

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інформаційних технологій
Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (Магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації
Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
Шифр і назва спеціальності

на тему «Метод стабілізації параметрів кварцових радіотехнічних пристроїв»

ДРТР. 2021058.01.03 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група ТР_м-21-1


підпис

І.Ю. Буднік
Ініціали, прізвище

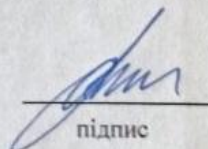
Керівник: докт. техн. наук, проф.


підпис

С.К. Підченко
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, проф.


підпис

С.К. Підченко
Ініціали, прізвище

12 12 2022 р.

Хмельницький, 2022

Хмельницький національний університет

Факультет інформаційних технологійКафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологійОсвітній рівень другий (магістерський)Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікаціїСпеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехнікаОсвітня-професійна програма Телекомунікації та радіотехнікаЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедрою ТМІТ« 05 » 09 2022р.**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ**Будніку Іллі Юрійовичу1 Тема роботи: *«Метод стабілізації параметрів кварцових радіотехнічних пристроїв»*керівник роботи Підченко Сергій Костянтинович, д.т.н, доцентЗатверджено наказом по університету від «1» липня 2022 р. № 832 Строк подання студентом роботи на кафедру: 25.11.2022 р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи – підвищення стабільності вихідних коливань КГ за рахунок контролю температурного стану КР, який працює в багаточастотному режимі збудження.**Об'єкт дослідження** – процес стабілізації параметрів КГ з урахуванням температурного стану КР.**Предмет дослідження** – метод стабілізації частоти вихідних коливань DDS синтезатора, де в якості опорного джерела коливань використовується КГ із компенсацією нестабільності частоти за рахунок контролю температури КР, що працює в багато частотному режимі збудження.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

1 Огляд існуючих методів та засобів стабілізації параметрів кварцових радіотехнічних пристроїв.

2 Математична модель кварцового генератора із стабілізацією температурного впливу.

3 Імітаційне моделювання системи стабілізації кварцового генератора на основі контролю температури.

4 Розробка системи стабілізації коливань DDS-синтезатора частоти на основі контролю температури кварцового резонатор опорного генератора.

Завдання отримав_

Буднік І.Ю.

Науковий керівник_

Підченко С.К.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
I.	Аналіз завдання на ДП	15.09.2022р.	Виконано
2.	Вступ. Розробка 1-го розділу	25.09.2022р.	Виконано
3.	Розробка 2-го розділу	15.10.2022р.	Виконано
4.	Розробка 3-го розділу	25.10.2022р.	Виконано
5.	Розробка 4-го розділу та висновки	15.11.2022р.	Виконано
6.	Корекція зауважень керівника роботи	20.11.2022р.	Виконано
7.	Підготовка доповіді та презентаційних матеріалів	25.11.2022р.	Виконано

Студент



підпис

Буднік І.Ю.

Ініціали, прізвище

Керівник роботи



Підпис

Підченко С.К.

Ініціали, прізвище

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	6
Вступ.....	7
1 Огляд існуючих методів та засобів стабілізації параметрів кварцових пристроїв	10
1.1 Фізичні основи та класифікація кварцових резонаторів.....	10
1.2 Використання кварцових резонаторів для тактування мікропроцесорів та мікроконтролерів.....	15
1.3 Класифікація дестабілізуючих факторів, які погіршують характеристики кварцових пристроїв	17
1.4 Огляд існуючих методів стабілізації параметрів кварцових радіотехнічних пристроїв	20
1.5 Постановка задач дослідження.....	21
Висновки до першого розділу.....	22
2 Математична модель кварцового генератора із стабілізацією температурного впливу.....	23
2.1 Модель кварцового резонатора як системи контролю.....	23
2.2 Еквівалентна електрична схема кварцового резонатора.....	26
2.3 Використання кварцових генераторів в схемах DDS синтезаторів частоти.....	31
2.4 Висновки до другого розділу	34
3 Імітаційне моделювання системи стабілізації кварцового генератора на основі контролю температури	35
3.1 Опис інтерфейсу користувача програми MATLAB/Simulink	35
3.1.1 Функціональні можливості програми MATLAB.....	35
3.1.2 Функціональні можливості середовища імітаційного моделювання Simulink	39
3.2 Імітаційна модель двочастотного кварцового генератора під дією зміни температури	46
3.3 Імітаційна модель двочастотного кварцового генератора з урахуванням температурного впливу	48

Висновки до третього розділу.....	51
4 Розробка системи стабілізації коливань DDS-синтезатора частоти на основі контролю температури кварцового резонатор опорного генератора	53
4.1 Структурна схема DDS синтезатора частоти на базі кварцового генератора із стабілізацією температури.....	53
4.2 Розробка системи температурного контролю кварцового генератора	54
4.3 Розробка системи температурної стабілізацію для DDS синтезатора частоти	59
4.3.1 Технічні характеристики DDS синтезатора AD9850	59
4.3.2 Імітаційна модель синтезатора DDS в середовищі MATLAB/Simulink.....	62
4.3.4 Розробка моделі стабілізатора та алгоритму стабілізації DDS синтезатора на основі контролю температури кварцового генератора.....	64
Висновки до четвертого розділу.....	71
Загальні висновки до роботи.....	73
Перелік джерел посилання	75
Додаток А. MATLAB-код для розрахунку температурних характеристик кварцового резонатора	78

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЧХ – Амплітудно-частотна характеристика

