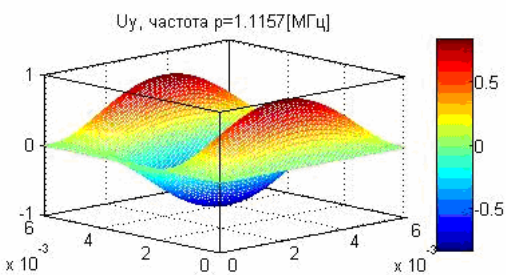
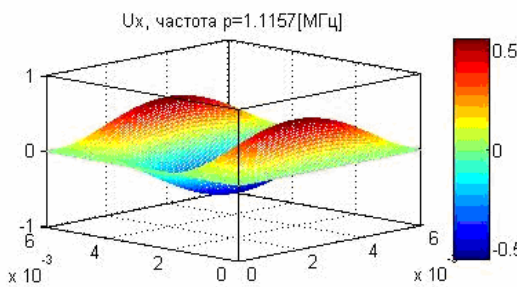
Для контроля полученных результатов расчета выполнен модальный анализ трехмерных колебаний пластины без принятия каких-либо предположений с помощью программного комплекса Comsol Multiphysics. На рис. 3 показан типовой пример сравнения распределения компонент вектора перемещений пластины для частот $f=0.417$ МГц и $f=1.16$ МГц.

Расчет Matlab

$f=0.417$ МГц

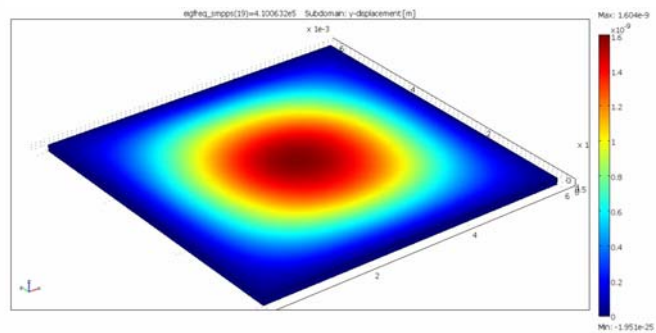
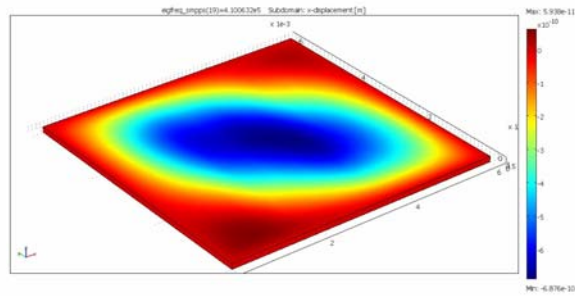


$f=1.16$ МГц



Расчет Comsol Multiphysics

$f=0.410$ МГц



$f=1.14$ МГц

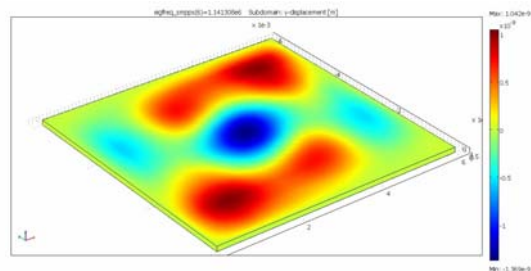
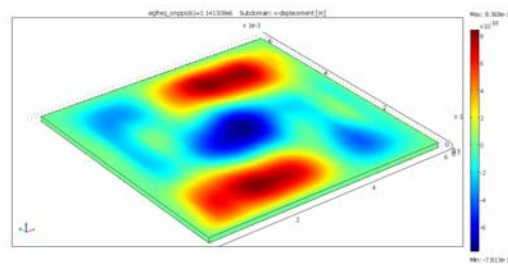


Рис. 3. Сравнение результатов расчета компонент вектора перемещений

Сравнение показало качественное совпадение форм колебаний для определенной численно-аналитическим методом частоты $f=0.417$ МГц и различие для частоты $f=1.16$ МГц, заключающееся в сдвиге максимумов перемещений относительно центра пластины в случае расчета в комплексе Comsol. Это вызвано тем, что часть гипотезы о плоском электроупругом состоянии, касающаяся

независимости перемещений u_x, u_y от координаты z , выполняется, в то время как часть гипотезы, касающаяся независимости электростатического потенциала от координаты z , для значения частоты $f=1.16$ МГц выполняется не во всем объеме пластины.

