

**ВИБІР ОПОРНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ДЛЯ СИСТЕМ  
СИНТЕЗУ ЧАСТОТ І СИГНАЛІВ**

*Розглянуто сучасні опорні генератори для систем синтезу частот і сигналів. Наведено класифікацію сучасних опорних генераторів. Розглянуто основні класифікаційні вимоги до автогенераторів. Розглянуто стандарти частоти та часу, прецизійні кварцові генератори, генератори НВЧ, опорні генератори на мікроелектромеханічних резонаторах (MEMS). Визначені області застосування того чи іншого виду резонаторів у якості опорних генераторів для систем синтезу частот і сигналів.*

*Ключові слова: автогенератор, опорні генератори, атомні стандарти, кварцові резонатори, MEMS*

O.I. POLIKAROVSKYKH  
Khmelnitsky National University

**SELECTION SUPPORT REFERENCE OSCILLATOR FOR SYNTHESIS SYSTEMS OF FREQUENCY AND SIGNALS**

*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 particular type resonators as reference generators for frequency synthesis systems and signals.*

*Keywords: oscillator, reference oscillator, atomic standards, quartz resonators, MEMS*

**Постановка задачі**

Прямі цифрові синтезатори частоти відіграють важливу роль у сучасних радіоелектронних пристроях. Це забезпечується багатьма значними перевагами: швидкість пере налаштування частоти, висок розрізняльна здатність, широка синтезована смуга частот. Багаторівневі DDS у силу своєї, технологічності, надійності, можливості мікромініатюризації та унікальності технічних характеристик (нерозривність фази під час перемикання з частоти на частоту, можливість формування сигналів складної форми, цифрове керування амплітудою, частотою та фазою вихідного коливання) на сьогодні знайшли застосування у системах зв'язку. Особливо перспективним є використання DDS у радіотехнічних системах передачі інформації з підвищеною завадостійкістю та захищеністю [1]. На сьогоднішній день ряд характеристик обчислювальних синтезаторів частоти є гіршими ніж у синтезаторів на основі ФАПЧ. Такими параметрами є гірші показники короткотривалої фазової стабільності (джитеру), існування у спектрі синтезованого сигналу гармонійних складових з високими значеннями амплітуд. Одним із напрямків покращення короткотривалої фазової стабільності є використання опорних генераторів із покращеними якісними характеристиками.

**Аналіз досліджень та публікацій**

Питанням побудови високостабільних опорних генераторів займалися багато авторів та наукових колективів [2,3,4,...]. Такі генератори сильно розрізняються за середньою частотою, рівневі сигналів і відносній нестабільності частоти, яка може змінюватись  $10^{-3}$  до  $10^{-15}$ . Періодичні коливання автономних генераторів  $u(t)$  характеризуються середньою частотою, формою коливання на протязі його періоду і флуктуаціями поточної фази. Стабільність частот таких генераторів оцінюється порівнянням їх сигналів з коливаннями вторинних стандартів частоти. Майже гармонійне коливання опорного автогенератора можна записати у вигляді

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

де  $U_0$  і  $f_0$  - амплітуда і носійна частота опорного сигналу, де  $\mu(t)$  і  $\varepsilon(t)$  - його амплітудна та фазові нестабільності,  $\varphi_0$  - початкова фаза коливання. Безпосередньо після увімкнення напруг автогенераторів у змінні  $\mu(t)$  і  $\varepsilon(t)$  входять регулярні складові, що визначають тривалість встановлення амплітуди та вибіг частоти під час прогріву. У фіксованому температурному режимі процеси, що викликають амплітудну та фазові нестабільності є випадковими. При довготривалій роботі можливий дрейф середньої частоти, що пов'язаний із старінням стабілізуючого резонатора або деградацією вакууму у колбах атомних стандартів частоти. Відносне середньоквадратичне відхилення (ВКВ) від частоти стандарту характеризуються похибкою встановлення частоти  $d_{\text{сст}}$ . Для генераторів із невисокою стабільністю значення похибки вимірюється у сотих долях (процентах). Для генераторів із середньою стабільністю вказують мільйонні долі -  $\text{млн}^{-1}$  (parts per million - ppm), у разі високої стабільності – мільярдні (білліонні) частини (parts per billion - ppb) [4].

