МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» Хмельницький національний університет

П'ЄЗОРЕЗОНАНСНІ ПРИСТРОЇ

Фізичні принципи роботи, основні параметри та характеристики

Харків - Хмельницький 2003 УДК 621.372.412 (042)

П'єзорезонансні пристрої. Фізичні принципи роботи, основні параметри та характеристики /Ф.Ф. Колпаков, С.К. Підченко. – Консп. лекцій з курсу "Радіопередавальні пристрої". - Хмельницький: ТУП, – 2003. - с.

Розглянуті фізичні принципи роботи кварцових резонаторів на об'ємних акустичних хвилях, їх еквівалентні електричні схеми, призначення та конструкції. Описаний вплив зовнішніх факторів на характеристики кварцових резонаторів.

Для студентів радіотехнічних спеціальностей усіх форм навчання з дисциплін "Пристрої генерування та формування сигналів", "Радіопередавальні пристрої", "Радіоелектронні пристрої", "Біомедичні вимірювальні перетворювачі", "Сучасні системи зв'язку", а також для студентів, які проходять навчання за спеціальностями, що пов'язані з проектуванням прийомопередавальної та біомедичної апаратури.

> Укладачі: Колпаков Ф.Ф., д.т.н., проф., Підченко С.К., к.т.н., доц.

Відповідальний за випуск: Слободзян В.І., к.т.н., доц.

Редактор-коректор: Костюк О.В.

Комп'ютерна верстка: Рижкова Д.В.

Макетування та друк здійснено редакційно-видавничим центром Технологічного університету Поділля (м.Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1). Підп. до друку 2001 р. Зам. № 379, тир 2001 р.

© Технологічний університет Поділля 2001 р.

Вступ

Характерною особливістю сучасного розвитку прецизійної радіоелектроніки є постійне збільшення кількості високоточних пристроїв, домінуючу роль серед яких відіграють п'єзорезонансні пристрої (ПРП). Вони знайшли своє застосування в апаратурі зв'язку, давно зайняли налійне місце в системах стабілізації частот (опорні та керовані генератори, синхронізуючі генератори комп'ютерних, телевізійних та інших систем) і в системах перетворення високочастотних сигналів (амплітудні, частотні і фазові перетворювачі-фільтри та детектори). Область їх використання все більше розширюється (електронні прилади часу, формувачі часових шкал з фіксованим початком відліку, частотні АЦП, прецизійні джерела напруги, змішувачі тощо). Перспективно використання кварцових резонаторів (КР) і п'єзорезонансних коливальних систем в прецизійній вимірювальній техніці. Їх застосування як чутливі елементи, які мають частотний вихід та які об'єднують високу точність з універсальністю, здатне забезпечити якісний стрибок в розвитку цієї області. Розширення границь застосування КР сприяє освоєнню нових п'єзоматеріалів (наприклад, ніобату, танталату, тетраборату літія, молібдату гадолінію тощо.), плівкових п'єзоелектриків, створенню КР не лише на об'ємних, а й на поверхневих та приповерхневих акустичних хвилях, а також розробці нових технологій обробки п'єзоматеріалів.

До нашого часу знайдено близько 1000 речовин, що володіють п'єзоелектричними властивостями. Більш менш досліджені п'єзовластивості лише декількох десятків монокристалів та полікристалічних речовин: турмаліну, сегнетової солі, виннокислого калію, титанату барію, цирконат титанату свинцю тощо. Але до цих пір вони не стали достатньо сильними конкурентами кварцу, так як у кварці поєднуються численні переваги: велика механічна та термічна стійкість, незначне внутрішнє тертя, майже ідеальна пружність, висока стабільність електрофізичних параметрів тощо.

В сучасній радіоелектроніці найбільше поширення отримали ПРП з кварцовими резонансними системами на об'ємних хвилях, тому в даному посібнику в компактній та доступній формі розглянуто фізичні та схемотехнічні принципи побудови таких пристроїв.

Мета посібника – поглибити знання і розширити розуміння курсів "Радіопередавальні пристрої", "Пристрої генерування та формування сигналів", які викладаються студентам радіотехнічних спеціальностей. Він може бути корисним також для студентів та науково-технічних працівників інших спеціальностей, яких цікавлять питання п'єзоелектроніки.

Фізичні принципи роботи, електричні еквівалентні схеми та конструкції кварцових резонаторів

1 П'єзоелектричні ефекти кварцу

Кристалічний кварц SiO₂ (кремнезем, безводний двооксид кремнію) - найбільш поширене поєднання на землі. Прозорі кристали кварцу – цінна технічна сировина. Кварц відноситься до числа найбільш твердих мінералів (твердість 7 за десятибальною шкалою, густина - 2,65 г/см³).

Розрізняють чотири температурні модифікації кварцу, з яких основне призначення в техніці знаходить низькотемпературна модифікація - α-кварц.

При температурі близько 573 [°]С у результаті фазового перетворення виконується перебудова тригональної кристалічної структури кварцу (група симетрії 3:2) в гексагональну (група симетрії 6:2) – перетворення α - кварцу в β -кварц, який має зовсім інші п'єзоелектричні постійні та інші фізичні властивості. При температурі більше 1710 [°]С кварц переходить в рідкий стан (плавиться).

Частіше всього зустрічається α-кварц таких кольорів: безколірний – гірський кришталь; димчатий – раухтопаз; чорний – моріон; золотистожовтий – цитрин; бузковий - аметист. Нагрівання кристалів кварцу до температури 350⁰С призводить до втрати його кольору.

В теперішній час виготовляють синтетичні кристали кварцу, які практично не поступаються за своєю якістю природним. Одна із ведучих місць у світі в цьому виробництві займають країни колишнього СРСР – Росія та Україна.

П'єзоелектричний ефект або п'єзоефект кварцу (слово "п'єзо" давньогрецького походження, що означає "давити") було виявлено у 1880 р. французькими вченими – братами Кюрі. Вивчаючи піроелектричні явища, вони виявили виникнення електричних зарядів на гранях кристалу кварцу при механічній дії на нього. Так був відкритий прямий п'єзоефект кварцу.

П'єзоелектричний ефект – це сукупність явищ в особливих класах кристалічних діелектриків, які лінійно (пропорційно) пов'язують механічні напруги (деформації) з електричним полем.

Явище виникнення на протилежних поверхнях (гранях) кристалу електричних зарядів (поляризація кристалу) при його механічній деформації називається **прямим п'єзоефектом**. Величина цих зарядів змінюється пропорційно механічній дії (механічній напрузі). При зміні направлення дії механічної деформації (наприклад, при заміні стиску розтягом) знаки електричних зарядів змінюються на протилежні. Через рік згодом вчені експериментально підтвердили існування і зворотного п'єзоефекту.

Зворотним п'єзоефектом називають механічну деформацію кристалу кварцу або кварцової пластини під дією прикладеного до нього електричного поля. Механічна деформація кристалу пропорційна напруженості

електричного поля. Пластина кварцу буде знакозмінно деформуватися (стискатися та розтягуватись), якщо до неї прикладати змінну електричну напругу.

Кристали кварцу мають геометрично правильне розміщення складових їх структурних елементів, що в просторі утворює кристалічну решітку. У вузлах решітки розміщуються іони, тобто атоми з нестачею або надлишком валентних електронів, які утворюють при приєднанні нейтральні атоми або молекули.

Виникнення п'єзоефекту у кристалах пояснюється деформацією їх кристалічної решітки під дією зовнішніх сил, в результаті чого порушується електрична рівновага кристалу, зумовлена зміною дипольних моментів, тобто відстані між центрами ваги різнойменних електричних зарядів. Це можливо тільки при наявності полярних напрямків в кристалах визначених класів, які не володіють центром симетрії. П'єзоефект може виникати в 20 із 32 класів (кристалографічних груп симетрії) кристалів [1-3,6].

Виникнення п'єзоефекту в кварці можна пояснити також з іншої точки зору.

Кристалічна структура кварцу *SiO*₂ побудована на основі кремнієкисневих тетраедрів [*SiO*₄] з атомами кремнію в центрі. Тетраедри де-

що викривленні: дві відстані Si - O дорівнюють 1,61 Å, а дві інші – 1,62 Å. Спіралі зі зчеплених вершинами тетраедрів $[SiO_2]$ утворюють гвинтову структуру (гвинтовий мотив) по осі Z з порожнечею в центрі потроєної гексагональної елементарної комірки, на яку припадає три "молекули" зі складу SiO_2 . В тетраедрі кристалу кварцу кожний іон Si, який володіє позитивним зарядом (+4e), пов'язаний з чотирма іонами O, кожний з яких володіє негативними зарядами (-2e), і кожний іон O зв'язує два іона Si. Заряди всіх іонів кристалічної комірки взаємно компенсуються, і в цілому вона *електрично нейтральна*.

Розглядаючи кожну пару іонів O як частинки, яка має заряд –4е, структурну комірку кварцу можна представити у спрощеному вигляді (рис.1.1,а), зручному для демонстрації зміщення електричних зарядів в кварці при його механічній деформації (рис.1.1,б та в). Припустимо, що ця комірка підлягає дії зовнішньої сили у напрямку електричної осі X (рис.1.1,б). Тоді іон Si (1) зрушиться всередину і розміститься між іонами O (2) і (6), а іон O (4) – між іонами Si (3) та (5). Внаслідок цього на одній поверхні виникає позитивний заряд, а на іншій – негативний, тобто буде спостерігатися п'єзоефект.

Користуючись моделлю структурної комірки, можна пояснити виникнення і зворотного п'єзоефекту.

Прямий і зворотний п'єзоефекти кристалів кварцу широко використовуються в пристроях стабілізації частоти, фільтрації сигналів і високоточних вимірів фізичних величин.



Рис.1.1 - Спрощена структура комірки кварцу (а) і схема утворення п'єзоелектричного ефекту (б, в)

Під час дії на спеціально оброблений кристал кварцу визначеної форми та геометричних розмірів (стержень, пластину, лінзу і тощо) змінного електричного поля з частотою, рівною або близькою до частоти власних механічних коливань кристалу, в останньому виникають резонансні коливання. Hi коливання завдяки прямому п'єзоефекту механічні обумовлюють досить інтенсивні електричні коливання, що впливають на збуджуюче їх електричне коло так, що частота електричних коливань в цьому колі буде "захоплюватися" (стабілізуватися) частотою власних механічних коливань кристалу, яка, в свою чергу, визначається його фізичними властивостями та геометричними розмірами.

Таку електромеханічну резонансну коливальну систему, яка складається з кристалічного елемента зі збуджуючими електродами *п'єзоелемента* (ПЕ), кварцоутримувача та ізолюючого балона в технічній літературі називають *кварцовим резонатором* (КР).

Іх виготовляють для досить широкого діапазону частот (від одиниць кілогерц до сотень мегагерц), для чого використовують різномаїття форм і геометричних розмірів п'єзоелементів, вирізаних із кристалічного моноблоку під різними кутами відносно його кристалографічних осей.

2 Зрізи кварцу та їх основні характеристики, види коливань

Кристал кварцу – анізотропне тіло, і його фізичні властивості різні у різних напрямках. Для описання фізичних властивостей кварцу, а також в техніці, в основному використовують кристалографічну систему координат (рис.1.2.), в напрямку яких він володіє визначеними (характерними для кожної вісі) властивостями. Тут Z – "оптична" вісь, яка співпадає з повздовжньою

віссю крис



Рис. 1.2 - Кристалографічні вісі кварцу

кристалу. В цьому напрямку п'єзоефект не

проявляється, електропровідність вища, перпендикулярному напрямку, ніж v відсутнє подвійне заломлення світлового променя. Вісь Х _ "електрична", направлена паралельно одній із граней призми, осей Х в кристалі кварцу три. В механічні напрямку вісі Х сипи викликають інтенсивне виникнення електричних зарядів. Вісь У – "механічна", направлена перпендикулярно площині XZ, осей Ү також три.

Для виготовлення кварцових резонаторів п'єзоелементи (пластини, бруски і тощо) можуть бути вирізані з кристалу кварцу під різними кутами відносно кристалографічних осей. Така орієнтація п'єзоелемента називається *зрізом*.

Існує поняття **початкової** орієнтації, коли всі грані п'єзоелемента паралельні кристалографічним осям. Умовне позначення початкової орієнтації п'єзоелемента складається з двох букв (X,Y або Z): перша вказує яка вісь

паралельна товщині п'єзоелемента, друга – яка із осей паралельна його довжині.

Шляхом ряду послідовних поворотів п'єзоелемента навколо його ребер на різні кути можна отримати велике різноманіття орієнтацій – так званих "косих" зрізів.

Позначення орієнтації п'єзоелемента з гранями, що утворюють кути з кристалографічними осями, складається з позначення першочергової орієнтації, до якої додають ще одну, дві або три букви (*l*, *b*, *s*), вказуючи які напрямки (повздовж довжини, товщини або ширини) ребер п'єзоелемента використані як осі першого та наступних поворотів із положення початкової орієнтації. Кути першого, другого та третього поворотів п'єзоелемента навколо цих осей позначають відповідно буквами α , β та γ , які проставляються через косі лінії. Числа, які проставлені замість цих букв, показують величину кутів повороту. Кут повороту вважається позитивним, якщо поворот здійснюється проти стрілки годинника. Найважливіші типи зрізів кварцу та їх позначення приведено на рис.1.3 та в табл. 1.1. В дужках вказані позначення зрізів, що діяли до введення розглянутої системи умовних позначень і які широко використовуються в п'єзоелектроніці.



Рис 1.3 - Найбільш поширені зрізи кварцу

Кожен зріз кварцу характеризується частотним коефіцієнтом N, що пов'язує резонансну частоту п'єзоелемента f_q з його частотно-визначальним розміром a співвідношенням $N = f_q \cdot a$. Для деяких типів КР частотний коефіцієнт визначається двома розмірами п'єзоелемента. Величина цього коефіцієнта залежить від фізичних властивостей (щільності та пружності) і орієнтації п'єзоелемента. За значенням частотного коефіцієнта можна оцінити діапазон частот, які перекриваються п'єзоелементами тих або інших

зрізів, або, навпаки, за заданою частотою f_q резонатора можна визначити розмір п'єзоелемента a .