Третья глава посвящена разработке численной модели кварцевого генератора, позволяющей учитывать влияние механических факторов на его динамику.

Кварцевый генератор представлен как конечноэлементная модель резонатора, встроенная в состав электрической цепи. При этом впервые модель резонатора представлена прямоугольной пластиной, заключенной в объем газа (рис. 4). Описание элементов электрической цепи формируется в диалоговом окне комплекса Comsol Multiphysics в типовом для программ электротехнического моделирования формате SPICE. Связь механической модели резонатора с моделью электрической цепи генератора осуществляется при помощи граничных условий, описывающих равенство потенциалов на поверхностях кварцевой пластины и потенциалов в узлах электрической схемы, к которым подключен резонатор.

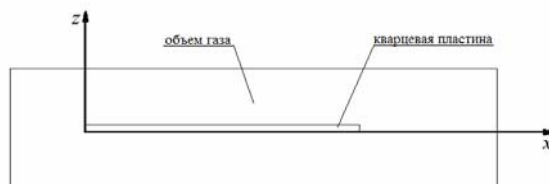


Рис. 4. Модель кварцевого резонатора

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

- уравнения механики пьезоэлектрической сплошной среды;
- волновое уравнение для давления воздуха;
- уравнения электростатики и электродинамики для электрической цепи.

Граничные условия задачи формулируются отдельно для «электрической» и «механической» групп уравнений. «Электрические» граничные условия описывают потенциалы на поверхностях пластины. «Механические» граничные условия определяются давлением воздуха и ускорениями точек на гранях пластины.

На рис. 5 представлена типовая схема кварцевого генератора, на примере которой иллюстрируется предлагаемый в работе подход.

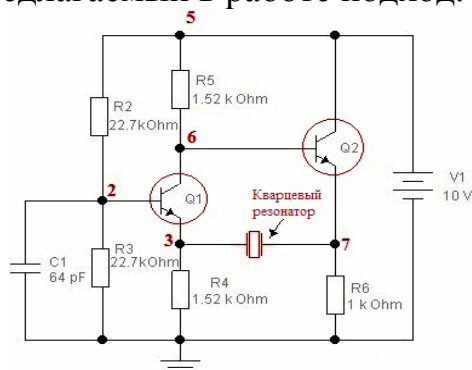


Рис. 5. Рассматриваемая схема кварцевого генератора

В данной схеме емкость имеет величину $C_1 = 64$ пФ, сопротивления $R_2 = R_3 = 22.7$ кОм, $R_4 = R_5 = 1.52$ кОм, $R_6 = 1$ кОм. Цепь подключена к источнику постоянного напряжения 10 В. Нелинейными элементами в данной схеме являются транзисторы $Q1$, $Q2$ моделей 2N2712. Выходной сигнал – значение потенциала в узле 7.

Кварцевый резонатор моделируется как квадратная кварцевая пластина SC среза шириной 6 мм и толщиной 70 мкм. Пластина находится в объеме газа размерами 11 мм × 2.6 мм × 8 мм.

Моделирование выполняется численно в программном пакете COMSOL Multiphysics. Основной задачей расчета является анализ выходного сигнала генератора как функции времени.

Выходной сигнал как функция времени и его спектр для случая отсутствия каких-либо внешних воздействий на генератор представлены на рис. 6, 7 соответственно. В окне результатов на рис. 6 выделен график в увеличенном масштабе времени. Наблюдаемое отклонение формы сигнала от синусоидальной является проявлением нелинейности системы; возникновение ненулевого среднего значения обусловлено возбуждением автоколебаний.