Характер фазових і амплітудних нестабільностей визначає спектральна густина потужності (СПП) періодичного коливання  $u(t)$  на одиничному опорі, зосередженому поблизу частоти  $f_0$ :

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

Проте більш коректною є характеристика коливань автогенератора є його СГП його фазової нестабільності  $S_\varphi(F)$ , де  $F = |f - f_0|$  - відстройка від номінальної частоти. Фазова нестабільність однозначно визначається нестабільністю циклічної частоти коливання

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

а спектральна густина потужності відхилення фази пов'язана із СГП частотних відхилень співвідношенням

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

Протягом короткого часу можливі зміни фази, що обумовлені ефектом тремтіння (джитером). Джитер викликається амплітудним і фазовим шумом, як внутрішнього, так і зовнішнього походження. Джитер сигналу має різні характеристики залежно від його причин і джерел. Джитер поділяють на дві основні категорії: випадковий (random jitter - RJ) і регулярний (deterministic jitter - DJ).

Випадковий джитер обумовлений шумовими процесами, що відбуваються у всіх напівпровідниках і компонентах. Передбачається, що цей джитер підпорядковується розподілу Гауса, і, як такий, ніколи не може досягти свого максимального значення в заданий відрізок часу. Таким чином, він характеризується статистичними величинами: середнім значенням і середньоквадратичним відхиленням. Джерелами випадкового джитеру є:

- Тепловий шум (thermal noise) - пов'язаний з потоком електронів в провідниках і зростає із збільшенням смуги пропускання, температури і теплового опору;
- Дробовий шум (shot noise) - шум електронів і дірок у напівпровідниках, який збільшується в залежності від струму зсуву і вимірюваної смуги частот;
- Шум мерехтіння (flicker noise) - шум, спектр якого обернено пропорційний частоті, т.зв. рожевий шум.
- Шум пульсацій напруги живлення;
- Шум зовнішніх акустичних впливів (мікрофонний ефект);

Регулярний джитер викликається діючими на сигнал процесами, що відбуваються в системному обладнанні. Системний джитер залежить від характеристик цифрової системи. Приклади джерел системного джитеру:

- Перехресні перешкоди від синтезованих сигналів;
- Вплив дисперсії при поширенні сигналу;
- Неузгодженість опорів.

Джитер оцінюється по значенню середньоквадратичного відхилення моментів переходу фази через нуль і вимірюють у пікосекундах.

Загальну оцінку нестабільності частот опорних генераторів зручно представляти у вигляді середньоквадратичного відхилення частоти за певний проміжок часу. Короткотривала нестабільність частоти  $\delta_k(T)$  визначає відносне середньоквадратичне відхилення (ВСВ) за час  $T$  тривалістю 1,10,100 або 1000 с. Цей параметр визначає внесок у частотний шум таких природних процесів, як дробовий та теплові шуми автогенератора. Довготривала нестабільність частоти  $\delta_o(T)$  за час  $T$  тривалістю в добу, місяць, рік, 10 років – характеризує ефект старіння та деградації елементів.

Значення носійної частоти коливання опорного генератора залежить від зовнішніх дестабілізуючих факторів, головний з яких температури навколишнього середовища. Температурний коефіцієнт відхилення частоти (ТКВЧ) вимірюється за номінальної температури у відносних долях, віднесених до 1°C.

Форма коливань автогенераторів, будь якої, конструкції не є абсолютно гармонійною. Характеристика спотворення форми гармонійного коливання являє собою рівень потужності вищих гармонік в  $S_m(f)$  на частотах  $2f_0$  і  $3f_0$  або потужність усіх паразитних спектральних компонент у широкій смузі частот по відношенню до потужності на носійній частоті.

Класифікація опорних генераторів наведена на рис. 1.

Стандарти частоти і часу – високостабільні за частотою джерела електромагнітних сигналів (радіодіапазоні або оптичних). Стандарти частоти використовуються в якості вторинних або робочих еталонів в метрологічних вимірах, а також при виробництві високоточних засобів вимірювань частоти і часу, в радіонавігації, радіоастрономії і в інших сферах.

