

## СОВРЕМЕННЫЕ ОПОРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ СИНТЕЗА ЧАСТОТ И СИГНАЛОВ

А.И. Поликарвовских

В статье рассматриваются современные опорные генераторы для систем синтеза частот и сигналов. Приведена классификация современных опорных генераторов. Проанализированы основные классификационные требования к таким генераторам. Рассмотрены стандарты частоты и времени, прецизионные кварцевые генераторы, генераторы СВЧ, опорные генераторы на микроэлектромеханических резонаторах (MEMS). Определены области применения того или другого вида резонаторов в качестве опорных генераторов для систем синтеза частот и сигналов

Ключевые слова: автогенератор, опорные генераторы, атомные стандарты, кварцевые резонаторы, МЭМС

### Постановка задачи

Прямые цифровые синтезаторы частоты играют важную роль в современных радиоэлектронных устройствах. Это обеспечивается многими значительными преимуществами: скорость перестройки синтезатора с частоты на частоту, высокая разрешающая способность, широкая синтезированная полоса частот. Многоуровневые DDS в силу своей технологичности, надежности, возможности микроминиатюризации и уникальности технических характеристик (неразрывность фазы во время переключения с частоты на частоту, возможность формирования сигналов сложной формы, цифровое управление амплитудой, частотой и фазой выходного колебания) на сегодня нашли применение в системах связи. Особенно перспективным есть использование DDS в радиотехнических системах передачи информации с повышенной помехоустойчивостью и защищенностью [1]. На сегодняшний день ряд характеристик вычислительных синтезаторов частоты ниже, чем у синтезаторов на основе ФАПЧ. Такими параметрами являются низкие показатели кратковременной фазовой стабильности (джиттера), существование в спектре синтезированного сигнала гармонических составляющих с высокими значениями амплитуд. Одним из направлений улучшения кратковременной фазовой стабильности есть использование опорных генераторов с улучшенными качественными

### Анализ исследований и публикаций

Вопросом построения высокостабильных опорных генераторов занимались много авторов и научных коллективов [2,3,4]. Такие генераторы сильно различаются средней частотой, уровнями сигналов и относительной нестабильности частоты, которая может сменяться от  $10^{-3}$  до  $10^{-15}$ . Периодические колебания ав-

тономных генераторов  $u(t)$  характеризуются средней частотой, формой колебания на протяжении его периода и флюктуациями текущей фазы. Стабильность частот таких генераторов оценивается сравнением их сигналов с колебаниями вторичных стандартов частоты. Почти гармоническое колебание опорного автогенератора можно записать в виде

$$u(t) = u_0 [1 + \mu(t)] \sin[2\pi f_0 t + \varepsilon(t) + \varphi_0], \quad (1)$$

где  $U_0$  и  $f_0$  - амплитуда и несущая частота опорного сигнала, где  $\mu(t)$  и  $\varepsilon(t)$  - его амплитудная и фазовые нестабильности,  $\varphi_0$  - начальная фаза колебания. Непосредственно после включения напряжений автогенераторов в переменные  $\mu(t)$  и  $\varepsilon(t)$  входят регулярные составляющие, которые определяют продолжительность установления амплитуды и выбег частоты во время прогрева. В фиксированном температурном режиме процессы, которые вызывают амплитудную и фазовые нестабильности являются случайными. При продолжительной работе возможен дрейф средней частоты, который связан со старением стабилизирующего резонатора или деградацией вакуума в колбах атомных стандартов частоты. Относительное среднеквадратичное отклонение (ОСО) от частоты стандарта характеризуются

погрешностью установления частоты  $d_{уст}$ . Для генераторов с невысокой стабильностью значения погрешности смеряется в сотых долях (процентах). Для генераторов со средней стабильностью указывают миллионные доли -  $млн^{-1}$  (parts per million - ppm), в случае высокой стабильности - миллиардные (биллионные) доли (parts per billion - ppb) [4].