	Кут	Вид	Форма	Частотний	Діапазон
Тип зрізу	орієнтації	коливань	п'єзо-	коеф. N,	частот,
			елемента	кГц∙мм	кГц
yxl/β ⁰	$\beta = 3435, 5^{\circ}$	Зсув по	Лінза	16802060	4605000
(AT)		товщині			
0	0				
yxl/β ⁰	$\beta = 3535,5^{\circ}$	- // -	Плоска	167015030	300036000
(AT)			пластина		(до 300000 на
1/00	0 40 500		п.	2550 2660	гармоніках)
yxl/β°	$\beta = -4850^{\circ}$	- // -	Лінза, плоска	25502660	200060000
(БТ)			пластина		
$vxb1/v^0/\beta^0$	$\beta = 33 \ 35^0$	_ // _	_ // _	1770 2100	500 40000
ух0/ү/р (ИТ)	p = 5555 $y = -10^{0}$	- // -	- // -	17702100	50040000
(111)	γ 19				
xvs/α^0	$\alpha = -5+6.5^{\circ}$	Вигин по	Брусок	55256200	260
(X)		товщині	r J		
		· ·			
xys/ α^0	$\alpha = -2+6,5^{\circ}$	Поз-	Пластина	27602850	40200
(X)		довжнє по			
0		довжині			
yxl/β ⁰	$\beta = \pm 45^{\circ}$	Кручення	Брусок	15001860	40800
1/00		2		0000 0400	100.000
yxl/β°	$\beta = -5153^{\circ}$	Зсув по	Квадратна,	20707480	100800
(Д1)		контуру	прямокутна		
····1/0 ⁰	$0 - 26 20^{0}$	11	Пластина	2000 2700	150 950
ух/р (ПТ)	p= 3638	- // -	- // -	50805780	130830
(цт)					
$xys1/\beta^0/\alpha^0$	$\alpha = 5 \ 8 \ 5^0$	Вигин по	Пластина	400 2200	20 200
(HT)	$\beta = -50 - 70^{\circ}$	ширині	11,140111114	1002200	20200
~ /	p 20 / 0	Г			
xysl/ β^0/α^0	$\alpha = 58, 5^{\circ}$	Поз-	Прямокутна	26502850	60200
(MT)	$\beta = -3358^{\circ}$	довжнє по	пластина		
		довжині			
yxls/ α^0/β^0	$\beta = 5152^{\circ}$	Поз-	- // -	32833297	100450
() () ()	$\alpha = 45^{\circ}$	довжнє по			
		ширині			

Таблиця 1.1 -Типи зрізів та їх основні характеристики

Наприклад, при поздовжніх коливаннях частотновизначальним розміром є довжина п'єзоелемента, при коливаннях виду зсув по товщині та зсув по контуру – відповідно товщина та розміри по контуру. Нижня границя частотного діапазону кожного зрізу обмежується можливістю застосування резонаторів великих розмірів і недостатньої механічної міцності; верхня границя діапазону зрізу визначається рівнем технології виробництва, який забезпечує можливість виготовлення п'єзоелементів з малими частотновизначальними розмірами.

В залежності від форми п'єзоелемента, типу зрізу, розташування електродів та способів збудження в п'єзоелементі можуть виникати коливання різних видів (рис.1.4.).



Рис. 1.4 – Види коливань кварцових пластин: a) стиск-розтяг; б) вигин; в) кручення; г) зсув по контуру; д) та е) зсув по товщині (е – третя механічна гармоніка)

Механічні коливання твердих тіл, які обумовлені розповсюдженням у пружних деформацій визначеного виду, розрізняють за видом них деформації: стиску-розтягу, зсуву (зсувні коливання), вигину (коливання вигину). *кручення* (коливання кручення). Перші лва вважаються найпростішими; вигин та кручення іноді розглядають як особливі випадки неоднорідних деформацій стиск-розтяг та зсув відповідно. Хвилі стискурозтягу та зсуву можуть розповсюджуватися як в необмеженому середовищі, так і в тілах обмежених форм. Хвилі вигину та кручення можуть існувати і розповсюджуватися тільки в обмеженому середовищі і тілах кінцевих форм.

Крім того, розрізняють повздовжні та поперечні механічні коливання. **Поздовжніми** називають коливання, зміщення частинок яких співпадає з напрямком розповсюдження пружної хвилі, а **поперечними** – зміщення частинок яких відбувається перпендикулярно напрямку розповсюдження хвилі. Повздовжніми є тільки коливання стиску-розтягу. Коливання решти трьох видів – поперечні. Коливання реальних тіл в багатьох випадках визначаються складними деформаціями, які є собою сукупністю двох і більше простих деформацій. Проте завжди виділяють найбільш виражену компоненту, яка і визначає вид коливань.

Точками кріплення п'єзоелементів КР можуть бути лише вузлові точки, в яких амплітуда коливань близька нулю. Для забезпечення механічної міцності бажано, щоб таких точок було більше і щоб вони були розміщені на периферії п'єзоелемента. Вузлові точки існують тому, що при коливаннях на резонансній частоті утворюються стоячі хвилі.

КР можна збуджувати на основній частоті, механічних гармоніках та побічних резонансних частотах, так як кварцовий резонатор € електромеханічною коливальною системою з великим числом степені свободи. В простішому випадку, якщо брусок, виготовлений з ізотропного тіла, розтягувати і стискати в одному напрямку, то в перпендикулярних напрямках виникають деформації стиску і розтягу. Це явище можна розглядати як взаємодію двох пов'язаних коливальних систем, кожна з яких відповідає певному виду коливань. Можливість виникнення коливань різних видів і в різних напрямках анізотропного кристала кварцу призводить ще до більш складних явищ. Таким чином, при збудженні в кварцовому резонаторі коливання одного виду (наприклад, по довжині) внаслідок зв'язку між коливаннями неминуче виникають коливання інших видів [4].

Розрізняють багаточастотність "ідеального" та реального резонаторів. Багаточастотність п'єзоелемента, виготовленого з "ідеального" монокристала і який має ідеальну форму, обумовлена всіма частотами, які визначаються геометричними розмірами, просторовою орієнтацією та геометрією збуджуючого поля, що залежить від форми та розміщення електродів. Спектр частот в цьому випадку носить закономірний характер і може бути розрахований.

В реальному КР з'являються додаткові частоти, які залежать від властивостей реального кварцу і технологічних дефектів (дефектів структури, відмінності форм кварцового елемента від ідеально заданої геометрії, відмінності в кріпленні тощо). Звичайно ці додаткові частоти групуються поблизу частот спектра "ідеального" резонатора.

Властивість багаточастотності КР описують *спектральною характеристикою* (рис.1.5), де вказуються всі власні частоти КР і співвідношення амплітуд їх коливань (в децибелах) при однаковому збуджуючому впливові.

Бажано, особливо для забезпечення якісного переналагодження за частою, мати таку спектральну характеристику, при якій частоти побічних коливань далеко відстають від частот коливань основного виду.

При великих амплітудах коливань проявляються нелінійні ефекти, обумовлені нелінійним зв'язком між напругою та деформацією. В такому



Рис. 1.5 – Спектральна характеристика кварцового резонатора з лінзовим п'єзоелементом, який сконструйований на частоту 3.2 МГц

випадку частота побічних коливань залежить від їх амплітуди, з'являються нові резонанси коливань, які називаються ангармонічними. Це явище зумовлює необхідність роботи при досить малих амплітудах коливань, коли майже відсутні нелінійні ефекти. Прецизійні КР працюють при таких амплітудах, коли нелінійні явища проявляються слабо.

Іноді КР збуджують на вищих механічних гармоніках – *обертонах*. Кварцові пластини з коливаннями зсуву по товщині можуть збуджуватись лише на непарних гармоніках основної частоти, так як у випадку парних гармонік на обох гранях п'єзоелемента будуть однакові за знаком потенціали, і збудити такий резонатор неможливо.

Частоти вищих механічних гармонік не кратні точно частоті основного коливання через *дисперсію пружних хвиль*, тобто через те, що швидкість розповсюдження цих хвиль зменшується з підвищенням частоти.

Прояв частотної дисперсії зсувних коливань в п'єзоелектричних пластинах поляга€ в тому, що при деякій критичній частоті f_{kn} і вище її розповсюдження акустичної умови хвилі якісно змінюються: амплітуда експоненціально цього коливання з віддаленням від джерела палає (рис.1.6). Оскільки критична частота піделектродної частини пластини f. нижча критичної частоти вільної (через пластини f. вплив маси



- Рис. 1.6 Розподіл коливань в резонаторі АТ - зрізу з захватом енергії:
 - 1 п'єзоелектрична пластина;
 - 2 електроди

електродів), для частоти $f_e < f < f_c$ енергія зсувних коливань по товщині буде локалізуватися лише в піделектродній зоні пластини і найближчих до неї ділянках (ефект захвату енергії, рис.1.6). Зниження енергії коливань не менше ніж на 80 дБ досягається на відстані від границі електрода, рівній 15 товщинам п'єзоелемента.

Суттєво краща локалізація енергії в центрі п'єзоелемента досягається в лінзових п'єзорезонаторах. В цих резонаторах навіть при відсутності електродів центральна область має більш низьку критичну частоту, оскільки товщина в центрі під впливом сферичності перевищує товщину п'єзоелемента на периферії.

3 Еквівалентні схеми кварцових резонаторів

Для аналізу та розрахунку схем ПРП КР зручно представити у вигляді електричної еквівалентної схеми, реакція якої еквівалентна електричній реакції збудженого резонатора [8,9].

Розроблено декілька варіантів еквівалентних схем КР, які відображають в залежності від типу резонатора і робочої частоти з достатньою для практики точністю процеси, що в них відбуваються (рис.1.7, де L_q , C_q , R_q , – динамічні індуктивність, ємність та опір втрат відповідно; C_e , C_3 , C_e , $C_{e\kappa}$, C_0 – статистичні ємності електродів, зазору, вводів, електроду відносно корпуса і резонатора; n_n – модуль коефіцієнта передачі). Варто мати на увазі, що еквівалентні схеми відображають властивості реальних КР у вузькому діапазоні частот тільки поблизу резонаторів.

Електричні параметри елементів еквівалентної схеми пов'язані з фізичними параметрами КР. Цей зв'язок для кожного виду коливань і зрізу свій.

Наприклад, для найбільш розповсюдженої і порівняно простої еквівалентної схеми (рис.1.7,а) динамічні параметри L_q , C_q , R_q і статистична ємність C_0 кварцоутримувача при використанні товщиннозсувних коливань через параметри КР визначаються залежностями

$$L_{q} = \frac{d_{q}S}{8\varepsilon^{2}S_{e}}; C_{q} = \frac{8\varepsilon^{2}S_{e}}{\pi^{2}n^{2}c'S};$$

$$R_{q} = \frac{d_{q}a_{m}}{4\varepsilon^{2}S_{e}}; C_{q} = \frac{\varepsilon_{0}^{''}S_{e}}{4S\pi},$$
(1.1)

де d_q – щільність кварцу; c' – модуль пружності кварцу; S – товщина



Рис. 1.7 – Еквівалентні схеми кварцових резонаторів: а) – двополюсного КР для середніх частот; б) – двополюсного КР з зазором між електродами для середніх частот; в) – двополюсного КР для НВЧ; г) – чотириполюсного КР

пластини; n – номер механічної гармоніки; S_e – площа електродів; ε - п'єзоелектрична стала кварцу; a_m – коефіцієнт затухання; $\varepsilon_0^{"}$ - діелектрична проникливість у напрямку товщини.

3 формули (1.1) видно, що індуктивність L_q пропорційна масі кварцу, який коливається, ємність C_q визначається величиною його пружності, опір R_q - пропорційний дисипативним втратам, а C_0 – ємність конденсатора, який утворений електродами.

При використанні вищих механічних гармонік на частотах до 80...100 МГц існує зв'язок:

$$L_{qn} \approx L_q; \quad C_{qn} = \frac{C_q}{n^2}; \quad C_{on} \approx C_o.$$
 (1.2)

На більш високих частотах через нерівномірний розподіл амплітуд коливань по поверхні пластини із збільшенням номера гармоніки п індуктивність L_{an} збільшується за законом

$$L_{qn} = L_q \cdot 1, 4 \cdot \frac{n-1}{2}$$
 (1.3)

Основні параметри L_q , C_q , R_q , C_0 еквівалентної схеми визначають частоти послідовного та паралельного резонансу.

Частота послідовного резонансу визначається відношенням:

$$W_q = \frac{1}{\sqrt{L_q C_q}},\tag{1.4}$$

частота паралельного резонансу – співвідношенням:

$$W_{0} = \frac{1}{\sqrt{L_{q} \cdot \frac{C_{0} \cdot C_{q}}{C_{0} + C_{q}}}}.$$
(1.5)

Розміщення резонансних частот на частотній осі ілюструється на прикладі АЧХ ($A(\Delta f)$) та ФЧХ ($\varphi(\Delta f)$) КР на 5 МГц (рис.1.8).

Характеристичний опір коливального контуру еквівалентної схеми КР та його добротність визначаються залежностями:

$$\rho_q = \sqrt{\frac{L_q}{C_q}}, \qquad (1.6)$$

$$Q = \frac{\rho_q}{R_q}.$$
 (1.7)

Різницю частот Ω паралельного ω_0 та послідовного ω_q резонансів називають *резонансним проміжком*. Ця різниця залежить від номера гармоніки, що використовується:

$$\Omega_n = \frac{\Omega}{n^2} \,. \tag{1.8}$$

Коефіцієнт зв'язку
$$p = \frac{C_q}{C_0}$$
 є важливим параметром КР і

однозначно характеризує різницю частот ω_0 та ω_q :

$$(\omega_0 - \omega_q)/\omega_q \approx 0.5 p$$
. (1.9)

Від номера механічної гармоніки залежить добротність резонатора (рис.1.9) та опір втрат (табл.1.2). Ця залежність для різних типів резонаторів



Рис. 1.8 - Частотна характеристика КР, зконструйованого на частоту 5,0 Мгц

різна. Із зростанням приблизно до n = 7...9 величина Q збільшується в кілька разів, а потім починає зменшуватись (рис.1.9).

Втрати КР обумовлені головним чином тертям всередині кристала – r_T , на його поверхні – r_n , його поверхні об залишковий газ в балоні – r_e та в точках кріплення пластини – r_M . Сумарний ефект може бути охарактеризований електричним еквівалентним опором втрат:

$$r_{\Sigma} = r_T + r_n + r_2 + r_M.$$

Величина *Q* суттєво залежить від дефектів кристалічної решітки кварцу, геометрії пластини та електродів, конструкції кварцоутримувача, вакууму в балоні та чистоти поверхні пластини. Втрати всередині кристала визначаються наявністю домішок неоднорідностей, взаємодією іонів кристалічної решітки, впливом побічних видів коливань. Втрати в поверхневому шарі визначаються наявністю на поверхні нерівностей,

включень, електродів збудження та атмосфери залишкової балонів. Зменшення втрат забезпечується як шляхом вдосконалення зрізу, геометрії електродів, пластини та так i забезпечення досить глибокого вакууму в балоні кварцового резонатора (до 1.10-3 Па) та покращення конструкції кварцоутримувача. Для підвищення добротності КР їх пластини ретельно полірують при виготовленні.

