

УДК 621.396

А.А. АКУЛИНИЧЕВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

КВАРЦЕВЫЙ ЧАСТОТНЫЙ МОДУЛЯТОР С ПОДВИЖНЫМ МИКРОЭЛЕКТРОДОМ УПРАВЛЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИИ

В работе рассмотрены вопросы построения управляемых пьезорезонансных колебательных систем в виде кварцевых частотных модуляторов на базе использования технологии микроэлектромеханических систем. Установлена целесообразность использования микроконденсаторов с электростатическим управлением как конструктивных элементов кварцевых частотных модуляторов, благодаря их высокой электрической добротности, низкому уровню шумов и низкому управляемому напряжению. Предложена конструкция матричного подвижного электрода с управляемой геометрией, рассмотрены режимы его работы. Разработан алгоритм построения характеристик управления: модуляционной характеристики и коммутационной характеристики. Установлено, что коммутационная характеристика весьма близка к линейной, благодаря чему обеспечивается точное воспроизведение управляющего закона цифровым путем. Приведены примеры формирования ЧМ-сигналов по гармоническому закону и 2GFSK.

Ключевые слова: кварцевый резонатор, модулятор, управляемый конденсатор, пьезоэлемент, подвижный электрод, эквивалентное последовательное сопротивление, межэлектродный зазор.

Введение

Постоянно возрастающие требования к гибкости и сложности, лёгкости и экономичности современных систем связи стимулируют поиск технологий, позволяющих уменьшить размеры и вес, снизить потребление и, главное, значительно улучшить технические характеристики СВЧ-компонентов. Все эти качества крайне необходимы для широкого спектра СВЧ-приложений, например, в мобильных телефонах, устройствах беспроводного доступа к сети Internet, в системах передачи данных на базе таких стандартов, как Bluetooth и WiFi, системах GPS. Удовлетворить все перечисленные требования позволяют многофункциональные интегральные микросхемы (ИМС), к числу которых могут быть отнесены микросхемы приёмопередающих устройств. Однако, несмотря на множество проводимых работ по разработке многофункциональных однокристалльных приёмопередающих устройств, многие компоненты, предназначенные, например, для выбора рабочей полосы частот, выбора канала и подстройки частоты опорного генератора, всё ещё остаются вне кристалла микросхемы ввиду невозможности интегрального исполнения высокодобротных индуктивностей и варикапов на кремниевой подложке средствами стандартных технологий [1].

Сегодня можно с уверенностью сказать, что только применение технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) позволит устранить перечисленные проблемы.

Появление технологии МЭМС привело к революционным изменениям во многих областях науки и техники, таких как автомобилестроение, биомедицинская техника, авиация и космонавтика, микропроцессорная техника, радиотехника и системы телекоммуникаций. К последним, в частности, относятся следующие направления разработки устройств на основе МЭМС: постоянные и переменные конденсаторы и индуктивности с высокой добротностью [2]; емкостные переключатели и переключатели с механическими контактами [3]; резонаторы [4]; фильтры; микрофоны [5]; антенны.

Изучением и совершенствованием технологии МЭМС, а также разработкой устройств на её основе, занимаются множество НИИ, ВУЗов и компаний-производителей всего мира. Разработано достаточно большое количество программных продуктов, предназначенных для расчета и конструирования МЭМС, среди которых особого внимания заслуживают такие пакеты, как Coventor, Corning IntelliSense, CoSolve-EM, GENESYS. Кроме того, в большинство современных конструкторских пакетов программ, таких как ANSYS, SolidWorks, Mechanical Desktop и др., введены дополнительные модули построения и анализа МЭМС.

1. Постановка проблемы

В большинстве современных систем связи используются такие методы модуляции сигналов, как FM, FSK, GFSK, MFSK, GMFSK. Узкополосная FM

в реализуется при помощи ИМС с использованием управляемых пьезорезонансных колебательных систем (УПРКС) с варикапом, FSK – коммутацией внешнего конденсатора, а GFSK требует применения специального синтезатора частот либо сочетания варикапа с гауссовским аналоговым фильтром.