Характер фазовых и амплитудных нестабильностей определяет спектральная плотность мощности (СПМ) периодического колебания

$u(t)$  на единичном сопротивлении, сосредоточенном вблизи частоты  $f_0$ :

$$S_m(f) = 2 \int_0^{\infty} [u(t)]^2 \cos 2\pi f t dt. \quad (2)$$

Тем не менее, более корректной характеристикой колебаний автогенератора есть его СПМ его фазовой нестабильности  $S_\phi(F)$ , где  $F = |f - f_0|$  - отстройка от номинальной частоты. Фазовая нестабильность однозначно определяется нестабильностью циклической частоты колебания

$$\Delta f(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (3)$$

а спектральная плотность мощности отклонения фазы связана с СПМ частотных отклонений соотношением

$$S_f(F) = F^2 S_\phi(F). \quad (4)$$

На протяжении короткого времени возможные изменения фазы, которые обусловлены эффектом дрожания фронта сигнала (джиттером). Джиттер вызывается амплитудным и фазовым шумом, как внутреннего, так и внешнего происхождения. Джиттер сигнала имеет разные характеристики в зависимости от его причин и источников. Джиттер разделяют на две основных категории: случайный (random jitter - RJ) и регулярный (deterministic jitter - DJ).

Случайный джиттер обусловленный шумовыми процессами, которые происходят во всех полупроводниках и компонентах. Предполагается, что этот джиттер подчиняется распределения Гаусса, и, как такой, никогда не может достичь своего максимального значения в заданный отрезок времени. Таким образом, он характеризуется статистическими величинами: средним значением и среднеквадратичным отклонением. Источниками случайного джиттера являются:

- Тепловой шум (thermal noise) - связанный с потоком электронов в проводниках и возрастает с увеличением полосы пропускания, температуры и теплового сопротивления;

- Дробовой шум (shot noise) - шум электронов и дырок в полупроводниках, который увеличивается в зависимости от тока смещения и измеряемой полосы частот;

- Шум мерцания (flicker noise) - шум, спектр которого обратно пропорциональный частоте, т.н. розовый шум;

- Шум пульсаций напряжения питания;

- Шум внешних акустических влияний (микрофонный эффект);

Регулярный джиттер вызывается действующими на сигнал процессами, которые происходят в системном оборудовании. Системный джиттер зависит от характеристик цифровой системы. Примеры источников системного джиттера:

- Перекрестные помехи от синтезированных сигналов;

- Влияние дисперсии при распространении сигнала;

- Несогласование сопротивлений.

Джиттер оценивается по значению среднеквадратичного отклонения моментов перехода фазы через нуль и измеряют в пикосекундах.

Общую оценку нестабильности частот опорных генераторов удобно представлять в виде среднеквадратичного отклонения частоты за определенный промежуток времени. Кратковременная нестабильность частоты  $\delta_k(T)$  определяет относительное среднеквадратичное отклонение (ОСО) за время  $T$  продолжительностью 1, 10, 100 или 1000 с. Этот параметр определяет взнос в частотный шум таких естественных процессов, как дробовой и тепловые шумы автогенератора. Долгодействующая нестабильность частоты  $\delta_o(T)$  за время  $T$  продолжительностью в сутки, месяц, год, 10 лет – характеризует эффект старения и деградации элементов.

Значение опорной частоты колебания опорного генератора зависит от внешних дестабилизирующих факторов, главный из которых - температура окружающей среды. Температурный коэффициент отклонения частоты (ТКО) смеряется при номинальной температуре в относительных долях, отнесенных к 1°C.

Форма колебаний автогенераторов любой конструкции не является абсолютно гармонической. Характеристика искажения формы гармонического колебания представляет собой уровень мощности высших гармоник в  $S_m(f)$  на частотах  $2f_0$  и  $3f_0$  или мощность всех паразитных спектральных компонент в широкой полосе частот по отношению к мощности на опорной частоте.

Классификация опорных генераторов приведена на рис.1.

Стандарты частоты и времени – высокостабильные по частоте источники электромагнитных сигналов (радиодиапазона или оптических). Стандарты частоты используются в качестве вторичных или рабочих эталонов в метрологических измерениях, а также при производстве высокоточных средств измерений ча-

стоты и времени, в радионавигации, радиоастрономии и в других сферах.

Квантовые стандарты частоты - устройства, в которых для точного измерения частоты колебаний или для генерирования колебаний с довольно стабильной частотой используются квантовые переходы частичек (атомов, молекул, ионов) из одного энергетического состояния в другое. Квантовые стандарты частоты принято разделять на два класса. В активных квантовых стандартах частоты, квантовые переходы атомов и молекул непосредственно приводят к излучению электромагнитных волн, частота которых служит стандартом или опорной частотой. Такие приборы называются также квантовыми генераторами. В пассивных квантовых стандартах частоты, измеренная частота колебаний внешнего генератора сравнивается с частотой колебаний, соответствующих определенному квантовому переходу выбранных атомов, т.е. с частотой спектральной линии.