Квантові стандарти частоти - пристрої, в яких для точного вимірювання частоти коливань або для генерування коливань з досить стабільною частотою використовуються квантові переходи частинок (атомів, молекул, іонів) з одного енергетичного стану в інший. Квантові стандарти частоти прийнято розділяти на два класи. В активних квантових стандартах частоти квантові переходи атомів і молекул безпосередньо приводять до випромінювання електромагнітних хвиль, частота яких служить стандартом або опорною частотою. Такі прилади називаються також квантовими генераторами. У пасивних квантових стандартах

частоти. вимірювана частота коливань зовнішнього генератора порівнюється з частотою коливань, відповідних певному квантовому переходу вибраних атомів, тобто з частотою спектральної лінії.

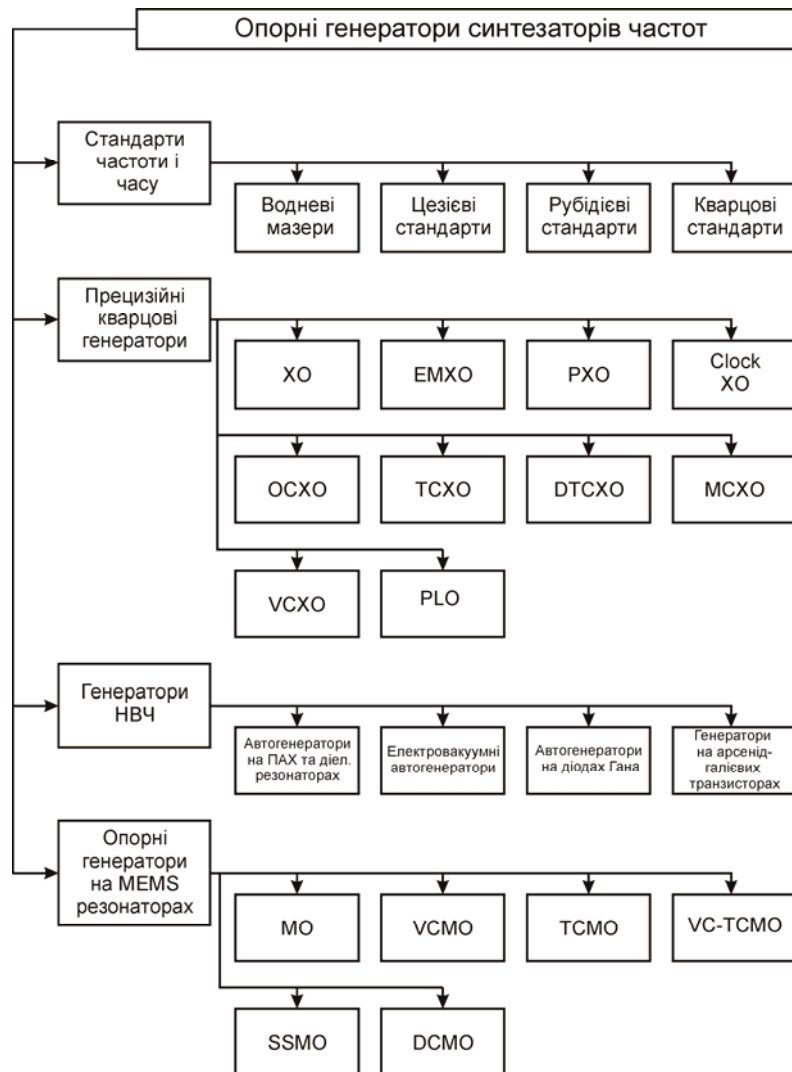


Рис.1 Класифікація опорних автогенераторів систем синтезу частот

Стандарти можна класифікувати за матеріалом робочого тіла квантових генераторів (водневі, цезієві, рубідієві, кварцові)

Стандарти частоти та часу не знаходять, або займають обмежену нішу у системах синтезу частот та сигналів в основному через свої масогабаритні та енергетичні характеристики. У якості виключення можна навести приклад опорного цезієвого стандарту фірми Simmetricom (США) Quantum SA.45s CSAC. Що являє собою квантовий стандарт частоти на основі атомів цезію [4]. Внутрішня будова якого наведена на рис.2.

Такий стандарт частоти та часу має видатні характеристики для свого розміру. Див. таблицю 1. Проте висока вартість такого опорного генератора не дає можливості використати його у масових синтезаторах частоти. Застосування обмежується спеціалізованою апаратурою наукового та військового призначення.