Традиционно частотное управление в автогенераторе осуществляется с помощью варикапа, включаемого в его состав. В типовых схемах автогенераторов нелинейность модуляционной характеристики часто не удовлетворяет предъявляемым требованиям, а изменение значения добротности и эквивалентного последовательного сопротивления колебательной системы весьма велики. Другим важным недостатком варикапа, при его введении в колебательный контур, является ухудшение добротности колебательной системы и увеличение уровня фазовых шумов $K_{ш}$, уровень которых определяется следующим соотношением:

$$K_{ш} = 1 + \frac{qI_0 p^2 R_{эКВ}}{2kT}, \quad (1)$$

где q – заряд электрона; p – коэффициент включения варикапа в контур; $R_{эКВ}$ – эквивалентное сопротивление контура; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; I_0 – величина обратного тока варикапа.

Результаты расчетов показывают, что введение в схему автогенератора варикапа увеличивает уровень его шумов, причем если при малой отстройке ($f_m = 100$ Гц) это увеличение составляет около 3дБс/Гц, то при больших отстройках может достигать 10дБс/Гц.

Таким образом, использование полупроводниковой ёмкости в колебательной системе увеличивает уровень фазовых шумов управляемых кварцевых генераторов минимум на (3...10)дБ и снижает добротность системы, а её реализация в кристалле ИМС приводит к ещё большему ухудшению этих параметров. Следует так же учитывать, что частотное управление в ИМС систем радиосвязи, выпускаемых ведущими мировыми производителями, осуществляется по опорному каналу с последующим многократным умножением частоты и, соответственно, шумовых составляющих сигнала.

Альтернативой применению варикапов является внешний конденсатор, однако такой подход не позволяет варьировать значение электрической ёмкости внешнего конденсатора. Электронно-управляемые конденсаторы являются ключевыми элементами в связных цепях, таких как управляемый напряжением генератор и перестраиваемые фильтры. Недостатки варикапов, используемых для этих целей, весьма существенны, поэтому в качестве аль-

тернативного элемента многие разработчики предлагают использовать МЭМС-конденсаторы с управляемой геометрией [2, 6, 7].

2. Анализ существующих конструкций МЭМС-конденсаторов

МЭМС с изменяемыми параметрами могут быть построены на основе различных механизмов управления их параметрами, к числу которых относятся: пьезоэлектрическое, электрострикционное, магнитоэлектрическое, электростатическое, электромагнитное, электродинамическое. Из перечисленных механизмов наиболее широко используется механизм электростатического управления. Геометрические размеры таких микроконденсаторов не превышают (100...500) мкм на сторону при величине межэлектродного зазора (0,75...5,5) мкм, наработка на отказ - не менее 10^9 циклов, диапазон управляющих напряжений (3...10) В [2].

Типичный МЭМС-конденсатор представляет собой конструкцию с одним подвижным и одним неподвижным электродами (рис. 1) [1].

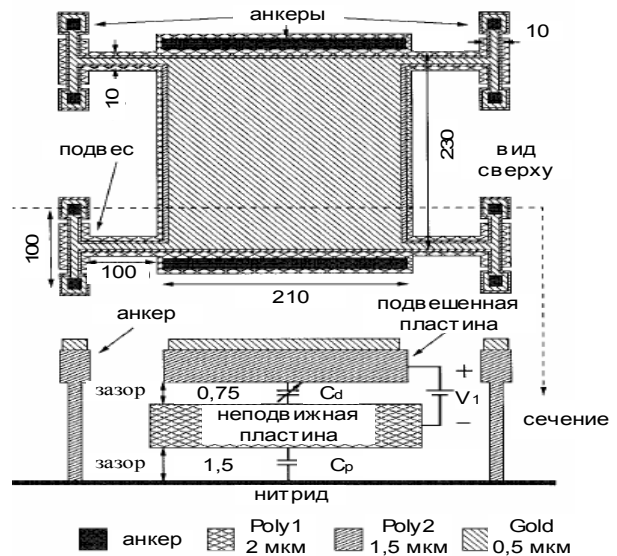


Рис. 1. Конструкция МЭМС-конденсатора

В качестве конструкционного материала для изготовления МЭМС-конденсаторов используют различного рода полисиликоны (Poly0, Poly1, Poly2), которые обладают хорошими механическими свойствами, но разными значениями поверхностного сопротивления. Управление ёмкостью конденсатора осуществляется изменением напряжения V_1 , что под действием электростатических сил приводит к смещению вниз верхнего подвижного электрода.