ФЧХ – Фазочастотна характеристика

КГ – Кварцовий генератор

КР – Кварцовий резонатор

ПЕЕ – П'єзоелектричний ефект

МП – Мікропроцесор

МК – Мікроконтролер

ЦАП – Цифро-аналоговий перетворювач

DDS – Direct digital synthesis

DAS – Direct Analog Synthesis

PLL – Phase Locked Loop

VCO – Voltage Controlled Oscillator

ВСТУП

Стабільність частоти коливань, які генерується кварцовими генераторами (КГ) є основним показником якості побудованих на їхній основі радіотехнічних пристроїв. Наприклад, типовим рішенням є використання КГ в якості джерела опорних коливань для цифрових синтезаторів прямого синтезу частоти (DDS). Незважаючи на те, що КГ характеризуються високою стабільністю вихідних коливань, такі пристрої також схильні до впливу низки дестабілізуючих факторів, наприклад старіння, вібраційного впливу, нестабільності теплового режиму тощо. Останній фактор є найбільш критичним і повинен бути врахований при побудові пристроїв, що функціонують в широкому діапазоні зміни температур.

Одним із підходів щодо вирішення проблеми компенсації нестабільності частоти КГ, що використовується в якості опорного генератора DDS, є використання багаточастотного режиму збудження кварцового резонатора (КР) для контролю його поточного стану.

Актуальність теми дослідження. Для забезпечення стабільності частоти вихідних коливань КГ (генерації стабільних часових інтервалі), актуальною задачею є розробка нових і удосконалення існуючих методів компенсації дестабілізуючих впливів.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення стабільності вихідних коливань КГ за рахунок контролю температурного стану КР, який працює в багаточастотному режимі збудження.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані та вирішені наступні задачі:

- аналіз та класифікація дестабілізуючих факторів, які негативно впливають на технічні характеристики КГ;

- аналіз існуючих методів підвищення ефективності КГ та методів компенсації температурного впливу;

- аналіз математичних моделей багаточастотних КР як багатовимірного об'єкту керування;

- розробка структурної схеми двочастотного КГ із цифровою стабілізацією параметрів;

- розробка алгоритму компенсації відхилення частоти коливання ГК, що використовується в якості джерела опорних коливань у складі DDS синтезатора частоти;

- розробка імітаційної моделі та проведення моделювання КГ, що працює в двочастотному режимі збудження та тестування алгоритму компенсації температурної нестабільності.

Об'єкт дослідження: процес стабілізації параметрів КГ з урахуванням температурного стану КР.

Предмет дослідження: метод стабілізації частоти вихідних коливань DDS синтезатора, де в якості опорного джерела коливань використовується КГ із компенсацією нестабільності частоти за рахунок контролю температури КР, що працює в багато частотному режимі збудження.

Методи дослідження: для вирішення поставлених задач були використані методи математичного моделювання, математичного аналізу, теорії електричних кіл, алгоритмізації та програмування.

Наукова новизна отриманих результатів: набув подальшого розвитку метод стабілізації параметрів КГ із компенсацією нестабільності частоти за рахунок контролю температури КР, що працює в багаточастотному режимі збудження. Метод стабілізації застосовано до опорного генератора DDS синтезатора частоти.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблена імітаційна модель двочастотного КГ із стабілізацією вихідних коливань за рахунок контролю температури КР;

- розроблена імітаційна модель DDS синтезатора частоти, який використовує двочастотний КГ із стабілізацією частоти коливань у якості

опорного генератора;

- розроблено алгоритм компенсації відхилення частоти DDS синтезатора, який використовує двочастотний КГ із стабілізацією частоти коливань у якості опорного генератора.

Апробація результатів дослідження. За результатами магістерської роботи, відповідно до теми дослідження, були підготовлені тези, які були опубліковані в збірнику тез доповідей XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук», яка проходила в м. Хмельницькому 18-19 листопада 2022 року.

1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ КВАРЦОВИХ ПРИСТРОЇВ

1.1 Фізичні основи та класифікація кварцових резонаторів

Кварцовий резонатор (КР) – це електромеханічний пристрій, що працює на основі п'єзоелектричного ефекту (ПЕЕ), який виникає у п'єзоелементі (ПЕ), та виготовлений із кристалу кварцу – кристалу двоокису кремнію [1]. Для будь-якого ПЕ характерним є поява електричного заряду внаслідок дії механічного навантаження, що називається прямим ПЕЕ, а також виникнення механічного напруження в результаті електричної поляризації – зворотний ПЕЕ [1].

До складу КР входить п'єзоелемент, тримач та корпус, в той час, коли сам п'єзоелемент складається із кристалічного елементу та електродів. Кристалічні елементи, що виготовлені із кристалів кварцу, мають форму бруска прямокутної форми, круглої лінзи чи пластини, або пластини прямокутної чи квадратної форми.

П'єзоелемент в КР здійснює механічні коливання, параметр яких залежать від його форми та структури.

Механічні коливання можуть бути наступних типів:

- коливання зсуву за контуром,
- коливання зсуву за товщиною,
- коливання косоного зсуву, згинання, кручення, стискання тощо.

Коливання цих типів можуть виникати на основній частоті (першій моді), а також на вищих гармоніках. Параметри та порядок вихідних коливань визначаються характеристиками даного конкретного резонатора.

Так-як кристал кварцу за своєю природою є анізотропним тілом, він має різні фізичні властивості за рівними напрямками осей координат [2].