Генератори НВЧ використовуються у діапазонах частот від 300 МГц до 100 ГГц. Стабілізація їх частоти генерації кварцовими резонаторами неможлива, тому або вимоги до стабільності частоти знижуються, або застосовують інші типи стабілізуючих резонаторів, або використовуються засоби фазової синхронізації частоти НВЧ - коливань за еталом частоти.

Якість опорних НВЧ – генераторів оцінюється додатковими параметрами, що характеризують вплив фази коефіцієнта відбиття від навантаження і варіацій напруги живлення на частоту.

Автогенератори на ПАВ відрізняються підвищеною до +10-+23дБмВт вихідною потужністю і малим рівнем фазових шумів. Так, значення білого фазового шуму генераторів M-tron Industries надзвичайно низьке – 175дБ/Гц при відстройці 100кГц від частоти 2ГГц [5].

Застосування діелектричних резонаторів дозволяє збільшити вихідну частоту до 30ГГц за стабільності 100-400 ppm. Фазові шуми поблизу носійної частоти генераторів фіксованих частот з сапфіровими резонаторами на діапазон 8-10 ГГц і вихідну потужність +13дБмВт дуже низькі. В генераторах серії DRO-1000-XX передбачено внутрішній регулятор напруги живлення, засоби зниження мікрофонного ефекту, підсилювач потужності до рівня +13 до +25 дБмВт на частотах до 26 ГГц [5]. Техніка дискових

діелектричних резонаторів дозволяє створювати НВЧ - генератори, за переважають за стабільністю кварцові і навіть атомні пристрої. Поки застосування цієї техніки стримується проблемою повторюваності параметрів від одного екземпляру резонатора до іншого і високою вартістю виготовлення. В автогенераторах міліметрового діапазону серії DRO-FT-10 використовується арсенід галієвий польовий транзистор з затвором Шотки (MESFET) або діоди Ганна.

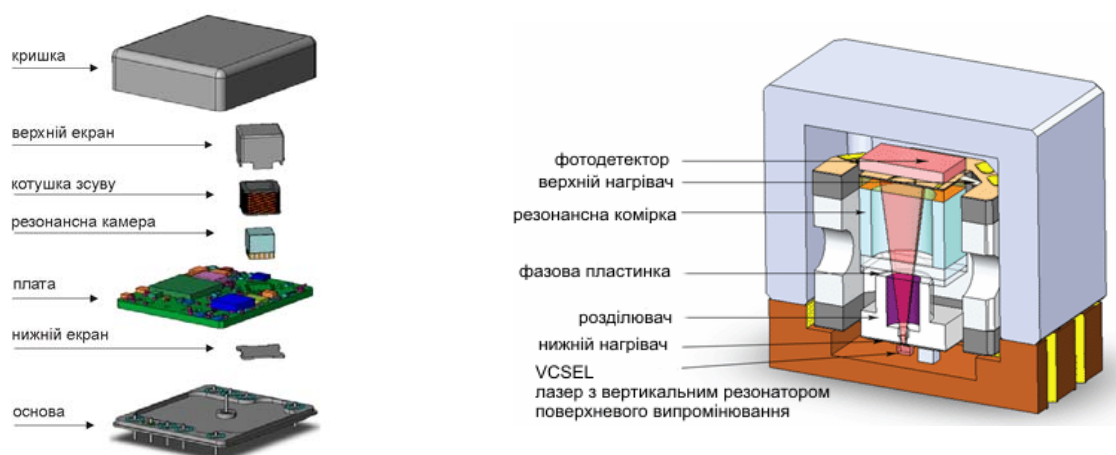


Рис.2. Внутрішня будова стандарту частоти фірми Symmetricom на основі атомів цезію [4]

До опорних генераторів прилягає група електронних компонентів серії PLO. Яка служить для переносу стабільності вгору по частоті: помножувачі частоти високої кратності і системи фазової автопідстройки частоти (PLL) [6]. На відміну від повномасштабних синтезаторів сітки стабільних частот у них відсутні засоби організації мілкового кроку по частоті: необхідний номінал вихідної частоти задається у вихідному генераторі з кварцовим резонатором. Завдяки такому спрощенню внутрішньої структури власний внесок цих компонентів у фазову нестабільність є невеликим.