Эквивалентная электрическая добротность этого конденсатора определяется выражением [1]

$$\frac{Q+1}{Q-1} = \frac{\sin(\sqrt{2w\tau}) + 2 \cosh\left(\sqrt{\frac{w\tau}{2}}\right) \sin\left(\sqrt{\frac{w\tau}{2}}\right)}{\sinh(\sqrt{2w\tau}) + 2 \sinh\left(\sqrt{\frac{w\tau}{2}}\right) \cos\left(\sqrt{\frac{w\tau}{2}}\right)}, \quad (2)$$

где $\tau = R_p C_d$; R_p – сопротивление неподвижной обкладки конденсатора; C_d – ёмкость конденсатора; w – рабочая частота конденсатора.

Величина добротности Q ограничивается, таким образом, активным сопротивлением нижней обкладки, что вызвано конструктивными особенностями. Устранение этого ограничения позволит существенно повысить добротность прибора. Типичные характеристики МЭМС-конденсатора приведены в табл. 1.

Таблица 1
Характеристики МЭМС-конденсатора

Характеристика	Значение
Площадь электрода	0,21 мм × 0,23 мм
Расчетная ёмкость, пФ	0,6
Измеренная добротность	20,0
Диапазон перестройки	1,5:1
Управляющее напряжение, В	0...4

Благодаря малой массе подвижного электрода (около 0,6 мкг) микроконденсатор обладает низкой чувствительностью к вибрации и ускорению. В частности, в реальных конструкциях изменение ёмкости на 10% наблюдается при ускорении 432g [1, 8].

Главным недостатком этого конденсатора является малый диапазон перестройки [9]. Расширение диапазона перестройки и увеличения добротности достигаются путем усложнения конструкции МЭМС-конденсатора: введением дополнительной пластины в конструкцию [1], а существенное увеличение добротности достигается введением подвижно-го диэлектрика [2].

Введение в конструкцию МЭМС-конденсатора дополнительной третьей пластины (рис. 2), позволяет увеличить диапазон его перестройки по сравнению с двухэлектродным (см. табл. 1), до уровня 1,87:1 при сохранении сопоставимой с последним добротности (табл. 2). Кроме того, применяя разные комбинации управляющих напряжений V_1 и V_2 , становится возможным, не изменяя конструкции конденсатора, использовать его в разных динамических диапазонах управляющих напряжений, что позволяет увеличить диапазон перестройки на 25%.

Использование технологии МЭМС обеспечивает возможность интеграции МЭМС-конденсатора внутрь ИМС. В отличие от варикапов, МЭМС-конденсаторам не присуще явление самомодуляции по радиочастоте, так как их механические резонанс-

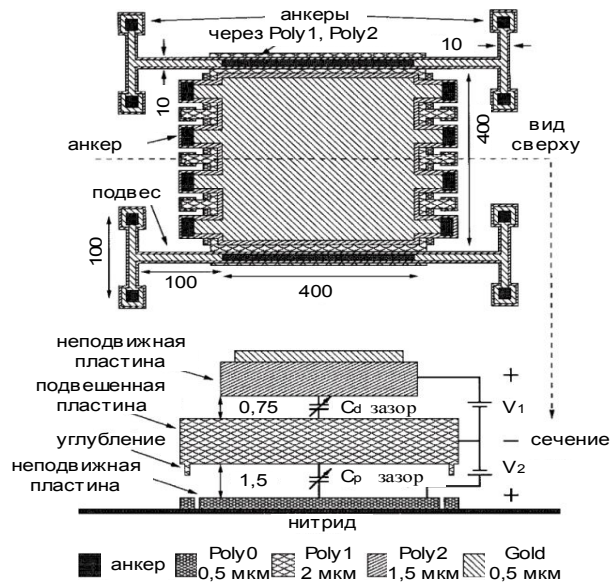


Рис. 2. Конструкция трехэлементного МЭМС-конденсатора

Таблица 2
Характеристики МЭМС-конденсатора

Характеристика	Значение
Площадь электрода	0,4 мм × 0,4 мм
Расчетная ёмкость, пФ	1,9
Измеренная добротность	18,4
Диапазон перестройки	1,87:1
Управляющее напряжение, В	0...4,4

ные частоты не превышают (100...150) кГц. Проявление же самомодуляции, вызванной изменением уровня мощности, как показано в [10], наблюдается лишь при $P_{RF} = 3,9$ Вт. Следовательно, МЭМС-конденсаторы могут работать при амплитудах ВЧ сигналов порядка (300...500) мВ, благодаря чему их использование в управляемых автогенераторах позволяет улучшить отношение сигнал/шум.

