

УДК 519.6 + 52.08 + 534.1 + 53.091  
ББК 22.19 + 22.6 + 22.323 + 22.3  
Д 466



Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 14-08-07001, не подлежит продаже.

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

Динамика кварцевого генератора в условиях внешней вибрации.  
М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. — 208 с.

Монография посвящена вопросам взаимодействия и взаимовлияния электрических цепей и механических элементов (пьезоэлектрических преобразователей) кварцевых генераторов при внешних вибрационных воздействиях и монотонно изменяющихся ускорений. Рассматриваются влияние на стабильность частоты и добротность системы различных конструктивных особенностей кварцевого генератора, технологии изготовления резонатора из кристаллического кварца, действия внешней вибрации и медленно меняющихся ускорений. Особое внимание уделено моделированию электромеханических колебаний кварцевой пластины при наличии внешних механических воздействий. Рассмотрены вопросы виброзащиты кварцевого генератора. Для проверки адекватности предложенных моделей и их верификации изложены методики и результаты экспериментальных исследований кварцевой пластины и макетного образца виброизолирующего подвеса.

Книга предназначена научным работникам, инженерам, преподавателям, аспирантам и студентам, специализирующимся в области создания высокоточных кварцевых генераторов, моделирования колебаний пьезоэлектрических сред и структурно-неоднородных систем, виброзащиты приборов, содержащих электромеханические преобразователи.

ISBN 978-5-4344-0175-3

© А. М. Гуськов, Е. А. Коровайцева, Г. Я. Пановко, А. Е. Шохин, 2014

## Оглавление

Предисловие .....	7
<b>Глава 1. Общие сведения о кварцевых генераторах и их элементах .....</b>	<b>11</b>
1.1. Основные конструктивные элементы кварцевого генератора и их характеристики .....	11
1.2. Показатели качества кварцевого генератора .....	17
1.2.1. Стабильность частоты .....	17
1.2.2. Добротность.....	19
1.2.3. Старение.....	21
1.3. Влияние внутреннего трения на добротность кварцевой пластины .....	22
1.4. Влияние поврежденности поверхностного слоя на добротность кварцевой пластины .....	24
1.5. Влияние технологии изготовления на качество обработки поверхности и добротность кварцевой пластины .....	27
1.6. Влияние зазора между электродами и пьезокварцевой пластиной на стабильность частоты кварцевого генератора .....	40
1.7. Влияние вибрации на показатели качества кварцевого генератора .....	45
1.8. Факторы, влияющие на старение кварцевого резонатора .....	50
<b>Глава 2. Исследование и моделирование кинетики поврежденной поверхностного слоя кварцевых пластин .....</b>	<b>55</b>
2.1. Экспериментальное исследование влияния шероховатости поверхности на добротность кварцевой пластины.....	55

2.2. Расчетная модель кварцевой пластины, учитывающая влияние поврежденности поверхностного слоя на ее добротность.....	59
2.3. Кинетика поверхностных микротрещин в кварцевой пластине .....	62
2.4. Экспериментальное исследование развития поверхностных микротрещин в кварцевой пластине.....	72
<b>Глава 3. Собственные колебания пьезоэлектрической кварцевой пластины .....</b>	<b>76</b>
3.1. Общие уравнения динамики пьезоэлектрической сплошной среды .....	76
3.2. Анализ собственных планарных колебаний кварцевой пластины .....	79
3.3. Оценка применимости гипотезы о плоском электроупругом состоянии кварцевой пластины на основе конечно-элементного анализа .....	86
<b>Глава 4. Анализ связанных электромеханических колебаний кварцевого генератора, находящегося в поле внешней вибрации.....</b>	<b>100</b>
4.1. Моделирование резонатора кварцевого генератора эквивалентной электрической схемой.....	100
4.2. Численный анализ динамики двухконтурного кварцевого генератора в виде электрической схемы .....	105
4.3. Численный анализ электромеханических колебаний кварцевого генератора .....	110
4.4. Численный анализ электромеханических колебаний кварцевого генератора в условиях внешней вибрации ....	113

<b>Глава 5. Виброизоляция кварцевого генератора.....</b>	<b>116</b>
5.1. Особенности виброзащиты приборов, содержащих пьезоэлектрические элементы.....	116
5.2. Конструкция пространственной подвески кварцевого генератора .....	123
5.3. Расчетная модель упругой подвески кварцевого генератора .....	127
5.3.1. Расчетная модель упругих элементов .....	131
5.3.2. Уравнения движения шара на упругой подвеске ..	143
5.4. Алгоритм расчета системы виброизоляции.....	144
5.4.1. Определение статического положения равновесия подвески при действии постоянных сил .....	146
5.4.2. Определение матрицы жесткости и собственных частот системы .....	147
5.4.3. Расположение упругих элементов подвески в пространстве .....	149
5.4.4. Определение области возможных перемещений элементов подвески, нагрузок и напряжений в стержнях.....	151
5.5. Пример расчета системы виброизоляции .....	155
5.6. Влияние массы стержней на собственные частоты подвески .....	174
5.7. Экспериментальное исследование динамических свойств системы пространственной виброзащиты прецизионного кварцевого генератора .....	181
5.7.1. Экспериментальный макет виброзащитной системы кварцевого генератора.....	181
5.7.2. Методика проведения эксперимента.....	183

5.7.3. Результаты эксперимента и сравнение с данными расчета.....	188
5.8. Оценка эффективности системы пространственной виброзащиты прецизионного кварцевого генератора.....	192
<b>Заключение</b> .....	197
<b>Список литературных источников</b> .....	199

## Предисловие

Кварцевый генератор как источник электрического сигнала стабилизированной частоты широко используется в системах навигации, связи, в электронно-вычислительных комплексах, в радиоэлектронной аппаратуре и других приборах различного назначения в качестве эталонов частоты и времени. По своему функциональному назначению кварцевый генератор представляет собой маломощный автогенератор электромагнитных колебаний, частота которого определяется собственными колебаниями пьезоэлектрического элемента резонатора, изготовленного из кристалла кварца.

Особенностью современных кварцевых генераторов являются высокая температурная и временная стабильность генерируемой ими частоты и низкий уровень паразитных гармонических составляющих сигнала (фазовых шумов).

В последние годы в связи с повышением требований, предъявляемых к кварцевым генераторам, используемым в основном в бортовой аппаратуре ракетной техники и космических аппаратов, возникла необходимость более тщательного изучения влияния различных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на частотную и фазовую стабильность генерируемого сигнала. Особую значимость для прогнозирования стабильности частоты и ее повышения приобретает, в частности, исследование отклика генератора на внешние динамические воздействия, такие как вибрация и ускорение, возникающие при эксплуатации транспортных систем. Заметим, что для прецизионной аппаратуры долговременная стабильность частоты должна дости-