Для резонаторів, які збуджуються на механічних гармоніках, в першому



Рис. 1.9 - Залежність добротності КР від номера механічних гармонік

Параметр	Номер гармоніки							
Параметр	1	3	5	7	9	11		
$f_{\it qn}$, МГц	23,5	70,5	117,5	164,5	211,5	258,5		
R_{qn} , Ом	42,5	49,5	92,0	178,0	365,0	580,0		
$Q_n \cdot 10^3$	25,6	64,6	28,1	12,0	7,1	4,1		

Таблиця 1.2 - Параметри гармонікового кварцового резонатора для різних механічних гармонік

наближенні добротність від номера гармоніки можна представити виразом:

$$Q_n \approx \frac{n\rho_q^2}{r + r'n},\tag{1.10}$$

де r - опір втрат, які визначаються факторами (зовнішніми), що не залежать від n; r' - опір втрат, який визначається факторами, що залежать від n(внутрішнє тертя в кристалі).

На теперішній час досягнуті добротності прецизійних кварцових резонаторів до десятків мільйонів.

Для схеми (рис.1.7,а) еквівалентний опір резонатора може бути визначено з виразу:

$$Z_{qe} = \frac{R_q (1 + j\alpha)}{1 - \delta_0 \alpha - j\delta_0}, \qquad (1.11)$$

де
$$\alpha \approx 2Q_q \frac{\Delta\omega}{\omega_q}$$
 - узагальнений розлад резонатора; $\Delta\omega = \omega - \omega_q$ -

абсолютний розлад; $\Delta \omega / \omega_q$ - відносний розлад кварцового резонатора;

 $\delta_0 = \omega C_0 R_q$ - відношення опору втрат до модуля опору статичної ємності електродів.

Еквівалентну схему, яка враховує можливість збудження резонатора на вищих механічних гармоніках основного коливання кварцової пластини, а також на ангармоніках, звичайно представляють у вигляді, зображеному на рис.1.10.

Теоретичні та експериментальні дослідження дозволили на основі теорії Лагранжа-Максвела отримати



Рис. 1.10 - Еквівалентна схема багаточастотного КР

аналітичний вираз багатострумової характеристики, яка описує нелінійні властивості КР, що збуджуються одночасно на декількох частотах [10]:

$$f_i(I_1,...,I_n) = f_{io}(1 + \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}I_j^2), i = \overline{1,n},$$
(1.12)

де λ_{ij} утворюють матрицю власних та взаємострумових коефіцієнтів $(\lambda_{ij} \neq \lambda_{ji}).$

Експериментально виміряні характерні значення λ_{ij} при одночасному збудженні КР АТ-зрізу на 3-й та 5-й механічних гармоніках склали:

$$\lambda_{11}=0.36 \text{ A}^{-2}, \lambda_{12}=-0.48 \text{ A}^{-2}, \lambda_{21}=-0.32 \text{ A}^{-2}, \lambda_{22}=0.31 \text{ A}^{-2}.$$

Використання багатострумових характеристик дозволяє реалізувати новий принцип управління резонансною частотою КР шляхом зміни амплітуди (амплітуд) збудження одного або декількох додатково збуджуваних коливань. На цьому принципі можна будувати малочутливі до дестабілізуючих впливів (температури, вібрації тощо) п'єзорезонансні пристрої.

4 Призначення та конструкції кварцових резонаторів

Історія конструювання кварцеві резонатори бере свій початок з 1918 року. В проміжках між двома світовими війнами розвиток резонаторів йшов повільними темпами. Однак друга світова війна дала потужний поштовх розвитку промисловості, яка виробляє КР. Визначною подією в історії вдосконалення цих пристроїв була пропозиція Сайкса (США) використовувати плівкові електроди (1948), що наносяться на поверхню активної частини ПЕ.

В більшості випадків на частотах більших 750 кГц застосовують КР з п'єзоелементами *АТ*-зрізу. Форма п'єзоелементів залежить від вимог, які висуваються до параметрів та габаритних розмірів резонаторів, а також від їх частоти: п'єзоелементи можуть бути круглими, плоскими, сферичними та прямокутними (рис.1.11). Якщо відношення діаметра п'єзоелемента до його товщини більше 50, тобто $d_{ne}/S >$ 50, то монтажна система практично не впливає на параметри резонатора. В цьому випадку звичайно використовують плоскі круглі п'єзоелементи без фасок (рис.1.11,а). Якщо ж $d_{ne}/S =$ 25...50, то використовують або плоскі п'єзоелементи з фасками, або плоско-випуклі пластини (рис.1.11,6,в). При $d_{ne}/S <$ 25 п'єзоелементи звичайно виконують у вигляді двояковипуклої лінзи (рис.1.11,г).

Коливання п'єзоелементів сферичної форми локалізовані в центрі, тому вплив монтажної системи зведений до мінімуму. Резонатори зі сферичними п'єзоелементами досить стабільні і мають високу добротність.

Однак вони мають велику у порівнянні з плоскими п'єзоелементами динамічну індуктивність L_a та яскраво виражений спектр небажаних



Рис.1.11 – Різні форми кварцових п'єзоелементів зрізу АТ: 1 – п'єзоелемент; 2 – електрод; а) і б) – плоский диск без фаски та з фаскою; в) і г) –сферичні пластини; д) і е) – пряма та зворотна мезаструктури; ж) – одностороння меза-структура; з) – прямоугольна пластина

коливань, що обмежують їх застосування в фільтрах та перестроюємих генераторах.

Тому в цих випадках краще використовувати плоскі п'єзоелементи – прямокутні (рис. 1.11, з) або круглі з товстими електродами. Але вони також мають свої недоліки. Так, наприклад, щоб виключити вплив монтажної системи, доводиться збільшувати довжину прямокутних пластин та відповідно і один із габаритних розмірів КР. Збільшення ж товщини електродів веде до погіршення параметрів резонатора, виникають також проблеми і суто технологічні.

Передбачалось, що п'єзоелементи прямої меза-структури (рис.1.11,д) будуть перспективні у фільтрових резонаторах на частотах до 10 МГц. Однак реалізація такої форми п'єзоелементів традиційними засобами обробки пов'язана з великими технологічними труднощами, так як при цьому потрібно виконати контур центральної частини з дуже високою точністю.

Останнім часом в наявності є дані про використання іонно-плазменого травлення для отримання п'єзоелементів зворотної меза-структури (рис.1.11,е). Дослідження виявили ефективність цього засобу для отримання п'єзоелементів і прямої меза-структури.

Наступним кроком у розвитку КР є створення "безелектродної" конструкції (Бессон, Франція, 1977 р.). В цій конструкції ПЕ збуджується електричним полем, створеним в міжелектродному "зазорі" (рис.1.12). Електроди нанесені на кварцові блоки – елементи кріплення ПЕ. Ці блоки мають ідентичні з ПЕ зріз і азимутальну орієнтацію. Такий тип конструкції КР в зарубіжних джерелах називають QAC. Подальшим розвитком цієї конструкції є використання "місткового" кріплення рухомої частини ПЕ (конструкція BVA). Для цього в ПЕ методами ультразвукового фрезування вирізають два концентричних



Рис. 1.12 - Конструкція КР з ПЕ, який збуджується в міжелектродному зазорі: Е – електрод, К - кварцовий блок з напиленим електродом

дугових паза. Дві ділянки ПЕ, що залишаються між ними в азимутальному направленні, створюють містки, які орієнтовані повздовж вісі Z' (Z' – проекція кристалографічної вісі Z на головну площину ПЕ) і механічно об'єднують рухому частину ПЕ - вібраторів з кільцевою периферійною частиною, затиснутою між двома електродними кварцовими блоками.

Перевагою згаданих вище конструкцій є потенційно більш висока стабільність параметрів КР в часі, що забезпечується завдяки відсутності на поверхні вібратора чужорідних матеріалів (електродних покрить), які є джерелом дестабілізуючих механічних напруг і тимчасового дрейфу частоти резонатора через старіння, зміну їх хімічного складу і т.д. Електрод в цих конструкціях може мати радіус викривлення, відмінний від радіуса викривлення ПЕ, що дозволяє керувати конфігурацією збуджуючого електричного поля, а з'єднувальні містки можуть мати велику різноманітність форм, розміщення та інших характеристик.

Конструкції *BVA* можна використати для КР будь-якого типу зрізу в широкому діапазоні частот. На теперішній час в найбільш прецизійних вакуумних резонаторах використовують конструкції *BVA*. Завдяки їм досягнуто покращення стабільності КР, в порівнянні з класичними "електродними" конструкціями, реально на порядок. Подібні конструкції використовують і в датчиках. Зміна відстані між вібратором і електродом призводить до зміни частоти, що дозволяє реалізувати велику групу п'єзорезонансних датчиків фізичних величин.

Досить значним досягненням в області кварцової техніки було створення в 1980 році в США КР з двоповоротним зрізом, який був названий SC. До резонаторів SC - зрізу відносять пристрої, орієнтація п'єзоелементів яких знаходиться в межах $21,9^{\circ} \leq \alpha \leq 22,8^{\circ}$; $33,9^{\circ} \leq \beta \leq 34,3^{\circ}$. Назва SC характеризує основну властивість КР цього зрізу – нечутливість по

відношенню до механічних напруг прискорень, вібрацій тощо. В цих КР досягнута краща ніж в КР АТ-зрізу, температурна стабільність як в стаціонарних, так і в нестаціонарних теплових полях. В КР SC-зрізу, крім основного температурно стабільного коливання (мода С), можливе збудження іншого коливання (мода В), що володіє високою температурною чутливістю і в наслідок цього є придатною для використання як "вмонтований" датчик температури.

В 1986 р. повідомлено про праці у Франції по створенню КР триповоротного зрізу ($\alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$), що володіють додатковими експлуатаційними перевагами. Складність практичної реалізації таких КР робить сумнівною перспективу їх промислового освоєння найближчим часом.

Характерною особливістю кінця минулого тисячоліття є активне освоєння КР діапазону НВЧ, які викликані необхідністю прямої генерації високостабільних сигналів з низьким рівнем шумів без використання множників частоти і аналогової обробки сигналів НВЧ (фільтрації, затримки тощо).

Основним обмеженням на величину резонансної частоти основної моди КР є абсолютна товщина пластини в активній зоні та її плоскопаралельність. Традиційні методи механічної обробки п'єзоматеріалів забезпечують потрібну якість оброблення ПЕ до товщин не менших 35 мкм, що відповідає резонансній частоті основної моди 50 МГц для АТ-зрізу, 75 МГц – для ВТ-зрізу кварцу і 60 МГц для танталату літію.

Можливим шляхом підвищення робочих частот КР є використання механічних гармонік. Однак на практиці КР АТ-зрізу обмежуються використанням 7-ї гармоніки, ВТ-зрізу – 5-ї, а для резонаторів із танталату літію – 9-ї. Це пов'язано із зменшенням ефективного коефіцієнта електромеханічного зв'язку, прямо пропорційного номеру гармоніки, добротності КР (рис.1.9), а також з утрудненням наладки резонатора на задану частоту.

Використання електродів замість звичайних п'єзомеханічних перетворювачів у вигляді тонких плівкових п'єзоелектриків ZnO, AlN, CdS та інших дозволило при тих самих резонансних розмірах звукопроводів використовувати механічні гармоніки з порядковим номером кілька сотень (300...400 і більше) та досягнути частотної границі порядку 10 ГГц. Цей тип насправді являється акустичним аналогом оптичного інтерферометра Фабри-Перо та отримав назву високообертонних об'ємних акустичних резонаторів (ВОАР) (рис.1.13). Це дозволило як звукопровід використовувати кристали не тільки кварцу, але й алюмоітрієвого гранату, сапфіру, ніобату літію, добротність яких приблизно в 10 разів вища, ніж кварцу, і які не є п'єзоелектриками. Завдяки цьому практично реалізовані резонатори з добротністю 5·10⁴ в діапазоні частот 1,5...2,0 ГГц, яка перевищує значення будь-яких інших відомих резонансних систем на даних частотах. Якщо для

звичайних КР добуток $f_q \cdot Q$ = 10^{13} , то для ВОАР цей добу-



Рис.1.13 - Конструкція високообертонного кварцевого резонатора з п'єзомеханічним перетворювачем у вигляді івки ZnO (L - резонансний розмір звукопровідника величиною ток складає (5...9) ·10¹³ (при використанні алюмоітрієвого гранату <1, 1, 1>).

Добра локалізація енергії між перетворювачами і мала площина активної зони (порядку $5 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$) забезпечують можливість жорсткого кріплення резонатора і підвищення вібростійкості на 1-2 порядки у порівнянні із звичайними КР (експериментально виміряна віброчутливість ВОАР складає $1,28 \cdot 10^{-11} \cdot g^{-1}$).

КР типу *BOAP* за своїм походженням є багаточастотними, що дозволяє будувати на їх основі баготочастотні або дискретно-переналагоджуємі генератори з дискретністю частот порядку 5 МГц, які задовольняють вимогам шумових характеристикам до збуджувачів радарних систем. Данні про температурні характеристики і старіння таких резонаторів поки що відсутні.

Використання відомої раніше технології хімічного полірування і нового процесу – реактивного іонного травлення, що забезпечує швидкість травлення до 30 мкм/год при високій якості поверхні дозволяє створити новий тип ПРП діапазону НВЧ – мембранні резонатори. Резонатори цього типу виконуються на основі технологічних прийомів, що характерні для масового виробництва, добре спрягаються за конструкцією та технологією з мікроелектронними колами.

Розрізняють два типа мембранних резонаторів: об'ємні акустичні резонатори на зворотних меза-структурах (*OMC OAP*) та напівпровідникові об'ємні акустичні резонатори (*HII OAP*). Останній тип ПРП не відноситься

до КР, але за конструкцією, фізичним принципам роботи та призначенням досить близький до них.

Високодобротні *OMC OAP* (рис.1.14) виконують із кварцу. При цьому реалізується високотемпературна стабільність, що характерна для *AT* та *SC* – зрізів. Рекордним досягненням на теперішній час за частотою для *OMC OAP*



Рис. 1.14 - Реальна конструкція КР СВЧ на обернених меза-структурах

є 1,6 ГГц на основній гармоніці (*AT*-зріз, хімічне полірування) та 1,9 ГГц – на третій гармоніці (*AT*-зріз, іонне травлення). Більш характерні частоти 225, 404 МГц на основній моді з добротністю $Q = 34 \cdot 10^3$ (товщина мембрани S = 7 мкм), 435, 735 МГц, $Q = 14 \cdot 10^3$ (S = 3,5 мкм). Виміряна величина добутку $f_q \cdot Q = (4...18) \cdot 10^{12}$ різна для різних типів зрізів і гармонік збудження.

Сучасні напівпровідникові об'ємні акустичні резонатори (*НП ОАР*, композитні резонатори) являють собою багатошарову структуру, що містить епітаксіальну напівпровідникову мембрану (звичайно Si або GaAs) та тонку п'єзоелектричну плівку (ZnO, AlN) на ній. Вибір Si мембрани має більшу перевагу з точки зору сумісності *НП ОАР* з іншими інтегральними колами, виконаними на цій же основі. П'єзоелектричну плівку вирощують за технологією тонкоплівкового напилення, а напівпровідникову мембрану виконують методом мікроелектронного травлення. Структура ZnO/Si товщиною від 6 до 20 мкм відповідає основній моді від 200 до 500 МГц. Відомі також інші структури: AlN/Si, ZnO/SiO, AlN/GaAs, ZnO/SiO₂/GaAs. Розміри резонуючої мембрани - 400×400 мкм².