Использование принципа модуляции межэлектродного зазора в УПРКС обеспечивает их высокую добротность и низкий уровень фазовых шумов, но в существующих решениях при работе с зазорами (100...150) мкм приводит к увеличению величины эквивалентного последовательного сопротивления (ЭПС) полной колебательной системы. Согласование УПРКС с входным сопротивлением ИМС требует ограничения величины ЭПС, не превышающего 150 Ом.

Целью данной работы является совершенствование конструкции управляемых пьезорезонансных колебательных систем с модуляцией межэлектродного зазора в части снижения величины эквивалентного последовательного сопротивления, что позволит повысить эффективность использования УПРКС в радиотехнических устройствах.

3. Разработка конструкции УПРКС на базе технологии МЭМС

Использование управляемой электродной системы и механизма пространственной локализации мод колебаний в пьезоэлементе позволяет для резонаторов толщинно-сдвиговых колебаний предложить динамический принцип их селекции. Для этого, по крайней мере, один электрод выполняется с изменяющейся геометрией. В результате, можно существенно поднимать уровень требуемых мод по выбору. Такая возможность базируется на пространственной локализации ангармонических обертонов, оцениваемой для плоских пьезоэлементов соотношением:

$$f_{nmp} = \frac{n}{2h} \sqrt{\frac{C_{66}}{\rho} \left[1 + \frac{h^2}{n^2} \left(\frac{Mnm^2}{C_{66}a_1^2} + \frac{C_{55}(p-1)^2}{C_{66}a_3^2} \right) \right]}, \quad (3)$$

где $n = 1, 3, 5, \dots$; $m = 1, 2, 3, \dots$; $p = 1, 2, 3, \dots$ – целые числа, определяющие число полуволн, укладываемых вдоль осей X_2 , X_1 и X_3 соответственно и обозначающие порядок обертонов; a_1 , a_2 – длина и ширина прямоугольного ПЭ; C_{ij} – упругие пьезоэлектрические константы кварца; ρ – плотность кварца; h – толщина пьезоэлемента; M – безразмерный коэффициент, зависящий от геометрии ПЭ.

Принцип динамической селекции мод по выбору f_{113} или f_{131} иллюстрирует рис. 3.

В предлагаемой конструкции используется электрод матричного типа с отдельным управлением каждым элементарным электродом.

Использование технологии MEMS позволяет создать многоэлементную управляемую систему – матричный подвижный электрод, являющийся основой нового типа кварцевых частотных модуляторов. Неподвижный электрод в этой конструкции нанесен на поверхность плоского пьезоэлемента, а между ним и элементарными электродами приложена управляющая разность потенциалов.

Предлагаемая конструкция представляет собой колебательную систему с возбуждением пьезоэлемента в межэлектродном зазоре, а подвижный и неподвижный электроды образуют конденсатор с двухслойным диэлектриком (пьезоэлемент, воздух/вакуум) за счет изменения ёмкости которого осуществляется управление резонансной частотой колебательной системы.

Матричный подвижный электрод с отдельно управляемыми электродами позволяет:

- за счет освобождения одной поверхности резонатора от наносимого на неё электрода увеличить добротность колебательной системы в целом;

