

**С. В. Хуторненко, А. А. Акулінічев**

**ПРИСТРОЇ ГЕНЕРУВАННЯ ТА ФОРМУВАННЯ СИГНАЛІВ**

**Частина 1**

**ПРИСТРОЇ ГЕНЕРУВАННЯ СИГНАЛІВ**

2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

**С. В. Хуторненко, А. А. Акулінічев**

## **ПРИСТРОЇ ГЕНЕРУВАННЯ ТА ФОРМУВАННЯ СИГНАЛІВ**

### **Частина 1 ПРИСТРОЇ ГЕНЕРУВАННЯ СИГНАЛІВ**

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2018

УДК 621.391.8(075.8)  
X98

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. Д. В. Агеєв,  
канд. фіз.-мат. наук О. М. Роєнко

**Хуторненко, С. В.**

X98 Пристрої генерування та формування сигналів [Електронний ресурс] : навч. посіб. : у 2 ч. Ч.1. Пристрої генерування сигналів / С. В. Хуторненко, А. А. Акулінічев. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2018. – 66 с.

Розглянуто методи генерування сигналів у пристроях радіоелектроніки і телекомунікацій. Наведено основні теоретичні відомості про пристрої генерування та стабілізації частоти сигналів, а саме: кварцові й LC-автогенератори та кварцові резонатори.

Для студентів вищих навчальних закладів за спеціальністю 172 "Телекомунікації та радіоелектроніка".

Іл. 45. Табл. 5. Бібліогр.: 12 назв

**УДК 621.391.8(075.8)**

© Хуторненко С. В., Акулінічев А. А., 2018  
© Національний аерокосмічний  
університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», 2018

## ЗМІСТ

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Перелік умовних позначень.....                                                  | 4  |
| Передмова.....                                                                  | 6  |
| 1 Загальні відомості про радіопередавальні пристрої.....                        | 7  |
| 2 Схеми автогенераторів та збуджувачів плавного діапазону.....                  | 12 |
| 2.1 Види схемних моделей автогенераторів.....                                   | 12 |
| 2.1.1 Загальні відомості про автогенератори.....                                | 12 |
| 2.1.2 Узагальнена схема автогенератора. Умови самозбудження.....                | 13 |
| 2.1.3 Режими самозбудження.....                                                 | 16 |
| 2.2 Класичні схеми автогенераторів.....                                         | 19 |
| 2.3 Збуджувачі плавного діапазону.....                                          | 24 |
| 2.4 Приклади реалізації промислових LC–автогенераторів.....                     | 26 |
| 3 Параметри і характеристики кварцових резонаторів.....                         | 31 |
| 3.1 Методи стабілізації частоти генераторів.....                                | 31 |
| 3.2 Математичний опис кварцового п'єзoelementу.....                             | 33 |
| 3.3 Еквівалентна електрична схема кварцового резонатора та його параметри ..... | 37 |
| 3.3.1 Аналіз еквівалентної електричної схеми КР.....                            | 37 |
| 3.3.2 Класифікація ЕЕС ПР.....                                                  | 41 |
| 3.4 Керування частотою кварцового резонатора.....                               | 43 |
| 3.5 Конструкції КР.....                                                         | 44 |
| 4 Схеми кварцових автогенераторів.....                                          | 48 |
| 4.1 Класифікація кварцових генераторів.....                                     | 48 |
| 4.2 Класифікація і еквівалентні схеми кварцових генераторів.....                | 49 |
| 4.3 Принципові схеми КГ.....                                                    | 53 |
| 4.4 Приклади реалізації промислових кварцових автогенераторів.....              | 56 |
| Бібліографічний список.....                                                     | 62 |
| Додаток - Класифікація випромінювання.....                                      | 63 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

CD – Clock Data Retiming – синхронізація виділення даних;  
CS – Clock Smoothing – виділення тактової частоти;  
DOCXO – Oven Controlled Crystal Oscillators – прецизійні кварцові генератори з подвійним термостатуванням;  
EMXO – Evacuated Miniature Crystal Oscillators – вакуумні мініатюрні кварцові генератори;  
FCXO – Frequency Controlled Crystal Oscillators – функціональні модулі для систем стандартів SONET/SDH, ATM, DWDM, xDSL та ін;  
FT – Frequency Translation – перенесення стабільної частоти;  
OCXO – Oven Controlled Crystal Oscillators – кварцові генератори з термостатуванням;  
PN – Phase Noise – фазовий шум;  
PRXO – Programmable Quartz Oscillators – програмовані кварцові генератори;  
SAW – поверхневі акустичні хвилі;  
SO – SAW Oscillators, генератори на поверхневих акустичних хвилях;  
TCXO – Temperature Controlled Crystal Oscillators – термокомпенсовані кварцові генератори;  
VCSO – Voltage Controlled SAW Oscillators – керовані за частотою напругою генератори на поверхневих акустичних хвилях;  
VCXO – Voltage Controlled Crystal Oscillators – керовані за частотою напругою кварцові генератори;  
ХО – Crystal Oscillator – кристалічний (кварцовий) генератор;  
АГ – автогенератор;  
АРП – автоматичне регулювання підсилення;  
ВЧ – високі частоти;  
ГГ – генератор гармонік;  
ГО – генераторне обладнання;  
ГПД – генератор плавного діапазону;  
ДПКД – дільник з перемінним коефіцієнтом ділення (цифровий);  
ДЧ – дільник частоти;  
ЕС – еквівалентна схема;  
ЗГ – задавальний генератор;  
ЗДСЧ – збуджувач дискретної сітки частот;  
ЗЗ – зворотний зв'язок;  
Зм – змішувач;  
ЗПД – збуджувач плавного діапазону;  
ІКМ – імпульсно-кодова модуляція;  
КГ – кварцовий генератор;  
КГУЧ – кварцові автогенератори з управлінням за частотою;

КЕ – кварцовий п'єзоелемент;  
КР – кварцовий резонатор;  
КС – коливальна система;  
МЕМС – мікроелектромеханічні системи;  
МККТТ – Міжнародний консультативний комітет з телеграфії і телефонії;  
МХ – модуляційна характеристика;  
НЧ – низькі частоти;  
ПЗЗ – позитивний зворотний зв'язок;  
ПРП – п'єзорезонансні пристрої;  
ПЧ – проміжна частота;  
РЛ – радіолінія;  
РП – розподільник потужності;  
РПП – радіопередавальний пристрій;  
РХО – Precision Quartz Oscillators – прецизійні кварцові генератори;  
СГКЧ – стояк генераторів керуючих частот;  
СЗБ – схема із загальною базою;  
СЗЕ – схема із загальним емітером;  
СЗК – схема із загальним колектором;  
СПМ – спектральна щільність потужності;  
ТЧ – тональна частота;  
ФАП – фазове автопідстроювання;  
ФАПЧ – фазове автопідстроювання частоти;  
ФШ – фазовий шум;  
ЧМ – частотна модуляція (частотний модулятор).

## ПЕРЕДМОВА

Дисципліна “Пристрої генерування та формування сигналів” є нормативною у підготовці студентів за спеціальністю 6.050901 “Радіотехніка”. Вона є спеціальною інженерною дисципліною, яка охоплює створення, функціонування, генерування та формування сигналів і елементну базу, на якій будуються системи зв’язку і яка суттєво впливає на кількісні і якісні показники, надійність і технічний рівень систем. Предмет вивчення дисципліни – це особливості роботи функціональних схем радіопередавальних пристроїв (РПП) і вузлів, що входять до їх складу.

Мета дисципліни – набуття студентами компетенцій в області теорії та практики конструювання сучасних РПП, практичного володіння навичками проектування та застосування РПП та основних вузлів, що входять до їх складу.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент має знати:

- структури сучасних РПП;
  - принципи дії каскадів РПП;
  - схеми збуджувачів, генераторів незалежного збуджування та модулаторів ВЧ-коливань;
  - інженерні методики розрахунків функціональних схем та основних вузлів РПП з використанням персональних комп’ютерів;
- уміти:
- користуватися методиками інженерного розрахунку основних каскадів РПП та довідковою літературою з радіокомпонентів, що використовуються;
  - самостійно знайомитись з окремими розділами курсу;
  - користуватися вивченим матеріалом під час проектування.

Дисципліна містить дві пов’язані частини: генерування і формування радіотехнічних сигналів. Особливістю є перехід до цифрових систем зв’язку і передачі даних, перехід системи зв’язку до телекомунікаційної системи і освоєння високочастотних діапазонів, у тому числі оптичного.

При вивченні дисципліни особливу увагу слід зосередити на тісному взаємозв’язку схемотехнічної побудови пристроїв із заданими при проектуванні характеристиками, такими, як діапазон частот, клас випромінювання, вид ущільнення, пропускна спроможність.

# 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РАДІОПЕРЕДАВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ

Система зв'язку – це система передавання повідомлень – деякої сукупності відомостей, що передаються людиною або пристроєм іншій людині або пристрою.

Повідомлення не може бути безпосередньо передано на велику відстань та зафіксовано одержувачем, воно передається за допомогою сигналу. Процес перетворення повідомлення в сигнал складається з операцій перетворення у низькочастотний електричний сигнал, кодування, модуляції. Під час прийому повідомлення відбувається зворотний процес. Модуляція – процес перетворення низькочастотного електричного сигналу у високочастотний. Сигнали між сторонами передачі та прийому передаються по лінії зв'язку, в якій поширюється електричний сигнал.

Системи зв'язку залежно від типу лінії зв'язку поділяють на електричні (дротові або оптоволоконні) та радіосистеми (прямого зв'язку і радіорелейного). Канал зв'язку – це сукупність технічних пристроїв разом з лінією зв'язку, яку призначено для передачі повідомлення. Якщо використовують одночасне передавання повідомлень по одній лінії зв'язку, система називається багатоканальною. В такій системі сигнали ущільнюються за допомогою частотного, часового або кодового ущільнення.

Перешкода – це сторонній вплив, який діє в каналі зв'язку і перешкоджає правильному прийому сигналу. За походженням перешкоди поділяють на внутрішні та зовнішні. Внутрішні виникають у результаті теплового пересування електронів (шуму) та наведення між окремими ланцюгами. Зовнішні поділяють на атмосферні, промислові, космічні та перешкоди від інших станцій. Усі перешкоди за статистичними ознаками є флуктуаційними, імпульсними і синусоїдальними.

Вимоги до засобів зв'язку полягають у готовності до роботи, перешкодостійкості, вірності, ефективності, прихованості, надійності, живучості.

Залежно від спрямованості передачі зв'язок може бути симплексним (одностороннім – передача ведеться абонентами по черзі), дуплексним (двостороннім) та півдуплексним (приймальна сторона може перервати передавальну). Повідомлення та сигнал можуть бути безперервними (характеризуються безперервною функцією часу) та дискретними. Процес заміни безперервного сигналу дискретним називається квантуванням. Частота дискретизації безперервного сигналу визначається теоремою Котельникова. Розрізняють квантування за рівнем, часом (через однаковий проміжок часу) та комбіноване.

Для передавання чисел по каналу зв'язку використовують коди – сукупності комбінацій з різних елементів або елементарних сигналів. Код має основу, яка дорівнює числу різних елементів, які використовуються для його побудови. Значущість коду – це кількість елементів, що створюють кодову комбінацію. Коди поділяють на рівномірні (всі комбінації коду склада-

ються з однакового числа елементів) та нерівномірні. Останні призначені для сприймання на слух та поділення символів і повинні мати спеціальні знаки, кінець будь-якої кодової комбінації не може бути початком наступної. В останньому випадку код зветься незвідним. Залежно від вірогіднісних характеристик повідомлення і сигналу коди поділяють на статистичні і нестатистичні. Залежно від використання всіх або не всіх можливих комбінацій коди поділяють на звичайні (не надлишкові) та надлишкові. При застосуванні допоміжних розрядів створюються перешкодостійкі коди.

Обсяг інформації вимірюється у бітах, швидкість передавання – бітах за секунду (біт/с або Bps) або у бодах. Бод – це кількість елементарних імпульсів за секунду.

Канали зв'язку характеризуються часом роботи, динамічним діапазоном сигналу, смугою частот. Перемноження цих трьох характеристик називають ємністю каналу зв'язку. Для збільшення інформаційної ємності каналів зв'язку широко застосовують часове, частотне та кодове ущільнення каналів.

Значущою інформаційною характеристикою системи зв'язку є тип випромінювання. Регламентом Міжнародного союзу електрозв'язку передбачається класифікація випромінювань засобами зв'язку. Клас – це сукупність характеристик випромінювання, які визначені установленими умовними позначеннями.

Міжнародна класифікація типів випромінювання радіохвиль містить основні та допоміжні характеристики класів випромінювання.

Основні характеристики – це тип модуляції основної несучої, що позначають буквами латинського алфавіту (перший знак умовного визначення) (N, A, H, R, J, B, C, F, G, P, K, L, M, Q, V, X); характер сигналів, які використовують для модуляції основної несучої, відображають арабськими цифрами (другий знак умовного визначення) (0, 1, 2, 3); тип інформації, яку передають, вказують латинськими буквами (третій знак умовного визначення) (N, A, B, C, D, E, F, W, X).

Додаткові характеристики – це характеристики модулюючих випромінювань (латинські літери – A, B, C, D, E, F, H, J, M, N, W, X) і вид ущільнення (латинські літери – N, F, T, C, W, X) (таблиці Д.1 – Д.5).

Системи автоматичного зв'язку формують канали таких типів: тональної частоти (ТЧ) – смуга частот (0,3...3,4 кГц); звукового мовлення – об'єднання двох або трьох каналів ТЧ в один канал; широкосмугові канали на базі стандартних груп: первинних (60...106 кГц), вторинних (312...522 кГц), третинних (812...244 кГц) та інших; канали телевізійного мовлення (50 Гц...6 МГц) [1].

Для двосторонньої передачі застосовують системи, які побудовані за принципом односмугової чотиридротової (основної для зв'язку по кабельним лініям), двосмугової дводротової (повітряні лінії) та односмугової дводротової систем. Односмугову дводротову систему використовують тільки

для зв'язку на тональних частотах і невеликих відстанях. Поділення напрямків передачі виконують диференціальними системами (телефонним апаратом).

У телефонних каналах поряд з інформаційними передаються допоміжні сигнали: набір номеру, виклик, відбій. Їх частоти знаходяться нижче спектру ТЧ і не перевищують десятків герц. Тому для передачі по каналу ТЧ їх переносять за частотою і організовують сигнальний канал, що може бути суміщеним з каналом ТЧ (сигнал виклику 2100 або 2650 Гц) або винесеним за смугу ТЧ (сигнали керування 3875 або 3850 Гц знаходяться між каналами ТЧ) [1].

Системи зв'язку поділяють на аналогові, цифрові та сумісні.

Аналогові системи з частотним розділенням каналів, які розраховані на 12 і більше каналів відповідно до рекомендацій Міжнародного консультативного комітету з телеграфії і телефонії (МККТТ) будують на базі стандартних груп каналів: первинна група – 12 каналів ТЧ (60...108 кГц), вторинна – 60 каналів (312...552 кГц), третинна – 300 каналів (812...2044 кГц), четвертинна – 900 каналів (8516...12366 кГц), п'ятирикова – 1800 каналів (спектр не регламентовано) [1]. Канали створюють за груповим способом побудови та багатократним перетворенням частоти.

Аналогові системи поділяють на системи передачі по повітряним лініям, симетричним та коаксіальним кабелям.

Найбільш перспективними є цифрові системи передачі. Вони побудовані на основі імпульсно-кодової модуляції (ІКМ) та часового поділення каналів за ієрархічним принципом європейської ієрархії за рекомендаціями МККТТ. Ієрархічна побудова містить субпервинну систему (ІКМ-15 має 15 цифрових каналів ТЧ зі швидкістю передачі 1024 кбіт/с), первинну (ІКМ-30 має 30 каналів ТЧ із 2048 кбіт/с), вторинну (ІКМ-120 об'єднує чотири системи ІКМ-30, має 120 каналів ТЧ із 8448 кбіт/с), третинну (ІКМ-480 об'єднує чотири системи ІКМ-120, має 480 каналів ТЧ із 34368 кбіт/с), четвертинну (ІКМ-480 об'єднує чотири системи ІКМ-480, має 1920 каналів ТЧ із 139 264 кбіт/с) або один канал телевізійного мовлення з глибиною сигналу яскравості 8 біт; п'ятирикову (ІКМ-7680 об'єднує чотири системи ІКМ-1920, має 7680 каналів ТЧ із 564992 кбіт/с) [1].

Основне призначення генераторного обладнання (ГО) полягає у формуванні групових і індивідуальних несучих і ряду допоміжних викличних частот, а також телекерування, телесигналізації та ін.

Основні вимоги, що висуваються до цифрових систем:

- висока стабільність сигналів, що генеруються;
- висока стабільність вихідних потужностей;
- надійність.

Стабільність частоти коливань визначається відносною нестабільністю  $\delta_f = \Delta f_0 / f_0$ , де  $f_0$  – номінальна частота коливань;  $\Delta f_0$  – відхилення частоти коливань від номінального значення.

За допустимою величиною несучої частоти на передачі і прийомі  $\pm 2$  Гц визначається допустиме відхилення частоти генераторів несучих частот  $\pm 0,5$  Гц. Вимоги до стабільності амплітуди несучої частоти є не такими жорсткими і становлять  $\pm(0,5...0,8)$  дБ. Через необхідність забезпечити точність роботи системи автоматичного регулювання підсилення (АРП) вимоги до стабільності амплітуди є значно більш жорсткими і становлять  $\pm(0,1...0,2)$  дБ.

Основними дестабілізуючими чинниками, що впливають на стабільність частоти та амплітуди є вплив температури, нестабільність джерел живлення, старіння елементів та ін. Тому питанням стабілізації частоти генератора приділяється багато уваги. Стабільність роботи генератора забезпечується режимом його роботи, стабільністю джерел живлення, використанням кварцових резонаторів для стабілізації частоти, термостакуванням кварцових резонаторів та ін. У процесі експлуатації генераторів періодично здійснюється підстроювання частоти задавальних генераторів за спеціальними сигналами радіостанцій або еталонами частоти.

Генераторне устаткування має в своєму складі:

- високостабільний задавальний генератор (ЗГ), що генерує коливання частотою  $f_{ze} = m f_0$ ;
- дільники частот (ДЧ), що формують керуючі частоти  $f_0 = f_{ze} / m$ ;
- генератори гармонік (ГГ), на виході яких формується послідовність експоненціальних імпульсів з гармоніками частоти  $f_0$ ;
- смугові фільтри (СФ), які виділяють гармоніки несучих частот  $if_0, jf_0 \dots kf_0$ ;
- допоміжні підсилювачі і розподільники потужності (РП) для забезпечення розподілу за стояками системи передачі.

При такій побудові генераторного обладнання стабільність будь-якої несучої частоти буде визначатися стабільністю тільки одного генератора. Як  $f_0$  часто використовують частоти 4, 12, 124 кГц і деякі інші. На практиці застосовують уніфіковане обладнання, яке забезпечує несучими і контрольними частотами будь-яку систему.

В останні роки застосовується більш раціональна структура побудови генераторного обладнання, в якій централізована частина (стояк генераторів керуючих частот (СГКЧ) містить високо стабільні задавальні генератори частоти 2592 кГц і яка методами синтезу (додавання, зменшення, множення і ділення) перетворюється в обмежену кількість керуючих частот (60, 372, 2592, 1552, 128 і 1024 кГц (рисунок 1.1) [1]. Ці частоти подаються на децентралізовані генераторні пристрої відповідних стояків, де керуючі частоти перетворюються в несучі або контрольні.

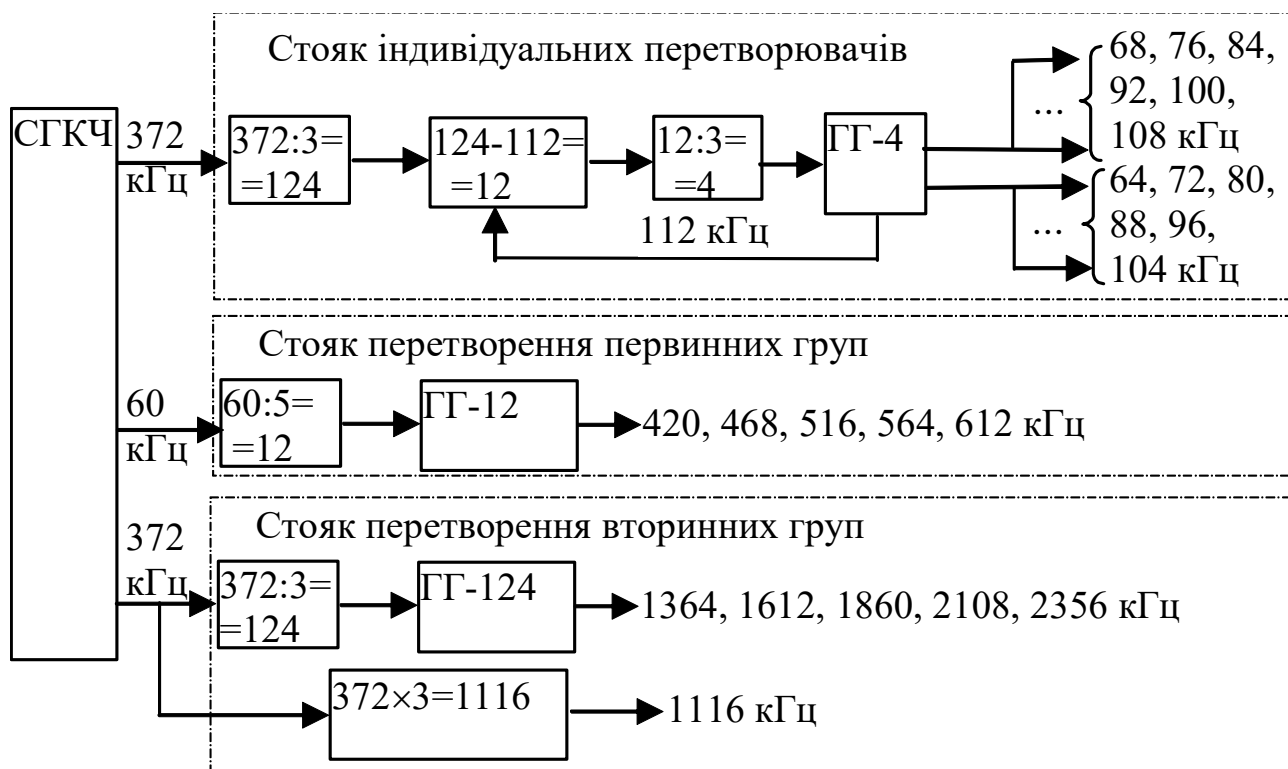


Рисунок 1.1 – Схема створення несучих частот генераторного обладнання телефонної системи зв'язку

Збуджувач сучасного радіопередавача – складний і дорогий пристрій, що визначає роботу передавача в цілому. Тому при розробленні передавального обладнання питанню проектування збуджувача приділяється велика увага.

До складу збуджувача (рисунок 1.2) входять: датчик опорних частот (ДОЧ), який часто називають синтезатором частот; формувач видів робіт (ФВР) на фіксованій частоті, тракт перенесення сформованих коливань у робочий діапазон частот (ПЧ).

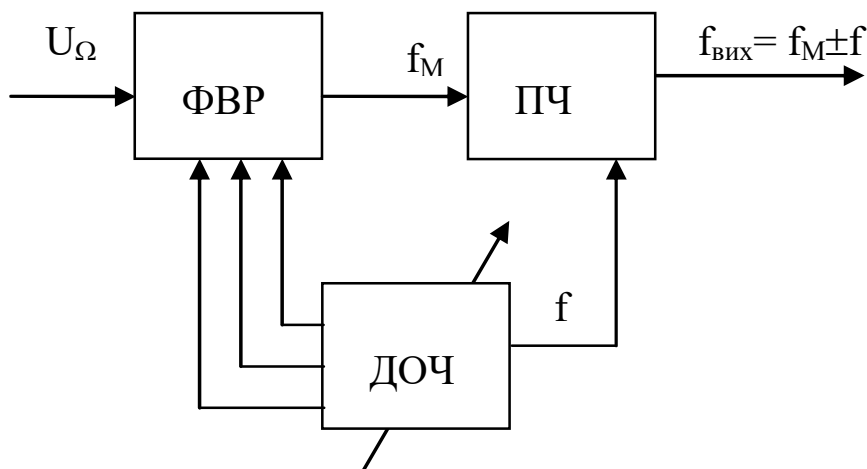


Рисунок 1.2 – Функціональна схема збуджувача,  $U_{\Omega}$  – модулюючий сигнал

## **2 СХЕМИ АВТОГЕНЕРАТОРІВ І ЗБУДЖУВАЧІВ ПЛАВНОГО ДІАПАЗОНУ**

### **2.1 Види схемних моделей автогенераторів**

#### **2.1.1 Загальні відомості про автогенератори**

Застосовувані в радіотехніці автогенератори (АГ) можна поділити на дві основні групи:

- 1) генератори синусоїдальних коливань;
- 2) генератори релаксаційних (розривних) коливань.