Стандарты можно классифицировать за материалом рабочего тела квантовых генераторов (водороду, цезию, рубидию, кварцу).

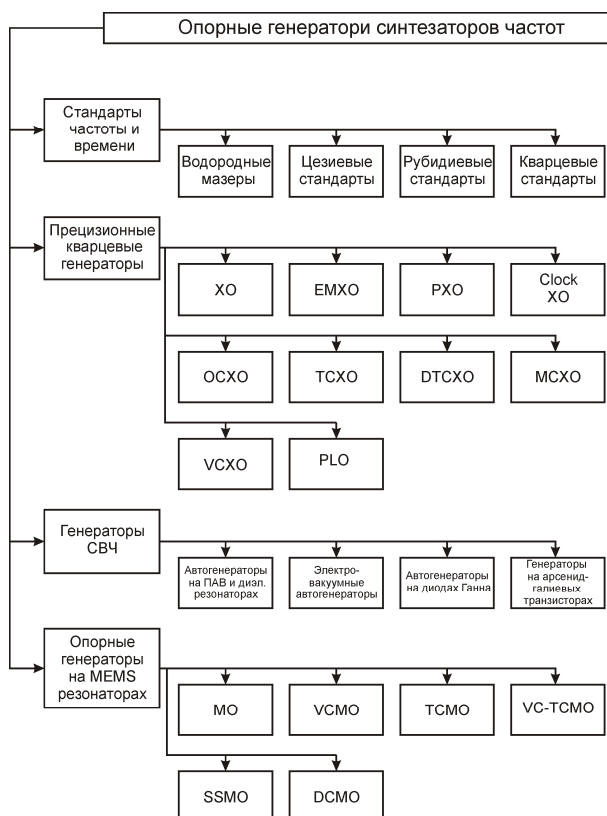


Рис. 1. Классификация опорных автогенераторов систем синтеза частот

Стандарты частоты и времени не находят широкого применения или занимают ограниченную нишу в системах синтеза частот и сиг-

налов в основном из-за своих массогабаритных и энергетических характеристик. В качестве исключения можно привести пример опорного цезиевого стандарта фирмы Simmetricom (США) Quantum SA.45s CSAC. Который представляет собой квантовый стандарт частоты на основе атомов цезия [4]. Внутреннее устройство которого приведено на рис.2.

Такой стандарт частоты и времени имеет выдающиеся характеристики для своего размера. См. таблицу 1. Тем не менее, высокая стоимость такого опорного генератора не дает возможности использовать его в массовых синтезаторах частоты. Применения ограничивается специализированными аппаратами научного и военного назначения.

Генераторы СВЧ используются в диапазонах частот от 300 МГц до 100 ГГц. Стабилизация их частоты генерации кварцевыми резонаторами невозможная, поэтому или требования к стабильности частоты снижают, или применяют другие типы стабилизирующих резонаторов, или используются средства фазовой синхронизации частоты СВЧ - колебаний по этапам частоты.

Качество опорных СВЧ - генераторов оценивается дополнительными параметрами, которые характеризуют влияние фазы коэффициента отражения от нагрузки и вариаций напряжения питания на частоту.

Автогенераторы на ПАВ отличаются повышенной до +10-+23дБмВт выходной мощностью и малым уровнем фазовых шумов. Так значение белого фазового шума генераторов M-tron Industries чрезвычайно низкое - 175дБ/Гц при отстройке 100 кГц от частоты 2ГГц [5].