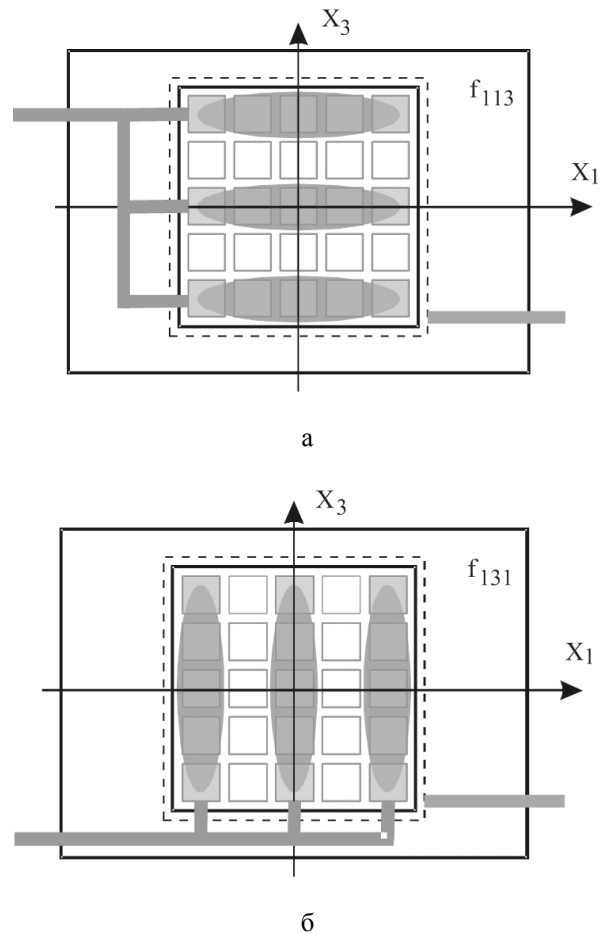


Рис. 3. Динамическая селекция мод в УПРКС
а – для f_{113} , б – для f_{131}

- за счет малой величины зазора увеличить ёмкость зазора до значений, при которых величина эквивалентного последовательного сопротивления колебательной системы не превышает 50 Ом, что позволяет использовать УПРКС с матричным подвижным электродом с ИМС большинства компаний-производителей;

- реализовать два режима управления – одноуровневый и многоуровневый. При одноуровневом режиме управления на все элементарные электроды одновременно подается равное управляющее напряжение и, следовательно, все элементарные электроды находятся на одинаковом расстоянии относительно плоскости u_1u_2 неподвижного электрода (рис. 4). При многоуровневом режиме управления в один и тот же момент времени на разные элементарные электроды подается управляющее напряжение разного уровня и, следовательно, различные элементарные электроды будут при этом находиться на разном расстоянии относительно плоскости u_1u_2 неподвижного электрода (рис. 5, 6), формируя тем самым переменную геометрию матричного подвижного электрода.