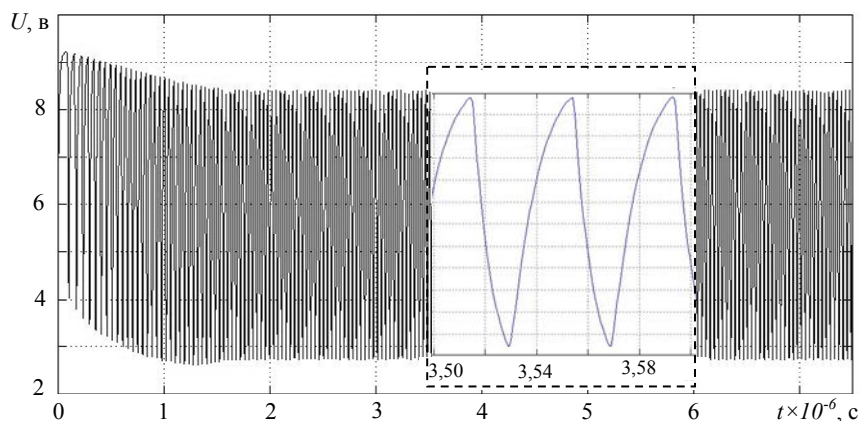


Рис. 6. График генерируемого сигнала во времени

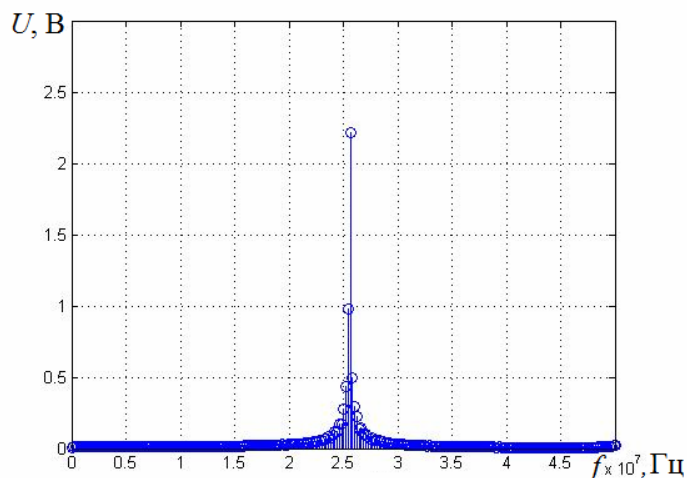


Рис. 7. Спектр выходного сигнала при отсутствии внешнего воздействия

Анализ спектра генерируемого сигнала показывает существование выраженной несущей частоты генератора ($f = 25,7$ МГц), а наличие

значительных фазовых составляющих вблизи несущей частоты обусловлено отличием формы сигнала от синусоидальной.

На основании предложенной модели выполнено исследование влияния внешних вибраций на динамику генератора. При формировании расчетной модели внешнее кинематическое возбуждение корпуса генератора учитывается в виде переносных сил инерции, приложенных к пластине в направлении оси x или оси z (рис. 4). Рассматривается случай низкочастотных по отношению к основной частоте генератора вибраций, т.к. 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 вибрационного ускорения и направления переносной силы инерции.

Значения относительных отклонений частоты при различных амплитудах ускорений представлены в табл. 2. Расчеты проводились для амплитуд ускорений в интервалах от 0 до $\pm 5g$, (g - ускорение свободного падения, $g=9.81$ м/с²), действующих в направлениях x и z (рис. 4).

Таблица 2

Значения относительных отклонений частоты для различных ускорений

		Ускорение						
		-5g	-3g	-g	0	g	3g	5g
$\Delta f/f \times 10^{10}$	ВДОЛЬ оси x	-4,382	-2,629	-0,876	-	0,876	2,629	4,382
	ВДОЛЬ оси z	-26,61	-15,97	-5,321	-	5,321	15,97	26,61

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

Так как точность генерации частоты выходного сигнала является важнейшим параметром кварцевого генератора, необходимо минимизировать влияние внешнего вибрационного воздействия на генератор. В целях виброзащиты генератора в соавторстве с использованием результатов главы была разработана и защищена патентом пространственная виброизолирующая подвеска.

В четвертой главе предложена модель кварцевого резонатора, позволяющая учитывать влияние качества обработки поверхности кварцевой пластины на добротность резонатора. При анализе параметров качества резонатора для задач

электроупругости предлагается представить пластину состоящей из трех слоев (рис. 8).