Плівкам AlN надають перевагу завдяки високій швидкості розповсюдження в них акустичної хвилі, і відповідно, високій резонансній частоті. Вони хімічно більш стабільні, забезпечують велику гнучкість технологічного процесу і мають більш низьку температуру напилення. Температурний коефіцієнт частоти для резонатора з відношенням товщини δSi/δAlN=2,6 в інтервалі температур 0...100 °C складає 400·10⁻⁶. Існує принципова можливість створення температурно-компенсованих *ΗΠ OAP*.

Для *НП ОАР* є типовими частоти основного резонансу від 300 до 500 МГц з добротністю біля 4000. Разом з тим вважається, що *ПП ОАР* на GaAS є базою для створення інтегральних приладів міліметрового діапазону.

Різновидами композитних структур є резонатори з контурним закріпленням плівкової діафрагми (напівпровідникова мембрана відсутня, вібратором є п'єзомеханічний перетворювач - діафрагма) та п'єзоелектричні модульовані структури. В приладах першого типу при використанні діафрагми товщиною 1 мкм і менше можливе забезпечення резонансної частоти вище 5 ГГц.

Пристрої другого типу являють собою перемінні тонкі плівки з заданим одномірним періодом модуляції у напрямку перпендикулярному їх поверхні. Відомі модульовані структури, які містять два п'єзоелектрика CuCl/CuBr на підложках із слюди та сапфіра. Ці пристрої можуть бути використані для генерації сигналів з частотами до 50 ГГц.

Порівняння переваг мембранних кварцових резонаторів та композитних структур в комплексі не можливе, оскільки залишається відкритим питання про старіння останніх.

Таким чином, сучасні п'єзорезонансні прилади на об'ємних акустичних хвилях забезпечують можливість генерування та фільтрації електричних сигналів навіть до частот в десятки ГГц, а також вимірювальних перетворювань різних фізичних величин в сигнал з частотною модуляцією.

Центральне місце серед цих приладів займають КР з коливаннями зсуву по товщині.

1.5 Сучасні п'єзорезонансні пристрої та їх використання

За призначенням КР розподіляють на резонатори для генераторів (генераторні) та резонатори для фільтрів (фільтрові). В конструктивному відношенні між ними немає різниці. Вони розрізняються тільки вимогами до електричних параметрів. Останнім часом виник ще один, особливий клас – резонатори-датчики.

Генераторні резонатори, в свою чергу, поділяються на резонатори для генераторів: фіксованих частот, керованих за частотою, термокомпенсованих та ударного збудження. Для фільтрових резонаторів чіткого поділу на групи немає, проте іноді вважають доцільним виділяти резонатори, які призначені для використання в дискримінаторах. Резонатори-датчики поділяють на резонатори-датчики температури, механічних сил (прискорення, тиску і т.д.), маси.

Провідним виробником ПРП серед підприємств країн СНГ є ВАТ "МОРИОН" (Росія, Санкт-Петербург, http://www.morion.com.ru).

Історія підприємства своїми коренями уходить до 1855 року, коли в "Головна Санкт-Петербурзі вілкривається телеграфна майстерня" Siemens-Halske. к першему знаменитого лому Лалі _ в Pociï електротехнічному заводу (фірми Siemens-Halske), який в 1922 р., після націоналізації, перейменовується в "Завод ім. Козицького". В 30 – ті роки на підприємстві вперше розпочато серійне виробництво кварцових резонаторів, створюється спеціалізоване "кварцове виробництво". З 1971 р. підприємство отримало назву "МОРИОН" (в якості ім'я використано назву сорту п'єзокварцу "моріон". природного темного кольору який толі використовувався у виробництві).

Резонатори для кварцових генераторів (КГ). Для цих КР звичайно задають вимоги до таких параметрів, як робоча частота, її нестабільність, яка визначається зовнішніми впливами, добротність або опір. Значення реактивних еквівалентних електричних параметрів в багатьох випадках не нормують. Для резонаторів, які використовуються в керованих або термокомпенсованих КГ, нормують значення індуктивності або ємності. Замість цих параметрів часто надають перевагу завданню вимог на розлад частоти резонатора при включенні паралельно або послідовно з ним заданого (конденсатора котушки реактивного елемента індуктивності). або Послаблення побічних резонаторів, як правило, для резонаторів, які використовуються в КГ фіксованих частот, не менш ніж 3,5 дБ. Для керованих КГ потрібно значно більше послаблення побічних резонансів – порядку 20...40 дБ у смузі частот, що вдвічі більше смуги частот керування. В смузі частот керування побічні резонанси повинні бути відсутніми. Для резонаторів, які призначені для термокомпенсованих КГ, задають вимоги до температурно-частотних характеристик. Для резонаторів, які застосовуються в КГ ударного збудження особливою вимогою є необхідність послаблення побічних резонансів в дуже широкій області частот, в тому числі необхідність сильного послаблення частот обертонів робочого коливання.

Генераторні КР прийнято класифікувати по формі, розмірам та матеріалу корпусів, а також по розміщенню, числу, формі, розмірам та призначенням виводів, наявністю відводів від металічного корпуса. Корпус (оболонка) КР призначений для захисту п'єзоелемента від зовнішніх механічних та кліматичних впливів, складається з основи та кожуха (ковпачка, балона) і забезпечує герметизацію або вакуумування внутрішньої порожнини резонатора. В першому випадку її заповнюють сухим інертним газом або повітрям при тискові близькому до атмосферного (герметичні КР), в другому – створюють розрідження не менше 10 Па (вакуумні КР).

Тип корпусу КР пов'язаний з видом використаного в ньому ПЕ. Корпуса ділять на дві основні групи: металеві та скляні. Останні використовують переважно для вакуумних КР, металеві - для герметизованих та вакуумних. Корпуса КР або розробляють спеціально, або використовують стандартні для електровакуумних та напівпровідникових пристроїв. Більшість корпусів стандартизовано. Габаритні розміри корпуса різних типів розрізняються досить сильно. Зокрема, зовнішній діаметр скляних корпусів знаходиться в межах від 30 до 5,2 мм, а довжина – від 85 до 22 мм. Металеві корпуса мають розміри 11х11х34...11,1х13,5х4,7 мм³.

Корпуса розрізняються також конструкцією виводів. Одні типи корпусів мають жорсткі виводи (штирі), які призначенні для роз'ємних об'єднань, другі – гнучкі виводи для з'єднання спаюванням або сваркою [7,8].

На теперішній час ВАТ "МОРИОН" серійно випускає велику номенклатуру кварцових резонаторів, які охоплюють діапазон частот від 4 кГц до 200 МГц.

Найбільш поширення отримали наступні види кварцових резонаторів:

- резонатори в металічних корпусах типа «Б» (HC-33), «М» (HC-49), «ММ» (HC-52), «ЧА», HC-49/S (табл. 1.3);

- резонатори в скляних корпусах типа «Э», «С» (табл. 1.4);

- резонатори в корпусах HC-52, HC-52- SMD для переналагодження пейджерів (Motorola, LX – 2, LX - 4, Samsung, NEC, Bumerang и др.).

Ці пристрої заміняють практично вся номенклатуру виробів, які раніш вироблялися в колишньому СРСР, а також виробляємих на теперішній час за кордоном.

			Точність	Динамічний
Тип	Корпус, тип	Діапазон частот	налагод-	опір,
		(номер гармоніки)	ження*10 ⁻⁶	Ом
РК379	M (HC-49)	420550 кГц (1)	±30	< 3000
	М	3500 27000 кГц (1)	±5±30	20100
	(HC-49)	2060 МГц (3)		
РК379	(HC-49-SMD)	60100 МГц (5)		
	MM	500045000 кГц (1)	±5±30	30150
	(HC-52)	20150 МГц (3)		
	(HC-52-SMD)	60150 МГц (5)		
	М	4000 27000 кГц (1)	$\pm 5\pm 30$	20100
	(HC-49)	2060 МГц (3)		
РК386		60100 МГц (5)		
	MM	500045000 кГц (1)	$\pm 5\pm 30$	30150
	(HC-52)	20100 МГц (3)		
		60150 МГц (5)		
РК 379	Б	75010000 кГц (1)		
DIG 40 ((HC-33)	1000 0000 E (1)	±10±20	30600
PK 426		10008000 кГц (1)		
РК 432	HC-49/S	1000025000 кГц (1)	±15±50	< 25

Таблиця 1.3 - Резонатори в металічних корпусах

РК411	М	100 150 МГц (5)	$\pm 10\pm 30$	80200
РК412	(HC-49)			
РК 76	М	450020000 кГц (1)	$\pm 15\pm 30$	4070
	(HC-49)	2030 МГц (3)		
РК 407	M (HC-49)	1000036000 кГц (1)	±25	20
РК372	ЧА	30,732,8 кГц (1)	±30	-
РК146	ЧА	32,76832,7778 кГц (1)	±30	-
PK404*	транзисторного	2 000 кГц (1)	±10	≤50
	типу (діаметр – 18,5 мм, висота – 6,0 мм)			

*) Довгочасна нестабільність РК 404 ±2,5*10⁻⁶ за 2 роки.

Таблиця 1.4 - Резонатори в скляних корпусах

		Інтервал	Нестабільність	Точність				
Корпус [*] ,	Діапазон	робочих	в інтервалі	налагод-				
тип	частот	температур, °С	температур, *10 ⁻⁶	ження,*10⁻⁰				
		-10+60	±75	±20±50				
Э	4 550	-20+70	± 100					
	кГц	-40+70	± 200					
C		-60 +85	$\pm 250 \pm 300$					
Э	Діапазон частот от 840 кГц до 150 МГц							
С		Діапазон частот от	840 кГц до 100 МГ	Ţ				

*) Розміри корпусів:

тип Э – діаметр 10,16 мм, висота 25 – 92 мм (виводи гнучкі);

тип С – діаметр 19,0 мм, висота 48 – 98 мм.

Типове позначення кварцового резонатора складається з наступних елементів:

PK 379M-5AM-38, 4625 M;

SMD PK 379М-5АМ-38, 4625 М (для поверхового монтажу),

де РК 379 - тип резонатора; М - тип корпуса (додаток 1); 5 - клас точності налагодження (табл. 1.5), А - інтервал робочих температур (табл. 1.6), М - відносна зміна частоти в інтервалі робочих температур; 38,4625 М – умовне позначення номінальної частоти.

Таблиця 1.5 - Позначення класів точності налагодження кварцових резонаторів

Точність											
налагодження, 10-6	±0,5	±1	±3	±5	±10	±15	±20	± 30	± 50	±75	±100
Клас точності		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Таблиця 1.6 - Типові нестабільності частоти від температури для частот

Діапазон		Відносні зміни частоти, × 10 ⁻⁶										
температур,	±1,5	±2	±3	±5	±7,5	±10	±15	±20	±25	±30	±40	±50
۰C	(Д)	(E)	(И)	(K)	(Л)	(M)	(H)	(Π)	(P)	(C)	(T)	(Y)
+75+85 (K)												
+65+75 (И)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+55+65 (Ж)												
-10+60 (A)	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
-30+60 (Б)	-	-	-	-	?	+	+	+	+	+	+	+
-40+70 (B)	-	-	-	-	-	?	+	+	+	+	+	+
-60+85 (Д)	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+

0,75...200 МГц

Позначення, що приведені в таблиці:

"+" - випускаються серійно; "-" - не випускаються; "?" - по узгодженню.

На основі генераторних КР розроблені та серійно виробляються також вісім базових моделей малогабаритних генераторів, які мають досить високі якісні показники та можуть бути використані в різних телекомунікаційних та навігаційних системах, зокрема: в системах синхронізації та зберігання часу; в системах супутникового, мобільного та провідного зв'язку; в цифрових та мікропроцесорних системах в якості джерел стабільних інтервалів часу (табл. 1.7).

<u>МОДЕЛЬ №1</u>. Основним елементом слугує кварцовий резонатор с внутрішнім термостатуванням, або резонатор-термостат (РТ). В якості нагрівача і датчика температури використовуються терморезистори з великим додатнім ТКО (позистори), які змонтовані на металічній основі кварцоутримувача. Схеми терморегулятора и генератора суттєво модернізовані.

<u>МОДЕЛЬ №2</u>. Містить в собі кварцовий резонатор с внутрішнім термостатуванням, але з комбінованим нагрівачем. Дана модель спеціально розроблена с метою забезпечення гранично малий час встановлення частоти (час готовності) в комплексі с малим енергоспоживанням, в тому числі і в момент включення. Існують дві модифікації цієї моделі: з напругою живлення 12В і 5В. Загальна конструкція, за виключенням РТ, подібна 1-ої моделі.

<u>МОДЕЛЬ</u> №3. Малогабаритний термостатований кварцовий генератор, основним елементом якого слугує резонатор SC-зрізу (типовий резонатор – 13 МГц / SC на 3-ій гармоніці). Це дозволило досягнути високої стабільності частоти в поєднанні з невеликим енергоспоживанням.

Прецизійний МОДЕЛЬ №4. кварцовий генератор на основі термостата, використаний резонатор SC-3pi3y. одноступеневого де оптимізована тепловим потокам використанням Конструкція по с температурної компенсації для досягнення температурної стабільності частоти ±3 х 10⁻¹⁰ в кварцовому генераторі компактних розмірів. Для кінцевого налагодження терморегулятора використані термочутливість коливань моди В. Модифікація генератора с висотою корпуса 19 мм зробила його ще більш приваблюючим.

<u>МОДЕЛЬ №5</u>. Прецизійний мініатюрний генератор, який має об'єм 8 см³. Завдяки високій стабільності частоти (~10⁻⁸) и малим розмірам, він може бути використаний в самих різних системах та пристроях.

МОДЕЛЬ №6. Високочастотний прецизійний генератор на діапазон частот від 50 МГц до 112 МГц. Резонатор SC-зрізу в поєднанні зі спеціальними схемними рішеннями забезпечує «плато» фазових шумів <-165дБ/Гц, що дозволяє використовувати генератор в при побудові синтезаторів частоти, включаючи синтезатори з ФАПЧ, а також безпосередньо в якості керуємого напругою термостатованого генератора.