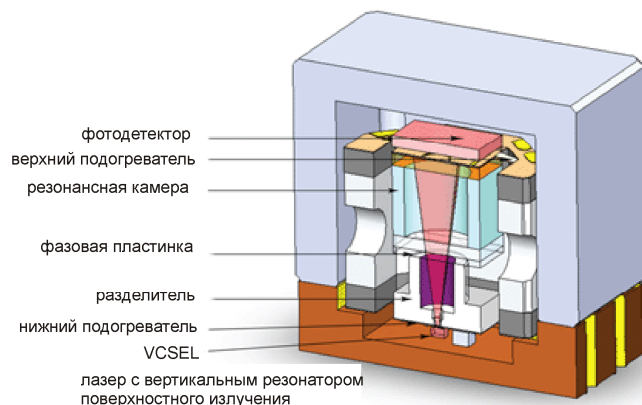


Рис. 2. Внутреннее строение стандарта частоты фирмы Simmetricom на основе атомов цезия [4]

Применение диэлектрических резонаторов позволяет увеличить выходную частоту до 30ГГц при стабильности 100-400 ppm. Фазовые шумы вблизи опорной частоты генераторов

фиксированных частот с сапфировыми резонаторами на диапазон 8-10 ГГц и выходную мощность +13дБмВт очень низкие. В генераторах серии DRO-1000-XX предусмотрен внутренний регулятор напряжения питания, средства снижения микрофонного эффекта, усилитель мощности к уровню +13 к +25 дБмВт на частотах до 26 ГГц [5]. Техника дисковых диэлектрических резонаторов разрешает создавать СВЧ - генераторы, которые превышают стабильность кварца и даже атомные устройства. Пока применение этой техники сдерживается проблемой повторяемости параметров от одного экземпляра резонатора к другому и высокой стоимостью изготовления. В автогенераторах миллиметрового диапазона серии DRO-FT-10 используется арсенид- галиевые полевые транзисторы с затвором Шотки (MESFET) или диоды Ганна.

К опорным генераторам прилегал группа электронных компонентов серии PLO, которая служит для переноса стабильности вверх по частоте: перемножители частоты высокой кратности и системы фазовой автоподстройки частоты (PLL) [6]. В отличие от полномасштабных синтезаторов сетки стабильных частот в них отсутствуют средства организации мелкого шага по частоте: необходимый номинал выходной частоты задается в выходном генераторе с кварцевым резонатором. Благодаря такому упрощению внутренней структуры собственный взнос этих компонентов в фазовые нестабильности небольшой.

Для систем синтеза частот и сигналов, которые массово используются в промышленности в диапазонах средних частот, в качестве автогенераторов, как правило, используются прецизионные кварцевые генераторы. Автогенераторы на основе кварцевых резонаторов делятся на большое количество групп: Обычные кварцевые генераторы (Crystal oscillator -XO); Вакуумированные миниатюрные (Evacuated miniature - EMXO); прецизионные (Precision...-PXO); Тактовые (Clock XO); термостабилизированные (Oven controlled ...-OCXO); термокомпенсированные (Temperature compensated...-TCXO); с цифровой компенсацией (Digitally compensated... - DTCXO); с микропроцессорной компенсацией (Microprocessor compensated... - MCXO); управляемые напряжением по частоте (Voltage controlled...-VCXO); синхронизированные по фазе (Phase locked...-PLO).

Автогенераторы на основе кварцевых резонаторов имеют широкоизвестный ряд преимуществ перед другими типами автогенераторов, тем не менее, они имеют целый ряд недостатков. Важным недостатком с точки зрения

использования их в системах синтеза частот и сигналов, есть небольшой частотный диапазон. Основная резонансная частота кварцевых резонаторов не превышает 40 МГц. Лишь применение высших гармоник кварцевого резонатора дает возможность повысить этот диапазон, однако при этом снижается добротность резонатора, а следовательно возрастает частотная нестабильность синтезированных сигналов. Другой проблемой есть явление старения резонатора, которое наблюдается в первый год работы резонатора. Также для кварцевых резонаторов является характерным сильная зависимость резонатора от температуры окружающей среды. Для борьбы с этим явлением используют высшие механические гармоники для температурной стабилизации основной частоты колебаний [3].

Встроенные цифровые или микропроцессорные схемы термокомпенсации обеспечивают прецизионную стабильность частоты в расширенном интервале температур. Такие схемы МСХО – обеспечивают нестабильность частоты на уровне  $1 \cdot 10^{-9}$ . Фазовые шумы возле опорной частоты для разных моделей кварцевых резонаторов существенно отличаются, их уровень может быть существенно ниже, чем у некоторых атомных стандартов.

Применение кварцевых автогенераторов в качестве опорных для систем синтеза частот и сигналов является распространенной практикой на сегодня. Это обеспечивается их тактико-техническими характеристиками и относительно низкой стоимостью. Тем не менее, конструктивные ограничения кварцевых генераторов, не дают возможности уменьшить стоимость, повысить технологичность, применить групповые и интегральные методы изготовления резонаторов.