Фізичні властивості кварцу описуються за допомогою кристалографічної системи координат, вздовж осей якої кристал має ті чи інші властивості.

Приклад зображення кристалу кварцу в кристалографічній системі координат показано на Рисунку 1.1.

Вісь Z на Рисунку 1.1 називається оптичною віссю та співпадає із повздожньою віссю кристала. Вздовж цієї осі п'єзоэффект не проявляється, а провідність вища ніж вздовж перпендикулярної осі.

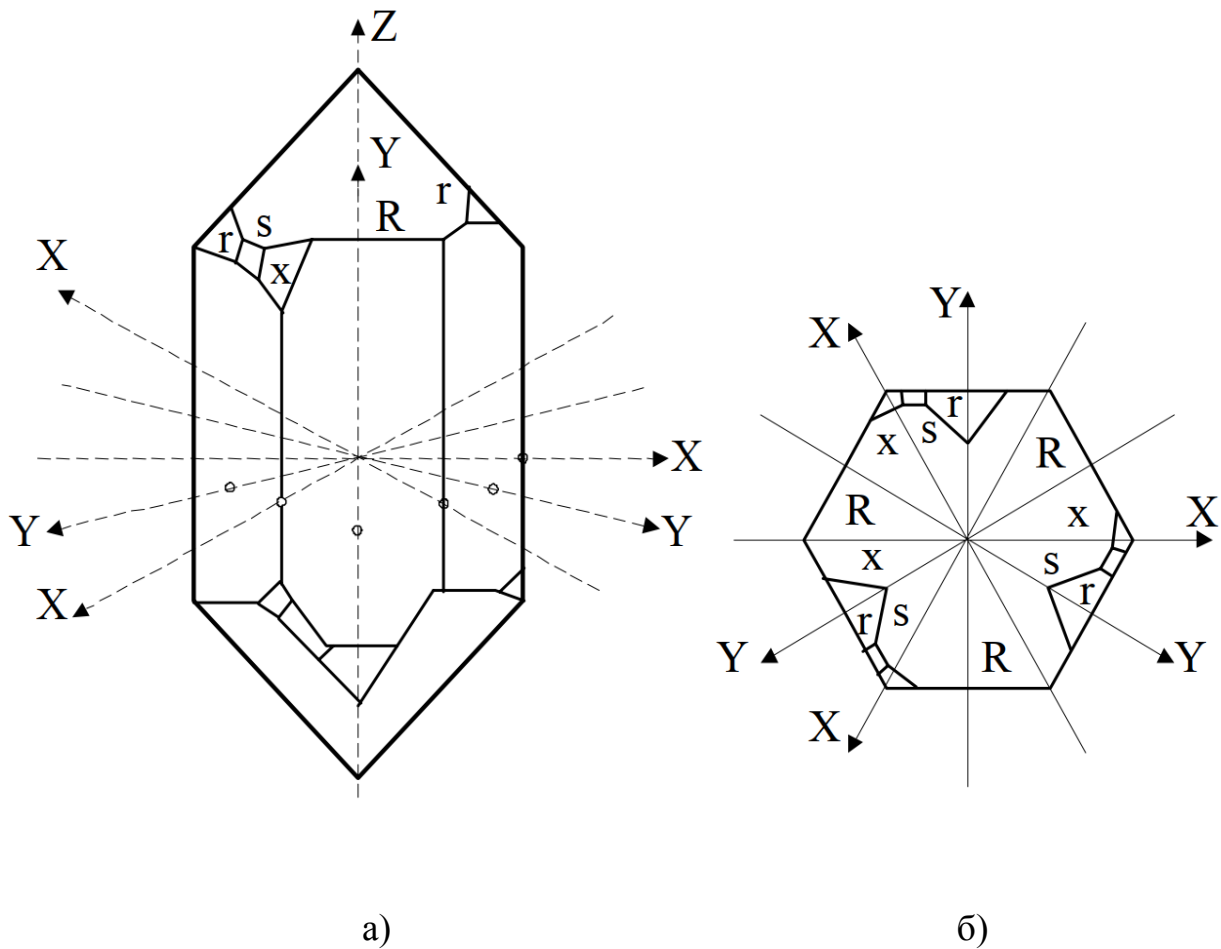


Рисунок 1.1 – Приклад зображення кристалу кварцу в кристалографічній системі координат

Для осі X , що направлена паралельно до однієї із бічних граней кристалу, характерним є інтенсивне виникнення електричних зарядів в результаті дії механічних сил. Ця вісь називається електричною, всього в кристалі кварцу є три такі осі.

Вісь Y називається механічною і направлена перпендикулярно до площини XZ (див. Рисунок 1.1). Всього в кристалі кварцу є три осі Y .

Початковою орієнтацією кристалу називається таке положення, при якому усі грані п'єзоелемента розміщені паралельні кристалографічним осям координат.

Початкова орієнтація позначається літерами x, y, z (двома із них). При такому позначенні перша літера вказує вісь, що є паралельною товщині п'єзоелемента, друга – вісь, яка паралельна довжині.

Далі, в результаті повороті навколо ребер отримуються різноманітні орієнтації косих зрізів [2].

Орієнтація п'єзоелемента по відношенню до граней, які утворюють відповідні кути із кристалографічними осями складається із першочергової орієнтації, до якої дописується справа ще одна, дві, або три букви – l, b, s . Ці літери вказують вздовж довжини, товщини, або ширина п'єзоелемента використовуються в якості осей першого та другого повороту із початкового положення [2].