Генератори синусоїдальних коливань поділяють на такі:

- генератори ВЧ-коливань, невід'ємною частиною яких є коливальна система;
- генератори НЧ-коливань з аперіодичними ланцюгами (RC-генератори).

Релаксаційні генератори, які використовуються для отримання НЧ-коливань спеціальної форми, також працюють на аперіодичних ланцюгах.

За способом збудження генератори поділяють на два класи:

- генератори із зовнішнім збудженням;
- генератори з самозбудженням – автогенератори.

Будь-який генератор складається з джерела живлення, електронного підсилювального приладу, коливальної системи.

Для генератора із зовнішнім збудженням частота коливань викликається збуджувачем; амплітуда коливань залежить як від нього, так і від параметрів підсилювача. Такий генератор можна подати як підсилювач потужності.

Для переходу від генератора із зовнішнім збудженням до автогенератора досить підмінити збуджувач спеціальним пристроєм, що забезпечує збудження підсилювача від власної коливальної системи. Такий пристрій називається зворотним зв'язком (ЗЗ).

Амплітуда і фаза коливань, що подається на вхід по каналу ЗЗ мають бути такими ж, як і при подачі від збуджувача.

При вмиканні джерела живлення, замиканні ланцюгів виникають електричні шуми, і в коливальній системі автогенератора починаються вільні коливання. Завдяки зворотному зв'язку ці коливання посилюються і зростають за амплітудою. При цьому, поки амплітуда коливань є малою, то посилення буде лінійним.

Енергетично процес наростання амплітуд пояснюється тим, що за один період коливань підсилювач подає контуру енергії більше, ніж витрачається за цей же час в контурі.

Зі зростанням амплітуди починає виявлятися нелінійність системи (кривизна вольт-амперної характеристики (ВАХ) підсилювального елемента) і підсилювання знижується.

Зростання амплітуди припиняється, коли підсилення знижується до рівня, при якому енергія, що віддається підсилювачем в контур, дорівнює енергії, яка витрачається в цьому контурі за один період коливань.

### 2.1.2 Узагальнена схема автогенератора. Умови самозбудження

Узагальнену схему автогенератора високочастотних коливань в стаціонарному сталому режимі показано на рисунку 2.1) [11]

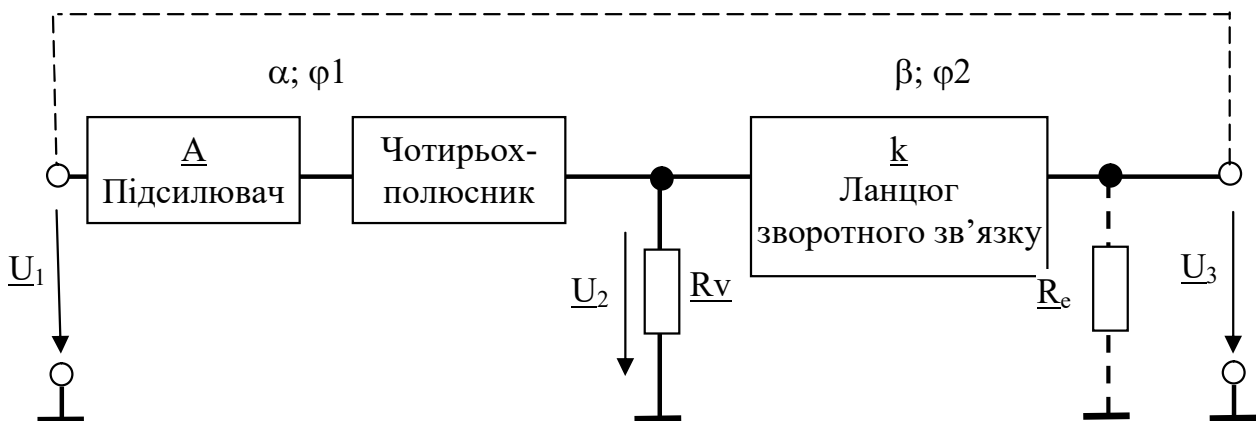


Рисунок 2.1 – Узагальнена схема автогенератора

Підсилювальний елемент разом з вибіркоким чотирьохполюсником, який забезпечує фільтрацію вищих гармонік, утворює нелінійний підсилювач, що приводить на виході до синусоїдальної напруги  $U_2$ .

Коефіцієнт підсилення

$$K_n(\omega_{r1}, U_1) = \frac{U_2}{U_1} = A;$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку

$$K_{33}(\omega) = U_3 / U_2 = k; \quad K_{33}(\omega) = U_1 / U_2.$$

Звідки

$$K_{33}(\omega) = K_n(\omega_{r1} U_1) = 1. \quad (2.1)$$

Оскільки коефіцієнт передачі лінійного зворотного зв'язку не залежить від амплітуди коливань, то з формули (2.1) можна визначити сталу амплітуду коливань при заданому  $K_{33}(\omega)$  (рисунок 2.2).

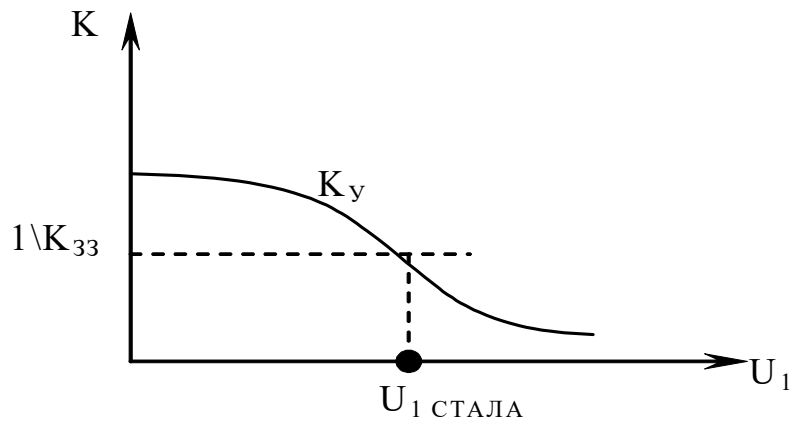


Рисунок 2.2 – Коефіцієнт зворотного зв'язку при сталій амплітуді коливань

У точках перетину  $K_y$  та  $1/K_{33}$   $U_1 = U_1$  – коливання сталі.

Крім того, при заданому значенні  $K_n$  та амплітуді  $U_{1ст}$  з рівняння (2.1) можливо знайти величину  $K_{33}$ .

Підсилювальний елемент здійснює фазовий зсув сигналу до значення  $\varphi_1$ , зворотний зв'язок – до значення  $\varphi_2$ .

Незатухаючі коливання в контурі коливальної системи встановлюються лише при виконанні двох умов, що одержали назву умов самозбудження.

Перша умова – баланс амплітуд – компенсація втрат, внесених ланцюгом зворотного зв'язку:

$$|g| = |k| \cdot |A| \geq 1 / 1/K_{33}. \quad (2.2)$$

Друга умова – баланс фаз – виконується лише тоді, коли між входом і виходом встановлено позитивний зворотний зв'язок (ПЗЗ):

$$\varphi_1 + \varphi_2 = 0; 2\pi, \dots n2\pi, \text{ де } n=0,1,2\dots \quad (2.3)$$

З першого співвідношення видно, що схема генератора може збуджуватися тільки тоді, коли підсилювач компенсує втрати в схемі зворотного зв'язку.

Друге співвідношення означає, що коливання в замкнутій системі можуть збуджуватися тільки тоді, коли фаза вихідної напруги схеми зворотного зв'язку і фаза вхідної напруги підсилювача збігаються.

Частота збуджених коливань і форма вихідної напруги генератора залежать від його параметрів і параметрів ланцюга зворотного зв'язку (рисунок 2.3).

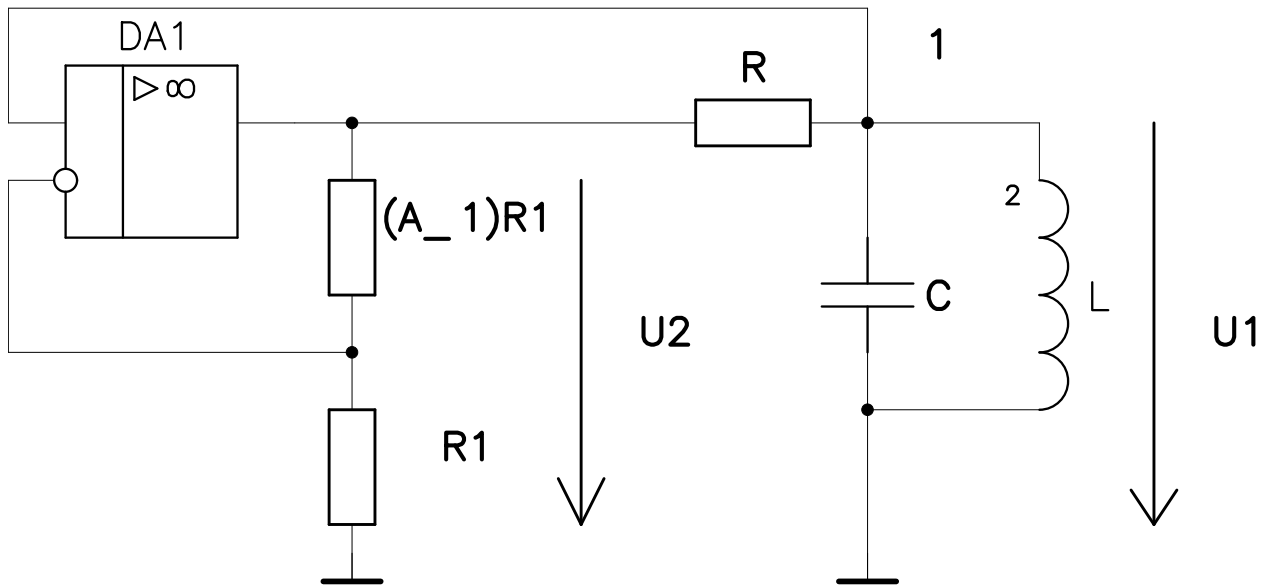


Рисунок 2.3 – Умовна схема генератора

Операційний підсилювач, підключений за неінвертуючою схемою, підсилює вхідну напругу  $U_1(t)$  у  $A$  раз.

У точці 1 схеми (за першим законом Кірхгофа)

$$\frac{U_2 - U_1}{R} - C\dot{U}_1 - \frac{1}{L} \int U_1 dt = 0.$$

Тому що  $U_2 = A U_1$ ,

$$\ddot{U}_1 + \frac{1-A}{RC} \dot{U}_1 + \frac{1}{LC} U_1 = 0.$$

Позначивши

$$\gamma = \frac{1-A}{2RC}, \quad \omega_0^2 = \frac{4}{LC},$$

одержимо розв'язок рівняння:

$$U_1(t) = U_0 e^{-\gamma t} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} t. \quad (2.4)$$

Розрізняють три випадки:

1)  $\gamma > 0$ , тобто  $A < 0$ . Амплітуда вихідної напруги спадає за експонентним законом. Коливання є загасаючими.

2)  $\gamma = 0$ , тобто  $A = 0$ . Виникають синусоїдальні коливання. Амплітуда є постійною.

3)  $\gamma < 0$ , тобто  $A > 0$ . Амплітуда вихідної напруги зростає за експонентним законом.

При  $A = 1$  виникають синусоїдальні коливання з постійною амплітудою і частотою, що дорівнює

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.5)$$

При більш слабкому позитивному зворотному зв'язку амплітуда коливань вихідної напруги зменшується, при більш глибокому – зростає. Самозбудження при ввімкненні живлення є можливим лише при виконанні умови  $A > 1$ . При цьому амплітуда вихідної напруги буде зростати, поки підсилювач не перевантажиться. Через перевантаження (насичення) підсилювача величина  $A$  буде зменшуватися, поки не буде дорівнювати одиниці. При цьому форма вихідного сигналу буде відрізнятися від синусоїди.

Якщо необхідною є синусоїдальна вихідна напруга, слід здійснити регулювання коефіцієнта підсилення таким чином, щоб він дорівнював одиниці для забезпечення відсутності перевантаження (насичення) підсилювача. На високих частотах досить легко можна реалізувати коливальний контур з високою добротністю. При цьому напруга на коливальному контурі навіть при глибокому насиченні підсилювача залишається практично синусоїдальною. Тому в схемах високочастотних генераторів звичайно не застосовують спеціальних методів регулювання амплітуди вихідного сигналу підсилювача, а вихідну напругу передають безпосередньо з коливального контуру.

### 2.1.3 Режим самозбудження

Амплітуду струму в коливальному контурі  $I_k$  можна визначити, відключивши зворотний зв'язок і отримавши коливальну характеристику підсилювача.

Коливальна характеристика – це залежність струму колектора транзистора підсилювача від амплітуди вхідного сигналу при постійній напрузі бази та розірваному зворотному зв'язку:  $I_k = I_k(E_c)$  або  $U_k = U_k(E_c)$  (рисунок 2.4).

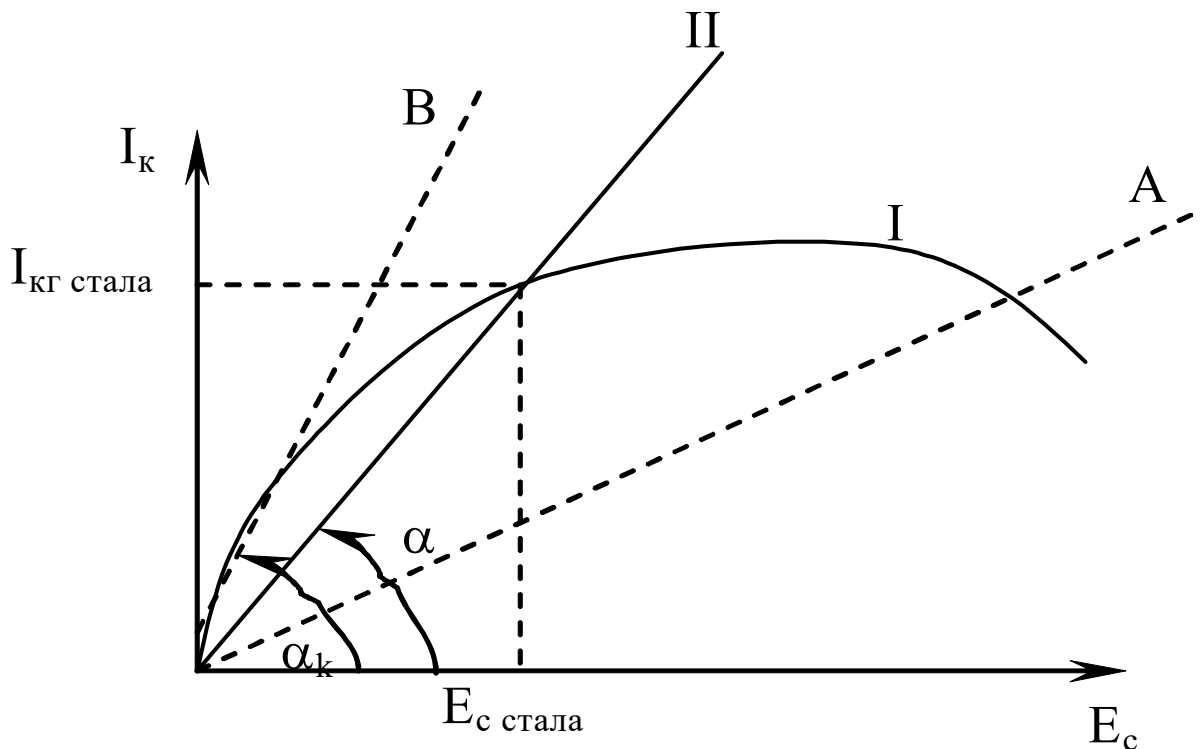


Рисунок 2. 4 – Коливальна характеристика підсилювача у м'якому режимі збудження

Для визначення  $I_{кг}$  при генерації потрібно встановити залежність між струмом  $I_k$  та напругою  $E_c$  при зворотному зв'язку у режимі сталих коливань.

Лінія II – це лінія зворотного зв'язку

$$\alpha = \arctg \frac{1}{\chi_{зв}}.$$

Точка перетину кривих I та II приводить до встановлення амплітуди стаціонарних коливань.

Для сталості коливань потрібно, щоб  $K_{зз} > \frac{1}{SZ_{еп}} + D$ ,

Якщо  $\alpha = \alpha_k$ , то  $K_{зз} = \frac{1}{SZ_{еп}} + D$  – початок коливань.

При збільшенні  $\chi_{зв}$  ( $\alpha \downarrow$ ) струм  $I_k$  зростає до свого максимуму, а потім почне зменшуватися (точка A); це – «перенапружений режим», тут струм бази знову починає зростати.

Умови самозбудження автогенератора з індуктивним зворотним зв'язком визначаються величиною  $M$ . При збільшенні  $M$ , починаючи з  $M = M_{кр}$ , генератор самозбуджується і амплітуда стаціонарного струму плавно зростає (рисунок 2.5).

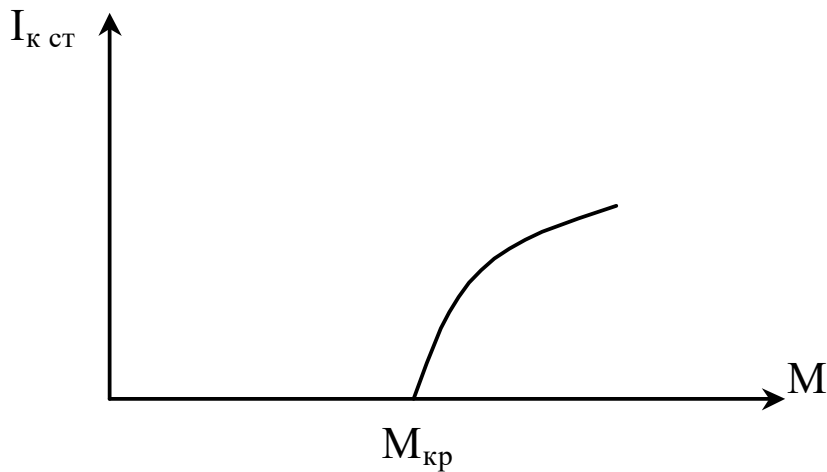


Рисунок 2.5 – Самозбудження генератора

Це – м'який режим самозбудження. Для м'якого режиму збудження необхідно, щоб коливальна характеристика починалася з нульової точки і мала великий нахил в області малих амплітуд.

Ці вимоги виконуються, якщо використовується автоматичний зсув напруги робочої точки транзистора.

При жорсткому режимі збудження коливальна характеристика має вигляд, зображений на рисунку 2.6.

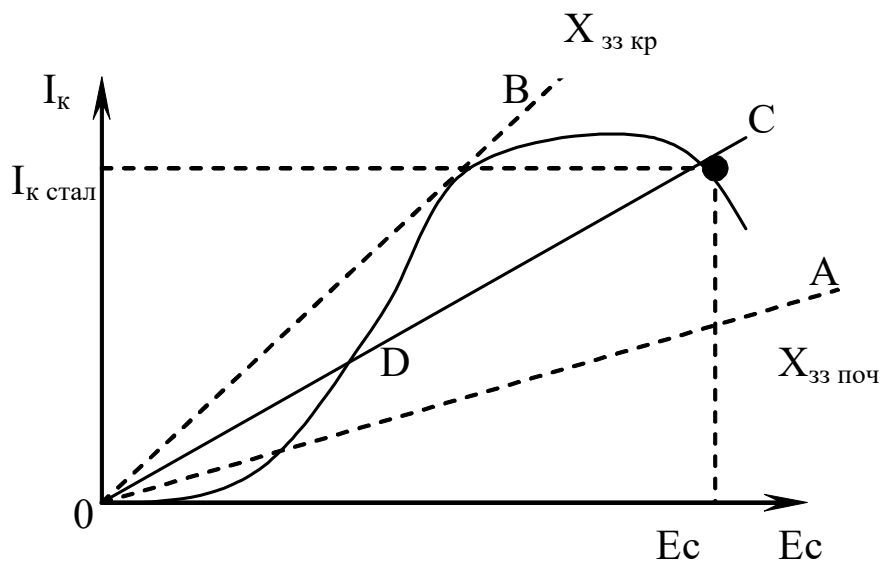


Рисунок 2.6 – Коливальна характеристика підсилювача у жорсткому режимі збудження

Для виникнення коливань є потрібним сильний зворотний зв'язок – лінія ОА. Після того, як коливання встановилися,  $X_{зз}$  можна зменшити до  $X_{зз кр}$  (лінія ОВ). При подальшому зменшенні  $X_{зз}$  вільні коливання зриваються, точка D – нестійка і коливання зриваються, точка C – стійка.

Якщо примусовий зсув настільки великий, що коливальна характеристика починається не з «0», то ніяке збільшення зворотного зв'язку не приведе до генерації.

Якщо за допомогою зовнішнього збуджувача викликати генерацію (точка С), то коливання будуть зберігатися і після припинення впливу (метод ударного збудження).

Таким чином, у генераторах з самозбудженням доцільно використовувати автоматичний зсув.

## 2.2 Класичні схеми автогенераторів

Основні різновиди генераторів показано на рисунку 2.7.

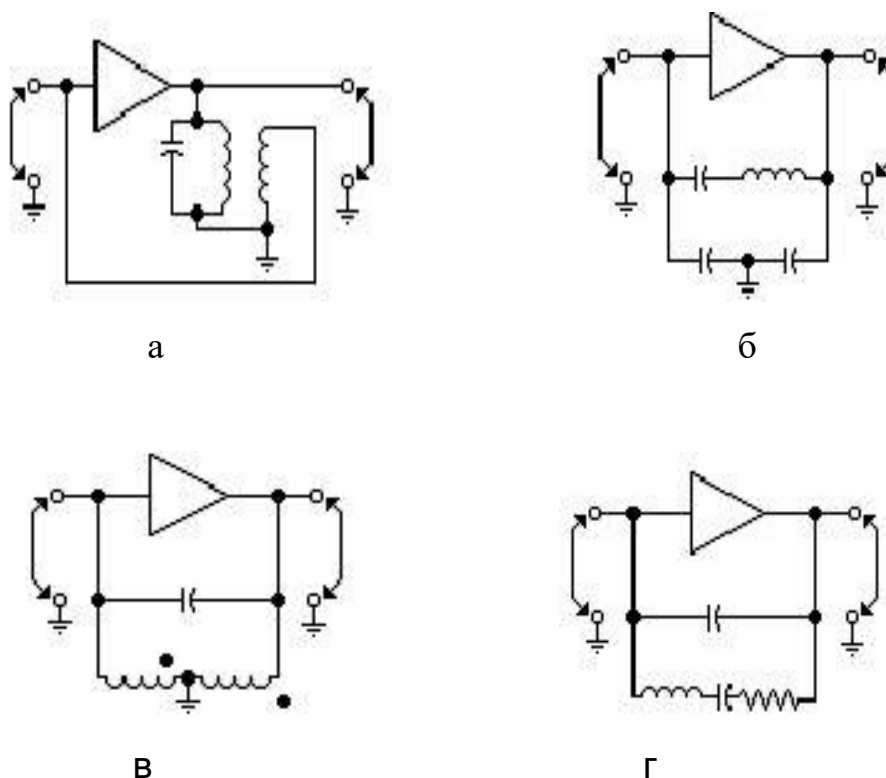


Рисунок 2.7 – Основні схеми генераторів: а – схема з трансформаторним зворотним зв'язком – схема Мейсснера; б – ємнісна триточка – схема Колпітца (Colpitts), різновид Клаппа (Clapp); в – індуктивна триточка – схема Хартлі (Hartley); г – коливальний контур зі зворотним зв'язком – схема Пірса (Pierce)

### Генератор зі зворотним зв'язком на основі трансформатора (схема Мейсснера)

Особливістю генератора за схемою Майсснера є те, що зворотний зв'язок здійснюється за допомогою трансформатора, первинна обмотка якого разом з конденсатором утворює коливальний контур, що визначає

частоту генерації схеми (2.5). Сигнал має на колекторі транзистора максимальну амплітуду і фазовий зсув  $180^\circ$ . Частина цієї напруги знімається з вторинної обмотки як напруга зворотного зв'язку. Для виконання умови балансу фаз трансформатору слід здійснити поворот фази сигналу на  $180^\circ$ . Якщо первинна і вторинна обмотки трансформатора мають один напрям намотування, то для інвертування фази необхідно вторинну обмотку ввімкнути зустрічно відносно первинної. Коефіцієнт трансформації вибирають таким, щоб на резонансній частоті коефіцієнт ланцюга посилення схеми  $|k_A|$  був істотно більшим за одиницю.

### Триточкові схеми (рисунки 2.8)

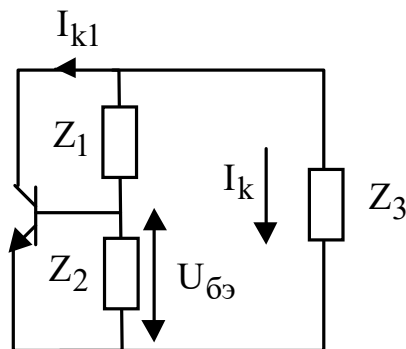


Рисунок 2.8 – Узагальнена еквівалентна триточкова схема генератора

У триточковій схемі три виводи підсилювального елемента (три точки) – колектор, база, емітер; сток, виток, затвор; анод, катод, керуюча сітка – введено у розрив коливального LC-контур. При цьому розривається або ємність (ємнісна триточка), або індуктивність (індуктивна триточка).