Интересной альтернативой кварцевым резонаторам в системах синтеза частот и сигналов есть автогенераторы на MEMS резонаторах. В последние годы широкого распространения получила принципиально новая технология реализации микроэлектромеханических резонаторных устройств, которая является совместной со стандартной технологией изготовления ИС. Таким образом, потенциально, те устройства что на сегодняшний день изготавливаются на дискретных элементах, могут быть реализованы как система на едином кристалле. Кроме того, одновременно с микроминиатюризацией применения MEMS технологии открывает новые возможности в разработке аппаратур связи и синтеза сигналов, коренным образом сменяя ее архитектуру одновременно с улучшением

основных характеристик, таких как добротность, потребляемая мощность, уровень шумов, ширина полосы пропускания канала фильтра. См. таблицу сравнения 2.

На сегодняшний день достигнуты следующие параметры [2]: электромеханические резонаторы, которые работают в диапазоне частот 8-1800 МГц с добротностью 20000...30000 соответственно; управляемые высокодобротные микроконденсаторы с добротностью несколько тысяч в диапазоне частот единиц десятков мегагерц, а на частотах микроволнового диапазона - несколько сотен (например,  $Q=500$  на частоте 2ГГц); объемные катушки индуктивности с  $Q>10$  на частоте до нескольких гигагерц.

MEMS – резонаторы по типу и применению делятся (см.рис.1) на: (МО — Oscillator) со стабильностью 20-100 ppm, MEMS – резонаторы с управлением напряжением (VCMO — Voltage Controlled Oscillator) со стабильностью <50 ppm, MEMS – резонаторы с температурной компенсацией (TCMO – Temperature Compensated Oscillator) со стабильностью 0.5-5 ppm, MEMS – резонаторы с температурной компенсацией с управлением напряжением (VC-TCMO — Voltage Controlled TCMO) со стабильностью 0.5-5 ppm, MEMS – резонаторы с расширением спектра (SSMO – Spread Spectrum Oscillator) со стабильностью 20-100 ppm, MEMS – резонаторы с управлением входной частотой (FSMO – Frequency Select Oscillator) со стабильностью 20-100 ppm, MEMS – резонаторы с цифровым управлением (DCMO – Digitally Controlled Oscillator) со стабильностью 0.5-100 ppm

Микромеханические резонаторы по способу реализации можно разделить на: резонаторы с радиальной, продольной и поперечной вибрациями резонирующего элемента. В общем случае микромеханический резонатор состоит из неподвижных управляющих электродов, на один с которых подается постоянное управляющее напряжение, на другие переменный входной сигнал. При этом резонирующая часть и сигнальные электроды образуют емкостные промежутки. Для функционирования устройства на структуру подается постоянное управляющее напряжение, а при действии на электроды переменного входного сигнала формируется переменное во времени электростатическое поле, которое вызывает колебание подвижной части конструкции. Топологий микрорезонаторов, которые реализуются с помощью MEMS-технологии, есть довольно много. Выбор топологии определяется частотным

диапазоном и стабильностью. Резонансная частота MEMS-резонатора зависит от свойств материала структуры и ее геометрии. Различия в конструкции электромеханических преобразователей, конфигурации и размерах резонирующего элемента разрешают варьировать основные параметры эквивалентного колебательного контура. Таких как резонансная частота, добротность, эквивалентное последовательное сопротивление и уровень фазовых шумов.

Преимуществами дисковых резонаторов является их высокая добротность. К недостаткам таких резонаторов можно отнести значительную величину напряжения смещения - порядка 35..70В, и высокое эквивалентное сопротивление порядка 30 кОм. Перспективной областью применения являются системы мобильной связи.

Недостатком резонатора типа «балка с фиксированным концом» есть значительное эквивалентное сопротивление 4-8 кОм. Резонаторы такого типа работают в диапазоне 5-17,5 МГц и характеризуются низким уровнем интермодуляционных искажений.