Кути повороту навколо цих осей позначаються буквами α, β, γ , відповідно для кутів першого, другого та третього поворотів. Додатнім вважається кут повороту проти годинникової стрілки [2].

В процесі виготовлення кристали кварцу для КР можуть бути вирізані під різним кутом відносно кристалографічних осей X, Y та Z . Тип зрізу КР – це його орієнтація відносно кристалографічних осей кварцу, що визначає основні параметри резонатора.

Деякі типи зрізів кварцу, їхні позначення та основні характеристики наведені в Таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Типи зрізів кварцу, їхні позначення та основні характеристики

Тип зрізу	Кут орієнтації	Вид коливань	Форма	Част. коеф. N, кГц·мм	Діапазон частот, кГц
ухl/β° (АТ)	β = 34...35,5°	Зсув за товщиною	Лінза	1680...2060	460...5000
ухl/β° (АТ)	β = 35...35,5°	Зсув за товщиною	Плоска пластина	1670...15030	3000...36000 (до 300000 на гармоніках)
ухl/β° (БТ)	β = -48...-50°	Зсув за товщиною	Лінза, плоска пластина	2550...2660	2000...60000
ухbl/γ°/β° (ІТ)	β = 33...35° γ = -19°	Зсув за товщиною	Лінза, плоска пластина	1770...2100	500...40000
хys/α° (Х)	α = -5...+6,5°	Витягування за товщиною	Брусок	5525...6200	2...60
хys/α° (Х)	α = -2...+6,5°	Поздовжнє по довжині	Пластина	2760...2850	40...200
ухl/β°	β = ± 45°	Кручення	Брусок	1500...1860	40...800
ухl/β° (ДТ)	β = -51...-53°	Зсув за контуром	Квадратна, прямокутна пластина	2070...7480	100...800
ухl/β° (ЦТ)	β = 36..38°	Зсув за контуром	Квадратна, прямокутна пластина	3080...3780	150...850
хysl/β°/α° (НТ)	α = 5..8,5° β = -50...-70°	Витягування по ширині	Пластина	400...2200	20...200
хysl/β°/α° (МТ)	α = 5..8,5° β = -33...-58°	Поздовжнє по довжині	Прямокутна пластина	2650...2850	60...200
ухls/α°/β° (ЖТ)	β = 51..52° α = 45°	Поздовжнє по ширині	Прямокутна пластина	3283...3297	100...450

На Рисунку 1.2 наводяться приклади зрізів кварцу $uxl/+β°$ (АТ, ЦТ) та $uxl/-β°$ (БТ, ДТ).

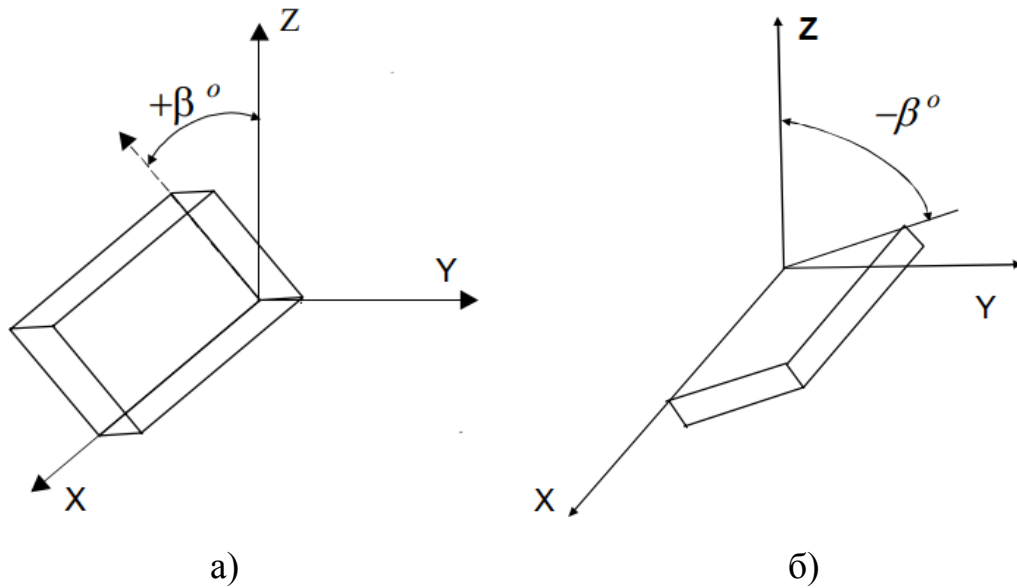


Рисунок 1.2 – Типи зрізу кварцу:
 $uxl/+β°$ (АТ, ЦТ), а) та $uxl/-β°$ (БТ, ДТ), б)

Для кожного типу зрізу кварцу ставиться у відповідність частий коефіцієнт N , який взаємопов'язує резонансну частоту п'єзоелемента та частотно-визначальний розмір згідно виразу:

$$N = af_q, \quad (1.1)$$

де f_q – резонансна частота;

a – частотно-визначальний розмір кристалу.

Частотний коефіцієнт залежить від щільності та пружності, а також від орієнтації п'єзоелемента.

Залежно від форми п'єзоелемента та його типу зрізу, а також розташування електродів і способів збудження, в КР можуть виникати коливання різних типів [2]:

- стискання-розтягування;

- витягування;
- кручення;
- зсув по контуру;
- зсув по товщині.