На високій частоті коефіцієнт зворотного зв'язку

$$\beta = -\frac{U_{BE}}{U_{KE}} = -\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2};$$

комплексний опір коливального контуру

$$Z_K = \frac{Z_3(Z_2 + Z_1)}{Z_1 + Z_2 + Z_3}.$$

Стаціонарний режим роботи

$$\dot{S}_1 \beta z_k = 1,$$

де  $\dot{S}_1$  – комплексна крутизна активного елемента;

$$I_{k1} = \dot{S}_1 U_{BE}.$$

Негативний керуючий опір автогенератора

$$z_{\Pi} = \rho z_k = - \frac{z_2 z_3}{z_1 + z_2 + z_3}.$$

Рівняння стаціонарного режиму роботи АГ. Амплітудна умова самозбудження

$$\dot{S}_1 Z_y = 1.$$

Фазова умова самозбудження

$$\begin{aligned} z_1 + z_2 + z_3 &= 0 \\ z_1 &= r_1 + jX_1 \approx X_1 \\ z_2 &= r_2 + jX_2 \approx X_2 \\ z_3 &= r_3 + jX_3 \approx X_3, \\ Q &\gg 1. \end{aligned}$$

Амплітудна умова самозбудження

$$\beta_k \geq 1, \beta_k \approx 1, 2.$$

Фазова умова

$$X_1 = -(X_2 + X_3); \quad z_1 = -(z_2 + z_3),$$

звідси реактивний опір між базою (Б) і колектором (К) має бути однаковим і протилежним за знаком сумі колекторних опорів між БЕ і КЕ:

$$X_{БК} = -(X_{БЕ} + X_{КЕ}).$$

Сума фазових зсувів у ланцюзі з позитивним зворотним зв'язком

$$\sum \varphi_i = 2\pi n.$$

Реактивний електронний компонент у ланцюзі БК має бути іншим, ніж у ланцюгах КЕ та БЕ. Наприклад, БК – дросель, КЕ та БЕ – конденсатори, або БК – конденсатор, КЕ та БЕ – дроселі.

**Триточкова схема з індуктивним зворотним зв'язком (схема Хартлі)**

Схема Хартлі подібна схемі Майсснера. Відмінність полягає тільки в тому, що трансформатор замінено дроселем з відведенням. Індуктивність цього дроселя разом з ємністю паралельно ввімкнутого конденсатора визначає резонансну частоту збудження генератора. На рисунку 2.9,а показано схему Хартлі з транзистором, увімкненим за схемою із загальним емітером. Через конденсатор С2 змінна напруга подається на базу транзистора. Базова напруга коливань відносно колектора має фазовий зсув  $180^\circ$ , так що цей зворотний зв'язок є позитивним. Амплітуда напруги зворотного зв'язку встановлюється відповідним вибором положення відведення на дроселі. Струм спокою колектора транзистора, як і в схемі Майсснера, визначається величиною опору R1.

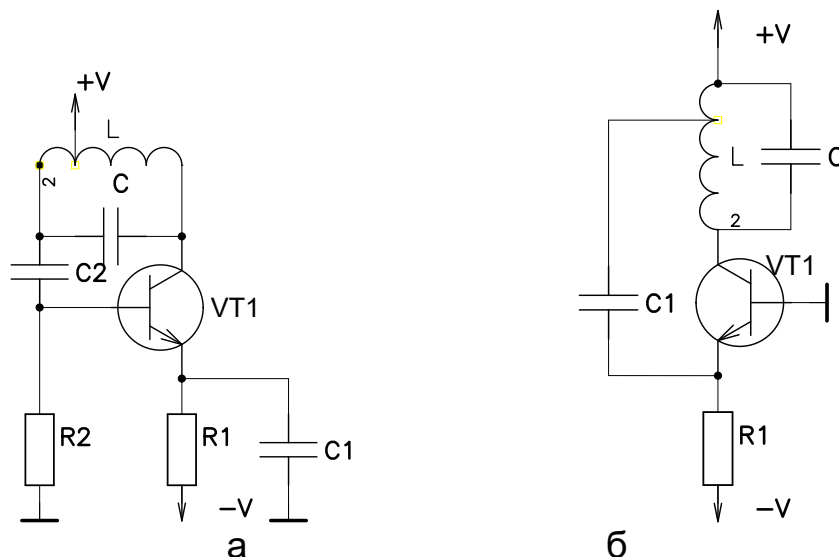


Рисунок 2.9 – Схема Хартлі

На рисунку 2.9, б показано схему ввімкнення транзистора із загальною базою. Напруга зворотного зв'язку, що надходить з дроселя L через конденсатор С1 має ту ж фазу, що і напруга колектора. Якщо для задання на-

пруги зсуву між базою та емітером використовується порівняно низька напруга живлення, емітерний резистор А має бути достатньо низькоомним, щоб забезпечувалася необхідна величина струму колектора.

Низькоомний емітерний резистор через конденсатор С1 навантажує коливальний контур, знижуючи його добротність. Загасання, що вноситься, можна значно знизити, якщо послідовно з R1 увімкнути дросель.

**Тригочкова схема із зворотним ємностним зв'язком (схема Колпітца).**

Особливістю схеми Колпітца є наявність ємнісного діляника напруги, який визначає коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою.

Послідовно сполучені конденсатори з дроселем L утворюють коливальний контур, ємність якого

$$C = \frac{C_a \cdot C_b}{C_a + C_b}.$$

Схема Колпітца в режимі із загальним емітером (рисунок 2.10) відповідає схемі Хартлі на рисунку 2.9. Вона є дещо складнішою, оскільки потребує наявності додаткового резистора R3, через який на транзистор подається напруга живлення.

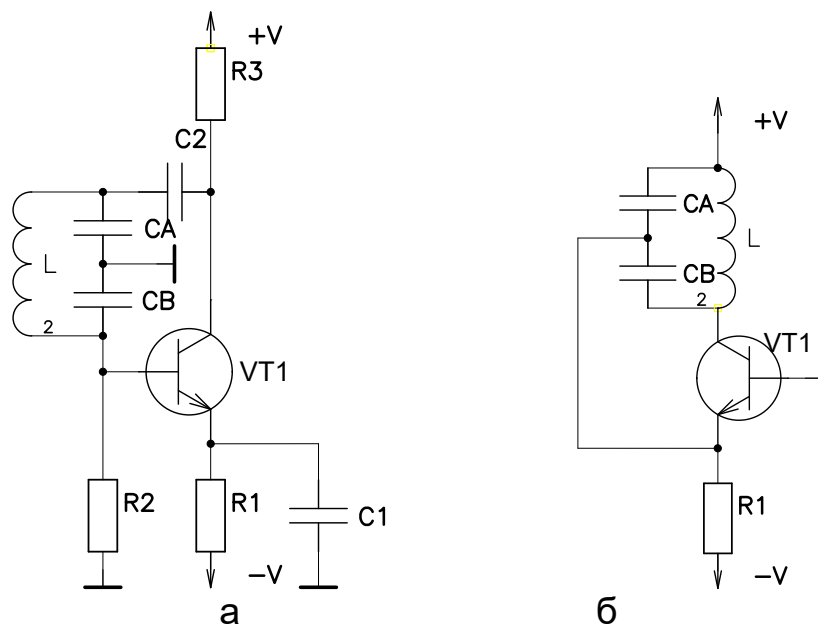


Рисунок 2.10 – Схема Колпітца

Істотно простішою є схема Колпітца з транзистором, увімкненим за схемою із загальною базою (рисунок 2.10, б). Вона відповідає схемі Хартлі, показаною на рисунку 2.9, б.

Різновидом схеми Колпітца є схема Клаппа (рисунок 2.11).

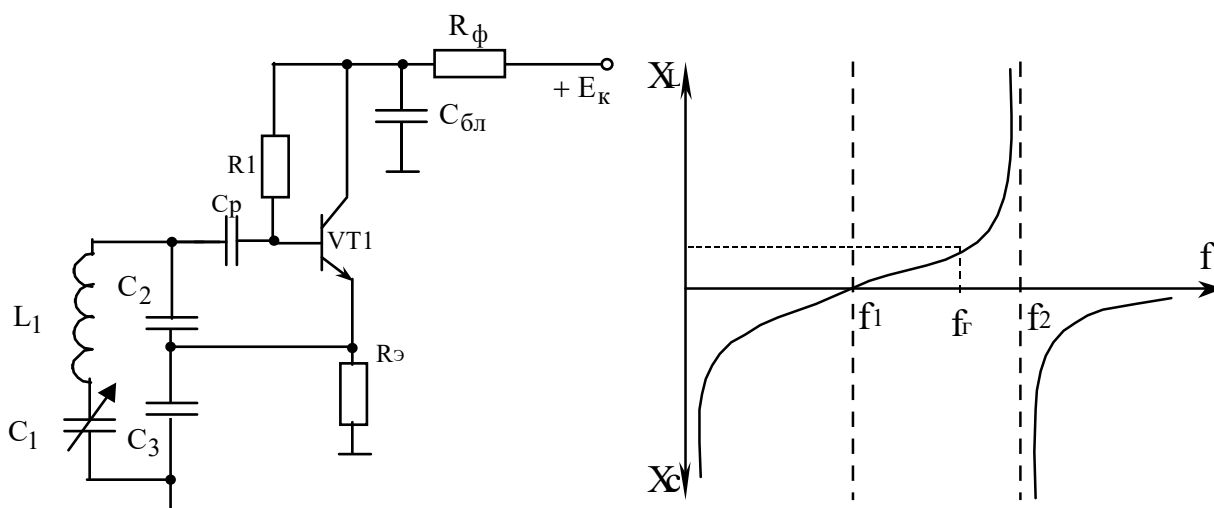


Рисунок 2.11 – Схема Клаппа

### 2.3 Збуджувачі плавного діапазону

Збуджувачі плавного діапазону (ЗПД) призначено для генерування сигналу вихідної частоти, який можна плавно переформувати за частотою у заданому діапазоні частот  $\Delta f$ .

Збуджувачі будують за оглянутими раніше схемами за умови, що один з елементів коливальної системи АГ змінює значення свого реактивного опору (індуктивності або ємності) під дією сигналу керування.

На рисунку 2.12 показано схему ЗПД на основі LC-АГ з керуванням ємністю.

Тут

$$C_{зв} = 0,1 \dots 0,01 C_{к\max};$$

$$C_{к\min} = C_{н\min} + C_{п} + C_{м} + C_4' + C_1^{(-TKC)};$$

$$C_4' = \frac{1}{C_4} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}, \quad C_{к\min} (пФ) \geq (1 \dots 2) \lambda (м);$$

$$C_{к\max} = C_{к\min} \cdot K_f^2,$$

де  $K_f$  – коефіцієнт діапазонності (коефіцієнт перебудови за частотою);

$$K_f = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \sqrt{\frac{C_{к\max}}{C_{к\min}}} \leq 1,5.$$

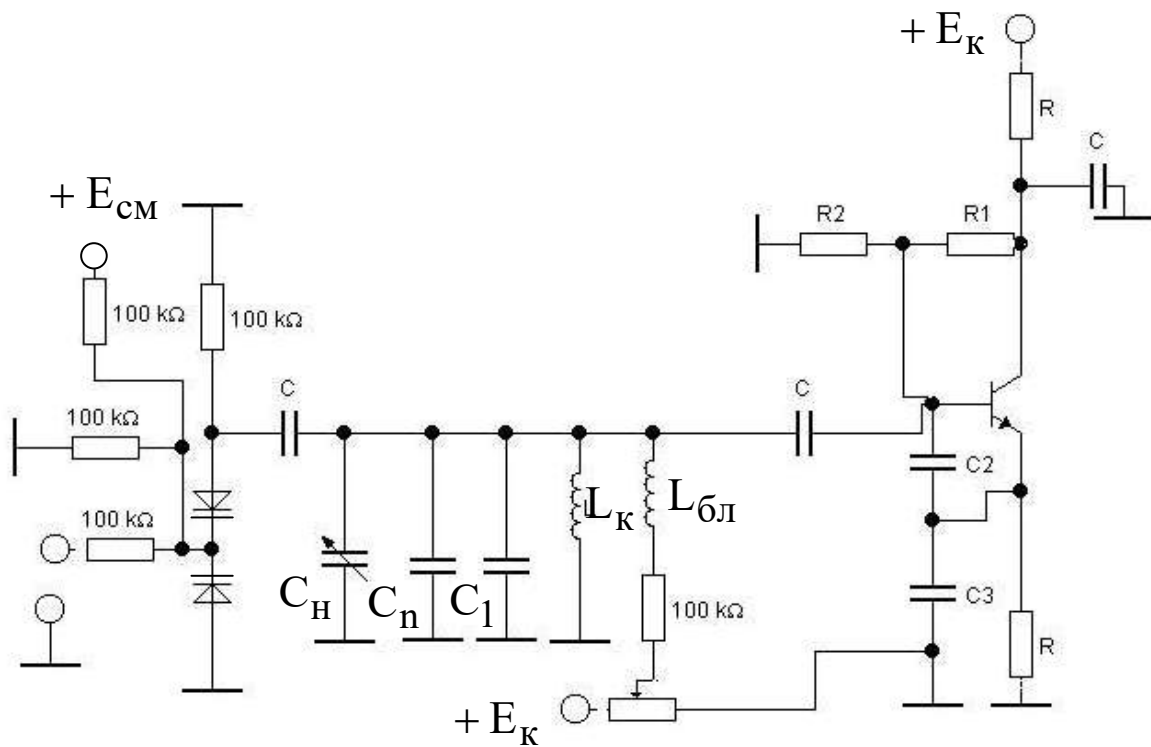


Рисунок 2.12 – Схема ЗПД на основі LC-АГ з керуванням ємністю

Типові значення для схеми:

$$L_K = 0,282 \frac{\lambda_{\min}(\text{М})}{C_{\text{кmin}}(\text{пФ})} \text{ мкГн};$$

$$\lambda = \frac{300}{f(\text{МГц})} \text{ м};$$

$$X_{c2}=X_{c3}=50 \text{ Ом};$$

$$\beta=1;$$

$$X_{c4}=100 \text{ Ом};$$

$$X_{L_{\text{бл}}} \approx 2...3 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{ср}} \leq \frac{R_H}{10...20} \approx 5...2 \text{ Ом};$$

$$X_{c_{\text{бл}}} \leq 1 \text{ Ом};$$

$$R_t = \frac{5...10}{S_{\text{транз}}(\text{PT})} \approx 500...1500 \text{ Ом}.$$

Збуджувачі плавного діапазону можна використовувати в складі збуджувачів із діапазонно-кварцевою стабілізацією частоти (стабілізацією середньої частоти при ЧМ) (рисунок 2.13).

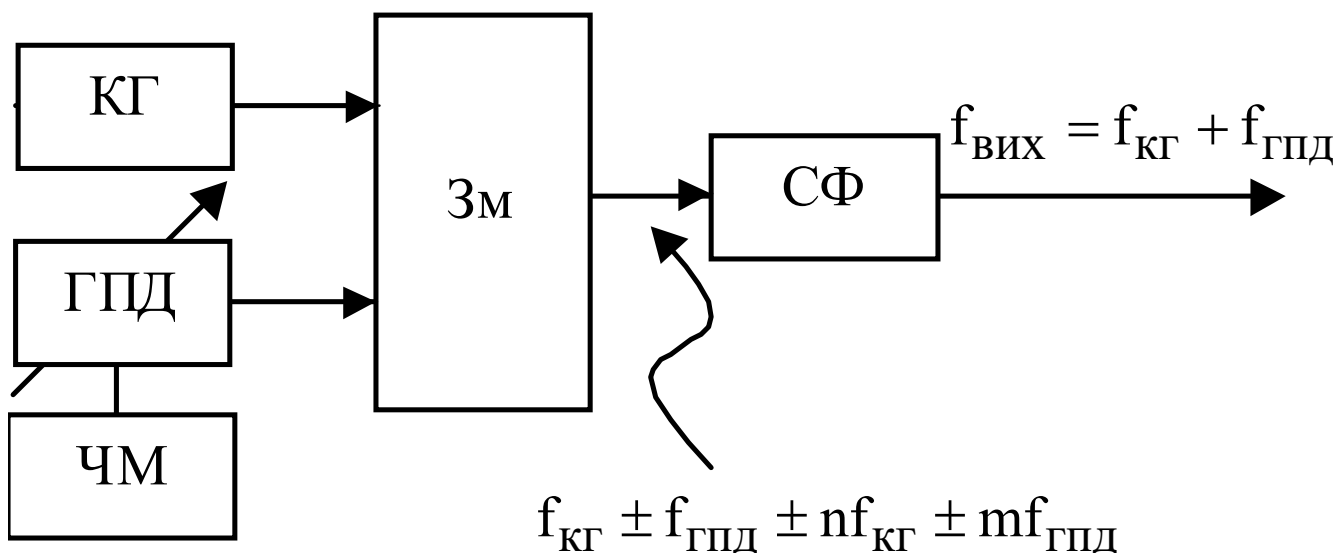


Рисунок 2.13 – Збуджувач плавного діапазону в складі збуджувачів з діапазонно-кварцевою стабілізацією частоти: КГ – кварцовий генератор; ГПД – генератор плавного діапазону; ЧМ – частотний модулятор; ЗМ – змішувач; СФ – смуговий фільтр

Відхилення частоти на виході:

$$|\Delta f_{\text{вих}}|_{\text{max}} = |\Delta f_{\text{кг}}|_{\text{max}} + |\Delta f_{\text{гпд}}|_{\text{max}} ;$$

$$\left| \frac{\Delta f_{\text{вих}}}{f_{\text{вих}}} \right|_{\text{max}} = \frac{|\Delta f_{\text{кг}}|_{\text{max}} + |\Delta f_{\text{гпд}}|_{\text{max}}}{f_{\text{кг}} + f_{\text{гпд}}} \approx \left| \frac{\Delta f}{f} \right|_{\text{кг}} + \frac{f_{\text{гпд}}}{f_{\text{кг}}} \left| \frac{\Delta f}{f} \right|_{\text{гпд}} .$$

## 2.4 Приклади реалізації промислових LC-автогенераторів

У промисловості застосовують однотранзисторні та двотранзисторні LC-автогенератори. Однотранзисторні автогенератори найбільш часто виготовляють за триточковою схемою.

Автогенератор високочастотного генератора Г4-102 (плата 3.661.301) виготовлено за схемою індуктивної триточки (рисунок 2.14). Діапазон частот синусоїдальних коливань автогенератора дорівнює 0,1...50 МГц. Перекриття діапазону частот забезпечують його поділом на вісім піддіапазонів. У кожному піддіапазоні комутують до автогенератора окрему коливальну систему. Приклад на схемі – ввімкнення автогенератора у восьмий піддіапазон частот (20...50 МГц).

LC-контур складається з – ємності між базою та колектором транзистора (ланцюг С28, С36, С38), індуктивності між базою та емітером L81 (ланцюг С28, L81, С37, С3), індуктивності між емітером та колектором L82 (ланцюг С3, С37, L82, С4).

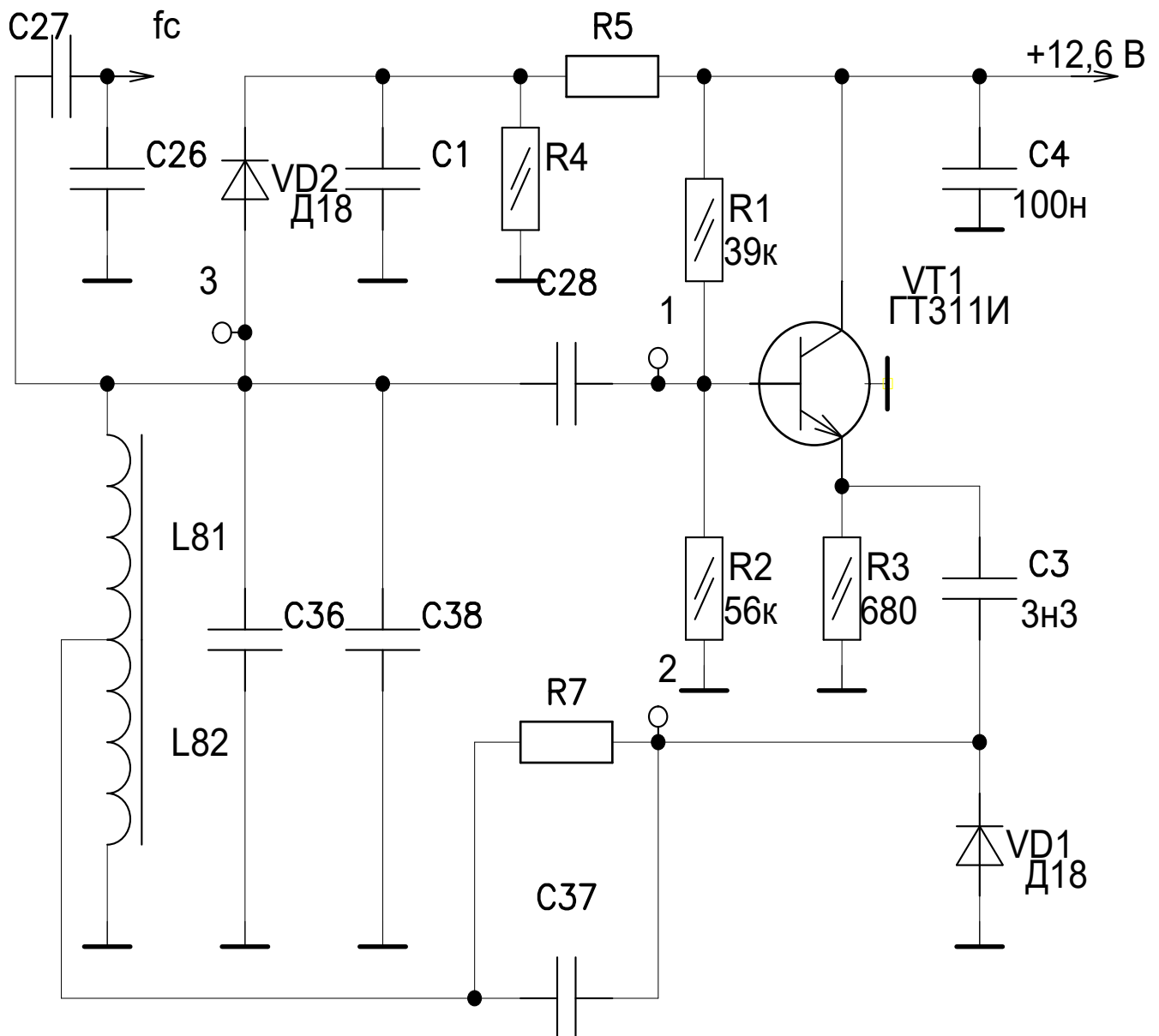


Рисунок 2.14 – Індуктивна триточка Г4-102

Особливістю схеми є: застосування діодів VD1, VD2 для обмеження амплітуди коливань сигналу, що покращує його вихідний спектр; використання вихідного ємнісного дільника C26, C27, який створює фільтр нижчих частот для зменшення гармонік сигналу резонансної частоти.

Автогенератор високочастотного генератора Г4-116 виконано за схемою ємнісної триточки (рисунок 2.15). Схема ввімкнення транзистора – СЗК. Діапазон частот синусоїдальних коливань автогенератора дорівнює 196...380 МГц. Перекриття діапазону частот забезпечують поділом діапазону на піддіапазони. У кожному піддіапазоні комутують до автогенератора окрему коливальну систему.

ФНЧ знижує рівень гармонік гетеродина на виході.