Гребенчатый MEMS резонатор продольных колебаний на сегодня является самым высокодобротным среди MEMS-резонаторов, выполненных из поликремния. Устройство ориентировано на применение в автогенераторах с возбуждением на частоте последовательного резонанса. Значение добротности таких резонаторов составляет  $Q = (50..500) \cdot 10^3$ . Уровень фазовых шумов составляет -168дБм/Гц при отстройке на 5кГц от опорной и мощностью опорной не больше -14,5 дБм. Основным недостатком резонаторов такого типа является низкая резонансная частота  $f_0 = (15..100)кГц$ , которая ограничивает их область применения.

Таким образом, существующие виды MEMS - резонаторов имеют следующие характеристики : добротность в диапазоне (1261 ... 500000), эквивалентное сопротивление ( 1 ... 500) ком, ТКЧ > (12,5×10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>), напряжением смещения VP - (5...70 )В, и применяются в широком диапазоне частот - (0,015-2000) МГц. Использование устройств термокомпенсации разрешает максимально приблизить величину ТКЧ MEMS - резонаторов к значению ТКЧ кварцевого резонатора АТ- среза, температурный коэффициент которого (при температурах (-73...+97) °C) находится в диапазоне (-2...2) × 10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>. Эквивалентное сопротивление MEMS - резонаторов и нелинейность преобразования значительно превышают аналогичные характеристики высокодобротных кварцевых

резонаторов, тем не менее, MEMS - устройства имеют значительно меньшие габариты и могут быть реализованы на кристалле, который делает перспективным их применение в системах синтеза частот и сигналов, в частности, для создания MEMS - фильтров с высокой добротностью  $Q$ , низким уровнем внесенных потерь, узкой полосой пропускания канала и резким спадом АЧХ.

Технология изготовления MEMS резонаторов позволяет создавать принципиально новые структуры прямых синтезаторов частоты на основе высокодобротных MEMS - резонаторов в качестве основного опорного генератора и набора высокодобротных фильтров, рассчитанных для формирования набора необходимых частот, смотри рис.3. Такой синтезатор может быть реализован на одном кристалле кремния, который даст возможность удешевить производство синтезаторов.

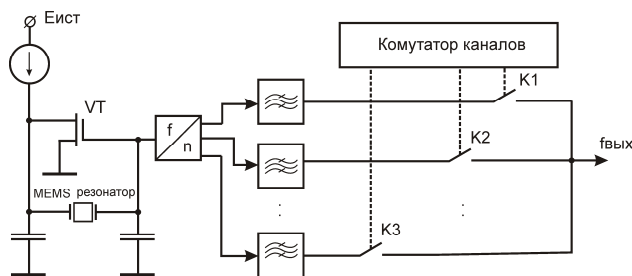


Рис. 3. Прямой синтезатор частоты на основе MEMS резонатора и набора фильтров

Синтезатор также может быть реализован, как набор высокодобротных MEMS - резонаторов изготовленных для синтеза заведомо рассчитанных частот (смотри рис.4).

Тем не менее, второй вариант имеет большее время выхода на рабочий режим после коммутации, но имеет безоговорочное преимущество - более точного синтеза опорных частот, который достигается точным расчетом резонаторов и их изготовлением.

### Выводы

В работе рассмотрены основные требования к опорным генераторам систем синтеза частот и сигналов. Рассмотрены современные опорные генераторы для систем синтеза частот и сигналов. Приведена их классификация. Рассмотрены основные классификационные требования к автогенераторам. Рассмотрены стандарты

частоты и времени, прецизионные кварцевые генераторы, генераторы СВЧ, опорные генераторы на микроэлектромеханических резонаторах (MEMS). Определены области применения того или другого вида резонаторов в качестве опорных генераторов для систем синтеза частот и сигналов. Предложено новые структурные схемы построения прямых синтезаторов частот с реализацией на кристалле кремния в едином технологическом цикле.

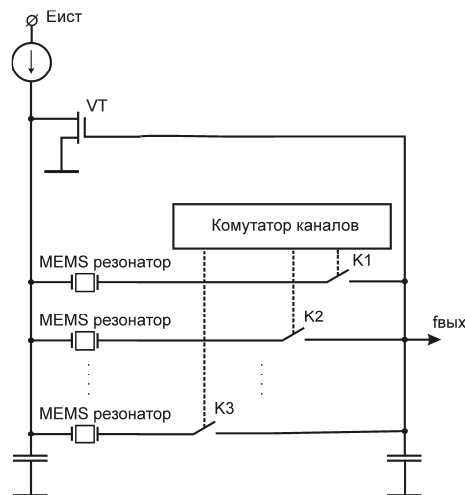


Рис. 4. Прямой синтезатор частоты на основе набора высокодобротных MEMS резонаторов