<u>МОДЕЛЬ №7</u>. Високостабільний генератор з подвійним термостатуванням. Даний кварцовий генератор забезпечує температурну та

Параметри	1	МОДЕЛЬ							
_	1(ГК54,ГК75)	2(ГК68	, ГК80)	3(ГК66)	4(ГК62)	5(ГК85)	6(ГК87)	7(ГК89)	8(ГК90)
Діапазон частот, МГц	4,420	9,5	.10,5	1040	516,384	1026	50112	410	1016,384
Стандартні частоти, МГц	4,9152; 5,0; 6.4; 8,192;	10	,0	10,0; 13,0; 16,384;	5,0; 8,192; 10.0	10,0; 13,0; 16,384; 26,0	100	4,096; 5,0; 8,192; 10.0	10,0; 13,0
	9,8304; 10,0;	1	ļ	26,0	- 2 -			- 7 -	
	12,8;	1	ļ	1		l			
	16,384;20,00	Ļ]	 '					
Корпус:	ay, ay, 1y,	1	ļ	1			27 27 0 57	2, 2, 1, 5,	212 212 0 512
дюймовии тип	$2^{-1}x2^{-1}x1$	514	125	-	-51x41x25(10)	1''×1''×0,5''	2″x2″x0,5	2° x2° x1,5°	27x27x0,5
метричнии тип, мм	51x41x25	3134	1823	30x2/x10	51X41X23(19)	-	-	-	-
Температурна нестабільність	1 '	1	ļ	1		l			
4actotu B Mexax	$\pm 5 \times 10^{-9}$	+1.5	·· 10 ⁻⁸	+5×10 ⁻⁹	$+2 \times 10^{-10}$	$\pm 1 \times 10^{-8}$	$+1 \times 10^{-7}$	$+1 \times 10^{-10} (+5 \times 10^{-11})$	±1×10 ⁻⁹
-10+60 C	$\pm 3 \times 10^{-8}$	±1,57	v10 ⁻⁸	$\pm 3 \times 10^{-8}$	$\pm 5 \times 10^{-10}$	$\pm 1 \times 10^{-8}$	$+2x10^{-7}$	$\pm 1 \times 10^{-10}$	$\pm 1.5 \times 10^{-9}$
-40+70 °C	$\pm 1.5 \times 10^{-8}$	$\pm 2,57$ $\pm 3x$	10 -8	$\pm 1 \times 10^{-8}$	$\pm 3 \times 10^{-9}$	$\pm 1,3 \times 10^{-8}$	$+5 \times 10^{-7}$	$\pm 1,3 \times 10^{-10}$	$\pm 1,5 \times 10^{-9}$
-60+70 °C	$+2.5 \times 10^{-8}$	+5x	10 -8	-	-	-	-	-	-
Ловгочасна нестабільність	<u></u> ,0A10			í'			ł		
частоти:	1	1	ļ	1		l			
за рік, *10 ⁻⁸	±(35)	±1	10	±(510)	±(25)	±(310)	± 50	±(0,52)	±(35)
за 10 років, *10 ⁻⁷	±2	±	:3	±3	±2	±3	± 20	±(0,31)	±3
Короткочасна нестабільність	12		11	 	12			12	
за 1 с (варіація Алана)	$5x10^{-12}$	1x10	0 -11	1×10^{-11}	5x10 ⁻¹²	2×10 ⁻¹¹		$2x10^{-12}$	1×10 ⁻¹¹
Фазовий шум, дБ/Гц, при	1	1	ļ	1		l			
відлагодженні від несучої	1	1	ļ	1		l			
(типове, для 10 мі ц, окрім	05 (10MErr)	1	ļ	1		l			
1 K87): 1 Eu	-95 (101011 Ц)	_0	20	-90	-100	-85	-60	-100	-95
1 ПЦ 10000 Гн	-160	-1	55	-145	-155	-150	-165	-155	-155
1000011		ГК68	ГК80		155	100	100	100	100
Напруга живлення, В	12	12	5	12	12	5	12	12	12
Струм споживання:	1 '			1		-			
в усталеному режимі, мА	30	25	35	80	180	150	120	270	200
в піковому (розігрів), мА	400	100	180	200	500	500	400	1200	500
Час встановлення частоти з	<u>ا</u> ا		— (1 .					
точністю ±1х10 ⁻⁷ , хв.	5	0.	,5	3	3	2	10	15	5

Таблиця 1.7 – Вісім базових моделей кварцових резонаторів

добову стабільність частоти $\pm 1 \times 10^{-10}$ за довгочасної стабільності $\pm (0,5...1...2) \times 10^{-8}$ /год.

МОДЕЛЬ №8. Високостабільний термостатований генератор (~110⁻⁹), виконаний в дуже компактному корпусі з висотою 0,5 дюйма, що дозволяє його використання в обладнанні з жорсткими обмеженнями компонентів по висоті. Генератор забезпечує температурну стабільність частоти - в межах ± $1x10^{-9}$ - в поєднанні з малим значенням по старінню: ± (3...5) x 10⁻¹⁰/добу і ±(3...5)x10⁻⁸/год. Для таких рівнів стабільності він є одним з найменших у світі.

Типова конструкція генераторів представлена в додатку 2.

Резонатори для фільтрів. Для цих резонаторів задають вимоги до відхилення частоти послідовного резонансу від номінального значення та певні значення індуктивності або ємності. Допуски на відхилення індуктивності нормуються досить жорстко – біля 5...10 %. Точно обговорюються смуги частот, в межах яких повинно забезпечуватись визначене послаблення побічних резонансів (рис.1.15). Вимоги до добротності КР звичайно нижчі, ніж для генераторних резонаторів, і добротність, якщо фільтри не дуже вузькосмугові, може бути порядка 10⁴. Для фільтрів часто використовують багатополюсні резонатори. Як для генераторних, так і для фільтрових КР конструктивно-технологічними методами намагаються знизити чуттєвість їх параметрів до факторів впливу, дії навколишнього середовища.

На теперішній час виробляється широка номенклатура монолітних п'єзорезонансних фільтрів на стандартні частоти (5,0; 9,0; 12,5; 18,5; 21,4; 36,0; 45,0; 72,0; 90,0 МГц) та нестандартні частоти в діапазоні від 2 до 160 МГц.

Основні технічні характеристики п'єзорезонансних фільтрів

1.	Відносна	ширина	смуги	пропускання:
----	----------	--------	-------	--------------

Діапазон номінальних	Відносна ширина смуги
частот, МГц	пропускання
245	$1 \ 10^{-4} \dots \ 3 \ 10^{-3}$
4570	$1 \cdot 10^{-4} \dots 1, 5 \cdot 10^{-3}$
70100	$1 \ 10^{-4} \ \dots \ 1 \ 10^{-3}$
100160	$1 \cdot 10^{-4} \dots 1,5 \cdot 10^{-4}$

2. Нерівномірність затухання в смузі пропускання: 3 дБ тах.

3. Вносиме затухання в смузі пропускання:

на основній частоті зрізу: 0,5...4 дБ,

на третій гармоніці: 2...8 дБ (залежить від порядка фільтра).

4. Відносне затухання в смузі затримання - від 30 дБ до 80 дБ.

5. Максимальне затухання в смузі затримання - від 40 дБ до 110 дБ.

6. Затухання в побічних смугах пропускання - від 15 дБ до 86-90 дБ.

7. Діапазон робочих температур: - 60°С ... + 70°С.



Рис. 1.15 – Типова амплітудно-частотна характеристика смугового п'єзоелектричного фільтру:

 $f_{\rm HOM}$, f_{cp} - номінальна, середня частота фільтра; Δf_l , Δf_2 - ширина смуги пропускання (режекції) по рівню al, a2; Δf_3 , Δf_4 - ширина нижньої, верхньої смуги затримування (пропускання) по рівню a2 (al); f_{cl} , f_{c2} та f_{c3} , f_{c4} - нижня и верхня частоти зрізу по рівню al та a2; f_{c5} , f_{c6} - нижня і верхня частоти зрізу смуги затримування (пропускання);

 a_1, a_2 - нижній, верхній рівень відносного затухання, який визначає смугу пропускання (затримування); a_{MUH}, a_{MAKC} - мінімальне і максимальне вносиме затухання; Δa - нерівномірність затухання в смузі пропускання; a_{2ap} - гарантоване відносне затухання в смузі затримування

Резонатори для датчиків фізичних величин. В КР цього класу використовують на відміну від двох згаданих чутливість параметрів коливальної системи (частіше всього – її резонансної частоти або частот) до впливу температури, що змінюється, механічної сили або приєднаної до поверхні п'єзоелемента маси. Ці резонатори виступають в якості чутливих елементів п'єзорезонансних датчиків [5].

Група п'єзорезонансних датчиків включає в себе велике число засобів виміру механічних параметрів (зусиль, тиску, прискорення, маси, кутових швидкостей, моментів деформації і т.д.), теплових пристроїв (термодатчиків, датчиків витрат, теплових потоків), пристроїв для контролю складу, концентрації газів, вологості, мікромас.

Резонатори-датчики частіше всього збуджуються товщинно-зсувними коливаннями, частоти яких лежать в діапазоні одиниць – десятків мегагерц. Відомо також застосування низькочастотних КР коливань вигину, які працюють на частотах в декілька десятків кілогерц.

Загальними вимогами до всіх КР - датчиків є досягнення високої добротності, сталості характеристик, чутливості до однієї або декількох заданих величин за часом, технологічність. Різноманітність конструктивних особливостей КР визначається призначенням датчика, специфікою задач, що ним розв'язуються. Наприклад, в датчиках абсолютного тиску, прискорення, кутової швидкості та ін. п'єзоелемент працює в умовах вакууму. В датчиках температури, різницевого тиску, аналізаторах газового складу аналогічний п'єзоелемент знаходиться в контакті з газовим середовищем. По цій причині КР - датчики можна класифікувати лише за видом п'єзоелемента: типу зрізу і виду коливань, які збуджуються, конфігурації п'єзоелемента та електродів.

Різноманіття технічних задач, які розв'язуються шляхом застосування КР в кожному конкретному випадку потребує обліку впливу зовнішнього середовища на його параметри і, в першу чергу, на резонансні частоти коливань, які збуджуються.

2 Вплив зовнішніх дій на характеристики кварцових резонаторів

2.1 Фактори впливу

В залежності від функціонального призначення ПРП зовнішні фактори впливу можуть бути або *decmaбiлізуючими*, або *інформативними*. Дійсно, будь-який автогенератор, який використовується в якості задаючого в радіопередавачі, намагаються сконструювати так, щоб частота генеруємого ним сигналу не залежала від впливу зовнішнього середовища (такий ПРП називають *інваріантним* до зовнішньої дії). В такому ж по схемі автогенераторі – датчику температури намагаються забезпечити високу чутливість до цього фактора і нульову – до всіх інших (механічних впливів, тиску і т.д.).

Зовнішні впливи можуть викликати як зворотні, так і не зворотні зміни резонансної частоти КР. В багатьох випадках після припинення того чи іншого зовнішнього впливу початкове значення частоти відновлюється з заданою точністю через деякий час, наприклад, через декілька секунд, хвилин або годин. Іноді таке відновлення не настає при будь-якій тривалості інтервалу спостережень. Очевидно, що перевищення деякого рівня інтенсивності зворотного впливу може призвести до незворотних змін властивостей КР.

В число факторів впливу входять температура, вологість, атмосферний тиск, механічні впливи, радіація, рівень збуджуючого електричного сигналу, час (старіння). Безпосередньо сам ПЕ володіє високою чутливістю до величини маси, яка приєднана до його поверхні в активній зоні (масчутливість КР). Цей вид чутливості цілеспрямовано використовують при створення вимірювачів мікромас. Він же самовільно проявляється в генераторних та фільтрових КР як один із компонентів старіння.

Варто відмітити, що часто дія одного фактора є результатом дії іншого. Наприклад, зміна температури оточуючої герметизований КР середовища призводить до зміни тиску газу всередині корпусу. При зміні температури на 100 °C тиск зміниться приблизно на 30% і буде спостерігатись взаємний вплив двох факторів на резонансну частоту КР.

В деяких специфічних застосуваннях може виявитись необхідним враховувати чутливість КР до впливу електричних і магнітних полів.

2.2 Температурна чутливість КР

Цей вид чутливості найбільш важливий. Вплив температури на частоту резонатора складний та різноманітний і є предметом багатьох теоретичних та експериментальних досліджень. Зміни температури можуть викликати як зворотні, так і незворотні зміни частоти. Зворотні зміни набагато, звичайно на декілька порядків, більше незворотних, тому останні беруть до уваги лише для резонаторів високої сталості.

Нестабільність за змін температури в інтервалі від T₁ до T₂ °C визначають як відносну зміну частоти $\frac{\Delta f}{f_n}$, де Δf – різниця між найбільшим f_{δ} і найменшим f_{M} значеннями частоти, зафіксованими при зміні температури від T₁ до T₂, а f_n – номінальна частота резонатора:

$$\Delta f / f_{\scriptscriptstyle H} = (f_{\scriptscriptstyle \delta} - f_{\scriptscriptstyle M}) / f_{\scriptscriptstyle H}.$$

Температурну нестабільність частоти оцінюють *температурним* коефіцієнтом частоти (ТКЧ) α_f , який являє собою відношення значення похідної $\frac{df}{f} dT$ до частоти f, де f = f(T) - функція, що описує залежність частоти від температури, і називається *температурно-частотнюю характеристикою* (ТЧХ). Залежність резонансної частоти та динамічних параметрів КР від температури визначається переважно фізичними властивостями п'єзоелемента, а також впливом електродів, елементів кріплення та кварцоутримувача.

Температурний коефіцієнт частоти КР може бути представлений виразом [8]

$$\alpha_f \approx 0.5 (\alpha_c - \alpha_\rho) - \alpha_b, \qquad (2.1)$$

де α_c , α_ρ та α_β - відповідно температурні коефіцієнти пружності, щільності та лінійного розширення ПЕ в напрямку частотовизначального розміру *а*. Якщо α_ρ в (2.1) не залежить від зрізу ПЕ і складає –3,64·10⁻⁵ 1/°С, то α_β має значення від –1,43·10⁻⁵ до –6,8·10⁻⁶ 1/°С в залежності від орієнтації, а α_c змінюється в залежності від типу зрізу як по величині, так і по знаку. Коефіцієнти α_c , α_ρ та α_β , крім того, є ще і функціями температури. Якщо коливання ПЕ не одномірні, то залежність ТКЧ суттєво ускладнюється і визначається температурними коефіцієнтами багатьох геометричних розмірів і пружних коефіцієнтів ПЕ.

Багатомірність і нелінійний характер процесів, які визначають температурні характеристики (TX) параметрів КР, теплова інерція, вплив елементів конструкції обумовлюють нелінійність ТХ КР, їх залежність від швидкості зміни температури, а також появу аномальних ділянок. В зв'язку з цим прийнято розрізняти статичні та динамічні температурні характеристики КР.

2.2.1 Статичні температурні характеристики КР

Статична температурно-частотна характеристика будь-якого КР з достатньою для практики точністю може бути представлена в діапазоні температур від –200 до +200 °C у вигляді полінома третьої степені:

$$\frac{f - f_0}{f_0} = a_Q (T - T_0) + b_Q (T - T_0)^2 + c_Q (T - T_0)^3, \qquad (2.2)$$

де f_0 – значення резонансної частоти КР при $T=T_0$; a_Q ; b_Q ; c_Q – температурні коефіцієнти частоти першого, другого та третього порядку, які є похідними по температурі відповідного порядку, обраховані в точці T_0 , і залежать від кута зрізу ПЕ.