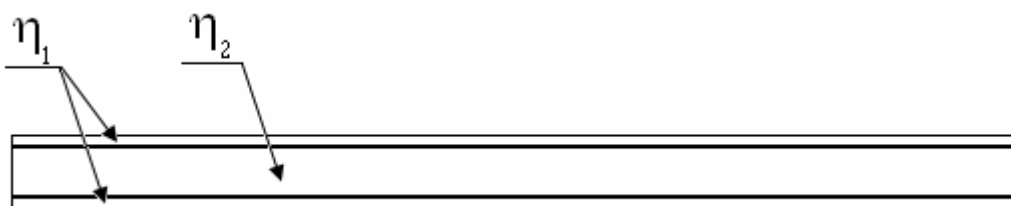


Рис. 8. Трехслойная модель кварцевой пластины

Верхний и нижний слои характеризуют поверхностный слой, нарушенный обработкой. Толщина этих слоев равна толщине нарушенного слоя пластины, материал – кварц с коэффициентом внутреннего трения, определяемым в теории теплопроводности и вязкости твердых тел соотношением

$$\eta_1 = \frac{2\rho^2 c_t^4 T \alpha^2 a^2}{\chi} \quad (3)$$

где ρ – плотность кристалла, c_t – скорость распространения волны, T – температура, α – коэффициент линейного расширения, a – размер кристаллита, χ – коэффициент теплопроводности. Размер кристаллита связан с величиной шероховатости поверхности соотношением

$$a \approx Rz / 5.5.$$

Материал среднего слоя – кварц с коэффициентом внутреннего трения, определяемым соотношением

$$\eta_2 = 0.135 \cdot 10^{-12} \frac{\rho c_t^2}{\pi^2}.$$

Толщина всех трех слоев в сумме равна толщине пластины.

Для тестирования предлагаемой модели были проведены расчеты и эксперименты по определению добротности кварцевых пластин АТ среза размерами в плане 24x21 мм, переданных для эксперимента ОАО «Пьезо». Значения толщины и шероховатости этих пластин, а также величины экспериментальной и определенной на основании предлагаемой модели пластины добротности приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений шероховатости поверхности и определения добротности пластин

№ пластины	Толщина пластины, мкм	Шероховатость поверхности Rz, мкм	Экспериментально определенная добротность пластины Q, $\times 10^3$	Расчетная добротность пластины Q, $\times 10^3$
1	424	4.58	3.79	3.4
2	253	2.17	14.6	14.4

3	203	2.13	22.4	20
4	197	2.08	22.0	24
5	200	1.48	30.0	28
6	186	1.45	44.7	42

Рассчитанные значения добротности пластины хорошо согласуются с экспериментальными данными (разница значений составляет от 1.5 до 10%), что подтверждает справедливость предлагаемой модели пластины.

Для описания изменения добротности кварцевой пластины во времени (старения резонатора) впервые предлагается моделирование кинетики повреждений поверхностного слоя пластины. При этом основой для описания развития повреждений поверхности в кристаллах кварца являются исследования в области геолого-минералогических наук, так как именно полученные в данной области соотношения включают в себя параметры, зависящие от окружающей среды – влажности, температуры, давления. Зависимость, описывающая в геологии развитие трещины в кристалле кварца, носит название закона Чарльза и имеет вид

$$v = v_0 \exp(-H/RT) \cdot (K_1/K_0)^n \quad (4)$$

где v – скорость роста трещины, H – энтальпия активации, R – газовая постоянная, T – температура, K_1 – значение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) для трещины I типа (нормального отрыва), K_0, v_0 и n – постоянные. При этом величины H и n зависят от влажности, температуры и давления окружающей среды.