Для систем синтезу частот та сигналів, які масово використовуються у промисловості у діапазонах середніх частот, у якості автогенераторів, як правило використовуються прецизійні кварцові генератори. Автогенератори на основі кварцових резонаторів мають поділяються на велику кількість груп: Звичайні кварцові генератори (Crystal oscillator -XO); Вакуумовані мініатюрні (Evacuated miniature - EMXO); прецизійні (Precision...-PXO); тактові (Clock XO); термостабілізовані (Oven controlled ...-OCXO); термокомпенсовані (Temperature compensated...-TCXO); з цифровою компенсацією (Digitally compensated... - DTCXO); з мікропроцесорною компенсацією (Microprocessor compensated... - MCXO); керовані напругою за частотою (Voltage controlled...-VCXO); синхронізовані за фазою (Phase locked...-PLO).

Таблиця 1

#### Порівняльні характеристики високоточних опорних генераторів

	ТСХО	ОСХО	Атомний стандарт	Атомний стандарт CSAC
Об'єм	0,07 см <sup>3</sup>	52 см <sup>3</sup>	122 см <sup>3</sup>	16 см <sup>3</sup>
Потужність при 25 °С	20 мВт	3 Вт	10 Вт	120 мВт
Затримка виходу на режим	731 мкс	69 мкс	1,7 мкс	2,3 мкс
Початкова точність	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-7}$	$< 5 \cdot 10^{-11}$	$< 5 \cdot 10^{-11}$
Температурний коефіцієнт	$\pm 3 \cdot 10^{-7}$	$\pm 3 \cdot 10^{-8}$	$\pm 3 \cdot 10^{-10}$	$\pm 1 \cdot 10^{-9}$
Вартість	низька	висока	висока	висока

Автогенератори на основі кварцових резонаторів мають широковідомий ряд переваг перед іншими типами автогенераторів, проте вони мають цілий ряд недоліків. Важливим недоліком з точки зору використання їх у системах синтезу частот та сигналів є невеликий частотний діапазон. Основна резонансна частота кварцових резонаторів не перевищує 40 МГц. Лише застосування вищих гармонік кварцового резонатора дає змогу підвищити цей діапазон, однак при цьому знижується добротність резонатора, а отже зростає частотна нестабільність синтезованих сигналів. Іншою проблемою є явище старіння резонатора, яке спостерігається у перший рік роботи резонатора. Також для кварцових резонаторів є характерним сильна залежність резонатора від температури навколишнього середовища. Для боротьби з цим явищем використовують вищі механічні гармоніки для температурної стабілізації основної частоти коливань [3].

Вбудовані цифрові або мікропроцесорні схеми термокомпенсації забезпечують прецизійну стабільність частоти у розширеному інтервалі температур. Такі схеми MCXO – забезпечують нестабільність

частоти на рівні  $1 \cdot 10^{-9}$  Фазові шуми біля носійної частоти для різних моделей кварцових резонаторів суттєво відрізняються, їх рівень може бути суттєво нижчим, навіть ніж у атомних стандартів.

Отже застосування кварцових автогенераторів у якості опорних для систем синтезу частот і сигналів є поширеною практикою на сьогодні. Це забезпечується їх тактико-технічними характеристиками та відносно низькою вартістю. Проте конструктивні обмеження кварцових генераторів, не дають змоги зменшити вартість, підвищити технологічність, застосувати групові і інтегральні методи виготовлення резонаторів.

Цікавою альтернативою кварцовим резонаторам у системах синтезу частот і сигналів є автогенератори на MEMS резонаторах. В останні роки широкого розповсюдження отримала принципово нова технологія реалізації мікроелектромеханічних резонаторних пристроїв, яка є сумісною із стандартною технологією виготовлення ІС. Таким чином потенційно, ті пристрої що на сьогоднішній день виготовляються на дискретних елементах, можуть бути реалізовані як система на єдиному кристалі. Крім того, одночасно з мікромініатюризацією застосування MEMS технології відкриває нові можливості в розробці апаратури зв'язку та синтезу сигналів, докорінним чином змінюючи її архітектуру одночасно із покращенням основних характеристик, таких як добротність, споживана потужність, рівень шумів, ширина смуги пропускання каналу фільтра. Дивись таблицю порівняння 2.

На сьогоднішній день досягнуті наступні параметри [2]: електромеханічні резонатори, що працюють у діапазоні частот 8-1800 МГц з добротністю 20000...3000 відповідно; керовані високодобротні мікроконденсатори з добротністю декілька тисяч у діапазоні частот одиниць десятків мегагерц, а на частотах мікрохвильового діапазону – декілька сотен (наприклад,  $Q=500$  на частоті 2ГГц); об'ємні котушки індуктивності з  $Q>10$  на частоті до декількох гігагерц.