Збудження КР може відбуватись на основній резонансній частоті механічних коливань а також на побічних частотах, оскільки КР є електромеханічною коливальною системою із великим числом степенів свободи.

1.2 Використання кварцових резонаторів для тактування мікропроцесорів та мікроконтролерів

Типовим рішенням є використання КГ в мікропроцесорних (МП) та мікроконтролерних (МК) пристроях в якості джерела тактових сигналів [3]. Наприклад, для МК 8051 в якості зовнішнього генератора часто використовується зовнішній КГ з тактовою частотою 12 МГц, а максимальна теоретично можлива тактова частота даного МК складає понад 40 МГц [3]. МК 8051 вимагає 12 тактів для одного машинного циклу, таким чином, щоб забезпечити ефективну частоту циклу від 1 МГц (з урахуванням тактової частоти 12 МГц) до 3,33 МГц (з урахуванням максимальної тактової частоти 40 МГц). Цей КГ використовується для генерації тактових імпульсів, необхідних для синхронізації всіх внутрішніх операцій МК.

Пристрої, що побудовані на базі МК та МП потребують джерела опорних тактових імпульсів для реалізації функції базової синхронізації та управління. Такі генератори відповідають за подачу тактових сигналів в МК. Всі інструкції, що виконуються МК, синхронізуються з тактовими сигналами. За допомогою генераторів задається час виконання різних операцій в МК та МП пристроях.

Електричні схеми генераторів, у яких в якості накопичуючого елемента використовуються RC або LC коливальні контури, незважаючи на їхню простоту та низьку вартість реалізації, не дозволяють забезпечити високий рівень точності

при змінах температури та напруги живлення [4]. Відхилення коливань генераторів на базі RC та RL контурів спостерігаються в діапазоні від 5% до 50% від номінальної вихідної частоти [4].

Використання механічних резонаторів (до яких відносяться кристали і керамічні резонатори) підвищує точність та стабільність виконання операцій МП оскільки вони мають низькі температурні коефіцієнти відхилення частоти вихідних коливань, а отже, вони підходять для застосувань, де потрібна стабільна генерація імпульсів в широкому діапазоні зміни робочої температури КР.

Отже, КГ використовуються в якості зовнішнього опорного джерела для МК і МП генеруючи тактові сигнали, які необхідні для синхронізації внутрішніх операцій. У МК тактові сигнали можуть генеруватися за допомогою механічних резонансних пристроїв або електричних схем фазового зсуву.

Застосування КР в МП та МК пристроях має ряд істотних переваг, до яких відноситься точність, компактність, низька вартість, низьке енергоспоживання, генерація високої частоти та ін. Для КР характерними є високий рівень забезпечення стабільності вихідних коливань протягом тривалого часу та довговічність [4].

Приклад використання КР для тактування МК PIC показано на Рисунку 1.6 [4].

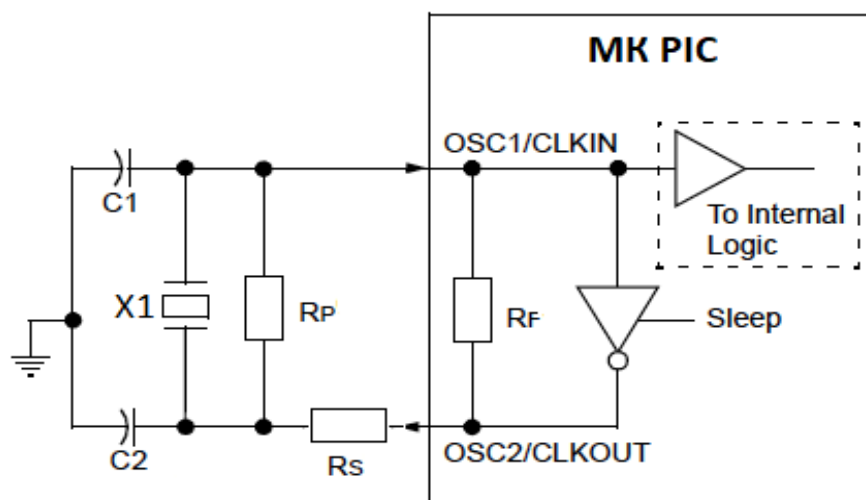


Рисунок 1.6 – Схема тактування з використанням зовнішнього КР для МК PIC [4]

На схемі, що зображена на Рисунку 1.6, значення опору резистора R_f становить порядку 2...10 МОм; також для деяких резонаторів необхідно використати в схемі паралельний R_p та послідовний R_s резистори [4].

У більшості МК стандартний коливальний контур складається з двох частин:

1) інвертуючий підсилювач з коефіцієнтом підсилення по напрузі – це активна частина коливального контуру, яка в більшості МК знаходиться на кристалі;

2) частотно-вибірковий контур зворотного зв'язку, що побудований на базі КР, конденсаторів та резисторів (Рисунок 1.6).

Таким чином, коло зворотного зв'язку є зовнішньою частиною схеми тактового генератора МК.

КР, що використовується в схемах тактового осцилятора МК, характеризується високою добротністю, стабільністю, невеликими розмірами та низькою вартістю. Схема, що складається із КР та двох конденсаторів утворює налаштовану пропорційно-інтегральну ланку, яка забезпечує зворотний зв'язок зі зсувом фази на 180° . Крім того, конденсатори у зовнішньому контурі сприяють появі демпферного ефекту і таким чином додатково стабілізують частоту. Для обмеження струму, що протікає через кристал, в схемі зовнішнього КГ присутній послідовний резистор R_s , вибір значення опору якого залежить від конкретного КР і необхідної резонансної частоти.