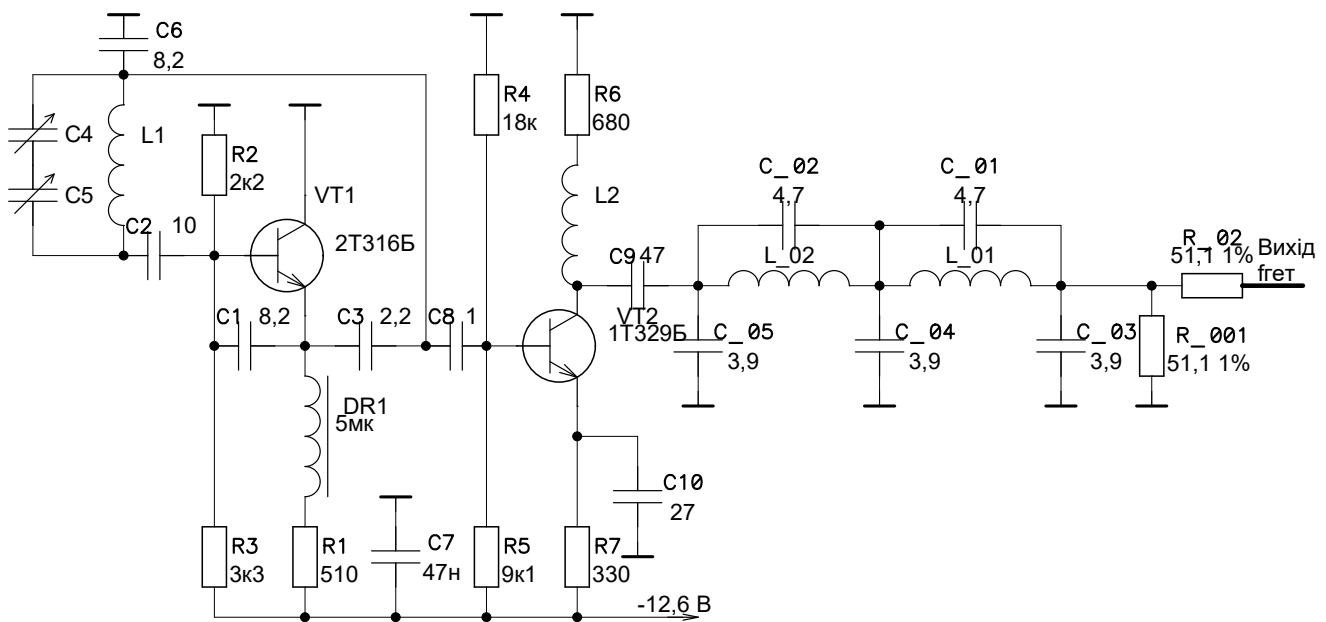


Рисунок 2.15 – Схема електрична принципова керованого автогенератора-гетеродина Г4-116 з буферним підсилювачем (СЗЕ) та ФНЧ

Приклад двотранзисторного автогенератора ЗПД для застосування у вигляді генератора, керованого напругою VCO у синтезаторі частоти PLL вимірювального генератора високої частоти Г4-153, Г4-154, показано на рисунку 2.16.

**Генератор на польових транзисторах з р-каналом.** Транзистор VT1 підключено за схемою із загальною базою. Він посилює сигнал і виділяє його на коливальному контурі L2, VD5, VD6. З контура сигнал подають на вихід і другий транзистор VT3, який увімкнено за схемою із загальним джерелом. Підсилений ним сигнал виділяється на значному опорі генератора стабільного струму (ГСС) на транзисторі VT2. З ГСС сигнал надходить на затвор VT1. Транзистор VT4 регулює амплітуду сигналу генератора, тобто діє як потенціометр.

Двотранзисторний автогенератор VCO генератора Г4-151 (3.260.013 ТО) виконано на біполярних транзисторах. Діапазон частот 128...256 МГц перекривають два автогенератори (128...200 МГц та 160...256 МГц), виготовлених за однаковими схемами.

Генератор на транзисторах VT4 і VT5 працює в діапазоні 128...200 МГц (рисунок 2.17). Частоту перебудовують подачею напруги на зустрічно ввімкнуті варикапи VD2–VD7. У коливальному контурі генератора варикапи з'єднані в дві групи: VD2–VD4 в одній групі і VD5–VD7 в другій. Напруга керування подається через фільтри R27C27 і R28C28. До інших потенціальних електродів підводиться фіксована постійна напруга: до одного – від коректора ЧС, до іншого – від потенціометра R10, який знаходиться у ланцюзі виток – емітер транзисторів VT1, VT2. У цей же ланцюг надходить модулююча напруга від коректора ЧС і керуюча напруга для швидкодіючої

системи ФАП. Напруга живлення +12 В надходить на генератор через фільтр на транзисторі VT3, а напруга сигналу – на вихід.

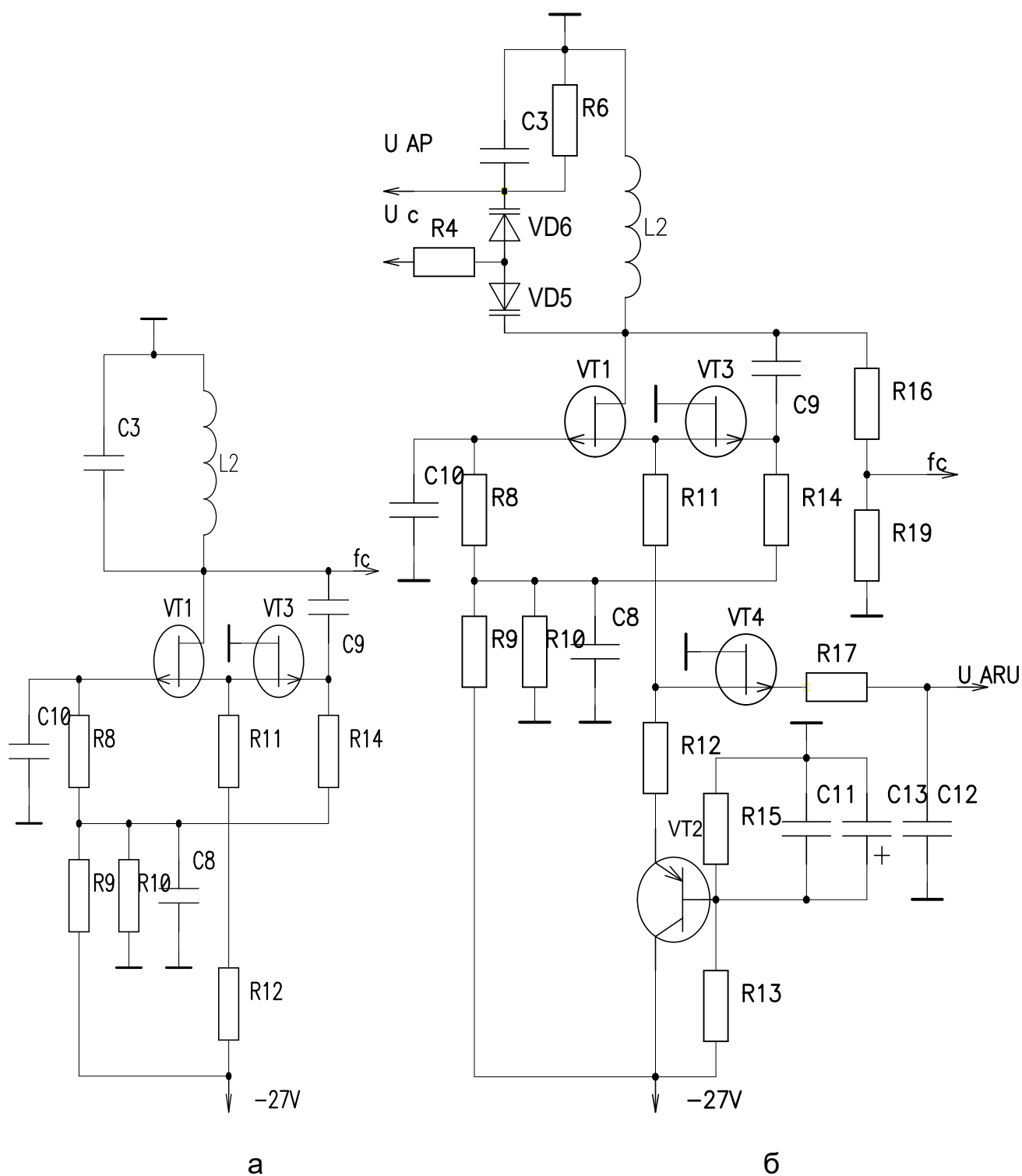
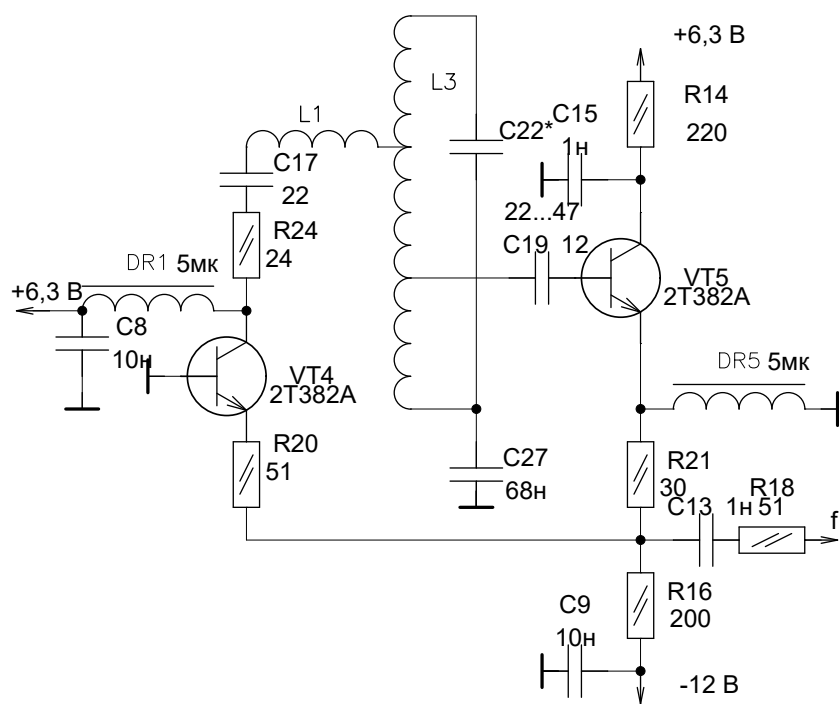
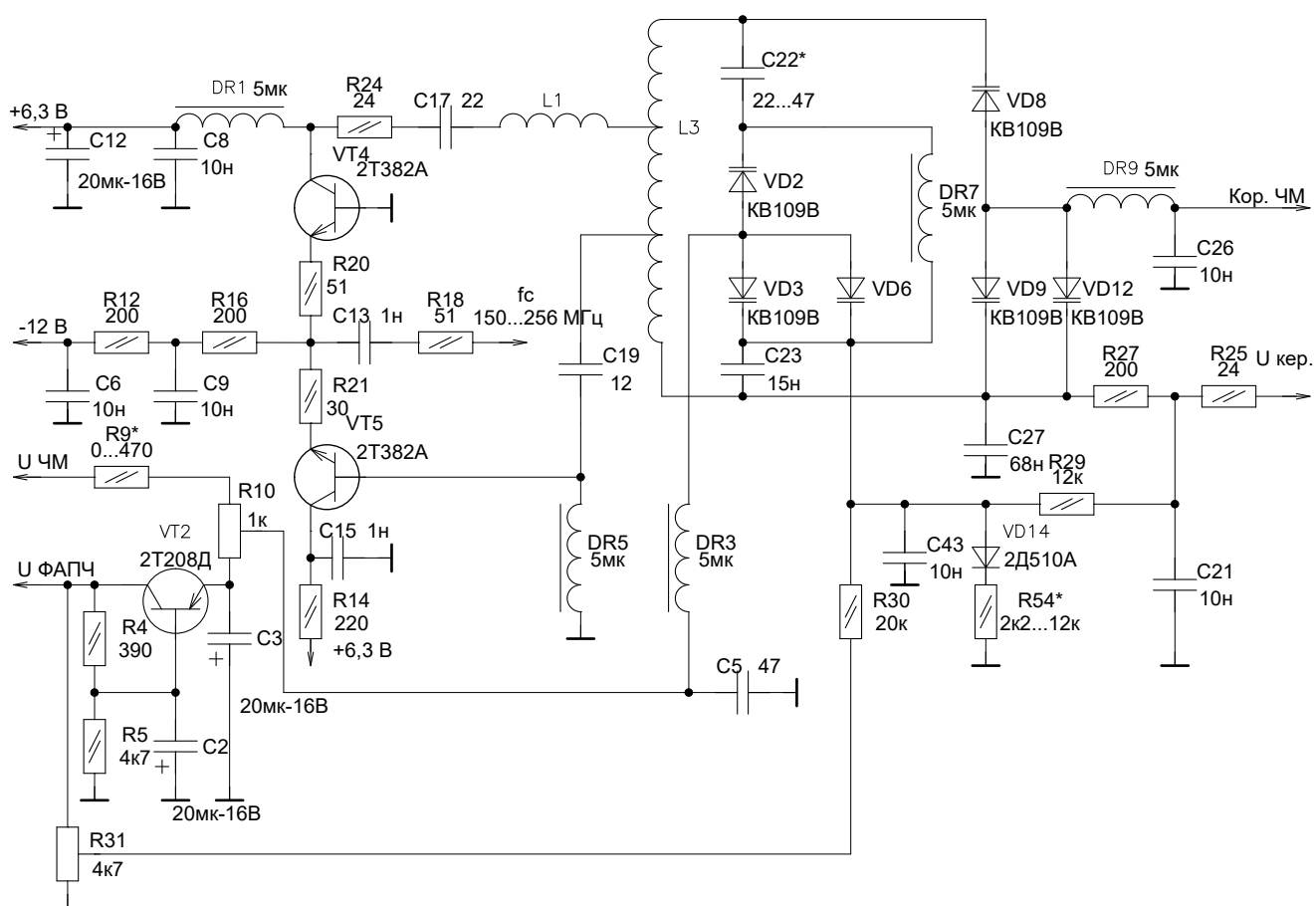


Рисунок 2.16 – VCO PLL ВЧ-генератора Г4-153, Г4-154:  
а – спрощена схема, б – принципова схема



а



б

Рисунок 2.17 – VCO PLL ВЧ-генератора Г4-151:  
а – спрощена схема; б – принципова схема

## 3 ПАРАМЕТРИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ КВАРЦОВИХ РЕЗОНАТОРІВ

### 3.1 Методи стабілізації частоти генераторів

Про стабільність частоти генератора можна робити висновки за її абсолютними і відносними змінами.

**Перша причина** нестабільності полягає у відносній нестабільності елементів коливального контуру. Еквівалентні параметри коливального контуру можуть змінюватись внаслідок зміни лінійних розмірів котушок і індуктивності конденсатора:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L_0} + \frac{\Delta C}{C_0} \right).$$

Температурну залежність характеризують такі коефіцієнти:

- температурний коефіцієнт частоти (ТКЧ) – відносне відхилення частоти  $f$  при зміні температури  $T$  на  $1^\circ\text{C}$ ;

- температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ)  $\alpha_C$  – відносне відхилення ємності при зміні температури  $T$  на  $1^\circ\text{C}$  (у слюдяних конденсаторах  $\alpha_C = (50 - 100)10^{-6}$ ;

- температурний коефіцієнт індуктивності (ТКІ)  $\alpha_E$  – відносне відхилення індуктивності  $L$  при зміні температури  $T$  на  $1^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_E \sim (50 - 100)10^{-6}$ .

Керамічні конденсатори випускають як з додатним, так і від'ємним КЄ  $\alpha_C \sim (30 - 50)10^{-6}$ , а також  $\alpha_C \sim (700 - 1500)10^{-6}$ .

Застосування конденсаторів з великим від'ємним ТКЄ дозволяє виконувати термокомпенсацію. Для цього до коливального контуру  $L_0C_0$  підключають паралельно  $C_K$  – компенсуючу ємність.

Сумарне температурне відхилення частоти

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L_0} + \frac{\Delta C_0 + \Delta C_K}{C_0 + C_K} \right);$$

відхилення дорівнює нулю, якщо

$$\frac{\Delta C_K}{C_0} \approx -\left( \frac{\Delta L}{L_0} + \frac{\Delta C}{C_0} \right).$$

При використанні  $C_K$  можна температурну нестабільність частоти знизити в декілька разів.

**Друга причина** нестабільності LC АГ – зміна ємності лампи або транзистора, що шунтують коливальний контур АГ. Ці ємності змінюються під

час прогрівання ламп і транзисторів і через дію змін напруги живлення.

Стабільність частоти АГ можна підвищувати у спосіб:

- застосовувати контури з великими ємностями;
- зменшувати коефіцієнт включення контуру  $m$ .

**Третя причина** нестабільності частоти АГ – вплив гармонік струму на частоту коливань.

Механізм впливу тут є таким: при проходженні через коливальний контур гармоніки створюють додаткове падіння напруги. Завдяки цьому на контурі результуюча напруга буде негармонічною і буде подаватися по ланцюгу зворотного зв'язку на вхід. Тоді форма імпульсу колекторного струму стане несиметричною. В результаті відбудеться зрушення фаз між  $I_1$  і напругою збудження, і  $S$  буде комплексною величиною, вносячи зміни в баланс фаз і значно впливаючи на частоту.

Нестабільність частоти

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{1}{2\Theta^2} \sum_{n=2}^{\infty} K_n^2,$$

де  $K_n = \frac{\alpha_n}{\alpha_1}$  – коефіцієнт  $n$ -ї гармоніки анодного (катодного) струму;

$\frac{\Delta f}{f_0} \sim 10^{-4} \dots 10^{-5}$  – для LC-контур.

Отже, для підвищення стабільності треба збільшувати  $\Theta$  або зменшувати коефіцієнт гармоніки анодного струму за рахунок вибору кута відсікання струму  $\Theta$ .

**Четверта причина:** вплив змін навантаження автогенератора на його частоту. Навантаження вносить додатковий реактивний опір і його зміна буде змінювати частоту.

Для підвищення стабільності частоти треба зв'язок контуру генератора з навантаженням зменшити. Найбільш дійсним способом є включення між АГ і навантаженням спеціального підсилювального каскаду, режим роботи якого слабо залежить від змін навантаження. Такий каскад називається буферним.

Для стабілізації частоти треба застосовувати коливальну систему АГ великої добротності. Так добротність LC-контура становить 30...200 одиниць, добротність функцій цих елементів електроніки – резонаторів – може досягати 1 000 000.

Температурна стабільність кварцових резонаторів набагато більша стабільності LC-контура. Для LC-контура  $TKЧ \sim (50 \dots 100)10^{-6}$ , а кварцу  $\sim 10^{-7} \dots 10^{-6}$  [8].

### 3.2 Математичний опис кварцового п'єзоелемента

Математичний опис коливань кварцового п'єзоелемента КЕ в тензорній формі уздовж його товщини має вигляд [2]:

$$\begin{aligned}c_{66}^E U_{1,22} + e_{26} \phi_{,22} &= \rho \ddot{U}_1; \\c_{22}^E U_{2,22} + c_{24}^E U_{3,22} &= \rho \ddot{U}_2; \\c_{24}^E U_{2,22} + c_{44}^E U_{3,22} &= \rho \ddot{U}_3; \\e_{26} U_{1,22} - \varepsilon_{22}^S \phi_{,22} &= 0,\end{aligned}$$

де  $c_{i,j}^E, e_{i,j}, \varepsilon_{i,j}^S$  – пружні, п'єзоелектричні і діелектричні постійні п'єзокварцу відповідно;

$\rho, U_i, \phi$  – щільність КЕ, зсув уздовж осі  $i$  й електричний потенціал відповідно;

$x_1, x_2, x_3$  – напрямки уздовж ширини, товщини і довжини КЕ відповідно. Аналіз рівняння показує, що тільки зсув  $U_2$  є зв'язаним з електричним потенціалом  $\phi$ , збуджується електрично і не є зв'язаним зі зсувами  $U_1, U_3$ . Отже, для КЕ моноклінної симетрії утворяться дві системи незв'язаних коливань, у першій –  $U=U_3=0$  і у другій –  $U_2=\phi=0$ .

Перша система:

$$\begin{aligned}c_{66}^E U_{1,22} + e_{26} \phi_{,22} &= \rho \ddot{U}_1; \\e_{26} U_{1,22} - \varepsilon_{22}^S \phi_{,22} &= 0.\end{aligned}$$

Механічні напруги  $T_{i,j}$  і електричні зсуви  $D_i$  [2]:

$$\begin{aligned}T_{21} &= c_{66}^E U_{1,2} + e_{26} \phi_{,2}; \\T_{22} &= c_{22}^E U_{2,2} + c_{24}^E U_{3,2}; \\T_{23} &= c_{24}^E U_{2,2} + c_{44}^E U_{3,2}; \\D_1 &= e_{12} U_{2,2} + e_{14} U_{3,2}; \\D_2 &= e_{26} U_{1,2} - \varepsilon_{22}^S \phi_{,2}; \\D_3 &= e_{36} U_{1,2} - \varepsilon_{23}^S \phi_{,2}.\end{aligned}$$

Система диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}\bar{c}_{66} U_{1,22} + \rho \omega^2 \ddot{U}_1 &= 0; \\ T_{21} &= c_{66}^E U_{1,2} + c_{26} \phi_{,2}; \\ \phi_{,2} &= e_{26} U_{1,2} / \varepsilon_{22}^S - D_2 / \varepsilon_{22}^S,\end{aligned}$$

де  $\bar{c}_{66} = c_{66}^E + e_{26}^2 / \varepsilon_{22}^S$ ;

$$\omega = \eta (\bar{c}_{66} / \rho)^{1/2};$$

$\eta$  – хвильове число.

Визначення коливань кристала має вигляд

$$U_1 = U_0 \sin(\eta x_2).$$

Запишемо для КЕ з зазором між поверхнею кристала і електродом граничні умови:

– механічні, що враховують масонавантаження:

$$T_{22} = T_{23} = 0; \quad T_{21} = \pm 2h' \rho' U_1; \quad T_{21} = \pm M h \eta h \quad \text{при } x_2 = \pm h,$$

де  $2h$  – товщина кристалічного елемента;

$2h', \rho'$  – товщина і щільність покриття КЕ;

$M = 2\rho' h' / \rho h$  – відносне масонавантаження;

– електричні, що враховують наявність міжелектродного зазору:

$$D_2 = \varepsilon_a V_0 \quad \text{при } x_2 = \pm h,$$

де  $\varepsilon_a$  – абсолютна діелектрична проникність зазору;

$V_0$  – напруженість електричного поля в зазорі.

Математичний опис роботи КЕ [12]:

рівняння коливань зсуву по товщині КР

$$U_1 = e_{26} D_2 \sin \eta x_2 / \left( \varepsilon_{22}^S \bar{c}_{66} \eta (\cos \eta h - M \eta h \sin \eta h) \right);$$

електричне поле

$$E = 2D_2 h \left( d_0 - k_{26}^2 / \eta h (\operatorname{ctg} \eta h - M \eta h) \right) / \varepsilon_{22}^S,$$

де  $d_0 = 1 + \varepsilon_{22}^s d / \varepsilon_a 2h$  – коефіцієнт зміни діелектричної проникності п'єзоелемента при зміні міжелектродного зазору;

$k_{26}^2 = e_{26}^2 / \bar{c}_{66} \varepsilon_{22}^s$  – коефіцієнт електромеханічного зв'язку;  
 провідність п'єзоелемента [12]

$$Y = j\omega D_2 S_e / E = j\omega S_e \varepsilon_{22}^s / 2h \left( d_0 - k_{26}^2 / d_0 \eta h (\operatorname{ctg} \eta h - M \eta h) \right), \quad (3.1)$$

де  $S_e$  – площа електродів.

Частота коливань зсуву по товщині у площині  $x_1, x_2$  має вигляд [12]

$$f = \frac{n}{2(2h)} \sqrt{\frac{\bar{c}_{66}}{\rho}} \left( 1 - \frac{4k_{26}^2}{n^2 \pi^2 d_0} \right) \frac{1}{1+M}, \quad n = 1, 3, \dots \quad (3.2)$$

За рівнянням (3.2) одержують гармонійні товщинно-зсувні коливання в площині  $x_1, x_2$ .

Отримані залежності є теоретичною основою побудови еквівалентної електричної схеми КЕ.

### **Моделювання температурних коефіцієнтів частоти п'єзорезонаторів**

При моделюванні КР важливо знати не тільки значення їх параметрів, але й їх температурні зміни. Найбільше практичне значення має відхилення частоти резонансу п'єзорезонатора під впливом частоти.

Залежність резонансної частоти п'єзоелектричного резонатора від температури може бути подано першими трьома членами степеневого ряду [7]:

$$\frac{f_n - f_0}{f_0} = \frac{\Delta f_n}{f_0} = \sum_{i=1}^3 T f_n^{(i)} (\Theta - \Theta_0)^i,$$

де  $f_n$  – резонансна частота резонатора при температурі  $\Theta$ ;

$f_{n0}$  – значення резонансної частоти при температурі  $\Theta_0$ , біля якої апроксимується її температурна залежність;

$$T f_n^{(i)} = \frac{1}{n! f_{n0}} \left( \frac{\partial^n f_n}{\partial \Theta^n} \right)_{\Theta=\Theta_0} \quad \text{– температурний коефіцієнт } n\text{-го порядку.}$$

Резонансну частоту  $f_n$  п'єзоелектричного резонатора будемо розглядати як функцію його розмірів, щільності, коефіцієнтів жорсткості або у загальному вигляді як функцію величин  $x_i$ :  $f_n = f(x_1, x_2 \dots x_n)$ .