### Литература

1. Полікарівських О.І Архітектура прямого цифрового синтезатора частоти для рішень цифрового радіо/Полікарівських О.І. //Вісник Хмельницького національного університету.-2012.Том.3.- С.142-146
2. Колпаков Ф.Ф. Микроэлектромеханические устройства в радиотехнике и системах телекоммуникаций / Ф.Ф. Колпаков, Н.Г. Борзяк, В.И.Кортунов –Харків.-ХАІ.-2006.
3. Підченко С.К, Моделювання термокомпенсованого DDS в середовищі Matlab / Підченко С.К., Марков С.В., Лаба О.А., Акулінічев А.А.// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.-2010.-№1.-С.77-80.
4. Symmetricom // Datasheet Quantum SA.45s CSAC Chip Scale Atomic Clock– Режим доступу до журн.:<http://www.symmetricom.com/resources/download-library/documents/datasheets/quantum-sa45s-csac/>
5. Белов Л.Компоненты генераторов стабильной частоты. Генераторы, управляемые напряжением.- Электроника: НТБ- 2004.- №1.- с.42;
6. Белов Л. Опорные генераторы.- Электроника: НТБ - 2004.- №6.- с.38

Таблица 1

Сравнительные характеристики высокоточных опорных генераторов

	ТСХО	ОСХО	Атомный стандарт	Атомный стандарт CSAC
Объем	0,07 см <sup>3</sup>	52 см <sup>3</sup>	122 см <sup>3</sup>	16 см <sup>3</sup>
Мощность при 25 °С	20 мВт	3 Вт	10 Вт	120 мВт
Задержка выхода на режим	731 мкс	69 мкс	1,7 мкс	2,3 мкс
Начальная точность	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-7}$	$< 5 \cdot 10^{-11}$	$< 5 \cdot 10^{-11}$
Температурный коэффициент	$\pm 3 \cdot 10^{-7}$	$\pm 3 \cdot 10^{-8}$	$\pm 3 \cdot 10^{-10}$	$\pm 1 \cdot 10^{-9}$
Стоимость	низкая	высокая	высокая	высокая

Таблица 2

Сравнение параметров кварцевого резонатора с MEMS резонатором

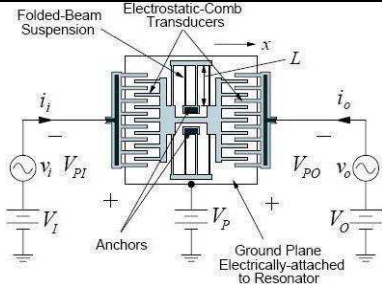
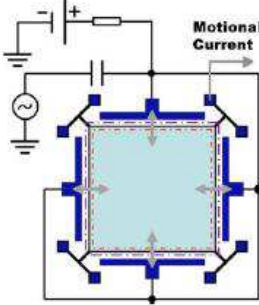
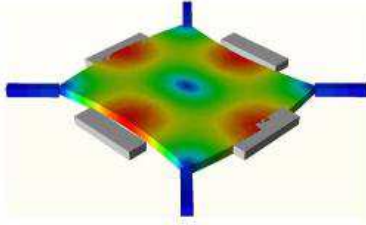
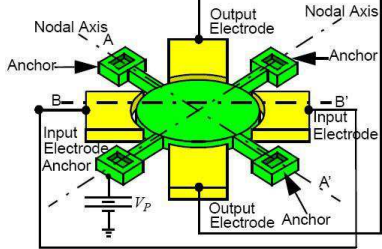
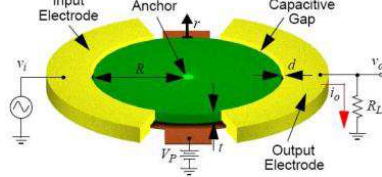
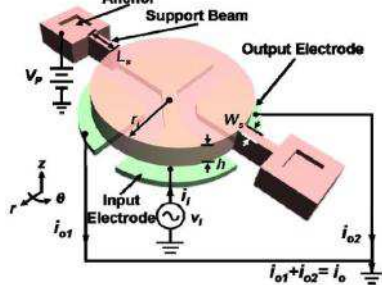
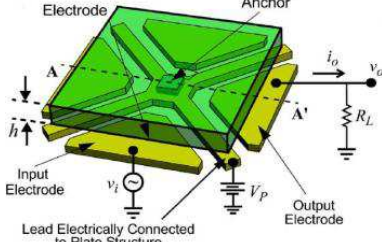
Параметр	Кварцевый кристаллический резонатор ТСХО	MEMS резонатор
Размер	2-5 мм	400 мкм
Частота	1-80 МГц	1-50 МГц
Добротность $Q (\times 10^3)$	100-200	75-150
Возможность КМОП интеграции	Невозможно	возможно
Корпусирование	Керамический или металлический корпус	Возможный пластик
Старение (за первый год)	3-5 ppm	3 ppm
Компенсированная температурная стабильность	1-10 ppm	1-10 ppm
Стойкость к ударам и вибрациям	низкая	высокая
Стоимость	высокая	низкая