Таблиця 2

#### Порівняння параметрів кварцового резонатора із MEMS резонатором

Параметр	Кварцовий кристалічний резонатор ТСХО	MEMS резонатор
Розмір	2-5 мм	400 мкм
Частота	1-80 МГц	1-50 МГц
Добротність $Q (\times 10^3)$	100-200	75-150
Можливість КМОП інтеграції	Неможливо	можливо
Корпусування	Керамічний або металевий корпус	Можливий пластик
Старіння (за перший рік)	3-5 ppm	3 ppm
Компенсована температурна стабільність	1-10 ppm	1-10 ppm
Стійкість до ударів та вібрацій	низька	висока
Вартість	висока	низька

MEMS – резонатори за типом та застосуванням поділяються (див.рис.1) на (МО — Oscillator) із стабільністю 20-100 ppm, MEMS – резонатори із керуванням напругою (VCMO — Voltage Controlled Oscillator) із стабільністю <50 ppm, MEMS – резонатори із температурною компенсацією (ТСМО – Temperature Compensated Oscillator) із стабільністю 0.5-5 ppm, MEMS – резонатори із температурною компенсацією із керуванням напругою (VC-ТСМО — Voltage Controlled ТСМО) із стабільністю 0.5-5 ppm, MEMS – резонатори із розширенням спектру (SSMO – Spread Spectrum Oscillator) із стабільністю 20-100 ppm, MEMS – резонатори із керуванням входною частотою (FSMO – Frequency Select Oscillator) із стабільністю 20-100 ppm, MEMS – резонатори із цифровим керуванням (DCMO – Digitally Controlled Oscillator) із стабільністю 0.5-100 ppm

Мікромеханічні резонатори за способом реалізації можна поділити на резонатори з радіальною, поздовжньою і поперечною вібраціями резонуючого елемента. У загальному випадку мікромеханічний резонатор складається з нерухомих керуючих електродів, на один з яких подається постійна керуюча напруга, на інші змінний входний сигнал. При цьому резонуюча частина і сигнальні електроди утворюють емнісні проміжки. Для функціонування пристрою на структуру подається постійна керуюча напруга, а при дії на електроди змінного входного сигналу формується змінне за часом електростатичне поле, що викликає коливання рухомої частини конструкції. Топологія мікрорезонаторів, що реалізуються за допомогою MEMS-технології, є доволі різноманітно. Вибір топології визначається частотним діапазоном та стабільністю. Резонансна частота MEMS-резонатора залежить від властивостей матеріалу структури та її геометрії. Різниця у конструкції електромеханічних перетворювачів, конфігурації і розмірах резонуючого елемента дозволяють варіювати основні параметри еквівалентного коливального контуру. Таких як резонансна частота, добротність, еквівалентний послідовний опір та рівень фазових шумів.

Порівняльна таблиця MEMS-резонаторів

Тип резонатора	Матеріал	Розміри	Частота та добротність	Схематичне зображення
1	2	3	4	5
Балка із фіксованим кінцем	Полікремній (товщина-2мкм)	Довжина балки-40 мкм, ширина-8мкм	9,34 МГц / 3100	
Балка із фіксованим кінцем	Монокристалічний кремній (товщина-20мкм)	Довжина балки-700 мкм, ширина-6мкм	3,2 МГц / 4500	
Резонатор із кінцями, що вільно коливаються	Полікремній (товщина-2,05мкм)	Довжина балки-13 мкм, ширина-6мкм	92 МГц / 7450	
Гребінчастий MEMS резонатор поздовжніх коливань	Монокристалічний кремній (товщина-30мкм)	Кількість гребінок - 500, довжина гребінки - 10 мкм	32 кГц / 50000	
Квадратний MEMS-резонатор (об'ємної акустичної моди)	Монокристалічний кремній (товщина-25мкм)	Довжина сторони 2 мм	2,18 МГц / 1160000	
Квадратний MEMS-резонатор із деформаціями (об'ємної акустичної моди)	Полікарбід кремнію (товщина-2мкм)	Довжина сторони 35 мкм	173 МГц / 9300	
Чашкоподібний резонатор (об'ємної акустичної моди)	Полікремній (товщина-3мкм)	Радіус диска-32 мкм	60 МГц / 48000	