В таблиці 2.1 наведені середні значення ТК КР найбільш поширених зрізів [7], які входять у вираз (2.2).

					1				
Koohinicut	Popuinuieri	Зріз							
Косфіцієні	гозмірність	AT	BT	ДТ	PT	ЦT			
a_Q	10 ⁻⁶ 1/°C	0	0	0	0	0			
B_Q	$10^{-9} 1/^{\circ}C^{2}$	0,4	-40	-19	-6,5	-58			
c_{Q}	$10^{-12} \ 1/^{\circ}C^{3}$	109,5	-128	75	-2	-151			

Таблиця 2.1 - Значення температурних коефіцієнтів деяких зрізів

В одноповоротних AT- і BT- зрізах, які в наш час є найбільш розповсюдженими, досягається часткова компенсація термічних напруг вздовж однієї з кристалографічних осей ПЕ. ТЧХ таких резонаторів являється функцією кута зрізу.

В останні роки багато уваги приділяється розробці КР на основі двоповоротних зрізів, які отримуються при двократному обертанні пластини ПЕ відносно кристалографічних осей. Подібне обертання ПЕ забезпечує орієнтацію з нульовою пружною сталою, що призводить до компенсації будьяких внутрішніх напружень.

ТЧХ найбільш розповсюдженого двоповоротного SC – зрізу (α =34°, β =22°) у вузькому інтервалі температур, характерному для роботи КР в умовах термостатування, показана на рис.2.1. Тут же для порівняння наведені ТЧХ КР *AT*- і *BT*- зрізів. При температурі 55±0,8°С відхилення частоти КР *SC* –зрізу не перевищує 1·10⁻⁹, що в 10...40 разів краще, ніж для інших зрізів.

ТКЧ різних мод КР мають різні значення. Для КР, який збуджується на основній частоті та на частоті *n*-ої механічної гармоніки, їх різниця визначається співвідношенням

$$\alpha_{fn} - \alpha_{f1} = K_{\alpha} (1 - 1/n^2), \qquad (2.3)$$

де α_{fn} та α_{f1} – ТКЧ *n*-ої механічної гармоніки та основної частоти відповідно; K_{α} - коефіцієнт, який залежить від орієнтації ПЕ. Для КР *AT* – зрізу K_{α} ≈6,6·10⁻⁷ 1/°С.

Охолодження КР до криогенних температур викликає зменшення ТКЧ приблизно до 4·10⁻⁹ 1/К при Т=4,2 К і зростання власної добротності



Рис. 2.1 - Порівняльні ТЧХ АТ-, ВТ- та SC-зрізів КР

приблизно до 4·10⁹ при Т=2 К.

Зміна температури призводить також і до зміни еквівалентних динамічних параметрів КР. При цьому динамічний опір високочастотних товщинно-зсувних КР практично не залежить від температури, а для більшості низькочастотних КР зростає з ростом температур, що обумовлено впливом припоїв, які використовуються для кріплення утримувачів. Температурну залежність опору звичайно характеризують середнім температурним коефіцієнтом (ТКО) [8]

TKO =
$$(R_{q2} - R_{q1})/R_{q0}(T_2 - T_1),$$
 (2.4)

де R_{q2} та R_{q1} – значення опору в крайніх точках температурного інтервалу T_2 і T_1 відповідно; R_{q0} – опір при нормальній температурі.

Опір КР деяких типів в крайніх точках температурного інтервалу з урахуванням (2.4) змінюється в 3-4 рази. Залежність ємності C_0 від температури визначається ТК діелектричної проникності ПЕ і матеріалів корпуса. Для вакуумних КР в скляних корпусах температурна залежність C_0 лінійна і має ТКЄ біля 5·10⁻⁵ 1/°С.

Для резонаторів з малим ТКЧ температурні коефіцієнти динамічної ємності C_q та індуктивності L_q протилежні по знаку і близькі по абсолютній величині, що викликає незначні зміни частоти від температури. Однак величини ТК C_q та L_q на 2-4 порядка більше ніж ТКЧ. Ця обставина визначає

досить значну зміну смуги пропускання кварцових фільтрів та форми ТЧХ КР при зміні величини розладу (тобто відхиленні робочої частоти кварцового генератора від частоти послідовного резонансу КР). Температурні залежності реактивних динамічних параметрів C_q та L_q досить точно описуються залежностями

$$C_{q} = C_{q0} [1 + \alpha_{C1} (T - T_{0}) + \alpha_{C2} (T - T_{0})];$$

$$L_{q} = L_{q0} [1 + \alpha_{L1} (T - T_{0}) + \alpha_{L2} (T - T_{0})],$$
(2.5)

де C_{q0} , L_{q0} – значення динамічних ємності та індуктивності при температурі $T_0 = 20^{\circ}$ С. В таблиці 2.2 приведені значення α_{c1} та α_{c2} для резонаторів різних зрізів [8]. Температурний коефіцієнт ємнісного відношення $m = C_0/C_q$, що викликаний температурною зміною реактивних параметрів КР, складає величину приблизно $3 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}$ С для резонаторів AT – зрізу та $9,5 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}$ С для резонаторів BT – зрізу, що слід врахувати при проектуванні кварцових фільтрів.

При використанні КР в якості датчиків фізичних величин необхідно також враховувати температурні залежності коефіцієнтів, які зв'язують ці величини із значенням інформаційного параметра, частіше всього із частотою послідовного резонансу. Так, коефіцієнт силочуттєвості резонаторів AT – зрізу $K_F = \frac{\partial f}{\int \partial F}$ при плоскому одноосному навантаженні лінійно змінюються із зміною температури і його ТК може досягати величини (1...2)·10⁻³ 1/°С, тобто суттєво перевищувати ТКЧ.

Тип зрізу, форма ПЕ	$\alpha_{c1}*10^4$, 1/°C	$\alpha_{c2} \cdot 10^7$, 1/°C ²
АТ, плоскі	+2,4	+2,0
АТ, двояковипуклі	+1,3+2,2	+1,0
ВТ, плоскі	-8,3	-12,0
РТ, плоскі	+2,7	+2,0
ИТ, плоскі	+4,0	+4,0
ДТ, прямокутні	-1,0	-3,0

Таблиця 2.2 - Температурні коефіцієнти динамічної ємності

Аномалії статистичних ТХ виникають в неточно сконструйованих або виготовлених КР і виражаються в наявності різких відхилень від типової ТХ у вигляді розривів, стрибків і т.д. у вузьких температурних інтервалах (приблизно від 1 до 5 °С). Причинами аномалій у високочастотних КР є зв'язки робочих коливань з коливаннями інших видів та близькість частот взаємодіючих коливань. Так як ТКЧ взаємодіючих коливань звичайно значно більше ТКЧ основних коливань, то взаємодія коливань проявляється у вузькій області температур. Аномалії ТЧХ КР супроводжуються також і аномаліями ТХ динамічних параметрів в тих же температурних інтервалах. В низькочастотних КР спостерігається, крім цього, ще і взаємодія з механічними резонансами елементів кріплення, які пов'язані з ПЕ [8].

Варто відмітити, що якщо статистичні ТХ КР досліджені досить грунтовно, то динамічну поведінку ТХ в даний момент інтенсивно вивчають.

2.2.2 Динамічні температурні характеристики КР

Розглянуті в попередньому розділі ТХ спостерігаються при відносно повільних змінах температури КР, причому критерій повільності відмінний для резонаторів різних конструкцій і залежить від дозволеного відхилення ТЧХ від її рівноважного стану. Аналіз показує, що резонансна частота КР залежить не лише від температури, але й від її похідних по координатах і часу. В даний момент існує декілька моделей, які пояснюють динамічні ефекти ТЧХ.

А. Баллато [6] запропонована модифікація рівняння статичної ТЧХ, яке обраховується по формулі (2.2), шляхом введення змінної залежності коефіцієнта ТЧХ першого порядку. При цьому рівняння ТЧХ набуває вигляду

$$\frac{\Delta f(t)}{f_0} = a(t)\Delta T(t) + b_0\Delta T(t)^2 + c_0\Delta T(t)^3, \qquad (2.6)$$

де

$$a(t) = a_0 + \widetilde{a} dT(t)/dt. \qquad (2.7)$$

Тут $\Delta T(t)$ – зміни температури ПЕ; \tilde{a} – динамічний коефіцієнт, який залежить від параметрів a_0 , b_0 , c_0 і конструкції резонатора. Його можна розглядати як феноменологічний параметр, який підлягає визначенню окремо для кожної конструкції КР. Динамічний коефіцієнт \tilde{a} прийнятий рівним 2,27·10⁻⁷ с/K². Недоліком моделі (2.6) є об'єднання a_0 та \tilde{a} (dT/dt) в загальний член a(t). Це означає, що при $T_0=0$ температурно-динамічні викривлення повинні бути відсутніми.

З урахуванням того, що значення T_0 може вибиратися довільно і тягне за собою лише зміни значення a_0 , можна зробити висновок про неточність цієї моделі.

Пізніше була запропонована більш досконала феноменологічна модель динамічних ТХ КР, яка отримана в результаті аналізу ефектів перерегулювання частоти в термостатованих КГ. В моделі врахований температурний градієнт, що виникає між поверхнею ПЕ, яка має температуру T_0 , і внутрішнім об'ємом ПЕ з температурою T_i , шляхом використання еквівалентного теплового опору R_T , яке спільно з еквівалентною ємністю C_T об'єму ПЕ обумовлює інерційну поведінку та гістерезис ТЧХ. Для резонатора SC – зрізу з частотою 5 МГц, який працює на третій гармоніці, обчислене значення R_TC_T складає ~ 10⁻¹ с. В цьому випадку ТХЧ може бути представлена виразом

$$\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_{\partial u_H} = a_0 \left(T_i + R_T C_T \frac{dT_i}{dt} - T_0\right) + b_0 \left(T_i + R_T C_T \frac{dT_i}{dt} - T_0\right)^2 + c_0 \left(T_i + R_T C_T \frac{dT_i}{dt} - T_0\right)^3,$$
(2.8)

або

$$\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_{\partial uu} = \left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_{cmam} + \tilde{a}\frac{dT_i}{dt}.$$
(2.9)

При умові

$$R_T C_T \frac{dT_i}{dt} << T_i - T_0,$$
 (2.10)

яка відповідає випадку невеликих динамічних ефектів, значення \widetilde{a} визначаються як

$$\widetilde{a} \approx \left[a_0 + 2b_0(T_i - T_0) + 3c_0(T_i - T_0)^2\right] R_T C_T.$$
(2.11)

Звертає на себе увагу значно менше (приблизно на порядок) значення \tilde{a} SC – зрізу в порівнянні з іншими зрізами, а також сильна залежність \tilde{a} від незначних змін орієнтації SC – зрізу.

Проведений розгляд статичного та динамічного впливу температури на параметри КР показує, що при роботі в широкому інтервалі температур параметри більшості ПРП не задовольняють сучасним вимогам без прийняття спеціальних заходів для зниження дестабілізуючих впливів температури.

2.2.3 Методи зниження температурного впливу на параметри КР

Для зниження температурних впливів на КР використовують конструктивно-технологічні та функціональні методи. До конструктивнотехнологічних методів варто віднести розробку нових двоповоротних зрізів ПЕ, які забезпечують більш повну компенсацію температурних напруг в кристалі (*TTS* та *SC* – зрізи) [5], ТЧХ яких розглянуті вище, а також високостабільних КР для термокомпенсування генераторів [7].

Бажання зменшити дестабілізуючий вплив електродів збудження та елементів кріплення призвело до розробки безелектродних резонаторів *BVA*,

в яких дисковий ПЕ AT – або SC – зрізу закріплений на 4 кварцових містках шириною біля 0,4 мм та збуджується в зазорі.

Не дивлячись на досягаєме досить значне покращення ТЧХ, конструктивно-технологічні методи, як правило пов'язані також із значним ускладненням та подорожчанням технології виробництва КР. Так, характеристики кристалів SC – зрізу приблизно в 10...20 більш чуттєві до кутових допусків, ніж звичайні КР AT – або BT – зрізів. Крім того, найменші порушення кінцевого контуру викликають появу паразитних коливань. Розробка фірмою *Hewlett-Packard* КР SC – зрізу зайняла 4 роки, причому половина цього періоду пішла на створення та доопрацювання спеціального Навелені причини обмежують виробничого облалнання. широке використання КР. лопомогою конструктивношо покрашенні за технологічних метолів.

Функціональні методи засновані на принципах температурної стабілізації або температурної компенсації зміни параметрів КР і можуть бути класифіковані за способом використання інформації про температурні зміни. У зв'язку з цим варто розрізняти системи *термостабілізації* та *термокомпенсації* без виділення та з виділенням інформації про температурні зміни в КР.

2.3 Вібраційна чутливість КР

Багато ПРП працюють в жорстких експлуатаційних умовах дії нестаціонарного теплового потоку, вібрації, акустичних шумів, деформації і т.д. Ця дія суттєво впливає на величину випадкової похибки п'єзорезонансних приладів і погіршує їх динамічні характеристики. Причому, якщо по відношенню до температури сам КР володіє визначеною інерційністю, тобто властивістю лінійного усереднення швидкозмінних теплових процесів, то по відношенню до вібрації дія цього ефекту незначна.

Особливо великий вплив вібрації проявляється в частотних вимірювальних перетворювачах механічних величин, де використовують КР з підвищеною силочуттєвістю. У високостабільних КГ застосування методів термостатування дозволяє досягти низьких рівнів відносної нестабільності частоти біля 10^{-10} в інтервалі температур до декількох десятків градусів. Проте ці показники стануть значно гіршими при роботі цього генератора в умовах підвищеної вібрації ($10^{-9}...10^{-7}$ при вібраційних прискореннях до 50g). Це пояснює підвищену цікавість розробників до вивчення впливу вібрації на характеристики ПРП і до пошуку методів *віброзахисту* та *віброкомпенсації*.

2.3.1 Ефекти, які виникають в КР під впливом вібрації

Дія вібрації як одного із видів механічних навантажень на КР проявляється двояко. З одного боку, змінюються напруги, які виникають при виготовлені резонатора, і які призводять до незворотних змін його частоти та динамічного опору. Ці процеси аналогічні пошкодженням виробів електронної техніки. З іншого боку, в ПЕ виникають механічні напруги, закон зміни яких в часі відповідає характеру зміни зовнішнього навантаження. Ці напруги призводять до зворотних змін частоти КР, які виражені у вигляді паразитної частотної модуляції. Такі процеси в резонаторі називають пружними, і при цьому зміни динамічного опору вілсутні.