1.3 Класифікація дестабілізуючих факторів, які погіршують характеристики кварцових пристроїв

Якщо деякий КГ використовується в радіотехнічному пристрої в якості джерела опорного сигналу, частота цього сигналу повинна не залежати від зовнішніх факторів впливу на резонатор, тобто КР має бути інваріантним по відношенню до зовнішніх дестабілізуючих впливів [1,2].

Фактори впливу можна поділити на такі, що викликають незворотні зміни в КР, тобто такі, після припинення дії яких КГ не повертається до початкового режиму роботи за скінченний час; і зворотні фактори впливу – коли значення частоти відновлюється після закінчення дії дестабілізуючого фактору.

До дестабілізуючих факторів впливу відносяться такі:

- температура;
- вологість;
- атмосферний тиск;
- механічне навантаження;
- радіація;
- рівень збудження сигналу;
- час роботи (фактор старіння).

Вплив температури на частоту КР визначається за допомогою відношення:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_n}, \quad (1.10)$$

Параметр, який відповідає за оцінку температурної нестабільності частоти КР, називається температурним коефіцієнтом частоти (ТЧК), що визначається як відношення функції температурно-частотної характеристики (ТЧХ) КР до резонансної частоти:

$$\alpha_f = \frac{df(T)/dT}{f}, \quad (1.11)$$

де $f(T)$ – функції, що описує ТЧХ КР.

Характер залежності резонансної частоти та динаміки характеристик КР від робочої температури визначається здебільшого властивостями п'єзоелементу, а також конструкційними особливостями.

В той час, коли відносно температури для КР властива інерційність щодо дестабілізуючого впливу, ефекти, що спричинені вібрацією є практично неінерційними [1,2]. Отже, підвищення рівня віброзахищеності та віброкомпенсація також ж актуальними задачами.

Відхилення частоти КР внаслідок дестабілізуючого впливу вібрації можуть бути описані згідно формули:

$$\Delta f_{\Sigma} = \Delta f_{\text{НЗ}} + \Delta f_{\text{ЗВ}} \xi(t) = \Delta f_{\text{В}} (1 - e^{\mu t}) + \Delta f_{\text{ЗВ}} \xi(t), \quad (1.12)$$

де $\Delta f_{\text{НЗ}}$ – незворотні зміни частоти;

$\Delta f_{\text{В}}$ – різниця частот КР та вільної від напруги пластини;

μ – коефіцієнт інтенсивності навантаження та характеристики КР;

$\xi(t)$ – функція зовнішнього впливу;

$\Delta f_{\text{ЗВ}}$ – амплітуда зворотних відхилень частоти.

На Рисунку 1.7 показана динаміка відхилення частоти КР в наслідок вібраційного впливу.

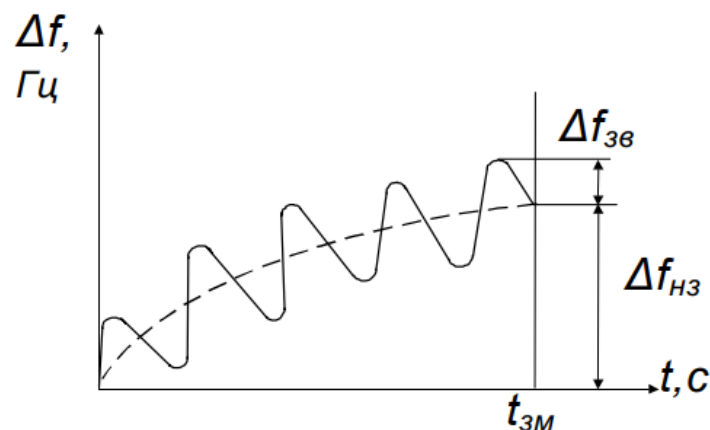


Рисунок 1.7 – Залежність відхилення частоти КР під впливом вібрації

В результаті тривалої експлуатації КР втрачає початкові технічні властивості, що проявляється у зміні резонансної частоти та інших параметрів КР. Такі відхилення технічних характеристик називаються старінням КР.

З часом в КР можуть відбуватись такі процеси (в якості прикладу приводяться лише деякі із них) [1,2]:

- релаксація внутрішніх напруг та деформація; зміна орієнтації кристалу; зсув областей кварцу;
- зміна механічної напруги на межі кристал-металева плівка;
- зміна властивостей пружності елементів кріплення;
- окислення металевого покриття електродів, що спричиняє зміну їхніх фізичних властивостей.

Час протікання цих процесів та рівень впливу на стабільність частоти КР залежить від типу останнього і умов експлуатації даного радіотехнічного пристрою, зовнішніх умов тощо. Ефекти, спричинені цими процесами таким можуть бути зворотними і незворотними [2].

1.4 Огляд існуючих методів стабілізації параметрів кварцових радіотехнічних пристроїв

Зниження температурного впливу на КР досягається за рахунок заснування так званих конструктивно-технологічних і функціональних методів.

Конструктивно технологічні методи передбачають розробку нових типів зрізу п'єзоелемента, які потенційно можуть забезпечити кращу компенсацію температурних впливів на кристал.

З метою зменшення рівень дестабілізуючого впливу температури, розробниками було запропоновано конструкції безелектродних резонаторів [2].