1	2	3	4	5
Диск з радіальним контуром (об'ємної акустичної моди)	Полікремній (товщина-2мкм)	Радіус диска 16,7 мкм	156 МГц / 9290	
Диск з радіальним контуром (коливальний режим)	Нікель (товщина-2,05мкм)	Радіус диска 15 мкм	11,6 МГц / 1651	
Квадратний резонатор (коливальний режим)	Полікремній (товщина-2,2мкм)	Довжина сторони 15 мкм	68 МГц / 15000	
Кільце (охоплюючий контур)	Полікремній (товщина-2мкм)	Радіус 11,8 мкм	1.2 ГГц / 15000	
Квадратний резонатор (коливальний режим)	Моно-кристалічний кремній	0,8 на 0,6 мм	5,1 МГц / 80000	
Трикутна балка (режим скручування)	Моно-кристалічний кремній	Довжина балки-100 мкм, ширина 4,25 мкм	20 МГц / 220000	

Перевагами дискових резонаторів є їх висока добротність. До недоліків таких резонаторів можна віднести значна величина напруги зміщення – порядку 35..70 В, та високий еквівалентний опір порядку 30 кОм. Перспективною областю застосування є системи мобільного зв'язку.

Недоліком резонатора типу «балка з фіксованим кінцем» є значний еквівалентний опір 4-8 кОм. Резонатори такого типу реалізовані на сьогодні працюють у діапазоні 5-17,5 МГц і характеризуються низьким рівнем інтермодуляційних спотворень.

Гребінчастий MEMS резонатор подовжніх коливань на сьогодні є самим високо добротним серед MEMS-резонаторів, виконаних з полікремнію. Пристрій орієнтовано на застосування у автогенераторах із збудженням на частоті послідовного резонансу. Значення добротності таких резонаторів складає  $Q = (50..500) \cdot 10^3$ . Рівень фазових шумів складає -168дБм/Гц при відстройці на 5кГц від носійної і потужності носійної не більше -14,5 дБм. Основним недоліком резонаторів такого типу є низька резонансна частота  $f_0 = (15..100)кГц$ , що обмежує їх область застосування.

Таким чином, існуючі види MEMS - резонаторів мають наступні характеристики : добротність в діапазоні (1261 ... 500000), еквівалентний опір ( 1 ... 500) кОм ,ТКЧ > (12,5×10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>), напругою зміщення V<sub>p</sub>

- (5... 70) В, і застосовуються в широкому діапазоні частот - (0,015-2000) МГц. Використання пристроїв термокомпенсації дозволяє максимально наблизити величину ТКЧ MEMS - резонаторів до значення ТКЧ кварцового резонатора АТ-зрізу, температурний коефіцієнт якого (за температур (-73...+97) °С) знаходиться в діапазоні  $(-2 \dots 2) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Еквівалентний опір MEMS - резонаторів і нелінійність перетворення значно перевищують аналогічні характеристики високочастотних кварцових резонаторів, проте MEMS - пристрої мають значно менші габарити і можуть бути реалізовані на кристалі, що робить перспективним їх застосування в системах синтезу частот і сигналів, зокрема, для створення MEMS - фільтрів з високою Q, низьким рівнем внесених втрат, вузькою смугою пропускання каналу і різким спадом АЧХ.

Технологія виготовлення MEMS резонаторів дозволяє створювати принципово нові структури прямих синтезаторів частоти на основі високочастотних MEMS – резонаторів у якості основного опорного генератора та набору високочастотних фільтрів, розрахованих для формування набору необхідних частот, див. рис.3. Такий синтезатор може бути реалізований на одному кристалі кремнію, що дасть можливість здешевити виробництво синтезаторів.