Зворотні зміни частоти існують лише під час дії механічного навантаження, але необхідно враховувати ефект гістерезису, який полягає в тому, що резонансна частота КР при зменшенні величини зовнішнього механічного навантаження приймає значення, яке відрізняється від її початкових значень при збільшені навантаження. Тому, коли вібраційне прискорення стає рівним нулю, різниця між початковим та кінцевим значеннями частоти може досягати 0,1 Гц (на резонансній частоті 5 МГц). Для того, щоб частота КР прийняла своє початкове значення (з точністю до 0,01 Гц), потрібно декілька десятків секунд. Це пов'язано з поступовим зникненням напруг, які обумовлені "пам'яттю" кристалічної решітки.

Таким чином, зміни частоти КР під впливом вібрації (рис. 2.2) можуть бути записані у вигляді

$$\Delta f_{\Sigma} = \Delta f_{_{H3}} + \Delta f_{_{36}} \xi(t) = \Delta f_{_6} (1 - e^{\mu t}) + \Delta f_{_{36}} \xi(t), \qquad 2.12$$

де Δf_{H3} – незворотні зміни частоти; Δf_{θ} – різниця частот резонатора та вільної від механічних напруг пластини; *µ* - коефіцієнт, який враховує інтенсивність навантаження, параметри зовнішнього впливу та характеристику резонатора; $\xi(t)$ – функція, яка описує зміни зовнішнього навантаження; Δf_{36} – амплітуда зворотних змін частоти.

Величину короткочасного зникнення частоти визначають через силочастотний коефіцієнт Ратайського K_f [5] та характеристики КР:

$$\frac{\Delta f_{36}}{f} = \frac{K_f(\Psi)FN}{Db},$$
(2.13)

де f – робоча частота КР; D та b – ширина і товщина перерізу ПЕ, через який передається зусилля F, яке обумовлене дією вібрації; *\V* - азиму- *∆f*, тальний кут, що утворений направлен- Ги ням F та кристалографічною віссю Х ПЕ; $N=\frac{fb}{n}$ – частотна стала ПЕ; n – номер гармоніки.

Незворотні зміни частоти КР, які нагромаджуються в процесі механічних впливів за період вібрашії. набагато менші короткочасних змін. але при інтенсив-



Рис. 2.2. Зміна частоти КР під дією вібрації: —— короткочасні зміни ----- незворотні зміни

них механічних наванта-ження, як показав експеримент (рис.2.3), незворотні частотні зникнення суттєво впливають на сталість резонансних частот КР.

Крім описаних ефектів вібраційного впливі при навантаження на КР, на його виводах виникає електричний сигнал. який називається віброшумом і пов'язаний з явишем прямого п'єзоефекту. Резонатор у цьому випадку може бути представлений у вигляді джерела електричних зарядів *q*, включеного на статичну ємність C_0 , ємність та опір навантаження $C_{\mu}, R_{\mu},$



Рис. 2.3. Незворотній відхід частоти КР під дією механічних ударів: n - кількість ударів

а електричний сигнал на виходах виражається як

$$U = \frac{q \sin(\omega t - \varphi)}{(C_{_{H}} + C_{_{0}})\sqrt{1 + [1/\omega R_{_{H}}(C_{_{H}} + C_{_{0}})]^{2}}},$$
 (2.14)

де

$$\varphi = \operatorname{arctg1} / \omega R_{\mu} (C_{\mu} + C_0).$$

Особливо відчутній внесок віброшумів в короткочасну нестабільність частоти ПРП на частоті вібрації, кратної або рівної резонансній частоті КР та резонансній частоті конструкції тримача. При цьому головна частина паразитної частотної модуляції при вібрації резонатора припадає на короткочасну зміну частоти ПЕ від впливу на нього різного роду напруг, які передаються через конструкцію утримувача.

Дослідження в цій області дозволяють зробити наступні висновки:

1. Залежність відхилень резонансних частот КР від величини вібраційного прискорення носить лінійний характер при фіксованому направленні вібрації. Нелінійність проявляється лише при великих рівнях прискорень та пов'язана з властивостями міцності ПЕ. Наприклад, для лінзових КР *AT* – зрізу діаметром 15 мм, які працюють на 5-й механічній гармоніці при частоті 5 МГц, цей рівень дорівнює 50g і вище.

2. Величина паразитної девіації частоти ПЕ суттєво залежить від направлення вектора вібраційного прискорення. Ця залежність має практично синусоїдний характер при зміні направлення вектора прискорення у всіх трьох площинах ПЕ, які утворені його кристалографічними осями (рис.2.4). Найбільше відхилення частоти спостерігається, як правило, в тому випадку, коли кварцова пластина перпендикулярна направленню дії прискорення або знаходиться в положенні близькому до цього. На рис. 2.4 показані також



Рис. 2.4 - Залежність девіації частоти КР від взаємного розташування вектора прискорення та кристалографічних осей

направлення вектора прискорення, для якого величина девіації частоти дорівнює нулю.

До зникнень резонансних частот КР під впливом вібрації справедливий принцип суперпозиції, який полягає в тому, що девіацію частоти Δf при впливі на КР довільного вектора вібраційного прискорення \vec{G} можна записати у вигляді

$$\Delta f = \Delta f_x + \Delta f_y + \Delta f_z = a_x G_x + a_y G_y + a_z G_z = \vec{A} \vec{G}, \qquad (2.15)$$

де \vec{A} - вектор чутливості до вібраційного прискорення, модуль якого виражається через коефіцієнти чутливості a_x , a_y , a_z повздовж кристалографічних осей ПЕ X, Y, Z,

$$\left|\vec{A}\right| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$
; (2.16)

 G_x , G_y , G_z - складові вектора прискорення \vec{G} , рівні по величині його проекції на вісі X, Y, Z. Із формули (2.15) можна зробити важливий висновок

про наявність площини нульової акселерометричної чутливості, тобто площини, перпендикулярної діючому вектору вібраційного прискорення \vec{G} , при якому векторний добуток (2.15) дорівнює нулю. Існування площини нульового акселерометричного впливу визначається вектором \vec{A} , який характеризує конкретний тип резонатора.

2.3.2 Конструктивно-технологічні методи боротьби з дією вібрації

Традиційно використання методів віброзахисту, які засновані на конструктивного рішення особливостях апаратури: знешколження резонансних явищ в конструкції, демпфірування, гашення коливань. Зниження рівня вібраційних прискорень в ПРП може бути досягнуто комплексними заходами: застосуванням схеми двоярусної амортизації, демпфіруючих мастик і компаундів; створенням необхідної конструктивної жорсткості конструкції та її елементів; виготовлення приладу обтікаємої форми, застосуванням свинцевих облицювань кожуха приладу і т.д. Така система віброзахисту при механічному збудженні пристрою в діапазоні частот від 10 до 200 Гц з прискоренням 2,5 g дозволяє знизити величину вібраційного прискорення, яке діє безпосередньо на КР, до 0.03 g на частотах вище 50 Гц і до 0.50...0.05 д в діапазоні частот від 10 до 40 Гц. тобто в 5...83 рази.

Проте області застосування подібних систем обмежені, що обумовлене значними масогабаритними показниками, складністю реалізації, неможливістю забезпечити необхідний рівень вібрації (десяті, соті долі g) на ПР при дії вібраційного прискорення від 5 g і вище (особливо в низькочастотній області). Крім того, параметри елементів системи віброзахисту ПРП в значній степені залежать від частоти вібрації.

Певний вплив на короткочасні значення частоти здійснюють різні конструктивно-технологічні параметри КР, такі, наприклад, як вид зрізу, конфігурація утримувача, число точок кріплення ПЕ та їх взаємне розміщення і т.д. Встановлені переваги чотириточкового кріплення ПЕ різних зрізів з точки зору мінімізації вібраційної чутливості.

Оптимізація конструкції резонатора – дуже трудомістка задача, проте її рішення дозволяє створювати КР з високою вібростійкістю. Оптимально сконструйовані резонатори мають коефіцієнт вібраційної чутливості від 2,8·10⁻¹⁰/g до 5,2·10⁻¹⁰/g, що приблизно в 7-8 раз менша, ніж в звичайних КР.

Такі дослідження успішно продовжуються. Наприклад, створені на промисловій основі французькими вченими із застосуванням технології високотемпературної дегазації та ультразвукової обробки КР *QAS SC* – зрізу можуть мати коефіцієнт вібраційної чутливості від 3⁻¹⁰/g до 2⁻¹⁰/g.

Таким чином, конструктивно-технологічними методами можна досягти зниження вібраційної чутливості ПР на один і навіть на два порядки.

Але ці методи вимагають наявності високорозвинутої технологічної бази, вони складні та трудомісткі в реалізації. Крім того, вони взагалі не застосовуються в датчиках механічних величин, де потрібна висока силова чутливість КР.

2.4. Вплив рівня збудження на характеристики КР

Створення прецизійних ПРП, в першу чергу високостабільних опорних генераторів та надвузькополосних кварцових фільтрів з відносною смугою пропускання порядка 10⁻⁵ і вужче, а також дискримінаторів, вимагає врахування нелінійних властивостей КР.

2.4.1 Нелінійні властивості КР

Нелінійні властивості КР проявляються, перш за все, в ефекті ангармонізму коливань, тобто в залежності резонансної частоти КР від амплітуди збуджуючого струму, яка викликається змінами коефіцієнтів пружності ПЕ. Дана залежність з задовільною точністю описуються відношенням, яке отримало назву струмової характеристики КР:

$$f = f_0 \left(1 + \lambda I^2 \right), \tag{2.17}$$

де f_0 – резонансна частота КР при малих рівнях збудження; I – струм, який протікає через резонатор; λ - коефіцієнт нелінійності. У співвідношенні (2.17) враховуються зворотні зникнення частоти в діапазоні рівнів збудження до 2...20 мА в залежності від конструкції КР. Знак коефіцієнта нелінійності залежить від типу зрізу і позитивний, зокрема, для резонаторів AT – зрізу, а для КР ET – та XT – зрізів - негативний. Величина коефіцієнта λ складає для резонаторів AT – зрізу (0,1...0,5) А⁻² в залежності від виду моди, яка збуджує коливання.

Зміна резонансної частоти у вказаному діапазоні струмів збудження супроводжується зворотною зміною динамічних параметрів еквівалентної схеми КР, зокрема динамічного опору R_q . При цьому, починаючи з режиму мікрострумів, R_q спочатку зменшується до деякого номінального значення $R_{qном}$, а при подальшому збільшенні струму, що протікає через резонатор, збільшується у відповідності зі співвідношенням

$$R_q = R_{qhho} \left(1 + \beta I^2 \right), \tag{2.18}$$

де β - коефіцієнт нелінійності динамічного опору. Зміна динамічної ємності C_q описується аналогічним виразом.



Рис. 2.5 - АЧХ КР при різних рівнях збудження: а) при температурі 300К; б) при температурі 4,2К

Амплітудно-частотна та фазочастотна характеристики КР при збільшенні рівня збудження зворотно деформуються, при цьому знак коефіцієнта λ однаковий для різних гармонік коливання, а варіація температури не призводять до якісної зміни частотних характеристик (рис.2.5).

Збільшення рівня збудження вище критичного призводить до стрибків амплітуди та фази сигналу, який пройшов через резонатор, що обумовлене добре відомим із теорії нелінійного резонансу гістерезисом АЧХ та ФЧХ нелінійних коливальних систем. Подальше збільшення струму збудження КР тягне за собою незворотні зміни його параметрів, появу розривів та деформації ТЧХ, погіршення шумових характеристик, розкорельованість відхилень частоти через старіння на різних гармоніках та втрату працездатності.

2.4.2 Оптимальна потужність збудження кварцового резонатора

Традиційним методом зниження впливу нелінійних ефектів є обмеження *максимальної потужності*, яка розсіюється на резонаторі.

Оптимальна потужність збудження КР визначається як максимальна потужність, яка не викликає провалів активності в широкому діапазоні температур від -60 до +85 °C, обумовлених виникненням комбінаційних резонансів внаслідок нелінійної взаємодії з ангармонічними обертонами двох

46



Рис. 2.6 - Залежність оптимальної потужності збудження КР від робочої частоти для III, V, VII, IX номерів механічної гармоніки і різних діаметрів електрода: 1) d=2мм; 2) d=3мм; 3) d=4мм; 4) d=5мм

інших гармонік. Для КР зсувних коливань значення оптимальної потужності з деяким наближенням може бути визначено із співвідношення

$$P_{opt} \approx \frac{f_n^3 S_e}{n^3},\tag{2.19}$$

де f_n – номінальна частота гармоніки; S_e – площа електрода; n – номер гармоніки. На рис.2.6 показані графіки залежності оптимальної потужності збудження від діапазону частот, що використовуються.

Величина потужності розсіювання на КР суттєво впливає на зміни його параметрів в часі. Допустимі границі потужності розсіювання на КР приведені в таблиці 2.3.

	ř	Максимальна	
Тип резонатора		допустима	
	Частота резон	потужність	
		розсіювання на	
			резонаторі, мВт
	На основній частоті	75010000	10
Герметизовані	На основній частоті	1000030000	4
	На гармоніках	5000100000	2
	На основній частоті	450	0,1
Borganui	На основній частоті	50800	2
Бакуумні	На основній частоті	80030000	4
	На гармоніках	Більше 15000	2

Таблиця 2.3 - Допустимі потужності розсіювання на резонаторах

2.5 Старіння КР

Зміна частоти та інших параметрів КР в часі (старіння) при тривалій експлуатації та зберіганні викликається поверхневими та структурними змінами, які відбуваються в кварцовій пластині та електродному покритті, контактних матеріалах та елементах кріплення ПЕ, а також рядом інших факторів.

2.5.1 Фізичні процеси старіння КР

З плином часу в резонаторах може відбуватися одночасно декілька процесів:

 зняття (релаксація) внутрішніх напруг та деформацій, які виникають при механічній обробці кварцової пластини та монтажі резонаторів, зміна в орієнтації зсувних областей кварцу, перехід метастабільного стану в основний;

- зміна механічних напруг на границі кристал – металічна плівка;

– виникнення та релаксація механічних напруг в ПЕ в результаті впливу на нього опор кріплення і релаксація механічних напруг в опорах кріплення;

- зміна пружних властивостей елементів кріплення;

 заглиблення, що виникають при механічній обробці мікротріщин або "затягування" їх при визначених умовах під дією молекулярних сил;

 видалення з поверхні кварцової пластини частинок абразиву або кварцу;

- міграція частинок з поверхні кристалу на стінки балона і назад;

– адсорбція кристалом кварцу вологи та газів і, навпаки, відривання адсорбованих частинок;

 окислення металічних покриттів (електродів) і зміна їх фізичних властивостей;

– вихід на поверхню кристала дифузійних домішок і надлишкових вакансій та зміна внаслідок цього щільності кристалу.

Перераховані процеси можуть в значній степені підсилюватись при зміні вакууму (натіканні) через порушення герметичності резонаторів, недосконалості чи порушенні технології механічної обробки, металізації та кріплення ПЕ, а також при наявності дефектів в кристалічній структурі, механічних пошкодженнях кварцової пластини та забруднень, що вносяться в внутрішній об'єм резонатора в процесі виготовлення.