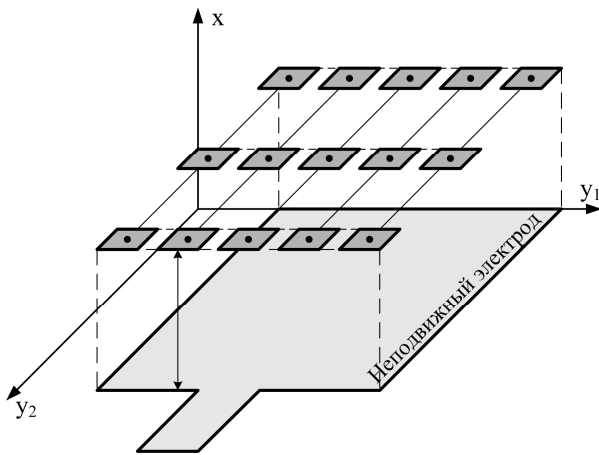


Рис. 4. Одноуровневое управление

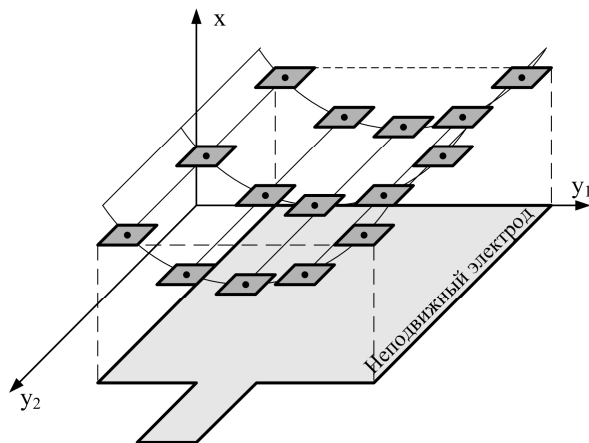


Рис. 5. Многоуровневое управление – цилиндрический закон управления

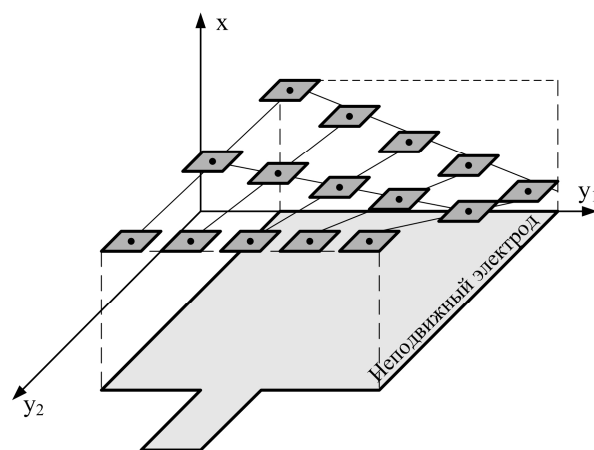


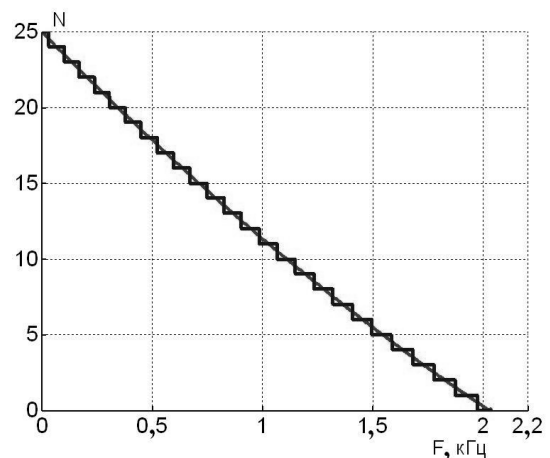
Рис. 6. Многоуровневое управление – произвольный закон управления

Использование пространственного и временно-го управления МПЭ позволит обеспечить гибкость управления частотой опорных генераторов и фильтров и расширяет области применения УПРКС.

4. Применение УПРКС с МПЭ

Использование пространственного и временно-го управления МПЭ обеспечивает гибкость управления частотой опорных генераторов и фильтров и расширяет области применения кварцевых частотных модуляторов.

Использование многоуровневого управления последовательным наращиванием во времени числа элементарных электродов N МПЭ, переведенных в единичное состояние, в случае работы с кварцевым резонатором с частотой первой гармоники равной 10МГц дает коммутационную характеристику $N[F(C_{\text{заз}})]$, представленную на рис. 7.

Рис. 7. Коммутационная характеристика КЧМ с МПЭ, $N_{\text{max}} = 25$

Здесь

$$N = \varphi(C_{\text{заз}}) = 2 \cdot \text{Ent} \left| \frac{C_{\Sigma} - N_{\text{max}} C_{\text{я}} "0"}{C_{\text{я}} "0"} \right|, \quad (4)$$

где $\text{Ent} | \cdot |$ – целая часть числа, C_{Σ} – эквивалентная ёмкость МПЭ, N_{max} – общее количество элементов МПЭ, $C_{\text{я}} "0"$ – ёмкость ячейки МПЭ в нулевом состоянии (при максимальной величине межэлектродного зазора).

При использовании аппроксимации КХ полиномом второй степени

$$N = \varphi(F) = \text{Ent} | a_0 + a_1 F + a_2 F^2 | \quad (5)$$

получаем $a_0 = 24,9861602$, $a_1 = -0,0149761$, $a_2 = 0,0000013$, $\text{СКО} = 0,045$.

Высокая степень близости коммутационной характеристики к линейной обеспечивает точное воспроизведение управляющего закона. В частности, это видно на примерах использования гармонического закона управления частотой и гауссовского закона (для 2GFSK с $\text{BT}_c = 0,5$) (рис. 8).