В работе отмечается, что ряд основных причин развития трещин в геологических материалах совпадает с причинами старения кварцевых резонаторов. Поэтому можно предположить, что основополагающим фактором, влияющим на старение резонатора и способствующим существованию большинства других факторов его старения, является наличие и глубина повреждений поверхности кварцевой пластины и их эволюция во времени. Так, при различной глубине поврежденного слоя при одних и тех же параметрах окружающей среды скорость роста трещин в поверхностном слое пластины будет различной. Но, исходя из экспериментальных данных о работе кварцевого резонатора, в соответствии с которыми кварцевая пластина не разрушается годами, как при хранении, так и при работе в схеме генератора, очевидно, что рост трещин в поврежденном слое пластины кварцевого резонатора с течением времени стабилизируется. Поэтому нарушенный слой пластины достигает некоторой предельной глубины, дальше которой трещины не развиваются в пределах срока технической эксплуатации генератора.

Однако закон геологии (4) описывает развитие трещины, неизменно приводящее к разрушению (рис. 9). Это противоречит экспериментальным данным о работе кварцевого резонатора. Поэтому, как было предложено выше, с течением времени длина трещины в поверхностном слое кварцевой пластины

считается стремящейся к некоторой постоянной величине (приработка кварца). Отметим также, что закон (4) был сформулирован в геологии для кристаллов кварца, подверженных статическому воздействию нагрузки, тогда как для кварцевой пластины, работающей в схеме генератора, основная нагрузка является гармонической.

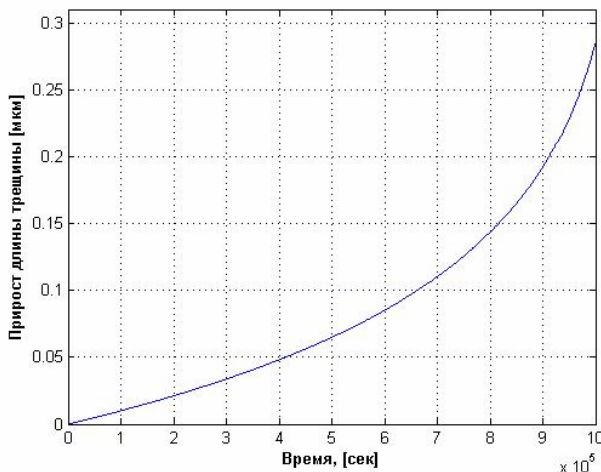


Рис. 9. Изменение длины трещины во времени

Поэтому предлагается ввести в закон (4) поправку, позволяющую учесть приведенные замечания:

$$v = C \cdot f \cdot l_k \cdot \exp(-H/RT) \cdot (K_1/K_0)^n \cdot Y(l) \quad (5)$$

где C – константа, f – частота колебаний пластины, l_k – конечное значение длины трещины, $Y(l) = (n/2 - 1)^{-n/2} \cdot (l_k/l - 1)^{n/2}$. График изменения длины трещины, описываемый законом (5), представлен на рис. 10.

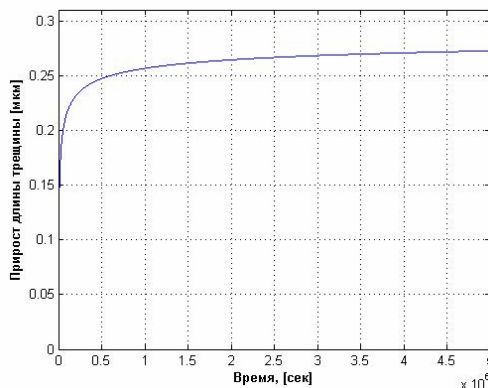


Рис. 10. Изменение длины трещины во времени при внесении поправки в закон Чарльза

При описании кинетики повреждений кварцевой пластины считается, что, как и обычно, скорость роста длины трещины коррелирована со скоростью изменения высоты неровности поверхности пластины Rz . Учитывая, что в формуле (3) $a \approx Rz/5.5$, получаем зависимость коэффициента внутреннего трения в нарушенном обработкой слое кварцевой пластины от времени в виде соотношения

$$\eta_1 = 0.066 \frac{\rho^2 c_t^4 T \alpha^2 Rz(t)^2}{\chi} \quad (6)$$

Для контроля реальных изменений в поверхностном слое кварцевой пластины проведен следующий эксперимент. В одинаковые схемы кварцевых генераторов были включены шесть резонаторов с основной частотой 25 МГц с пластинами АТ среза (производство Тайвань). Кварцевые генераторы были подключены к источнику питания и работали в течение двух недель. Наряду с этим изучались шесть резонаторов, находившихся в покое.