Швидкість протікання розглянутих процесів та ступінь їх впливу на зміну параметрів різних резонаторів неоднакові та можуть суттєво змінюватися в залежності від часу та зовнішніх умов. Причому частина цих процесів відноситься до зворотних і, при певних умовах, може повторюватись.

Характер (закон) зміни частоти резонаторів в часі в ідеальному випадку (для високоякісних прецизійних резонаторів) описується

логарифмічним законом. Спочатку після виготовлення (протягом декількох тижнів і навіть місяців) спостерігається підвищена швидкість зміни частоти, в майбутньому швидкість знижується, а по закінченню деякого часу закон зміни частоти можна вважати лінійним. Проте плавний хід зміни частоти звичайних резонаторів широкого застосування, як правило, порушується внаслідок різного роду нерегулярностей, прояв яких різний для різних типів КР.

Оскільки в КР може проходити одночасно декілька процесів різної інтенсивності та тривалості, які викликають зміни частоти різного знаку, то можна спостерігати досить різноманітний характер змін частоти (рис.2.7). Зміна частоти КР в часі супроводжується також і зміною добротності.

Процеси натікання, окислення, взаємної дифузії матеріалів електродного покриття призводять до зменшення частоти (негативного відхилення). Натяги, які виникають в електродному покритті (електроді), відривання частинок кварцу та електродного покриття викликають збільшення частоти (позитивного відхилення).

Резонатори в металевих корпусах мають переважно тенденцію до зниження частоти в часі, резонатори в скляних корпусах – до підвищення. Така відмінність визначається різною властивістю металевих та скляних балонів поглинати залишкові гази. В скляному балоні гази переходять від кварцу до скла, внаслідок чого частота підвищується. Для герметизованих резонаторів в металевих корпусах поглиблюючим фактором зниження частоти є наявність всередині балона водяних парів та продуктів випаровування при паянні. Герметизація у вакуумі холодним зваренням сприяє підвищенню стабільності таких резонаторів.





1 - вакуумні КР (частота 3,3...10,0 Мгц); 2 - герметизовані КР з полірованими ПЕ (частота 10 Мгц); 3,4 - герметизовані КР в корпусах Б1 та М1 відповідно (частота 18 Мгц);

середнє значення зміни частоти; — — — — — зміна частоти окремих зразків Для герметичних КР з паяним з'єднанням корпуса старіння за 5-10 років досягає значення (35...50)·10⁻⁶, для вакуумних КР широкого застосування воно приблизно на порядок, а для прецизійних – на 2 порядка менше.

Величина та швидкість зміни параметрів резонаторів залежать від способу та якості виготовлення резонаторів, а також від умов їх експлуатації та зберігання. До основних дестабілізуючих факторів, які викликають зміни частоти кварцових резонаторів при експлуатації та зберіганні, належать вплив температури, вологість та механічні впливи.

2.5.2 Залежність інтенсивності старіння КР від рівня збудження

Старіння КР – складний процес, обумовлений великою кількістю взаємопов'язаних факторів, одним з яких є рівень збудження резонатора. Вплив рівня збудження на швидкість старіння в рамках сучасних уявлень пов'язують з залежністю швидкості релаксації механічних напруг в кристалі резонатора та елементами його кріплення від величини напруженого коливального стану кристалу.

На основі аналізу багатьох публікацій по дослідженням КР запропонована модель старіння прецизійного резонатора на частоту 5 МГц в залежності від рівня збудження (рис.2.8). Вона представлена розмитою функцією старіння від струму, що протікає через кварц.

На ділянці а-b-с дані підтверджуються експериментально. При



Рис. 2.8 - Залежність швидкості старіння КР від струму збудження

великому рівні добового старіння $\left(\frac{\Delta f}{f} > 1.10^{-8}\right)$ справа від точки **а**

залежність має характер насичення та домінантою старіння є релаксація пружних властивостей елементів кріплення ПЕ. На ділянці **а-b**, при зменшенні струму, знижується віддача енергії в кріплення і складова від релаксації пружності кріплення зменшується, залишаючись домінантною.

На ділянці **с-d** домінантами стають: старіння пружності металізованого шару, підлягаючого шару кварцу, елементів схеми збудження. На ділянці **d-e** основний вклад вносять старіння елементів схеми та зміни еквівалентної коливальної маси КР. Зліва від точки **e** домінантами являються: старіння елементів схеми, зміна маси, дрейф пружних констант кварцу. На даний момент дослідження старіння при струмах менше 1 мкА не мають достатнього експериментального підтвердження.

Аналіз показує, що для вакуумних КР на частоти 2,5 та 5,0 МГц, що працюють на 5-й механічній гармоніці, зменшення струму через резонатор з 750 до 75 мкА призводить до зменшення систематичної зміни частоти з $1,5\cdot10^{-9}$ до $1,0\cdot10^{-10}$ за місяць, що відповідає значенням $5\cdot10^{-11}$ та $3\cdot10^{-12}$ на добу.

Інтенсивність старіння КР, а відповідно, і рівень їх збудження, визначає довгочасну стабільність частоти прецизійних КГ. Наприклад, кварцовий автогенератор на прецизійному КР АТ-зрізу (5 МГц на 3-й механічній гармоніці), виконаний за схемою ємкісної триточки з системою автоматичного регулювання струму, що протікає через резонатор, та розміщений в термостаті, температура статування якого підтримувалася на рівні ±0,001°С при зміні температури навколишнього середовища від +20 до +60°С, забезпечив покращення добової нестабільності із значення 8 10⁻¹⁰ до 1 10⁻¹¹ при зміні струму збудження з 400 до 40 мкА.

Варто відмітити суперечливість вимог до рівня збудження КР: для досягнення високої довгочасної стабільності його варто знижувати, а для отримання короткочасної стабільності, яка визначається відношенням сигнал-шум в ПРП, - збільшувати. У зв'язку з цим для кожної конкретної ситуації необхідно встановлювати оптимальний рівень збудження, який забезпечує компроміс.

ЗАКЛЮЧЕННЯ

Завершуючи розглядання фізичних принципів функціювання, областей застосування та конструкцій КР, відмітимо найбільш загальні властивості, які притаманні класу високодобротних електромеханічних коливальних систем, що працюють на об'ємних акустичних хвилях. Розуміння цих властивостей та закономірностей дозволяє розв'язувати задачі аналізу та синтезу ПРП різного функціонального призначення.

 Будь-який КР володіє певною, часто досить малою, чутливістю своїх параметрів (резонансних частот, динамічних еквівалентних параметрів) та характеристик (амплітудно-частотних, фазочастотних та ін.) до впливу сукупності різних фізичних факторів. На основі конструктивно-технологічних методів можна керувати величинами коефіцієнтів чутливості. Такий метод керування характеризується великими часовими та матеріальними затратами.

Найпростішим методом захисту КР від факторів, які на нього впливають, є статування (наприклад, термостатування).

- Характеристики чутливості КР володіють високою стабільністю та хорошим відтворенням. Завдяки цьому можливе ефективне використання методів компенсації взаємодії впливаючих факторів (термокомпенсація, віброкомпенсація і т.д.) схемотехнічними або алгоритмічними шляхами. Компенсаційний вид управління чутливістю ПРП до впливових факторів більш переважаючий.
- Будь-який КР є багаторезонансою (багаточастотною) коливальною системою. Ця його властивість може бути використана для розширення функціональних можливостей та покращення точностних характеристик ПРП.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кэди У. Пьезоэлектричество и его практические применения. – М.: Изд-во иностр. лит., 1949. –718 с.

2. Мэзон У.П. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультраакустике. – М.: Изд-во иностр. лит., 1952.-447 с.

3. Фёдоров Ф.И. Упругие волны в кристаллах. М.: Наука, 1965. – 368 с.

4. Смагин А.Г., Ярославский М.И. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы. –М.: Энергия, 1970. – 488 с.

5. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.

6. Зеленка И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: Материалы, технология, конструкция, применение: Пер. с чешск. –М.: Мир, 1990. – 584 с.

7. Альтшуллер Г.Б., Елфимов Н.Н., Шакулин В.Г. Кварцевые генераторы: справ. пособие. – М.: Радио и связь, 1984. – 232 с.

8. Справочник по кварцевым резонаторам /Под ред. П.Г. Позднякова. – М.: Связь, 1990. – 288 с.

9. Кварцевые и квантовые меры частоты / Под ред. Б.И. Макаренко. М.: МО СССР, 1989. 536 с.

10. Колпаков Ф.Ф., Руднев О.Е., Хуторненко С.В. Исследование многотоковых характеристик кварцевых резонаторов / Техника радиосвязи. Сер. общетехническая (ОТ). 1990. – Вып. 1. – С.145-154.

11. <u>www.jauch.de</u>

Додаток 1



«HC-49-SMD»

Тип корпусу розмір А розмір В розмір Х B HC-52-SMD 12.5±0.2 8.7±0.1 3.4±0.2 1 HC-52-6MM-SMD 11.7±0.2 7.9±0.1 3.4±0.2 1 HC-52-8MM-SMD 3.4 max 9.7±0.2 5.9±0.1 1

Гип корпусу	розмір А	розмір І
HC-49-SMD	17.8±0.2	13.1±0.1
HC-49-11MM-SMD	15.9±0.2	11.2±0.1
HC-49-9MM-SMD	14.4±0.2	9.5±0.1

Додаток 2

Конструкції кварцових генераторів





ГК – 85 ТС



ГК 68-ТС



ГК – 66 ТС

Призначення виводів				
ГК54, ГК76, ГК87, ГК89, ГК90	ГК66, ГК68, ГК85			
 Вхід напруги керування, Uкер 	1. Спільний (корпус)			
2. Вихід опорної напруги коректування	Вхід напруги керування, Uкер			
частоти	3. Вихід опорної напруги коректування			
3. Вихід сигналу робочої частоти, f	частоти			
4. Спільний (корпус)	 Напруга живлення, Uж 			
Напруга живлення, Uж	Вихід сигналу робочої частоти, f			

Додаток 3

Приклад подання довідкового матеріалу з конструкцій і параметрів кварцових резонаторів і генераторів світового виробника – фірми Jauch (Германія)



The pulse of progress

Кварцовий SMD-генератор



Oscillator · JO32

Surface Mount Crystal Oscillator

Features
oscillator stop function

ceramic / metal package

General Data

type		J032 2.5 V	J032 3.0 V	J032 3.3 V	
frequency range		0.75 ~ 75.0 MHz	0.75 ~ 75.0 MHz	0.75 ~ 75.0 MHz	
frequency stability over all*		± 30 ppm ~ ± 100 ppm	± 30 ppm ~ ± 100 ppm	± 30 ppm ~ ± 100 ppm	
current consumption		see table 1	see table 1	see table 1	
supply voltage		2.5 V ± 5 %	3.0 V ± 5 %	3.3 V ± 5 %	
output	rise & fall time	see table 3	see table 3	see table 3	
	load	15 pF	15 pF	15 pF	
	current max.	5 mA	5 mA	5 mA	
	low level max.	V _{DC} x 0.1	V _{DC} x 0.1	V _{DC} x 0.1	
	high level min.	V _{IX} x 0.9	V _{DC} x 0.9	V _{DC} x 0.9	
temperature operating		-20 °C ~ +70 °C	-20 °C ~ +70 °C	-20 °C ~ +70 °C	
	extended	-40 °C ~ +85 °C	-40 °C ~ +85 °C	-40 °C ~ +85 °C	
	storage	-55 °C ~ +125 °C	-55 °C ~ +125 °C	-55 °C ~ +125 °C	
phase jitter 12 kHz ~ 20.0 MHz		< 1.0 ps RMS	< 1.0 ps RMS	< 1.0 ps RMS	
symmetry at 1/2 V _{DC}		< 40 / 60 % max.	< 45 / 55 % max.	< 45 / 55 % max.	

lable 1: current	consumption max.
2.5 V version:	
0.75 ~ 19.9 MHz	6 mA
20.00 ~ 39.9 MHz	11 mA
40.00 ~ 59.9 MHz	16 mA
60.00 ~ 75.0 MHz	20 mA
3.0 V version:	
0.75 ~ 19.9 MHz	6 mA
20.00 ~ 39.9 MHz	11 mA
40.00 ~ 59.9 MHz	16 mA
60.00 ~ 75.0 MHz	20 mA
3.3 V varsion	
0.75 ~ 19.9 MHz	7 mÅ
20.00 ~ 39.9 MHz	13 mÅ
40.00 ~ 59.9 MHz	19 mÅ
60.00 ~ 75.0 MHz	24 mA
note:	
- specific data on request	t

* inclusive stability at 25°C, operating temperature range, input voltage change, aging, shock and vibration.

Table 2: frequency stability code

The pulse of progress

stability code	A	В	G			
	± 100 ppm	± 50 ppm	± 30 ppm			
-20 °C ~ +70 °C	0	0	0			
-40 °C ~ +85 °C	0	0				
• standard O on request						

Table 3: rise & fall time max.

	2.5 V	3.0 V	3.3 V
0.750 ~ 75.0 MHz	10 ns	10 ns	10 ns
- specific data on request			

Order Information



Jauch Quartz GmbH + Telephone: (+49) 77 20 / 9 45-0 + Telefox: (+49) 77 20 / 9 45-100 + Internet: www.jauch.de + e-mail: info@jauch.de + 02/2004

3MICT

Вступ

1 Фізичні принципи роботи, електричні еквівалентні схеми та конструкції кварцових резонаторів

- 1.1 П'єзоелектричні ефекти кварцу
- 1.2 Зрізи кварцу та їх основні характеристики, види коливань
- 1.3 Еквівалентні схеми кварцових резонаторів
- 1.4 Призначення та конструкції кварцових резонаторів
- 1.5 Сучасні п'єзорезонансні пристрої та їх використання
- 2 Вплив зовнішніх дій на характеристики кварцових резонаторів
 - 2.1 Фактори впливу
 - 2.2 Температурна чутливість КР
 - 2.2.1. Статичні температурні характеристики КР
 - 2.2.2 Динамічні температурні характеристики КР
 - 2.2.3 Методи зниження температурного впливу на параметри КР
 - 2.3 Вібраційна чутливість КР
 - 2.3.1 Ефекти, які виникають в КР під впливом вібрації
 - 2.3.2 Конструктивно-технологічні методи боротьби з дією вібрації
 - 2.4 Вплив рівня збудження на характеристики КР
 - 2.4.1 Нелінійні властивості КР
 - 2.4.2 Оптимальна потужність збудження КР
 - 2.5 Старіння КР
 - 2.5.1 Фізичні процеси старіння КР
- 2.5.2 Залежність інтенсивності старіння КР від рівня збудження ЗАКЛЮЧЕННЯ

ЛІТЕРАТУРА

- Додаток 1
- Додаток 2
- Додаток 3