У цьому випадку маємо

$$\frac{\partial^j f_n}{\partial \Theta^j} = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^i \frac{\partial^j f(x_1, x_2, \dots, x_i)}{\partial^j x_i} \frac{\partial^j x_i}{\partial \Theta^j}.$$

Запишемо залежності температурних коефіцієнтів резонансної частоти:

$$\begin{aligned} T f^{(1)} &= \frac{1}{2} T c_{66}^{(1)} - \frac{1}{2} T \rho^{(1)} - T h^{(1)} + T a^{(1)} + T b^{(1)}; \\ T f^{(2)} &= T c_{66}^{(2)} - T \rho^{(2)} - 2 T h^{(2)} + T a^{(2)} + T b^{(2)} - \\ &\quad - \frac{1}{2} (T c_{66}^{(1)2} - T \rho^{(1)2} - T h^{(1)2} + T a^{(1)2} + T b^{(1)2}); \\ T f^{(3)} &= T \rho^{(1)} T \rho^{(2)} + 2 T h^{(1)} T h^{(2)} - T c_{66}^{(1)} T c_{66}^{(2)} + T a^{(1)} T a^{(2)} + \\ &\quad + T b^{(1)} T b^{(2)} + T c_{66}^{(3)} - T \rho^{(3)} - 2 T h^{(3)} + T a^{(3)} + T b^{(3)} + \\ &\quad + \frac{1}{3} (T c_{66}^{(1)3} - T \rho^{(1)3} - T h^{(1)3} + T a^{(1)3} + T b^{(1)3}), \end{aligned}$$

де  $T x_i^{(n)} = \frac{1}{n! x_i} \left( \frac{\partial^n x_i}{\partial \Theta^n} \right)_{\Theta=\Theta_0}$  – температурний коефіцієнт n-го порядку параметра  $x_i$ ;

$$T a^{(n)} = \frac{1}{n! \left( 1 - \frac{4k_{26}^2}{n^2 \pi^2 d_0} \right)} \frac{\partial}{\partial \Theta^n} \left( 1 - \frac{4k_{26}^2}{n^2 \pi^2 d_0} \right), \quad T b^{(n)} = \frac{\rho h}{n! \rho_m h_m} \frac{\partial}{\partial \Theta^n} \frac{\rho_m h_m}{\rho h} - \text{тем-}$$

пературні коефіцієнти, які залежать від матеріалу та величини міжелектродного зазору.

Аналіз формул свідчить про те, що внаслідок нелінійного характеру температурних коефіцієнтів частоти є неможливим забезпечити їх нульові значення у широкому діапазоні температур. Термостабільні зрізи п'єзокварцу можна забезпечити лише при застосуванні термостатів або зробити їх мінімальними у деякому діапазоні температур.

Алгоритм розрахунків температурних коефіцієнтів частоти є таким: обчислення значення коефіцієнтів жорсткості  $c_{\lambda\mu}$ , п'єзоелектричних коефіцієнтів  $e_{i\lambda}$  та коефіцієнтів діелектричної проникності  $\epsilon_{ij}$  для заданої орієнтації зрізу п'єзокварцу. З отриманих значень визначають залежність резонансної частоти п'єзоелектричного резонатору від температури (рисунок 3.1).

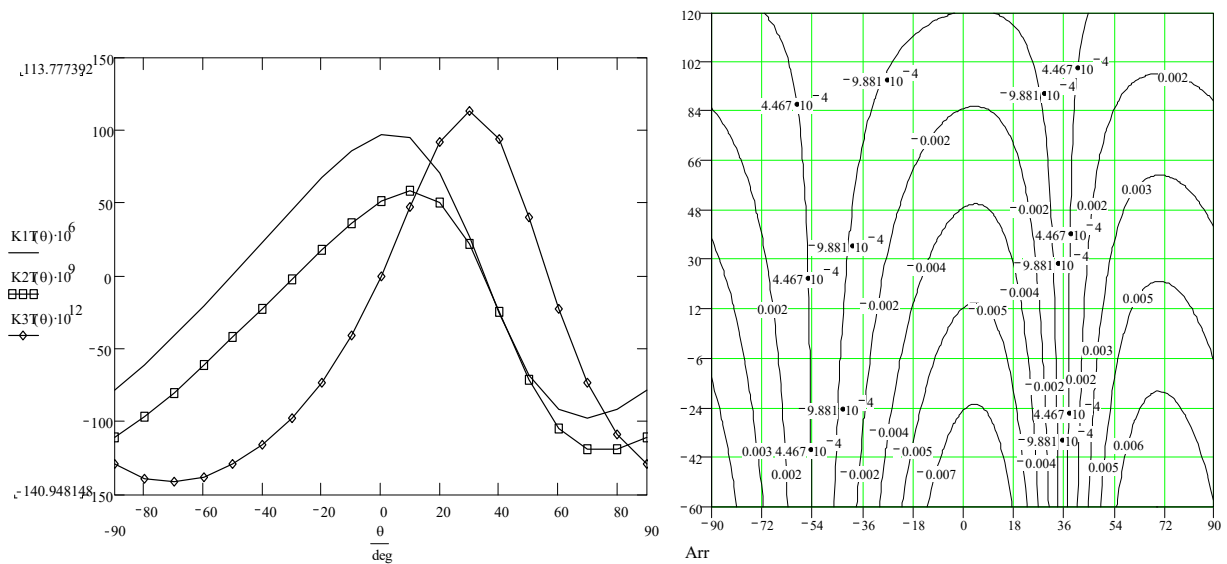


Рисунок 3.1 – ТКЧ 1-3-го порядків Y-зрізів кварцу

### 3.3 Еквівалентна електрична схема кварцового резонатора та його параметри

#### 3.3.1 Аналіз еквівалентної електричної схеми КР

Для зручності розрахунку КР використовують еквівалентну електричну схему (ЕЕС) п'єзореzonатора (ПР), що має такий же повний опір, що і п'єзоелектричний п'єзореzonатор на частоті, близькій до резонансної.

У наш час відомо ряд ЕЕС ПР, що вирізняються як кількістю, типом, зв'язками між еквівалентними електронними компонентами, так і функціональними співвідношеннями між значеннями компонентів і параметрами електромеханічної коливальної системи ПР. При створенні ЕЕС використовують два підходи:

- математичний: перехід до ЕЕС від диференціальних або трансцендентних рівнянь, що описують коливання (провідність або повний опір) ПР, використовуючи метод електромеханічних аналогій;
- фізичний: використання однієї з відомих ЕЕС як базової з додаванням додаткових електронних компонентів.

Відповідно до першого підходу отримуємо формули складових опорів ЕЕС ПР та ЕЕС ПЕ. Наведемо формулу (3.1) у вигляді суми провідностей п'єзоелемента:

$$Y = Y_0 + Y_1;$$

$$Y_0 = \frac{j\omega S_e \epsilon_{22}^S d_0}{2h \left( d_0^2 - \frac{k_{26}^4}{\eta^2 h^2 (ctg \eta h - M \eta h)^2} \right)} \approx \frac{j\omega S_e \epsilon_{22}^S d_0}{2h (d_0^2 - k_{26}^4)};$$

$$Y_1 = \frac{j\omega S_e \epsilon_{22}^S k_{26}^2}{2h \left( d_0^2 - \frac{k_{26}^4}{\eta^2 h^2 (\operatorname{ctg} \eta h - M \eta h)^2} \right) \eta h (\operatorname{ctg} \eta h - M \eta h)} = \frac{j\omega S_e \epsilon_{22}^S k_{26}^2}{2h \left( d_0^2 - \frac{k_{26}^4}{(1 - M \eta^2 h^2)^2} \right) (1 - M \eta^2 h^2)}.$$

Аналіз схем провідностей п'єзоелемента і їх еквівалентів показано на рисунку 3.2.

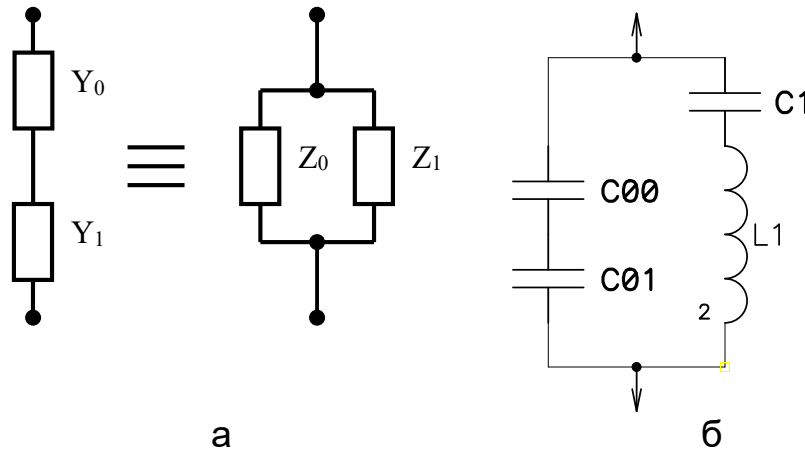


Рисунок 3.2 – Аналіз схем провідностей ПЕ

На рисунку

$$Y_0 = j\omega C_0,$$

де  $C_0 = \frac{S_e \epsilon_{22}^S d_0}{2h (d_0^2 - k_{26}^4)} = \frac{S_e \epsilon_{22}^S (1 + \epsilon_{22}^S d / \epsilon_a 2h)}{2h ((1 + \epsilon_{22}^S d / \epsilon_a 2h)^2 - k_{26}^4)}$  – статична ємність ПЕ;

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_{00}} + \frac{1}{C_{01}} = \frac{2h}{S_e \epsilon_{22}^S} \cdot \frac{(1 + \epsilon_{22}^S d / \epsilon_a 2h)^2 - k_{26}^4}{1 + \epsilon_{22}^S d / \epsilon_a 2h}.$$

Таким чином, опір першої гілки  $Z_0$  являє собою дві послідовно ввімкнені ємності:  $C_{00}$  – ємність кристала та  $C_{01}$  – ємність зазору (див. рисунок 3.2, б):

$$C_{00} = \frac{\epsilon_{22}^S S_e}{2h} \cdot \frac{1}{(1 - k_{26}^4 \frac{1}{1 + \epsilon_{22}^S d / \epsilon_a 2h})};$$

$$C_{01} = \frac{\epsilon_a S_e}{d}.$$

Опір другої гілки [12]

$$Z_1 = \frac{2h \left( d_0^2 - \frac{k_{26}^4}{\eta^2 h^2 (\operatorname{ctg} \eta h - M \eta h)^2} \right) \eta h (\operatorname{ctg} \eta h - M \eta h)}{j \omega S_e \varepsilon_{22}^S k_{26}^2} = \frac{2h \left( d_0^2 - \frac{k_{26}^4}{(1 - M \eta^2 h^2)^2} \right) (1 - M \eta^2 h^2)}{j \omega S_e \varepsilon_{22}^S k_{26}^2}$$

при відсутності масонавантаження (електродів) п'єзoeлемента ( $M=0$ );

$$Z_1 = \frac{2h (d_0^2 - k_{26}^4)}{j \omega S_e \varepsilon_{22}^S k_{26}^2} = Z_{11} + Z_{12};$$

$$Z_{11} = \frac{2h d_0^2}{j \omega S_e \varepsilon_{22}^S k_{26}^2} = \frac{1}{j \omega C_1};$$

$$Z_{12} = -\frac{2h k_{26}^4}{j \omega S_e \varepsilon_{22}^S k_{26}^2} = \frac{j \omega 2h k_{26}^4}{\omega^2 S_e \varepsilon_{22}^S k_{26}^2} = j \omega L_1,$$

де  $C_1 = \frac{S_e \varepsilon_{22}^S k_{26}^2}{2h d_0^2}$  – динамічна ємність;

$L_1 = \frac{2h k_{26}^4}{\omega^2 S_e \varepsilon_{22}^S k_{26}^2}$  – динамічна індуктивність.

Таким чином, друга гілка провідності являє собою послідовно ввімкнені динамічну ємність  $C_1$  й індуктивність  $L_1$  (рисунки 3.2, б).

Найбільш загальноприйнятою ЕЕС для ненавантаженого ПР є схема, яку встановлено ДСТУ 3113-95 [9]. Схема описує одночастотне колювання ПР і являє собою ряд елементів у вигляді статичної ємності  $C_0$  (в паралельній гілці) і динамічних ємності  $C_1$ , індуктивності  $L_1$  і опору  $R_1$  (в послідовній гілці) (рисунки 3.3).

У ДСТУ 3113-95 також описано ЕЕС, де гілки з зосередженими елементами замінені комплексними опорами або провідностями (рисунки 3.3). При цьому залежності параметрів ПР від частоти мають вигляд, показаний на рисунку 3.4 [9].

Встановлено такі параметри:

- $C_1$  – динамічна ємність ПР – це ємність послідовної гілки, що являє собою послідовне з'єднання індуктивності, ємності і активного опору, зашунтованого ємністю між виводами ПР;

- $L_1$  – динамічна індуктивність ПР – індуктивність еквівалентної схеми ПР;

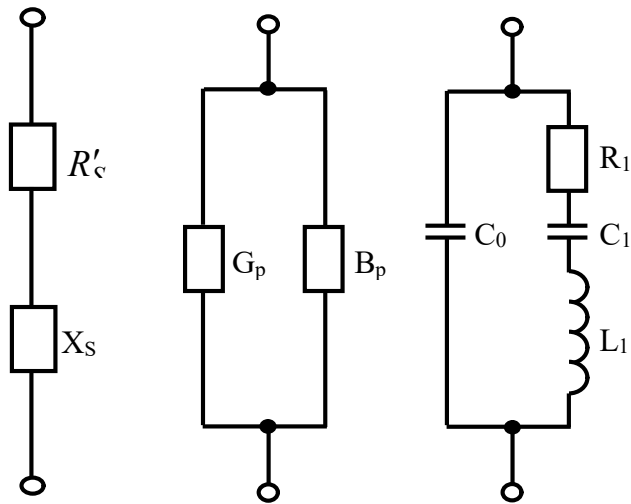


Рисунок 3.3 – ЕЕС ПР з зосередженими елементами  
за ДСТУ 3113-95

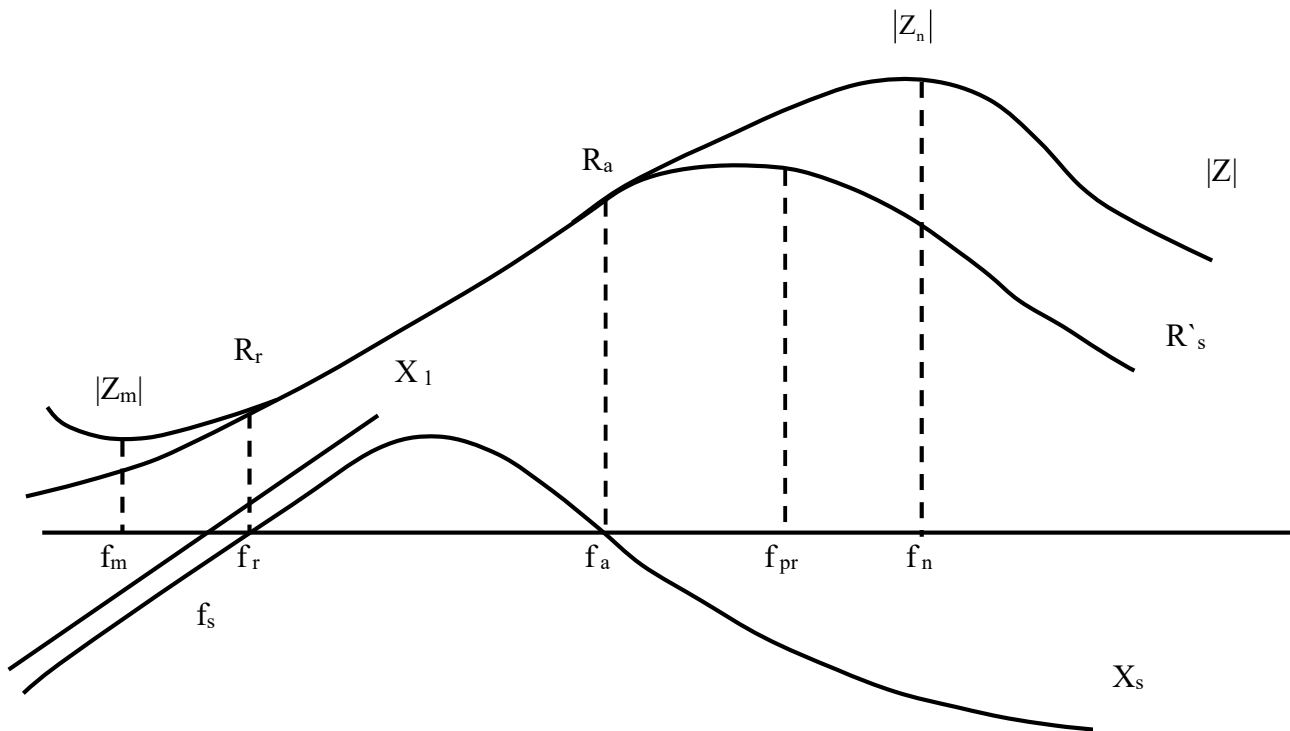


Рисунок 3.4 – Залежність параметрів п'єзоелектричного резонатора від частоти:  $|Z|$  – модуль повного опору ПР;  $|Z_m|$  – модуль повного мінімального опору ПР;  $|Z_n|$  – модуль повного максимального опору ПР;  $X_1$  – реактивний опір динамічної послідовної гілки резонансу;  $R'_s$  – еквівалентний послідовний опір ПР;  $R_r$  – резонансний опір ПР;  $R_a$  – антирезонансний опір ПР;  $f$  – частоти ПР при:  $f_s$  – послідовному резонансі,  $f_p$  – паралельному резонансі,  $f_m$  – мінімальному повному опору;  $f_n$  – максимальному повному опору,  $f_{pr}$  – максимальному еквівалентному послідовному опору,  $f_r$  – резонансі,  $f_a$  – антирезонансі

-  $R_1$  – динамічний опір ПР – активний опір еквівалентної схеми ПР, що являє собою послідовне з'єднання індуктивності, ємності і активного опору, зашунтованого ємністю між виводами ПР;

-  $C_0$  – статична ємність ПР – ємність між виводами п'єзоелектричного резонатора подалі від резонансних частот.

Похідні від параметрів:

- ємнісний коефіцієнт ПР  $r = C_0/C_1$  – відношення статичної ємності ПР до його динамічної ємності;

- частота ПР при послідовному резонансі

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}};$$

- добротність ПР

$$Q = \frac{2\pi f_s L_1}{R_1} = \frac{1}{2\pi f_s C_1 R_1};$$

- доброякісність ПР

$$M = \frac{Q}{r} = \frac{1}{2\pi f_s C_0 R_1}.$$

Кварцовий резонатор має дві резонансні частоти: частоту послідовного резонансу  $f_s$  і частоту паралельного резонансу  $f_p$ . Смуга частот  $f_s - f_p$  називається резонансним проміжком резонатора. Тут реактивний опір має індуктивний характер, а за межами смуги – ємнісний. Частоти  $f_s$  і  $f_p$  розрізняються на 0,25% при  $C_0 / C_1 \approx 200$ .

На практиці частота кварцового автогенератора знаходиться у резонансному проміжку резонатора, при цьому використовується його індуктивний опір.

### 3.3.2 Класифікація ЕЕС ПР

**ЕЕС без механічного навантаження ПЕ.** Вперше ЕЕС ПР були отримані Ван-Дейком у 1925 р. для одночастотного режиму роботи ПР без навантаження. Схема відповідає прийнятій ДСТУ 3113-95 (див. рисунок 3.3). Найбільш поширеними є ЕС без механічного навантаження п'єзоелемента. Їх поділяють на одночастотні й багаточастотні; без урахування нелінійності і з її урахуванням; урахуванням взаємодії частот в багаточастотному режимі збудження ПР і без урахування.

**Багаточастотні ЕС.** Кожна з резонансних частот по аналогії з ланцюгом (див. рисунок 3.3) може бути зображена послідовною резонансною гілкою (рисунок 3.5).

**ЕЕС з механічним навантаженням.** ЕЕС з механічним навантаженням з ПЕ є більш загальним випадком ЕЕС. Було запропоновано ЕЕС ПР з механічним навантаженням ПЕ, де навантаження подано у вигляді механічної сили  $F_u$ , механічного зсуву  $\xi$  на поверхні ПЕ, збудження ПЕ струмом  $I$  і напругою  $E$ , перетворення електричної енергії в механічне переміщення (п'єзоефект).

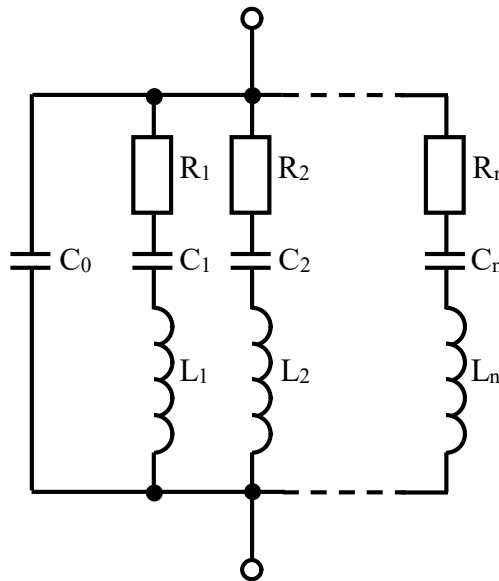


Рисунок 3.5 – ЕЕС багаточастотного кварцового резонатора

ПР показано у вигляді трансформатора з коефіцієнтом трансформації  $1/4$  (коефіцієнтом електромеханічного зв'язку (рисунок 3.6)).

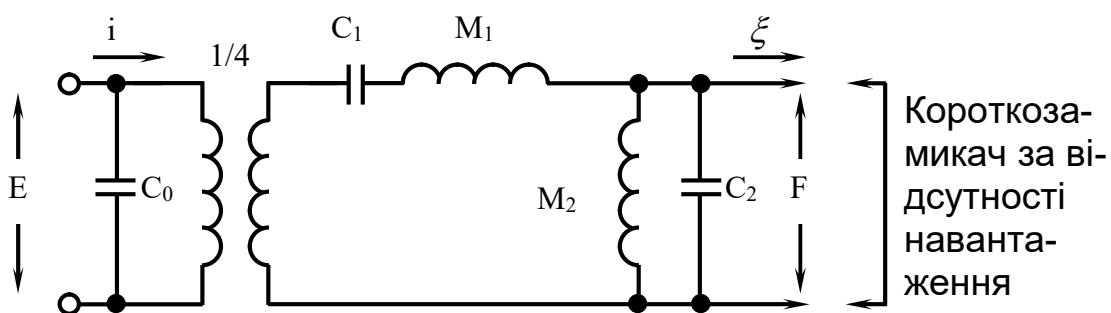


Рисунок 3.6 – Електромеханічна ЕС ПР з механічним навантаженням:

На рисунку введено такі позначення:  $C_0$  – статична ємність ПЕ;  $1/4$  – коефіцієнт електромеханічного зв'язку;  $C_1$  – статична гнучкість ПЕ, помножена на  $8/\pi^2$ ;  $M_1$  – маса ПЕ, помножена на  $1/8$ ;  $C_2$  – статична гнучкість ПЕ, помножена на  $2/\pi^2$ .

За відсутності механічного навантаження (кварцовий елемент є вільним на кінцях) паралельний коливальний контур  $M_2C_2$  закорочується і схема перетворюється в схему, зображену на рисунку 3.7.

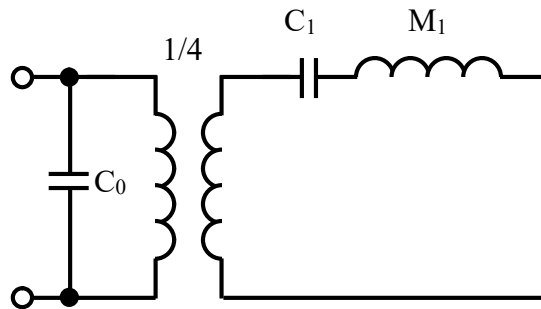


Рисунок 3.7 – Електромеханічна ЕС ПР без втрат

Ця схема еквівалентна схемі Ван-Дейка за відсутності втрат  $R_1 = 0$ .

**Акустичне навантаження в зазорі між КЕ і електродами.** У ПР з міжелектродним зазором, з корпусом, заповненим повітрям або газом, відбувається передача акустичної хвилі з поверхневим КЕ в повітряне (газове) середовище. ЕЕС являє собою поширення такої хвилі в одноатомному газі і є класичною; являє собою Т-подібну схему (рисунок 3.8).

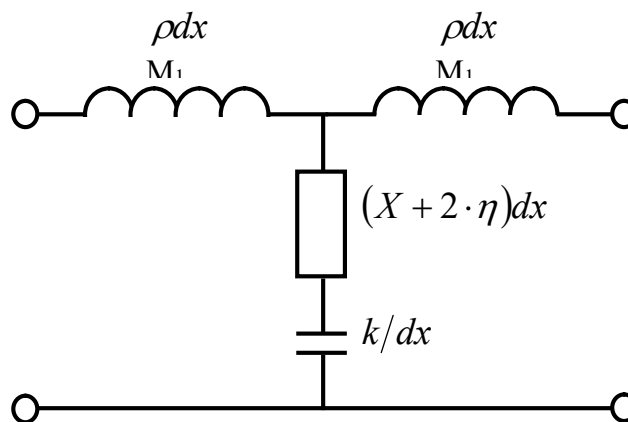


Рисунок 3.8 – ЕЕС поширення пружної хвилі в однорідному газі або рідині:  $\rho$  – потужність середовища поширення хвилі;  $X$  – об'ємна в'язкість;  $\eta$  – зсувна в'язкість;  $k$  – коефіцієнт теплопровідності

### 3.4 Керування частотою кварцового резонатора

Керування частотою КР виконують для таких цілей:

- підстроювання частоти кварцового автогенератора або фільтру з незмінною частотою при виготовленні пристрою;
- керування частотою пристрою в процесі його роботи (наприклад, для

плавної перебудови частоти як генератора, керованого напругою VCO).