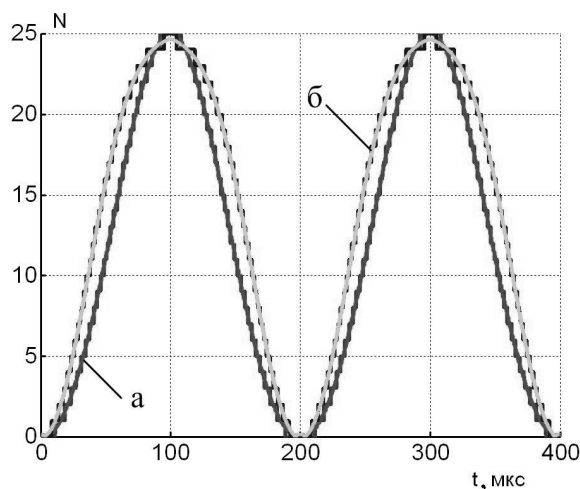


Рис. 8. Примеры формирования ЧМ-сигналов
а – гармонический закон, б – гаусовский закон

Помимо использования кварцевых частотных модуляторов с МПЭ непосредственно для получения частотно модулированного сигнала в системах связи, отметим ещё несколько возможностей его применения.

Точная установка номинальной частоты опорного генератора. Эта задача решается самим пользователем при применении корпусированного кварцевого частотного модулятора с матричным подвижным электродом путем формирования необходимого числа ячеек МПЭ, переведенных из нулевого состояния в единичное. Последнее достигается либо командой микропроцессора (перепрограммируемый режим), либо фиксированной электрической прошивкой. Подобная технология применяется, например компанией Analog Devices, под названием DigiTrim.

Температурная компенсация автогенераторов. Компенсирующий управляющий сигнал с датчиков температуры изменяет число N в соответствии с коммутационной характеристикой.

Компенсация уходов частоты, вызванных вариацией питающего напряжения и старением. Задающий генератор содержит в своём составе источник опорного напряжения и компарирующее устройство, формирующее сигнал компенсации. Эффективность такого решения ограничена необходимостью опоры. Более эффективной является компенсация старения, при которой закон старения зашивается в микропроцессор.

Заклучение

В работе рассмотрены вопросы построения управляемых пьезорезонансных колебательных систем в виде кварцевых частотных модуляторов на базе использования технологии МЭМС.

Установлена целесообразность использования микроконденсаторов с электростатическим управлением как конструктивных элементов КЧМ, благодаря их высокой электрической добротности, низкому уровню шумов и низкому управляющему напряжению.

Важным достоинством микроконденсаторов является отсутствие явления самомодуляции по высокой частоте, характерного для варикапов и объясняющегося значительным превышением электрических резонансных частот над механическими.

Предложен матричный подвижный электрод с управляемой геометрией, рассмотрены его одно- и многоуровневый режимы работы. На базе построенной математической модели управляемой пьезорезонансной колебательной системы разработан алгоритм построения характеристик управления: модуляционной характеристики и коммутационной характеристики.

Установлено, что коммутационная характеристика $N(F)$ весьма близка к линейной, благодаря чему обеспечивается точное воспроизведение управляющего закона цифровым путем. Приведены примеры формирования ЧМ-сигналов по гармоническому закону и 2GFSK ($BT_c = 0,5$).

Помимо традиционных задач частотной модуляции в системах связи указаны другие области применения кварцевых частотных модуляторов с матричным подвижным электродом, характеризующие расширение их функциональных возможностей: точная установка номинальной частоты пользователем (подобно технологии DigiTrim); компенсация уходов частоты, вызванных старением, вариациями температуры, питающего напряжения и других дестабилизирующих факторов.

Литература

1. Dec Aleksander *Micromachined electro-mechanically tunable capacitors and their applications to RF IC's* / Aleksander Dec, Ken Suyama // *IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques*. – Vol. 46, No. 12. – Dec. 1998 y. – P. 2587–2596.
2. Jun-Bo Yoon *A high-Q tunable micromechanical capacitor with movable dielectric for RF applications* / Yoon Jun-Bo, Clark Nguyen // *Technical Digest, IEEE Int. Electron Devices Meeting, San Francisco, California, 11-13 Dec. 2000 y.* – P. 489–492.
3. Peroulis Dimitrios *Electromechanical considerations in developing low-voltage RF MEMS switches* / Dimitrios Peroulis, Kamal Sarabandi // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – Vol. 51, No. 1. – January 2003 y. – P. 259–270.
4. Demirci M.U. *A 10-MHz micromechanical resonator pierce reference oscillator for communica-*

tions / M.U. Demirci. // *Digest of Technical Papers, the 11th Int. Conf. on Solid-State Sensors & Actuators, Munich, Germany, 10-14 June 2001* y. – P. 1094-1097.