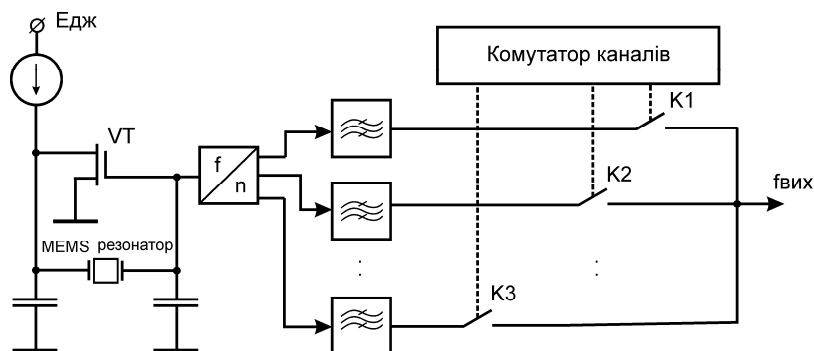


Рис.3. Прямий синтезатор частоти на основі MEMS резонатора та набору фільтрів

Синтезатор також може бути реалізований, як набір високочастотних MEMS – резонаторів виготовлених для синтезу наперед розрахованих частот. (див.рис.4) Проте другий варіант має більший час виходу на робочий режим після комутації, але має беззаперечну перевагу більш точного синтезу опорних частот, що досягається точним розрахунком резонаторів і їх виготовленням

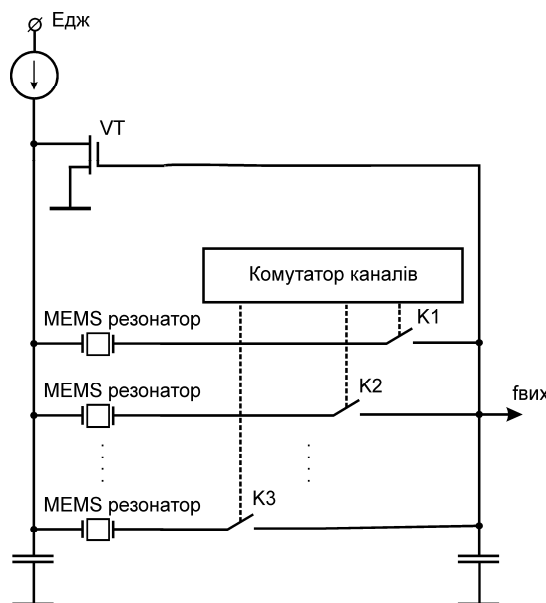


Рис.4. Прямий синтезатор частоти на основі набору високочастотних MEMS резонаторів

### Висновки

В роботі розглянуто основні вимоги до опорних генераторів. Розглянуто сучасні опорні генератори для систем синтезу частот і сигналів. Наведено класифікацію сучасних опорних генераторів. Розглянуто основні класифікаційні вимоги до автогенераторів. Розглянуто стандарти частоти та часу, прецизійні кварцові генератори, генератори НВЧ, опорні генератори на мікроелектромеханічних резонаторах (MEMS). Визначені області застосування того чи іншого виду резонаторів у якості опорних генераторів для систем синтезу частот і сигналів. Запропоновано нові структурні схеми побудови прямих синтезаторів частот з реалізацією на кристалі кремнію у єдиному технологічному циклі.



**Література**

1. Полікаровських О.І Архітектура прямого цифрового синтезатора частоти для рішень цифрового радіо/Полікаровських 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;

**References**

1. Polikarovs'kih O.I Arhitektura prjamogo cifrovogo sintezatora chastoti dlja rishen' cifrovogo radio/Polikarovs'kih O.I. //Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu.-2012.Tom.3.-S.142-146
2. Kolpakov F.F. Mikrojelektromehaničeskie ustrojstva v radiotekhnike i sistemah telekommunikacij / F.F. Kolpakov, N.G. Borzjak, V.I.Kortunov –Harkiv.-HAI.-2006.
3. Pidchenko S.K, Modeljuvannja termokompensovanogo DDS v seredovishhi Matlab / Pidchenko S.K., Markov S.V., Laba O.A., Akulnichev A.A.// Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah.-2010.-№1.-S.77-80.
4. Symmetricom // Datasheet Quantum SA.45s CSAC Chip Scale Atomic Clock– Rezhim dostupu do zhurn. : <http://www.symmetricom.com/resources/download-library/documents/datasheets/quantum-sa45s-csac/>
5. Belov L.Komponenty generatorov stabil'noj chastoty. Generatory, upravljaemye naprjazheniemju.- Jelektronika: NTB- 2004.- №1.- s.42;
6. Belov L. Opornye generatory.- Jelektronika: NTB- 2004.- №6.- s.38;

Рецензія/Peer review : 22.4.2014 р.

Надрукована/Printed : 18.5.2014 р.