Для исследования поверхности кварцевых пластин после работы резонаторов была использована зондовая нанолaborатория (ЗНЛ) ИНТЕГРА Спектра. Было выполнено сканирование поверхностей пластин в режиме атомно-силового микроскопа. Шероховатость поверхностей исследованных пластин представлена в табл. 4.

Таблица 4

Шероховатость поверхностей исследованных пластин		
№ пластины	Шероховатость пластины, мкм	
	покоившейся	колебавшейся
1	1,066	2,141
2	1,009	1,373
3	0,972	2,345
4	1,074	1,913
5	1,652	1,679
6	1,407	1,534
<R>	1,197	1,831

В соответствии с полученными данными, среднее значение шероховатости поверхности покоившихся пластин составляет 1,197 мкм, колебавшихся пластин – 1,831 мкм. Таким образом, можно сделать вывод, что в процессе колебаний пластины повреждения нарушенного обработкой поверхностного слоя развиваются больше, чем на поверхности покоящейся пластины. В соответствии с этими данными были определены все константы соотношения (5), проведены контрольные расчеты, получена зависимость добротности пластины от времени, представленная на рис. 11.

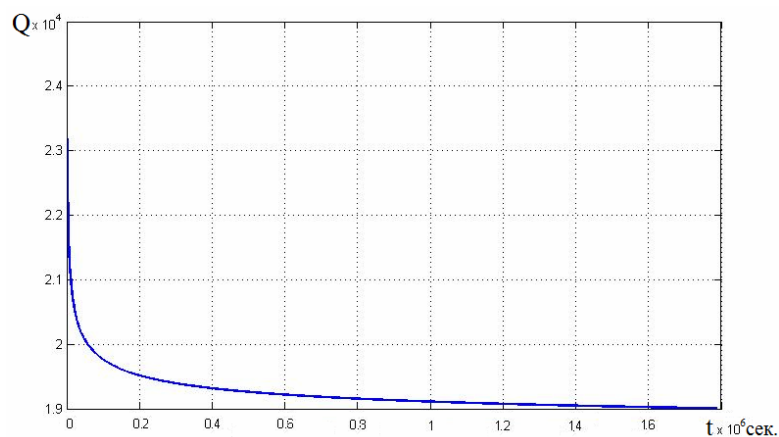


Рис. 11. Зависимость добротности кварцевой пластины от времени

В заключении дана общая характеристика работы и приведены основные ее результаты.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Получено уравнение планарных колебаний пьезоэлектрических пластин с произвольной анизотропией материала. Выполнено сравнение решения данного уравнения с помощью комплекса Matlab с решением задачи о трехмерных колебаниях пластины, полученным в программном комплексе Comsol Multiphysics. Проверена выполнимость гипотезы о плоском электроупругом состоянии, принимаемой в расчете пьезоэлектрических пластин.

2) Разработана модель кварцевого генератора, позволяющая учесть влияние механических факторов на динамику генератора. Модель представляет собой совокупность электрической схемы генератора и механической модели кварцевой пластины, заключенной в объеме газа. Модель реализована в комплексе Comsol Multiphysics и описывается уравнениями механики пьезоэлектрической сплошной среды, волновым уравнением для давления воздуха и уравнениями электростатики и электродинамики для электрической цепи.

3) С помощью разработанной модели исследовано влияние внешних низкочастотных вибраций на частоту выходного сигнала кварцевого генератора. Рассмотрено влияние вибраций в двух перпендикулярных направлениях для промежутков времени, много меньших периода внешних вибраций. Установлено, что с ростом амплитуды воздействия изменение частоты увеличивается. Наибольшая чувствительность к ускорению из двух рассмотренных направлений имеет место в направлении толщинной координаты.