5. Nguyen Clark *Vibrating RF MEMS for low power wireless communications* / Clark Nguyen // *MEMS Workshop (iMEMS'01), Singapore, 4-6 July 2001* y. – P. 21-34.

6. Ionis Gregory V. *A Zipper-Action Differential Micro-Mechanical Tunable Capacitor* / Gregory V. Ionis, Aleksander Dec, Ken Suyama // *MEMS Conference 2001, Berkeley, USA, 2001* y. – P. 29–32.

7. Altug Oz *RF CMOS-MEMS capacitor having large tuning range* / Oz Altug, Gary Fedder // *The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, 8-12 June 2003* y. – P.851–854.

8. Tanner Danelle M. *MEMS reliability in shock environments* / Danelle M. Tanner, Jeremy A. Walraven, Karen Helgesen // *IEEE International Reliability Physics Symposium, San Jose, 10-13 April 2000* y. – P. 129–138.

9. Акулиничев А.А. *Пьезорезонансные колебательные системы с электромеханическим управлением: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13; защищена 9.12.2004; утв. 13.04.2005* / Акулиничев Артем Аркадьевич. – X., 2004. – 164 с.

10. Dussopt Laurent *Intermodulation Distortion and Power Handling in RF MEMS Switches, Varactors, and Tunable Filters* / Laurent Dussopt, Gabriel M. Rebeiz // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – Vol. 51, No. 4. – April 2003 y. – P. 1247–1256.

Поступила в редакцию 14.02.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник В.А. Батаев, НПП «ХАРТРОН-АРКОС», Харьков.

КВАРЦОВИЙ ЧАСТОТНИЙ МОДУЛЯТОР З РУХОМИМ МІКРОЕЛЕКТРОДОМ КЕРОВАНОЇ ГЕОМЕТРІЇ

А.А. Акулиничев

У роботі розглянуто питання побудови керованих п'єзореzonансних коливальних систем у вигляді кварцових частотних модуляторів на базі використання технології мікроелектромеханічних систем. Встановлено доцільність використання мікроконденсаторів з електростатичним керуванням у якості конструктивних елементів кварцових частотних модуляторів, що є можливим завдяки їх високій електричній добротності, низькому рівню шумів та низькому рівню напруги керування. Запропоновано конструкція матричного рухомого електроду з керованою геометрією, розглянуто режими його роботи. Розроблено алгоритм побудови характеристик керування: модуляційної характеристики та комутаційної характеристики. Встановлено, що комутаційна характеристика вельми близька до лінійної, завдяки чому забезпечується точне відтворення закону керування цифровим шляхом. Наведено приклади формування ЧМ-сигналів за гармонійним законом та 2GFSK.

Ключові слова: кварцовий резонатор, модулятор, керований конденсатор, п'єзоелемент, рухомий електрод, еквівалентний послідовний опір, між електродний зазор.

QUARTZ FREQUENCY MODULATOR WITH MOVABLE MICRO-ELECTRODE CONTROLLED GEOMETRY

A.A. Akulynichev

The paper discusses the issues of building managed piezoresonance oscillatory systems in the form of a quartz frequency modulator based on the use of technology microelectromechanical systems. The expediency of using microcapacitor with electrostatic management as structural elements of quartz frequency modulator, due to their high electrical quality factor, low noise and low control voltage. The proposed of the movable electrode matrix with controlled geometry, we consider the modes of its operation. The developed an algorithm for constructing the control characteristics: modulation-term performance and switching characteristics. Established that the switching characteristics of a very nearly linear, thus ensuring accurate reproduction of the management features width digital control. A given examples of the formation of harmonically FM signals and 2GFSK.

Key words: quartz resonator, modulator, controlled capacitor, piezoelectric, movable electrode, the equivalent series resistance, the inter-electrode gap.

Акулиничев Артём Аркадьевич – канд. техн. наук, доцент кафедри «Приём, передача и обработка сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: akulynichev@xai.edu.ua.