Для керування частотою КР застосовують два способи:

- підключення до КР реактивностей і керування параметрами реактивності
- найбільш поширений спосіб;
  - безпосередню дію на КР, наприклад, зміною зазору між поверхнею ПЕ і електродами збудження, прикладанням механічних зусиль до КЕ, впливом тепла та ін.

За першим способом реактивності підключають послідовно, паралельно або послідовно і паралельно КР (рисунок 3.9).

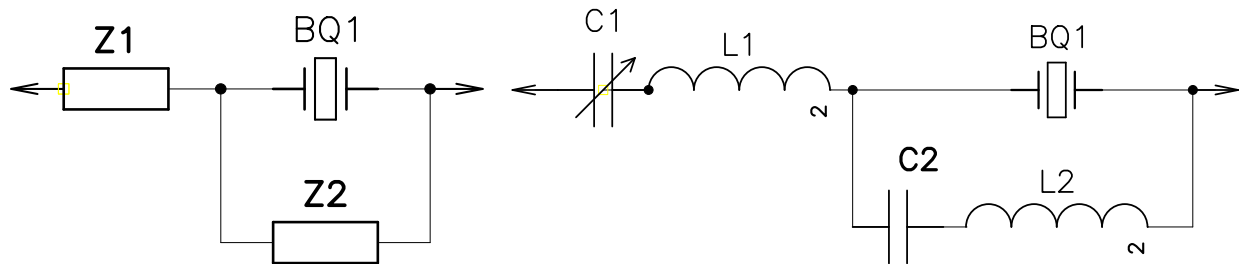


Рисунок 3.9 – Керування частотою КР

Індуктивність  $L1$  знижує частоту КР, ємність  $C1$  – збільшує, індуктивність  $L2$  застосовується для нейтралізації статичної ємності  $C_0$  резонатора і її значення має дорівнювати за модулем реактивності  $C_0$ .

Підключення зовнішніх реактивностей змінює резонансний проміжок КР.

### 3.5 Конструкції КР

Накладаються тверді обмеження на параметри і характеристики резонаторів. Стандартизація й уніфікація резонаторів стосується переважно їхнього зовнішнього пристрою – форми і розмірів корпусу, кількості виводів, розмірів і їх розташування. Це дозволило істотно скоротити їх номенклатуру і досягти взаємозамінності. Внутрішня будова резонаторів характеризується великою різноманітністю.

Звичайно резонатори складаються з трьох основних частин: корпусу, утримувача і п'єзоелемента. Корпус має виводи, призначені для з'єднання електродів п'єзоелемента із зовнішнім електричним ланцюгом. У деяких конструкціях утримувач як окремий вузол є відсутнім, і п'єзоелемент кріпиться або до виводів корпусу, або безпосередньо до його внутрішніх стінок.

Призначенням корпусу є захист п'єзоелемента від зовнішніх механічних і кліматичних впливів, що можуть приводити до його ушкодження і небажаних змін його електричних і експлуатаційних характеристик. Сучасні КР мають герметичні, вакуум-щільні корпуси, що надійно захищають ПЕ від дії вологості, різного роду забруднень, змін зовнішнього атмосферного

тиску, швидких змін температури і деяких інших зовнішніх впливів.

Резонатори, корпус яких заповнено газом при тиску, що є близьким до атмосферного, називають герметичними, а ті, в яких усередині корпусу створено розрідження – вакуумними.

Стандартом МЕК залежно від класу резонаторів установлено чотири значення швидкості натікання корпусу:  $10^{-7}$ ,  $10^{-8}$ ,  $10^{-9}$ ,  $10^{-10}$  бар·см<sup>3</sup>/с, що відповідає:  $7,5 \cdot 10^{-8}$ ;  $7,5 \cdot 10^{-9}$ ;  $7,5 \cdot 10^{-10}$  і  $7,5 \cdot 10^{-11}$  л·мм рт. ст./с [8].

Корпуси резонаторів розрізняють за видом матеріалу. Відомі пластмасові, скляні, металеві і керамічні корпуси (рисунок 3.9) [8].

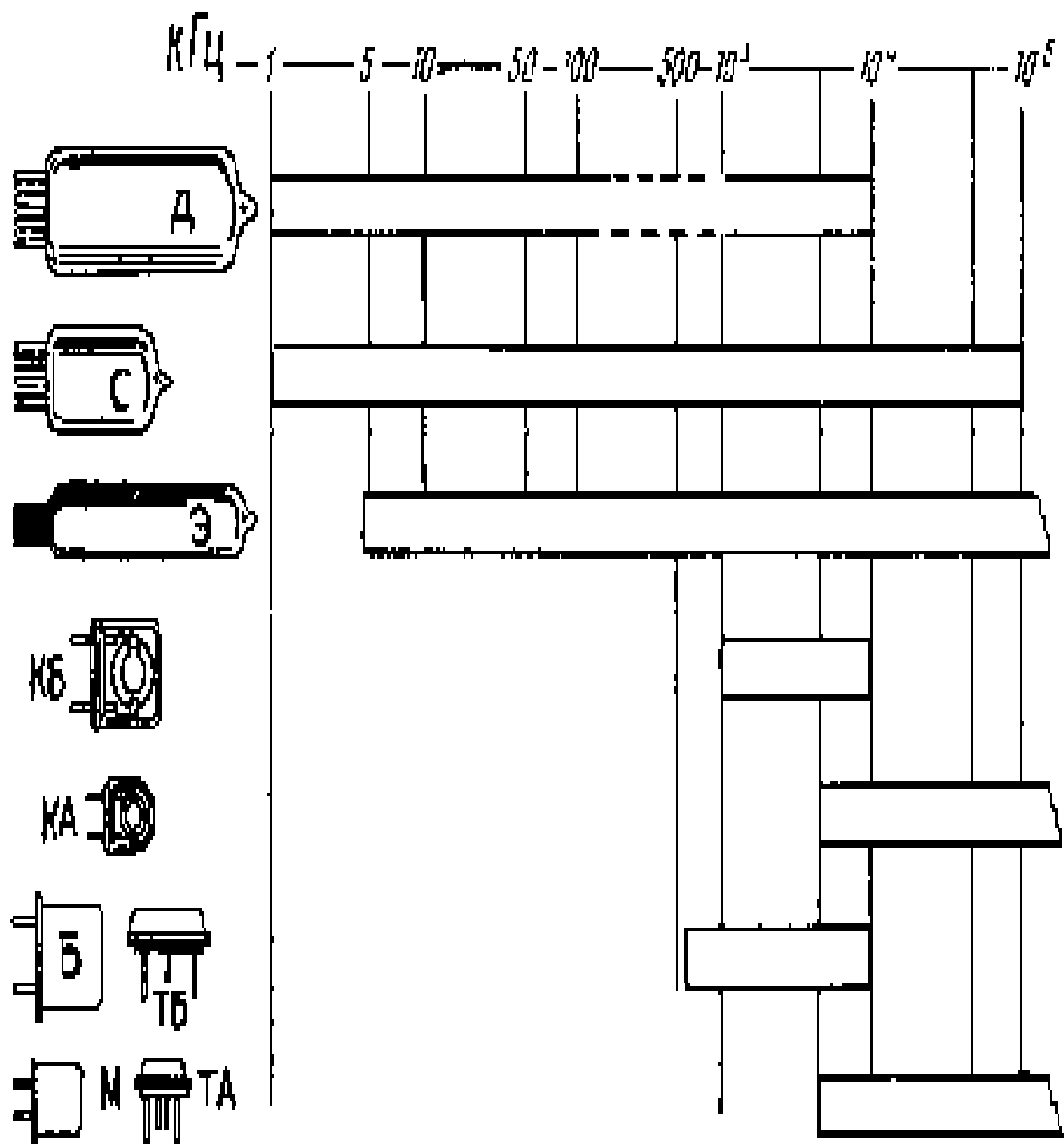


Рисунок 3.9 – Діаграма, що ілюструє переважне використання резонаторів у корпусах деяких типів за діапазонами частот

Сучасні кварцові елементи, що є основним вузлом резонатора, з коливаннями зрушення по товщині виготовляють плоскопаралельної або спеціальної форми, що є відмінними від плоскопаралельної (рисунок 3.10).

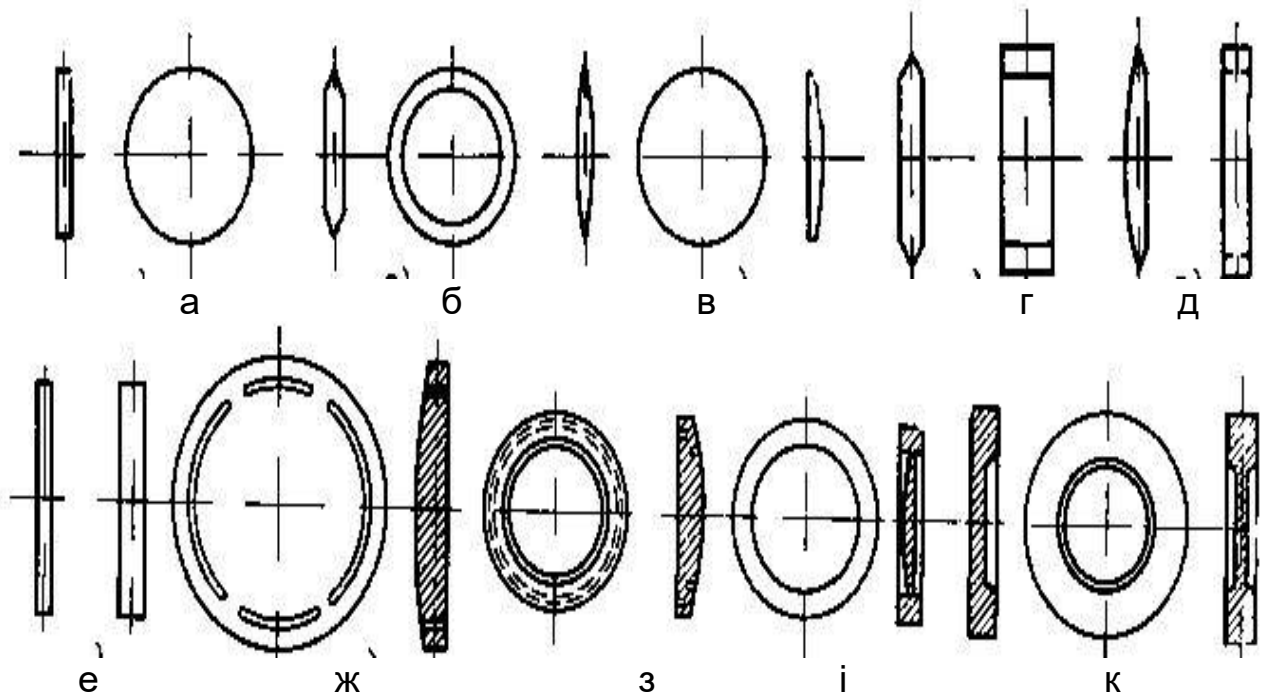


Рисунок 3.10 – Конструкція ПЕ ТСК: а – круглий плоский; б – круглий з фасками; в – круглий лінзовий (одно- та двоопуклий); г – прямокутний з фасками; д – прямокутний лінзовий, е – полосковий; ж – п'єзоелемент БВА; з – КуАС; і – канавковий підвіс; к – мембранний

Недоліками КЕ плоскопаралельної форми є:

- можливість витоку енергії акустичних коливань до кріплень КЕ;
- взаємозв'язок з видами коливань, що є відмінними від коливань зсуву по товщині;
- низька добротність;
- нерегулярні зміни опору резонатора в діапазоні температур;
- нерегулярні зміни частоти в діапазоні температур.

Основна перевага КЕ – відносна простота виготовлення і низька вартість.

Для усунення недоліків застосовують такі конструктивні кроки:

а) КЕ у вигляді одно- і двоопуклих лінз (рисунок 3.10, в). Товщина КЕ описується рівнянням

$$2h = 2h_0 \left( 1 + \frac{x_1^2 + x_3^2}{4Rh_0} \right),$$

де  $R$  – радіус КЕ;  $2h_0$  – товщина плоскопаралельного КЕ;  $x_1$  і  $x_3$  – поточні координати в напрямку площини пластини. Для цієї форми КЕ є характерними висока добротність, невеликий вплив кріплення на параметри резонатора;

б) КЕ у вигляді прямокутно-лінзової форми (рисунки 3.10, д). КЕ зрізу  $u \times b \pm (14^\circ \pm 1^\circ) / (32^\circ \pm 1^\circ)$  вирізняється тим, що пластина усічена двома рівнобіжними центральної осі порожнинами, що утворюють із кристалографічною віссю  $Z$  кут від  $-15^\circ$  до  $+5^\circ$ . Довжину і ширину КЕ вибирають з умови:

$$\sqrt{8 \cdot R \cdot 2h} \geq L \geq 6.9(2h + 1\text{мм});$$

$$\sqrt{8 \cdot R \cdot 2h} \geq B \geq 4.6(2h + 1\text{мм}),$$

де  $2h$  – мінімальна товщина пластини, мм;  $R$  – радіус кривизни, мм;

в) КЕ східчастої форми забезпечує відображення частини енергії і її локалізацію в піделектродній області й вирізняється тим, що глибина виїмок дорівнює половині товщини пластинки, що забезпечує підвищення добротності й технологічності;

г) КЕ з локальним кульовим виступом у центрі пластини, виконаний у вигляді круглої пластини з локальним виступом у формі кульового сегмента, діаметр основи якого  $\frac{1}{3D} \leq d_c \leq \frac{2}{3D}$ , радіус  $R \leq 1,8 \cdot 10^{-2} \cdot D \frac{d_c^3}{2h}$ , де  $D$  – діаметр КЕ;  $2h$  – товщина плоскопаралельного КЕ заданої частоти. Виступ сформовано у вигляді сходинок (від трьох до семи), виконаних травленням. Така оптимізація лінзового КЕ дозволяє зменшити його діаметр майже в два рази (з 11 до 6 мм для частоти 5 мм.). Діапазон робочих частот таких резонаторів лежить у межах 1...10 МГц;

д) кільцевий КЕ, форма якого сприяє локалізації коливань у середній активній зоні, при цьому зменшується зв'язок коливань зсуву по товщині зі згинальними коливаннями. КЕ може бути виконаним з однією або двома опуклими протилежними торцевими поверхнями. Діаметр кільцевого КЕ визначають зі співвідношення

$$d_{cp} = \frac{2h_0 V 2h}{\pi K_f},$$

де  $2h_0$  – максимальна товщина КЕ;  $2h$  – змінна товщина КЕ;  $V$  – швидкість поширення пружних хвиль;  $K_f$  – частотний коефіцієнт.

## 4 СХЕМИ КВАРЦОВИХ ГЕНЕРАТОРІВ

### 4.1 Класифікація кварцових генераторів

Кварцові генератори можуть бути поділені за такими ознаками:

**за частотами збудження резонаторів:**

- схеми послідовного резонансу (резонатор працює поблизу частоти послідовного резонансу);
- схеми паралельного резонансу (резонатор працює на частоті, близькій до частоти паралельного резонансу);

**за характером збудження резонатора:**

- на основній частоті;
- на коливаннях вищих порядків.

Коливання вищих порядків широко використовують у високостабільних (прецизійних) кварцових генераторах і у випадках, коли необхідно одержати високі частоти (понад 15...400 МГц) без застосування помножувачів частоти;

**за місцем ввімкнення резонатора** триточкові схеми поділяють на такі:

- з резонатором між базою і колектором транзистора;
- резонатором між базою і емітером транзистора;
- резонатором між емітером і колектором транзистора.

Провідні виробники п'єзоелектронних приладів генерації й селекції частоти такі як: BAT «Морион» (Росія), Vectron Int., Geyer Electronic, Rakon Limited [3, 4, 6, 10] та інші, на сьогоднішній день випускають стандартні (базові) генератори таких основних класів:

XO – Crystal Oscillators, група базових генераторів;

SO – SAW Oscillators – на поверхневих акустичних хвилях;

PXO (Programmable Quartz Oscillators) – програмовані;

PXO (Precision Quartz Oscillators) – прецизійні кварцові;

VCXO, VCSO (Voltage Controlled Crystal Oscillators, Voltage Controlled SAW Oscillators) – керовані напругою за частотою;

TCXO (Temperature Controlled Crystal Oscillators) – термокомпенсовані;

EMXO (Evacuated Miniature Crystal Oscillators) – вакуумовані мініатюрні кварцові;

OCXO (Oven Controlled Crystal Oscillators) – термостатовані з автоматичною стабілізацією температури резонатора;

DOCXO (Double Oven Controlled Crystal Oscillators) – прецизійні з подвійним термостатуванням;

FCXO (Frequency Controlled Crystal Oscillators) – функціональні модулі для систем стандартів SONET/SDH, ATM, DWDM, xDSL та ін.

На рисунку 4.1 показано шкалу точності, розбиту на області застосу-

вання різних типів генераторів. Як видно з рисунка, кварцові генератори задовольняють всім вимогам забезпечення опорного сигналу – від стандартних масових застосувань (точність  $10^{-4} \dots 10^{-5}$ ) до еталонних пристроїв (точність  $10^{-9} \dots 10^{-10}$ ).

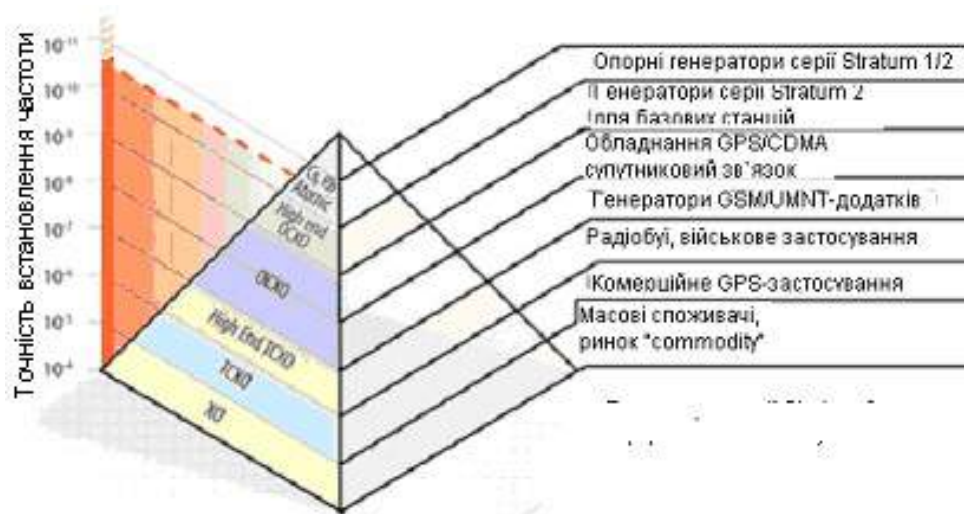


Рисунок 4.1 – Спектр основних класів генераторів у розрізі діапазонів точності частоти і їх застосування

## 4.2 Класифікація і еквівалентні схеми кварцових генераторів

Схема з кварцовим резонатором, що знаходиться між базою і колектором транзистора, називається ємнісною триточкою. Узагальнену еквівалентну схему КГ, зібраного за такою схемою, показано на рисунку 4.2,а.

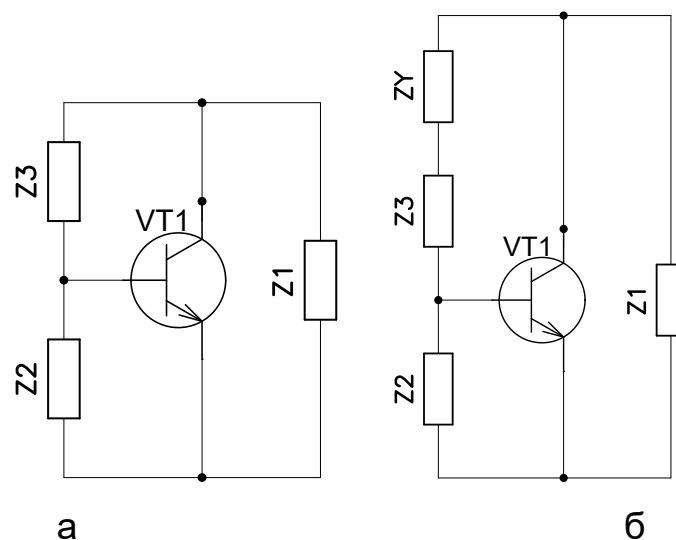


Рисунок 4.2 – Узагальнена еквівалентна триточкова схема КГ

Якщо резонатор знаходиться між базою і емітером або емітером і колектором, схеми називаються індуктивною триточкою.

Якщо послідовно з резонатором немає реактивного опору або цей опір має ємнісний характер, то резонатор збуджується між частотами послідовного і паралельного резонансів.

Якщо резонатор розміщено між базою і емітером або емітером і колектором, схеми називаються індуктивною триточкою. Якщо послідовно з резонатором немає реактивного опору або цей опір має ємнісний характер, то резонатор збуджується на частоті між частотами послідовного і паралельного резонансів.

При індуктивному характері реактивного опору, який підключено послідовно з резонатором, останній може збуджуватися на частоті нижче або вище частоти послідовного резонансу; при обумовленому значенні цього реактивного опору резонатор збуджується на частоті, що збігається з частотою послідовного резонансу.

Найбільш широко в таких схемах використовується ємнісна триточка. Вона дозволяє одержати максимальну стабільність частоти КГ, більш проста в регулюванні, надійніша порівняно з індуктивними триточками.

Схеми з кварцовим резонатором в ланцюзі зворотного зв'язку показано на рисунку 4.3. Резонатор у таких генераторах збуджується на частоті, близькій до частоти послідовного резонансу. Схеми з кварцовим резонатором у ланцюзі зворотного зв'язку менш критичні щодо значення динамічного опору резонатора порівняно з триточковими схемами. Резонатор можна застосовувати з великим  $R_1$ .

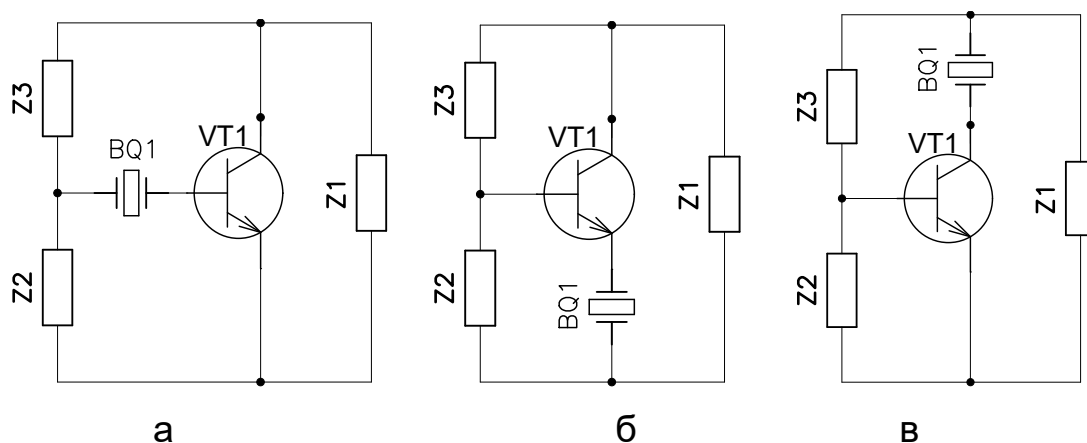


Рисунок 4.3 – Еквівалентні схеми КГ із кварцовим резонатором у ланцюгах зворотного зв'язку: а – у ланцюзі бази; б – у ланцюзі емітера; в – у ланцюзі колектора

При тій же потужності, що розсіюється на кварцовому резонаторі, ці

схеми дозволяють одержати більший рівень напруги при навантаженні КГ. Однак стабільність частоти КГ, виконаного за схемою з кварцовим резонатором у ланцюзі зворотного зв'язку, нижче стабільності при використанні триточкових схем. Тому ці схеми застосовуються значно рідше порівняно з триточковими схемами (рисунок 4.4)

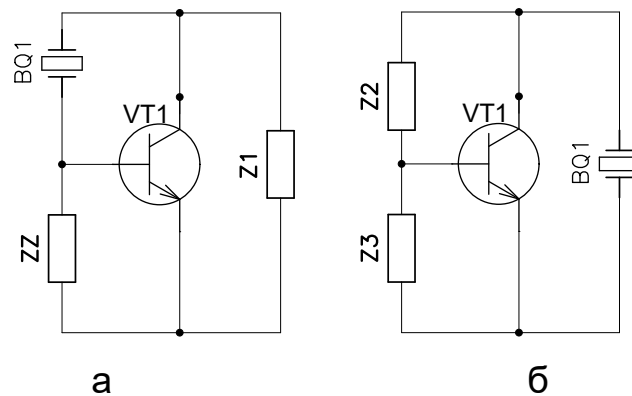


Рисунок 4.4 – Еквівалентні триточкові схеми КГ:  
а – ємнісна; б – індуктивна

Основним співвідношенням, що описує стаціонарний режим КГ, є рівняння стаціонарного режиму:

$$S\gamma_1(\theta) \exp(i\varphi_s) Z_k=1, \quad (4.1)$$

де  $S$  – крутість апроксимованої статичної характеристики колекторного струму транзистора;

$\theta$  – високочастотний кут відсічки;

$\gamma_1(\theta)$  – коефіцієнт розкладання першої гармоніки косинусоїдального імпульсу;

$\varphi_s$  – фаза усередненої за період коливань крутості колекторного струму  $S\gamma_1(\theta)$ ;

$Z_k$  – керуючий опір автогенератора.