4) Предложено математическое описание кинетики повреждений поверхности кварцевой пластины. Проведен сравнительный анализ причин старения кварцевого резонатора и причин развития трещин в кристалле кварца. Отмечено, что ряд причин старения резонатора совпадает с причинами роста трещин в кристалле кварца. Это позволило предположить, что

основополагающим фактором, влияющим на старение резонатора и способствующим существованию других факторов, является наличие и глубина повреждений поверхности кварцевой пластины и их эволюция во времени. Выполнено экспериментальное исследование кинетики повреждений поверхности кварцевой пластины резонатора при работе резонатора в схеме кварцевого генератора. Экспериментально показано, что в процессе колебаний пластины повреждения ее поверхности развиваются больше, чем на поверхности покоящейся пластины.

5) Выполнено численное моделирование изменения добротности резонатора во времени вследствие роста трещин в поверхностном слое пластины.

6) На основании полученных результатов расчетов и экспериментов впервые удалось теоретически доказать, что возможно математическое моделирование динамики высокоточных кварцевых генераторов и их основных элементов с учетом комплексного влияния как внешних механических воздействий, так и качества поверхности, состояния окружающей среды на эксплуатационные свойства и параметры качества генераторов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1.** Коровайцева Е.А. Оценка влияния кинетики повреждений поверхности кварцевой пластины на добротность кварцевого резонатора // Наука и образование. Инженерное образование. E-Journal 2012, №4. (<http://www.technomag.edu.ru/doc/383658.html>).
- 2.** Патент 2447336 РФ, МПК F16F 3/02, F16F 15/00. Пространственная виброизолирующая подвеска / А.М. Гуськов, Г.Я. Пановко, А.Е. Шохин, Е.А. Коровайцева, А.М. Васильев, О.В. Бармина; Учреждение российской академии наук Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – Заявка № 2010108319; Заяв. 05.03.2010; Опубл.10.04.2012, Бюл. № 10.
- 3.** Пановко Г.Я., Коровайцева Е.А. Учет влияния внешних вибраций в модели кварцевого генератора // XVIII Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г.Горшкова: Материалы.-М.: МАИ, 2012.
- 4.** Гуськов А.М., Коровайцева Е.А. Влияние качества обработки поверхности кварцевой пластины на динамику кварцевого генератора // XVIII Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г.Горшкова: Материалы.-М.: МАИ, 2012.
- 5.** А.М. Gouskov, Е.А. Korovaytseva, G.Ya. Panovko, А.Е. Shokhin. Parametric synthesis of rod spatial vibroisolation system under arbitrarily directed external disturbance // Journal of Vibroengineering. Vol.13, issue 4, 2011.
- 6.** Гуськов А.М., Коровайцева Е.А. Исследование воздействия механических факторов в электромеханической модели кварцевого генератора // // XXIII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов: Материалы.-М., 2011.

- 7.** Гуськов А.М., Коровайцева Е.А., Пановко Г.Я., Шохин А.Е. Исследование влияния внешнего вибрационного поля на динамику кварцевого генератора // *Машиностроение и инженерное образование. Выпуск 3-М.: МГИУ, 2011.*
8. Gouskov A.M., Korovaytseva E.A., Panovko G.Y. Quartz oscillator nonlinear dynamics // *7th European Nonlinear Dynamics Conference.* – pp. 99-100.
9. Коровайцева Е.А. Моделирование динамики кварцевого генератора // *XVII Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г.Горшкова: Материалы.-М.: МАИ, 2011. – с. 106.*
- 10.** Гуськов А.М., Коровайцева Е.А., Шохин А.Е. Особенности численного моделирования собственных колебаний кварцевой пластины // *Машиностроение и инженерное образование. Выпуск 3.-М.: МГИУ, 2010.*
11. Коровайцева Е.А., Гуськов А.М. Исследование нелинейной динамики кварцевого генератора // *XXII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов «Будущее машиностроения России»: Материалы.-М., 2010.*
12. Гуськов А.М., Коровайцева Е.А. Основные проблемы производства кварцевых генераторов // *XVI Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г.Горшкова: Материалы.-М.: МАИ, 2010.-С. 60.*
13. Гуськов А.М., Коровайцева Е.А. Расчет частот кварцевых пластин прямоугольной формы // *XVI Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г.Горшкова: Материалы.-М.: МАИ, 2010.-С. 61.*
14. Коровайцева Е.А. Особенности динамики кварцевого генератора // *XXI Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения: Материалы.-М., 2009.-С. 189.*