Функціональні методи компенсації температурної нестабільності частоти КР ґрунтуються на методах контролю температури КР. Прийнято розділяти такі

методи на термостабілізаційні із отриманням інформації про температуру та без отримання цієї інформації.

Для усунення вібраційних завад використовуються методи віброзахисту при конструюванні радіоапаратури. До таких методів відноситься: усунення резонансних явищ конструкції КР, демпфування та гашення коливань [2].

Також для зниження вібраційних завад можуть бути застосовані комбінаційні підходи, наприклад, схеми двоярусної амортизації, демпферних мастик та компаундів тощо. Такі системи віброзахисту дозволяють зменшити вібраційне прискорення, що діє на КР, до $0,03g$ на частотах понад 50 Гц і до $0,5 \dots 0,05g$ в діапазоні частот від 10 до 40 Гц [1,2].

Технологічно-конструктивними методами вдається досягти значних покращень вібраційних характеристик, однак, дані методи потребують високої точності при виготовленні та складні в реалізації.

1.5 Постановка задач дослідження

Одним із підходів щодо вирішення проблеми компенсації нестабільності частоти КГ, що використовується в якості опорного генератора DDS, є використання багаточастотного режиму збудження кварцового резонатора (КР) для контролю його поточного стану.

Для забезпечення стабільності частоти вихідних коливань КГ (генерації стабільних часових інтервалі), актуальною задачею є розробка нових і удосконалення існуючих методів компенсації дестабілізуючих впливів.

В результаті аналізу предметної області, для досягнення поставленої мети кваліфікаційної роботи, необхідно вирішити такі задачі:

1. Розробка та удосконалення математичних моделей багаточастотних КР як багатовимірною об'єкту керування;
2. Розробка структурної схеми двочастотного КГ із цифровою стабілізацією параметрів;

3. Розробка алгоритму компенсації відхилення частоти коливання ГК, що використовується в якості джерела опорних коливань у складі DDS синтезатора частоти;

4. Розробка імітаційної моделі та проведення моделювання КГ, що працює в двочастотному режимі збудження та тестування алгоритму компенсації температурної нестабільності.

5. Удосконалення методу стабілізації параметрів КГ із компенсацією нестабільності частоти за рахунок контролю температури КР, що працює в багаточастотному режимі збудження.

6. Застосування методу стабілізації застосовано до опорного генератора DDS синтезатора частоти.

Висновки до першого розділу

В першому розділі магістерської роботи було зроблено наступне:

1. Розглянуто фізичні основи роботи КР, розглянуто їхні основні параметри та їхню класифікацію за типом зрізу кристалу кварцу. Розглянуто метод опису та позначення зрізу кристалів кварцу за допомогою кристалографічної системи координат.

2. Проведено аналіз застосувань КР в якості джерела тактових імпульсів пристроїв для сучасних МК та МП пристроїв з позиції їх ефективності та надійності.

3. Розглянуто ряд дестабілізуючих факторів, які негативно впливають на стабільність частоти генерування вихідних коливань КГ, а саме: температурний вплив, вібрацію та старіння КР.

4. Проведено аналіз методів та засобів подолання вищеописаних дестабілізуючих факторів, зокрема за рахунок контролю температури КР запропоновано здійснювати компенсацію відхилень частоти КГ.

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КВАРЦОВОГО ГЕНЕРАТОРА ІЗ СТАБІЛІЗАЦІЄЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВПЛИВУ

2.1 Модель кварцового резонатора як системи контролю

Узагальнена модель інваріантної КР з контролем впливу температури розроблена на основі багатовимірної системи з комбінованим керуванням [1], яка складається із двох контурів керування, що можуть бути якої синтезовані окремо один від одного. Останній факт є важливим при розв'язанні задачі побудови КР із стабілізацією параметрів.

Структурна схема багаточастотного КР із компенсацією зовнішніх факторів впливу зображена на Рисунку 2.1.

Згідно схеми на Рисунку 2.1 ідентифікація зовнішнього фактору впливу (температурного впливу) здійснюється за допомогою блоку ідентифікатора фактору впливу (ІФП), який виконує неперервні спостереження за вектором Y_{c0} володіючи інформацією про характеристики A перетворювача сигналу керування (ПСК).

Без урахування неконтрольованих факторів впливу Θ , спостереження відбувається за сумарним вектором впливу:

$$\Delta Y = \Delta Y_{k0} + \Delta Y_{nk}, \quad (2.1)$$

де ΔY_{k0} – керована складова;

ΔY_{nk} – некерована складова.

Згідно виразу (2.1), в системі має місце накопичення похибки ідентифікації фактору впливу.