Запишемо співвідношення для розрахунку елементів частотозадавального ланцюга КГ, зібраного за ємнісною триточкою, в якій послідовно з резонатором ПЕ1 введено елемент керування частотою генератора  $Z_k$  (рисунок 4.2,б).

Керуючий опір КГ

$$Z_y = KZ_1 \frac{Z_2 + Z_{yH} + Z_{KB}}{Z_1 + Z_2 + Z_{yH} + Z_{KB}},$$

де  $Z_{KB} = R_{KB} + iX_{KB}$  – повний еквівалентний опір кварцового резонатора;  
 $Z_1, Z_2$  – повні опори елементів ланцюга зворотного зв'язку;  
 $Z_{y.H}$  – повний опір елемента керування частотою КГ;

$$K = -\frac{Z_2}{Z_2 + Z_{yH} + Z_{KB}} \text{ – коефіцієнт зворотного зв'язку;}$$

$$Z_y = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_{yH} + Z_{KB}}.$$

Модуль керуючого опору генератора в сталому режимі

$$|Z_y| = \frac{1}{S_{\gamma 1}(\theta)} = \frac{X_1 X_2 (1 - \operatorname{tg} \varphi_1 \operatorname{tg} \varphi_2) [1 - \operatorname{tg}(\varphi_1 + \varphi_2) \operatorname{tg} \varphi_s]}{R_1 + R_2 + R_{yH} + R_{KB}} \cos \varphi_s,$$

де  $X_1, X_2$  і  $R_1, R_2$  – реактивні й активні складові  $Z_1$  і  $Z_2$ ;

$R_{yH}$  і  $R_{KB}$  – активні опори керуючого елемента і резонатора відповідно;

$\varphi_1$  і  $\varphi_2$  – фази  $Z_1$  і  $Z_2$  відповідно;

$\operatorname{tg} \varphi_1 = R_1/X_1$ ;

$\operatorname{tg} \varphi_2 = R_2/X_2$ ;

$\varphi_s$  – фаза крутості транзистора.

Частота КГ, виконаного за схемою ємнісної триточки відповідно до узагальненої схеми (рисунк 2.8), у загальному випадку не дорівнює частоті послідовного резонансу резонатора  $f_k$  і визначається з виразу

$$f = f_k \frac{1 - \frac{1}{2} m x_{\text{ГПОВН}}}{1 - x_{\text{ГПОВН}}},$$

де  $x_{\text{ГПОВН}} = 1 + x_2 + x_{yH} - (r_x + r_2 + r_{yH}) \operatorname{tg}(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_s)$  – значення приведенного повного реактивного опору КГ;

$x_1, x_2, x_y, r_1, r_2$  і  $r_{yH}$  – приведені реактивні й активні складові;

$Z_1, Z_2$  і  $Z_{yH}$  – відносні безрозмірні величини, що дорівнюють відношенню опорів до модуля реактивного опору ємності резонатора  $C_0 |XC_0| = |1/\omega C_0|$ .

При зміні реактивного опору, ввімкненого послідовно з резонатором, зміна частоти КГ визначається виразом

$$\Delta f = -\frac{1}{2} m f_k \frac{\Delta x_i (1 - e)^2}{1 - \Delta x_i (1 - t)^2},$$

де  $\Delta x_n = \Delta x / |x C_0|$  – приведені значення зміни реактивного опору.

Останнім виразом користуються при розрахунку керованих за часто-

тою КГ: частотно-модульованих, з частотною маніпуляцією термокомпенсованих та інших, тобто у всіх випадках, коли за відомою зміною реактивного опору  $\Delta x$  необхідно визначити зміну частоти  $f$ , навпаки, коли за заданою зміною частоти  $\Delta f$  необхідно визначити необхідну зміну реактивного опору  $\Delta x$ . Цей же вираз використовується і для розрахунку дестабілізуючого впливу зміни реактивних опорів, увімкнених послідовно з резонатором.

### 4.3 Принципові схеми КГ

Кварцові генератори, в яких кварцовий резонатор використано як елемент контуру з індуктивною реакцією, називають осциляторними, а генератори, в яких кварцовий резонатор введено у ланцюг зворотного зв'язку, називають генераторами послідовного резонансу.

Типову схему генератора, стабілізованого кварцом, на послідовному резонансі показано на рисунку 4.5,а; на високих частотах – на рисунку 4.5,б.

Елементи R1, R2, R3, C1 схеми призначено для забезпечення необхідного режиму за постійним струмом і термостабілізацією; елементи R3C2 є елементами ПЗЗ; кварцовий резонатор BQ1 – частотозадавальний ланцюг; конденсатори C3, C4, C5 – елементи настроювання.

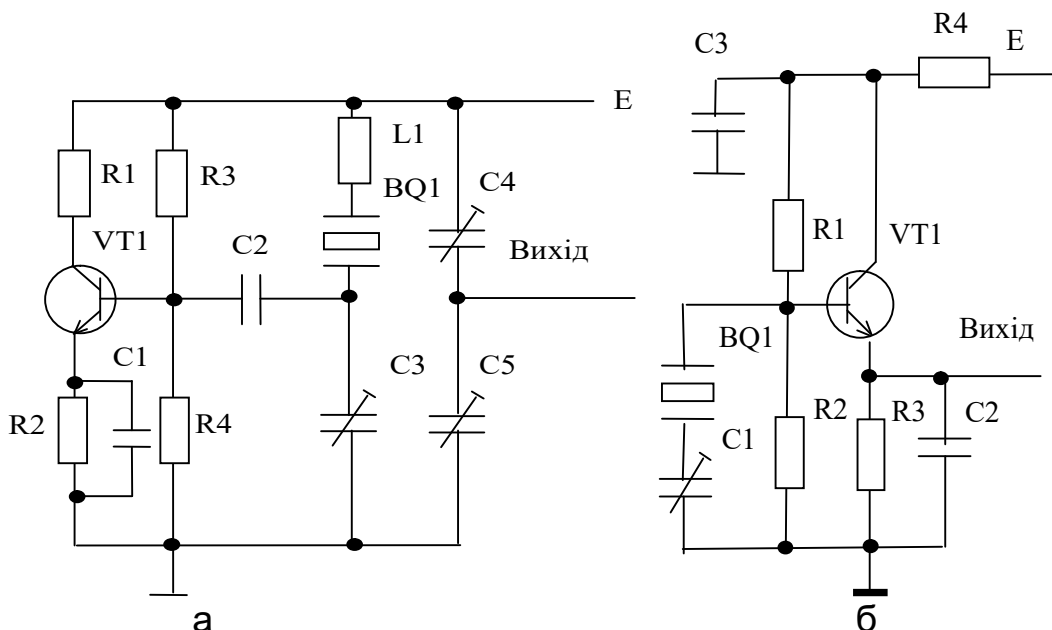


Рисунок 4.5 – Типова схема генератора, стабілізованого кварцом:  
а – на послідовному резонансі, б – варіант на високих частотах

Осциляторну схему кварцового генератора з кварцом між колектором і базою, виконану за схемою з заземленим емітером (ємнісною триточкою), зображено на рисунку 4.6,а.

У наш час знаходить широке застосування в діапазоні частот до 22 МГц ємнісна триточка при роботі резонатора на основній частоті і до 66 МГц при зрушенні на третій механічній гармоніці. Автогенератор із кварцовим резонатором між колектором і базою показано в схемі із заземленим за високою частотою емітером (рисунк 4.6,б).

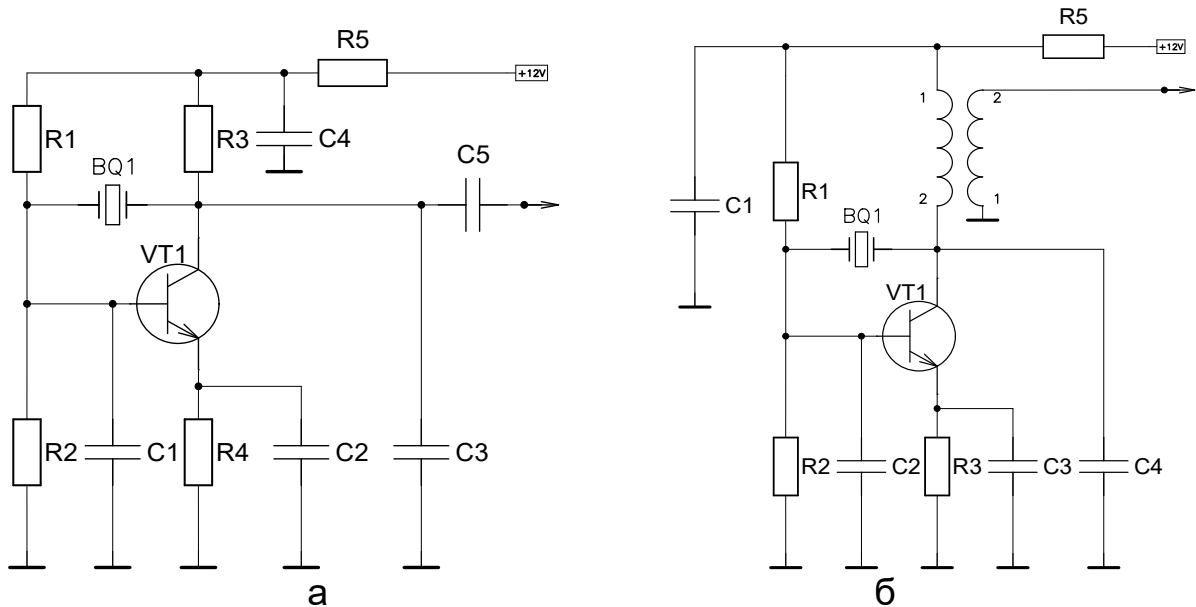


Рисунок 4.6 – Ємнісна триточка

Вплив змін реактивних параметрів транзистора, що залежать від напруги живлення і часу, послабляється із зростанням ємностей  $C1$ ,  $C3$ , тобто з наближенням робочої частоти автогенератора до  $F_s$ . Однак, з одного боку, надмірне збільшення ємностей призводить до погіршення умов самозбудження. З іншого боку, зі збільшенням ємностей зростає потужність, яка розсіюється на резонаторі, що веде до збільшення нестабільності частоти, яка генерується. За технічними умовами потужність, що розсіюється на резонаторі, обмежена 1...2 мВт. Однак у діапазоні частот 1...22 МГц частота послідовного резонансу пропорційна  $(0,5...2) \cdot 10^9$  Гц/мкВт, тому у високостабільних генераторах потужність на резонаторі варто обмежити величиною 0,1...0,2 мВт.

На високих частотах, де реактивний опір рівнобіжної ємності резонатора менше реактивного опору динамічної гілки кварцового резонатора, можливе самозбудження через рівнобіжну ємність  $C_p$ . Наявність індуктивності  $L1$  означає можливість виконання умови балансу фаз на частоті послідовного резонансу, а також у деякій області – розстроювання нижче частоти послідовного резонансу. Індуктивність  $L1$  забезпечує виконання балансу фаз в умовах, коли  $M < 2$ , і еквівалентний реактивний опір кварцу не може мати індуктивний характер. Це значить, що генератор із кварцом у контурі може працювати на більш високих частотах і більш високих ме-

ханічних гармоніках кварцового резонатора.

Для недопущення паразитного самозбудження через паралельну ємність  $C_p$ , що найбільше ймовірно на високих частотах і вищих механічних гармоніках, паралельно резонатору вмикають резистор  $R_1$ , що вносить втрати в контур паразитного самозбудження.

Знизити вимоги до реактивності кварцового резонатора на механічних гармоніках можна при використанні схем генераторів послідовного резонансу. При підвищенні частоти і номера гармоніки активність кварцового резонатора зменшується через збільшення його еквівалентного опору і підвищення шунтувального впливу статичної (рівнобіжної) ємності  $C_p$ , яку необхідно нейтралізувати або компенсувати. Нейтралізацію можна здійснити в мостовій схемі, де кварц поміщають в одне з плеч збалансованого моста. У схемі мостового автогенератора послідовного резонансу, зображеної на рисунку 4.7, при точному балансуванні моста зворотний зв'язок здійснюється тільки через динамічну гілку резонатора.

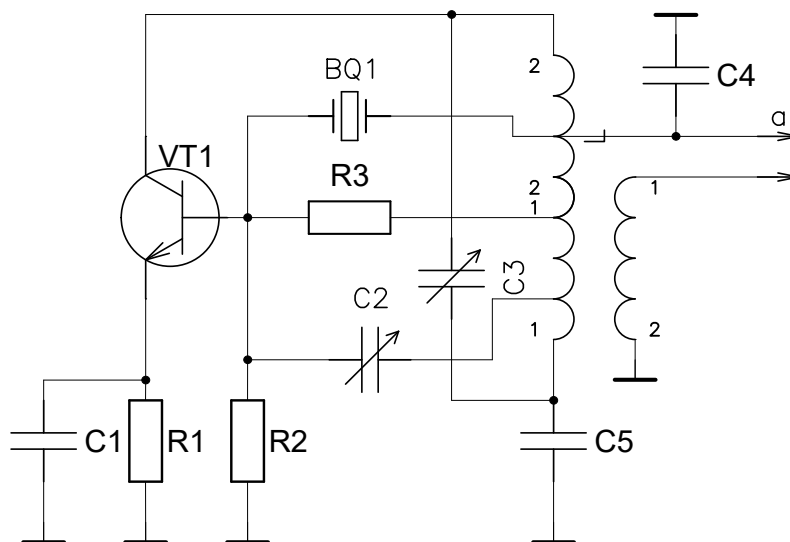


Рисунок 4.7 – Схема мостового автогенератора послідовного резонансу

На механічній гармоніці кварцового резонатора різко зростає провідність послідовної гілки резонатора, міст розбалансовується, і при відповідному виборі елементів схеми генератор збуджується. Контур  $L_1C_3$  має бути налагодженим на частоту необхідної гармоніки. У цій схемі вдається збудити кварцові резонатори на п'ятій або сьомій гармоніках. Схеми з нейтралізацією статичної ємності резонатора досить критичні до режиму роботи і складні в регулюванні, хоча їх можна застосовувати на частотах до 100 МГц. Верхня межа частот генератора з нейтралізацією обумовлена труднощами одержання великого еквівалентного опору контуру зі зростанням частоти, тому що початкова ємність контуру не може стати малою через наявність паразитних ємностей.

#### 4.4 Приклади реалізації промислових кварцових автогенераторів

Кварцовий автогенератор генератора високої частоти Г4-151 на платі 5.282.404 (рисунок 4.8) виконано за схемою ємнісної триточки на біполярному транзисторі за СЗЕ на частоті 10 МГц.

Особливістю підключення КР у ємнісних триточках є зменшення його резонансної частоти  $f_r$  за допомогою послідовно ввімкненої індуктивності L1 для забезпечення індуктивної реакції резонатора на частоті резонанса. Це забезпечує генерування частоти автогенератора, що дорівнює резонансній частоті КР. Особливістю схеми на рисунку 4.8 є відсутність конденсатора між колектором і емітером транзистора.

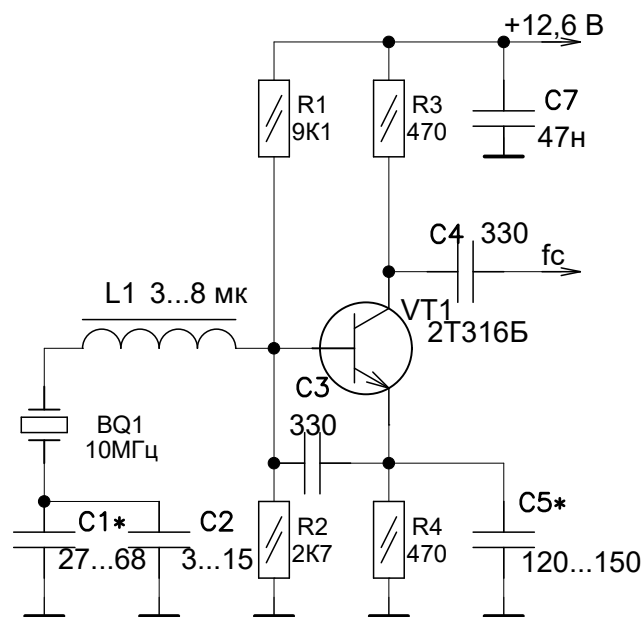


Рисунок 4.8 – Кварцовий автогенератор генератора Г4-151

На рисунках 4.9 – 4.11 показано принципові електричні схеми термостатованих опорних кварцових автогенераторів, керованих напругою (OCVCXO) частотомірів.

На рисунку 4.9 зображено схему OCVCXO частотоміра ЧЗ-34 (виконання І23.261.136).

Автогенератор виконано за схемою ємнісної триточки на біполярному транзисторі за СЗК, частота дорівнює 1 МГц. Кварцовий резонатор поміщено в термостат. На транзисторах VT2, VT3 виконано попередній підсилювач і автоматичне регулювання амплітуди (АРА) напруги сигналу автогенератора. Амплітудний детектор АРА побудовано з використанням діодів. Випрямлену діодами напругу АРА через резистор R2 подають на базу транзистора VT1, при цьому струм через транзистор змінюється і амплітуда автоколивань стабілізується. АРА застосовано для стабілізації струму КР та забезпечення підтримки з великою точністю заданої потужності

розсіювання у КР, що зменшує нестабільність частоти автогенератора.

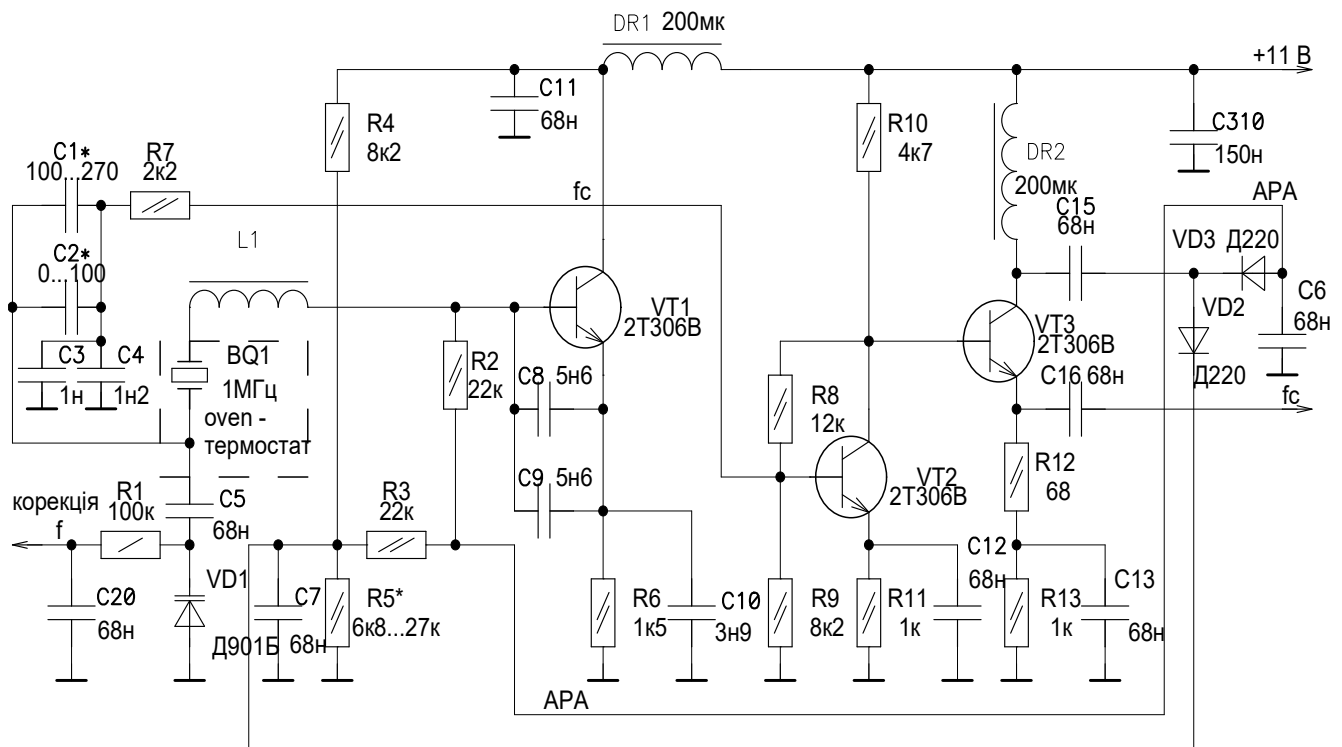


Рисунок 4.9 – Кварцовий автогенератор ОСVCXO частотоміра ЧЗ-34

На рисунку 4.10 показано схему ОСVCXO частотоміра ЧЗ-57.

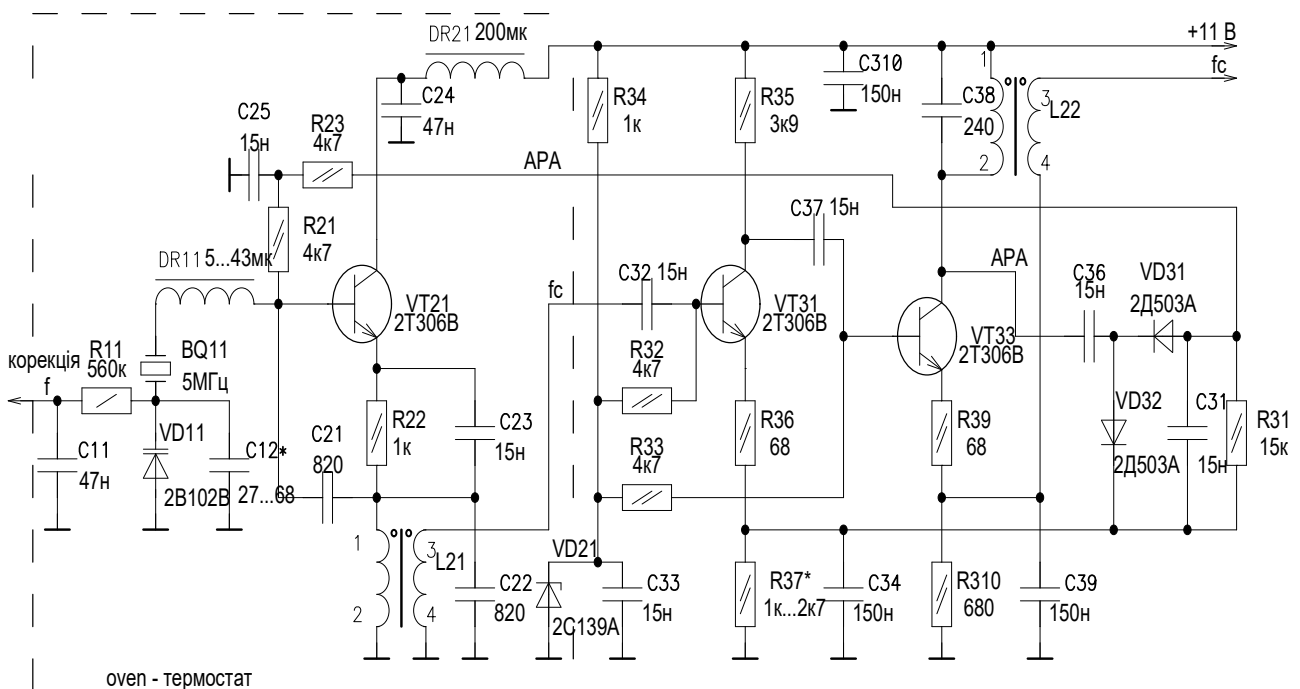


Рисунок 4.10 – Кварцовий автогенератор ОСVCXO частотоміра ЧЗ-57

На рисунку 4.11 показано схему ОСВХО частотоміра ЧЗ-63.