Таблица 3

Сравнительная таблица MEMS-резонаторов

Тип резонатора	Материал	Размеры	Частота и добротность	Схематическое изображение
Балка с фиксированным концом	Поликремний (толщина- 2мкм)	Длина балки-40 мкм, ширина-8мкм	9,34 МГц / 3100	
Балка с фиксированным концом	Монокристаллический кремний (толщина- 20мкм)	Длина балки-700 мкм, ширина-6мкм	3,2 МГц / 4500	
Резонатор с концами, которые свободно колеблются	Поликремний (толщина- 2,05мкм)	Длина балки-13 мкм, ширина-6мкм	92 МГц / 7450	

Продолжение табл. 3

<p>Гребенчатый MEMS резонатор продольных колебаний</p>	<p>Монокристаллический кремний (толщина- 30мкм)</p>	<p>Количество гребенок - 500, длина гребенки - 10 мкм</p>	<p>32 кГц / 50000</p>	
<p>Квадратный MEMS-резонатор (объемной акустической моды)</p>	<p>Монокристаллический кремний (толщина- 25мкм)</p>	<p>Длина стороны 2 мм</p>	<p>2,18 МГц / 1160000</p>	
<p>Квадратный MEMS-резонатор с деформациями (объемной акустической моды)</p>	<p>Поликристаллический кремний (толщина- 2мкм)</p>	<p>Длина стороны 35 мкм</p>	<p>173 МГц / 9300</p>	
<p>Чашеподобный резонатор (объемной акустической моды)</p>	<p>Поликристаллический кремний (толщина- 3мкм)</p>	<p>Радиус диска-32 мкм</p>	<p>60 МГц / 48000</p>	
<p>Диск с радиальным контуром (объемной акустической моды)</p>	<p>Поликристаллический кремний (толщина- 2мкм)</p>	<p>Радиус диска 16,7 мкм</p>	<p>156 МГц / 9290</p>	
<p>Диск с радиальным контуром (колебательный режим)</p>	<p>Никель (толщина- 2,05мкм)</p>	<p>Радиус диска 15 мкм</p>	<p>11,6 МГц / 1651</p>	
<p>Квадратный резонатор (колебательный режим)</p>	<p>Поликристаллический кремний (толщина- 2,2мкм)</p>	<p>Длина стороны 15 мкм</p>	<p>68 МГц / 15000</p>	

Кольцо (охватывающий контур)	Поликремний (толщина- 2мкм)	Радиус 11,8 мкм	1,2 ГГц / 15000	
Квадратный резонатор (колебательный режим)	Монокристаллический кремний	0,8 на 0,6 мм	5,1 МГц / 80000	
Треугольная балка (режим скручивания)	Монокристаллический кремний	Длина балки-100 мкм, ширина 4,25 мкм	20 МГц / 220000	

Хмельницький національний університет, Україна

## MODERN REFERENCE OSCILLATOR FOR SYNTHESIS OF FREQUENCY AND SIGNALS

**A.I. Polikarovskikh**

Modern reference oscillator frequency synthesis for systems and signals was considered. The classification of current reference generator was considered. The basic requirements for classification excited oscillator. Considered standard frequency and time precision crystal oscillators, generators, microwave , basic generators resonators microelectromechanical (MEMS). Defined the scope of a particular type resonators as reference generators for frequency synthesis systems and signals

Key words: oscillator , reference oscillator , atomic standards, quartz resonators , MEMS