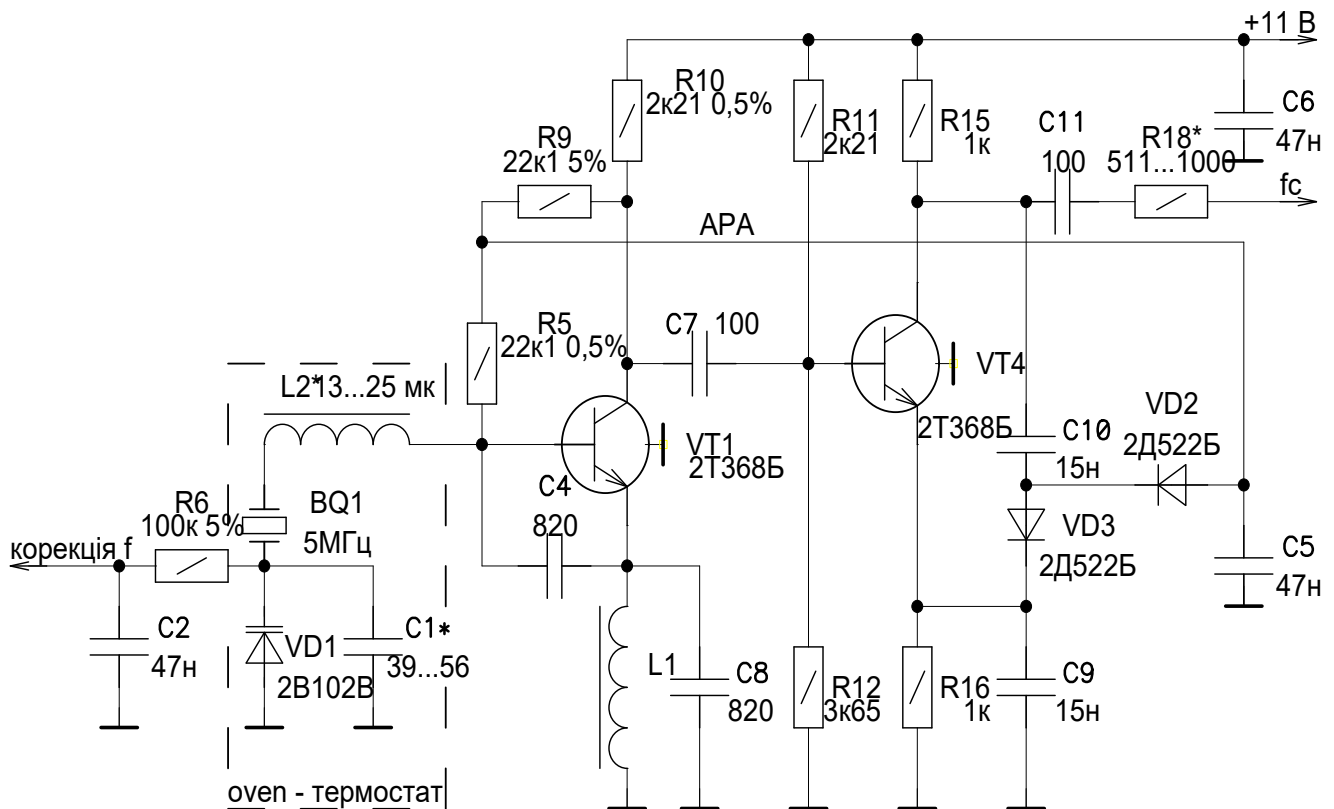


Рисунок 4.11 – Кварцовий автогенератор ОСВХО частотоміра ЧЗ-63

59

VD3. Сигнал генератора з колектора транзистора VT4 надходить на амплітудний детектор VD2, VD3, випрямляється і через резистор R5 надходить на базу транзистора VT1. При цьому струм через транзистор змінюється і амплітуда автоколивань стабілізується. Особливістю реалізації схеми є застосування точних (0,5 %) резисторів.

Схему кварцового автогенератора з КР у ланцюзі зворотного зв'язку застосовано у вимірнику АЧХ Ч1-42 (рисунок 4.12). Таку схему називають схемою Батлера. За такою схемою КР працює на резонансній частоті першої або непарної гармоніки.

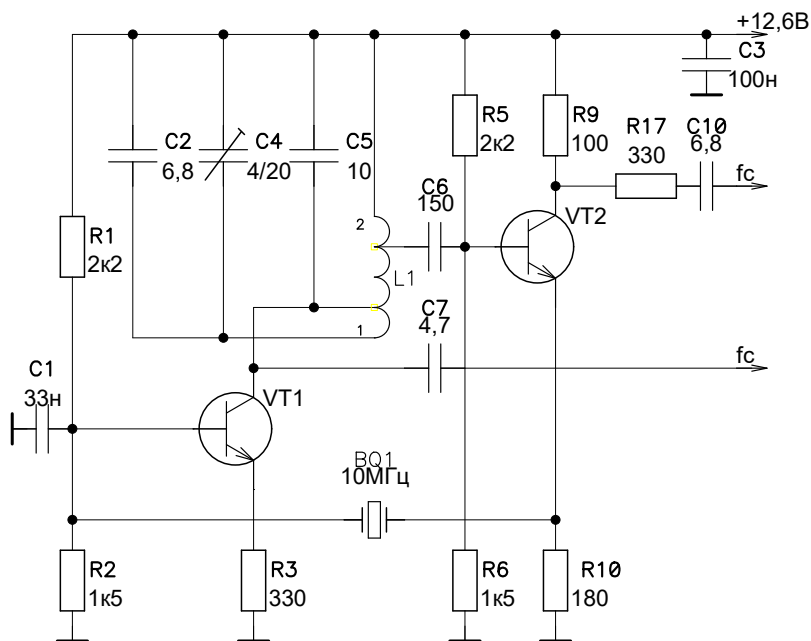


Рисунок 4.12 – Кварцовий автогенератор Х1-42 (схема Батлера)

Таку схему також застосовано в опорному кварцовому автогенераторі типу ОСВСХО частотоміра Ч3-34 (виконання І23.261.128Сп) (рисунок 4.13).

КР працює на резонансній частоті п'ятої механічної гармоніки, яка дорівнює 5 МГц. Транзистори автогенератора підключено за схемами: VT1 – СЗБ, VT2, VT3 – СЗЕ. Амплітудний детектор на діоді VD3 виконує АРА, тобто регулює робочу точку транзистора VT1.

На рисунку 4.14 показано схему кварцового генератора частотоміра Ч3-33 виконання І23. 261.003(004).

Автогенератор – ємнісна триточка, транзистор VT1 підключено за СЗБ. КР працює на першій гармоніці, що дорівнює 1 МГц.

Класичну схему кварцового автогенератора – ємнісну триточку з біполярним транзистором структур р-п-р і п-р-п з підключенням транзистора за СЗЕ застосовано у калібраторах аналізаторів спектра С4-25, С4-45 (рисунок 4.15).

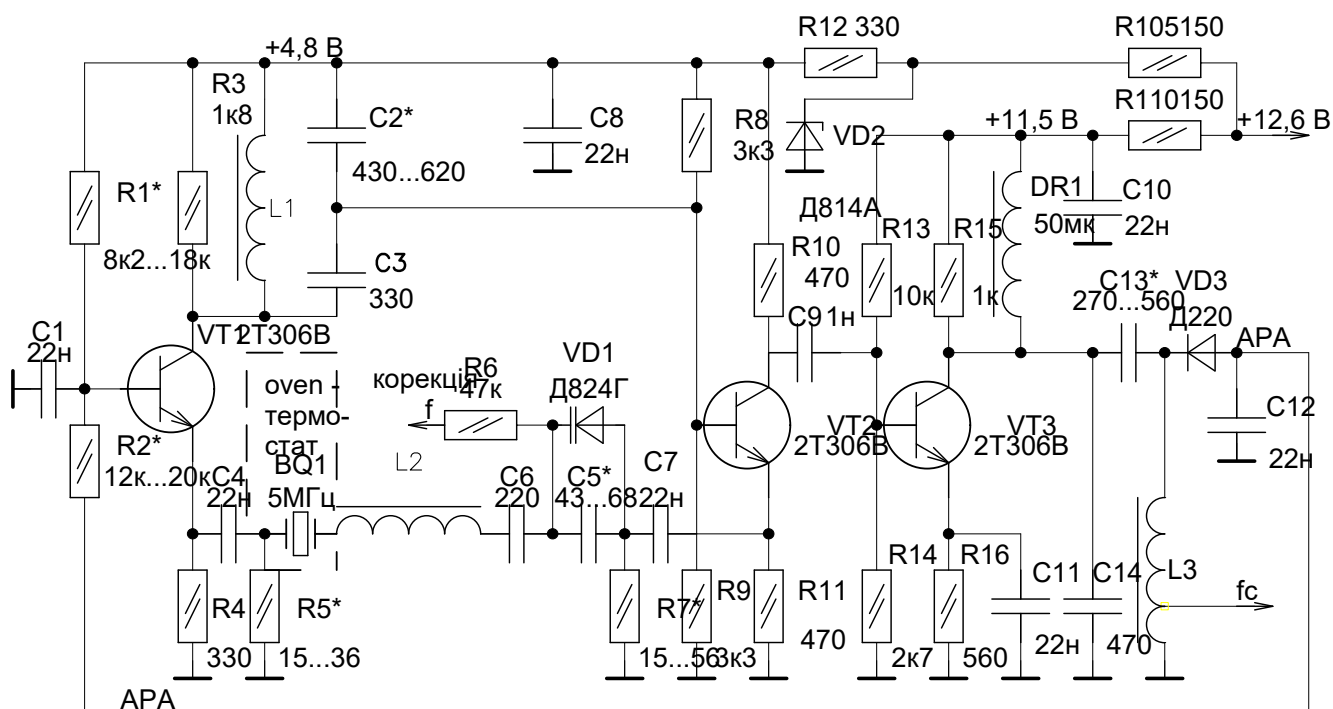


Рисунок 4.13 – Кварцовий автогенератор ОСVCSXO частотомера ЧЗ-34

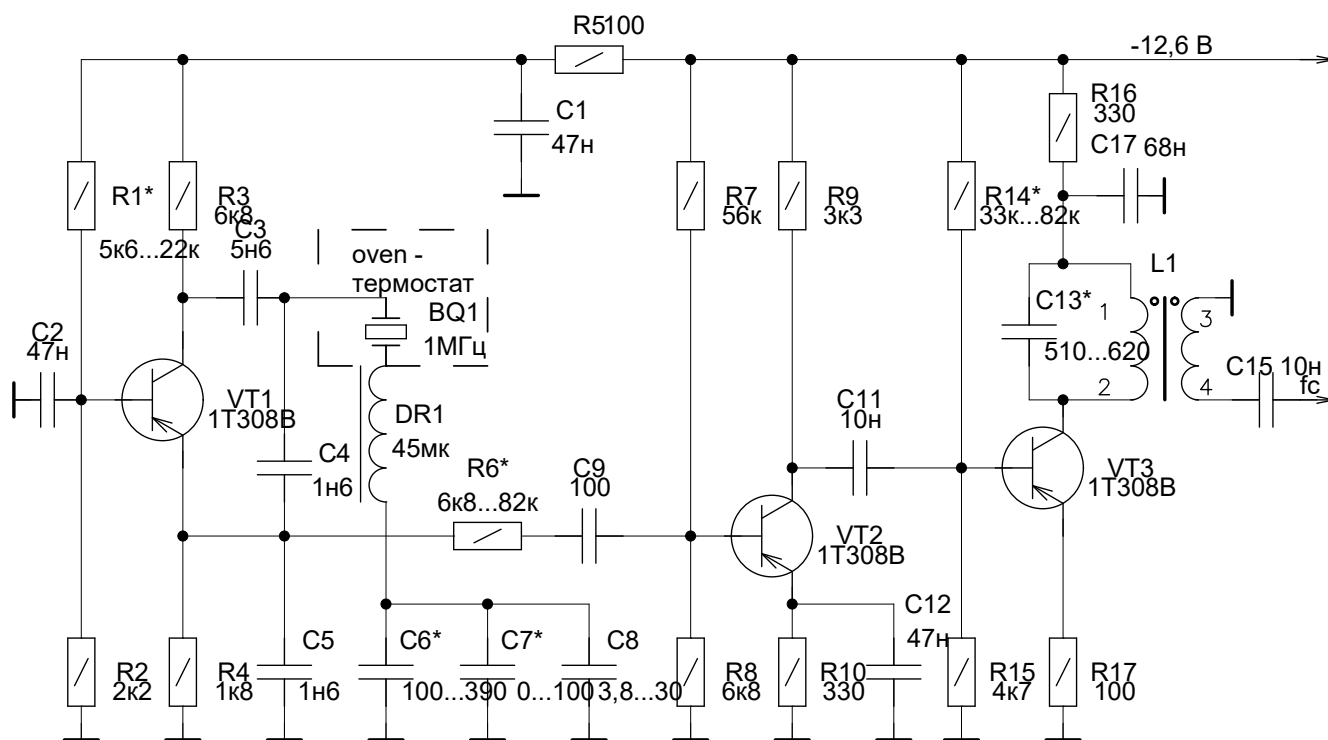


Рисунок 4.14 – Кварцовий автогенератор ОСXO частотомера ЧЗ-33

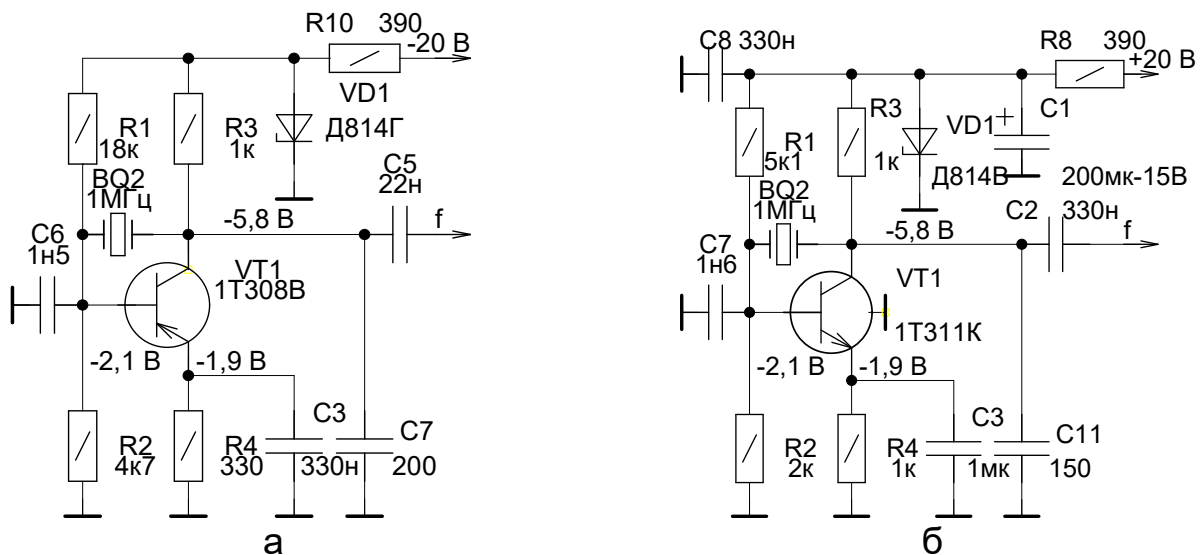


Рисунок 4.15 – Кварцовий автогенератор XO аналізаторів спектра:  
а – C4-25; б – C4-45

В автогенераторі КР підключено безпосередньо між базою і колектором транзистора і працює вище резонансної частоти резонатора – на частоті, де імпеданс резонатора має індуктивну реакцію. Підстроювання частоти є непередбаченим. Автогенератор має схему кварц-канал і має частоти генерації 0,1; 1 і 10 МГц, при цьому до автогенератора перемикачем підключають відповідний КР зі своїм ланцюгом С6, С7.

Опорний кварцовий генератор «Гіацинт-М» ИГ2.210.003 ОСХО (рисунок 4.16) виконано за схемою ємнісної триточки.

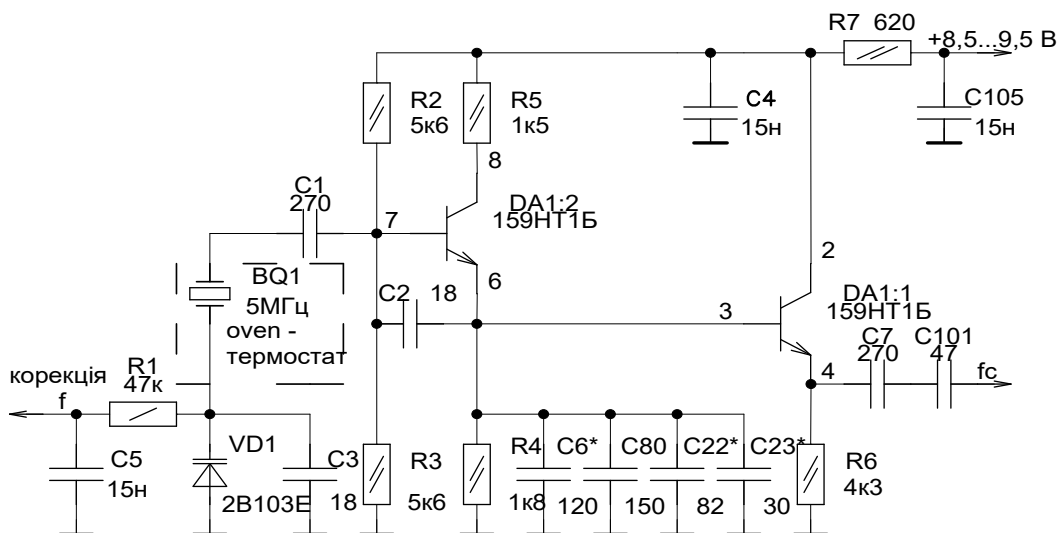


Рисунок 4.16 – Кварцовий автогенератор ОСХО «Гіацинт-М»

Основні параметри: частота – 5 МГц, короткочасова нестабільність частоти за 1 с –  $1 \times 10^{-10}$ .

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Аджемов, А. С. Многоканальная электросвязь и каналобразующая телеграфная аппаратура: учебник для техникумов [Текст] / А. С. Аджемов, А. И. Кобленц, В. Н. Гордиенко. – М. : Радио и связь, 1989. – 416 с.
2. Зеленка, И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: материалы, технология, конструкция, применение [Текст] / И. Зеленка ; пер. с чешск. И. А. Рокос. под. ред. И. С. Рез. – М. : Мир, 1990. – 584 с.
3. Каталог генераторов, резонаторов и фильтров [Электронный ресурс] : каталог – Режим доступа: <http://www.rakon.com/products/families/>. – 2015.
4. Кварцевые генераторы, фильтры, резонаторы, кристаллические элементы [Электронный ресурс] : ОАО «Морион». – 137 с. – Режим доступа : [http://www.morion.com.ru/full\\_catalog/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%202015.pdf](http://www.morion.com.ru/full_catalog/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%202015.pdf). – 2015.
5. Зеленский, А. А. Многочастотные кварцевые генераторы: учеб. пособие по курсовому и дипломному проектированию [Текст] / А. А. Зеленский, В. Ф. Солодовник, В. А. Шевелев. – Харьков: ХАИ, 1999. – 138 с.
6. Новые достижения VCXO / TCXO [Электронный ресурс] : Nihon Dempa Kogyo Co., Ltd. (NDK). – Режим доступа: [http://www.eltech.spb.ru/presentation/novie\\_dostizheniya\\_v\\_proizvodstve\\_vcxo\\_i\\_tcxo](http://www.eltech.spb.ru/presentation/novie_dostizheniya_v_proizvodstve_vcxo_i_tcxo). – 22.01.2015.
7. Колпаков, Ф. Ф. П'єзорезонансні пристрої. Фізичні принципи роботи, основні параметри та характеристики: консп. лекцій з курсу “Радіопередавальні пристрої” [Текст] / Ф. Ф. Колпаков, С. К. Підченко. – Хмельницький : ТУП, 2003. – 58 с.
8. Пьезоэлектрические резонаторы: справочник [Текст] / В. Г. Андросова, Е. Г. Бронникова, А. М. Васильев и др.; под ред. П.Е. Кандыбы и П.Г. Познякова. – М. : Радио и связь, 1992. – 392 с.
9. Резонатори п'єзоелектричні. Терміни, визначення та літерні позначення електричних параметрів: ДСТУ 3113-95. – Київ. : Держстандарт України, 1994. – 22 с.
10. Стабилизация частоты, модули, фильтры, датчики [Электронный ресурс] / Vectron International. – Режим доступа: <http://www.vectron.su/datasheets.htm>.
11. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство [Текст] / У. Титце, К. Шенк. – М. : Мир, 1983. – 512 с.
12. Хуторненко С. В. Толщинно-сдвиговые колебания пьезорезонансных элементов датчиков технологических параметров [Текст] / С. В. Хуторненко // Технология приборостроения. – 1996. – № 1. – С. 24-27.

## ДОДАТОК

### Класифікація випромінювання

Таблиця Д.1 – Перша обов'язкова характеристика класу випромінювання

| Тип модуляції основної несучої                                                                      | Символ |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Модуляція основної несучої відсутня                                                                 | N      |
| Амплітудна модуляція основної несучої:                                                              |        |
| дві бічні смуги, повна несуча                                                                       | A      |
| одна бічна смуга, повна несуча                                                                      | H      |
| те ж, ослаблена або перемінна несуча                                                                | R      |
| одна бічна смуга, придушена несуча                                                                  | J      |
| незалежна бічна смуга                                                                               | B      |
| залишкова бічна смуга                                                                               | C      |
| Кутова модуляція основної несучої: частотна модуляція                                               | F      |
| фазова модуляція                                                                                    | G      |
| Модуляція основної несучої одночасна або в попередньо заданій послідовності за амплітудою або кутом | D      |
| Імпульсна модуляція послідовністю:                                                                  |        |
| немодульованих імпульсів                                                                            | P      |
| імпульсів, модульованих за амплітудою                                                               | K      |
| шириною (тривалістю)                                                                                | L      |
| продовженням (фазою)                                                                                | M      |
| кутом протягом періоду імпульсів                                                                    | Q      |
| Комбінація вище згаданих або інших видів модуляції                                                  | V      |
| Інші, не зазначені вище випадки                                                                     | X      |

Таблиця Д.2 – Друга обов'язкова характеристика класу випромінювання

| Характер сигналів, що модулюють основну несучу                                                                                                                               | Символ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Сигнал, що модулює, відсутній                                                                                                                                                | 0      |
| Одноканальний квантовий або цифровий первинний сигнал без модулюючої піднесучої (без часового ущільнення)                                                                    | 1      |
| Одноканальний квантовий або цифровий первинний сигнал з модулюючою піднесучою (без часового ущільнення)                                                                      | 2      |
| Одноканальний аналоговий первинний сигнал                                                                                                                                    | 3      |
| Резерв для відображення інших видів сигналів                                                                                                                                 | 4...6  |
| Двох- або багатоканальний квантовий або цифровий сигнал                                                                                                                      | 7      |
| Аналоговий первинний сигнал                                                                                                                                                  | 8      |
| Складний одно- або багатоканальний первинний сигнал, що відображає одночасно або в заданій послідовності квантовану інформацію разом з одно- або багатоканальною інформацією | 9      |
| Інші, не зазначені вище випадки                                                                                                                                              | X      |

Таблиця Д.3 – Третя обов'язкова характеристика класу випромінювання

| Вид переданої характеристики                                      | Символ |
|-------------------------------------------------------------------|--------|
| Інформація не передається                                         | N      |
| Телеграфія:<br>для слухового прийому<br>для автоматичного прийому | A<br>B |
| Факсиміле (нерухомі графічні зображення)                          | C      |
| Передача даних, телеметрія, телекерування                         | D      |
| Телефонія (включаючи звукове радіомовлення)                       | E      |
| Телебачення (сигнал зображення)                                   | F      |
| Комбінація згаданих вище типів передач                            | W      |
| Інші, не зазначені вище випадки                                   | X      |

Таблиця Д.4 – Перша додаткова характеристика класу випромінювання

| Особливості первинних сигналів, що модулюють                                                                                                                                                            | Символ      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Двопозиційна кодова послідовність з посилками:<br>різними за числом і/або тривалістю<br>однаковими за числом і тривалістю без корекції помилок<br>однаковими за числом і тривалістю з корекцією помилок | A<br>B<br>C |
| Чотирьохпозиційна кодова послідовність, у якій кожна позиція являє собою посилку сигналу (один біт або більше)                                                                                          | D           |
| Багатопозиційна кодова послідовність, в якій кожна позиція є:<br>посилкою сигналу (один біт або більше)<br>знаком                                                                                       | E<br>F      |
| Звуковий сигнал радіомовної якості: моно, стерео, квадро                                                                                                                                                | H           |
| Мовний сигнал комерційної якості                                                                                                                                                                        | J           |
| Сигнал монохроматичного (чорно-білого) телебачення                                                                                                                                                      | M           |
| Сигнал кольорового телебачення                                                                                                                                                                          | N           |
| Комбінації вказаних вище випадків                                                                                                                                                                       | W           |
| Інші випадки, не зазначені вище                                                                                                                                                                         | X           |

Таблиця Д.5 – Друга додаткова характеристика класу випромінювання

| Вид ущільнення                              | Символ |
|---------------------------------------------|--------|
| Відсутнє                                    | N      |
| Частотне                                    | F      |
| Часове                                      | T      |
| Кодове                                      | C      |
| Комбінація частотного і часового ущільнення | W      |
| Інші види ущільнення                        | X      |

Навчальне видання

**Хуторненко Сергій Володимирович  
Акулінічев Артем Аркадійович**

## **ПРИСТРОЇ ГЕНЕРУВАННЯ ТА ФОРМУВАННЯ СИГНАЛІВ**

Частина 1

**ПРИСТРОЇ ГЕНЕРУВАННЯ СИГНАЛІВ**

Редактор В. М. Коваль

Зв. план, 2018

Підписано до видання 22.12.2018

Ум. друк. арк. 3,6. Обл.-вид. арк. 4,06. Електронний ресурс

---

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001