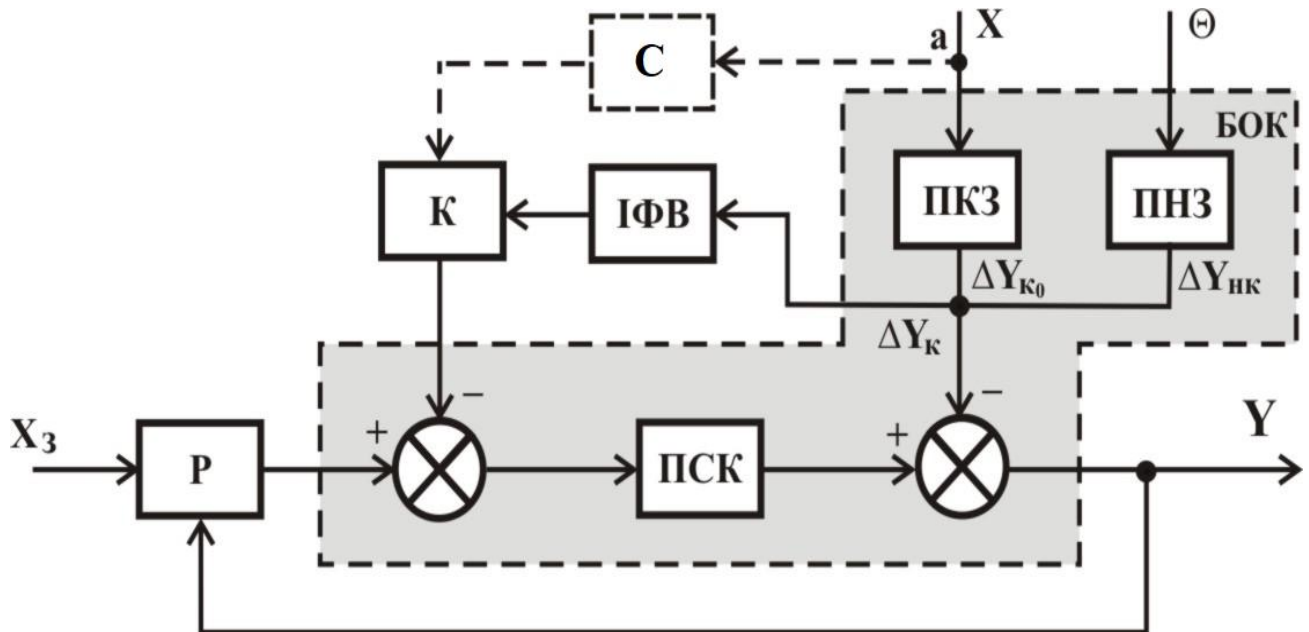


Рисунок 2.1 – Модель двочастотного КР із компенсацією зовнішніх факторів впливу

Таким чином, умова інваріантності системи щодо вектору X має наступний вигляд:

$$K_{к0} = W^{-1}AS_0^{-1}, \quad (2.2)$$

де $K_{к0}$ – матриця передаточних коефіцієнтів компенсатора K ;

S_0 – матриця передаточних коефіцієнтів ідеального сенсора C ;

W – матриця передаточних коефіцієнтів сигналу керування ПСК (Рисунок 2.1).

В реальних умовах завжди має місце похибка:

$$S = S_0 + \Delta S \quad (2.3)$$

Похибка (2.3) призводить до еквівалентної похибки компенсатора ΔK_S , отже, має місце наступне співвідношення:

$$K_{S_0} + \Delta K_S = W^{-1}A(S_0 + \Delta S)^{-1} \quad (2.4)$$

Тоді, зробивши перетворення:

$$(S_0 + \Delta S)^{-1} = (S_0(E + S_0^{-1}\Delta S))^{-1} = (E + S_0^{-1}\Delta S)^{-1}S_0^{-1}, \quad (2.5)$$

де E – одинична матриця;

та за умови, що

$$\|S^{-1}\Delta S\| \leq \|\Delta S\| \cdot \|S_0^{-1}\| < 1 \quad (2.6)$$

отримуємо:

$$(E + S_0^{-1}\Delta S)^{-1} = E + \sum_{k=1}^{\infty} (-S_0^{-1}\Delta S)^k \quad (2.7)$$

В першому наближенні, обмежившись першим порядком за ΔS , отримуємо:

$$\Delta K_S = -WAS_0^{-1}\Delta SS_0^{-1} \quad (2.8)$$

Умова інваріантності за вектором X в заданій координатній системі матиме вигляд:

$$K_{I_0} = W^{-1}I_0^{-1}, \quad (2.9)$$

Тоді, за аналогією, отримуємо:

$$\Delta K_I = -W^{-1}I_0^{-1}\Delta I I_0^{-1}, \quad (2.10)$$

де ΔI – визначає похибки ідентифікації факторів впливу.

Введемо евклідові норми та відносні похибки компенсації:

$$\delta_{K_I} = \left\| \left\| \Delta K_I / K_{I0} \right\| \right\|, \quad (2.11)$$

$$\delta_{K_S} = \left\| \left\| \Delta K_S / K_{S0} \right\| \right\|. \quad (2.12)$$

Тоді мають місце такі співвідношення:

$$\delta_{K_S} = \|S_0^{-1}\| \cdot \|\Delta S\|, \quad (2.13)$$

$$\delta_{K_I} = \|I_0^{-1}\| \cdot \|\Delta I\|, \quad (2.14)$$

Зважаючи на те, що на практиці в першому наближенні можна вважати, що $I_0 = E$, і зробивши підстановку $S_0 = E$, на основі виразів (2.8) та (2.10) для реальних значень системи $\|\Delta S\| \gg \|\Delta I\|$, звідки слідує: $\delta_{K_S} \gg \delta_{K_I}$ [1].

2.2 Еквівалентна електрична схема кварцового резонатора

Підключений до електричного кола КР має властивості коливального RLC-контур, у випадку роботи на частотах, які близькі до резонансної частоти КР, та як звичайний конденсатор, якщо роботі частоти відрізняються від резонансної частоти.

Еквівалентна електрична схема КР із однією резонансною частотою зображена на Рисунку 2.2.

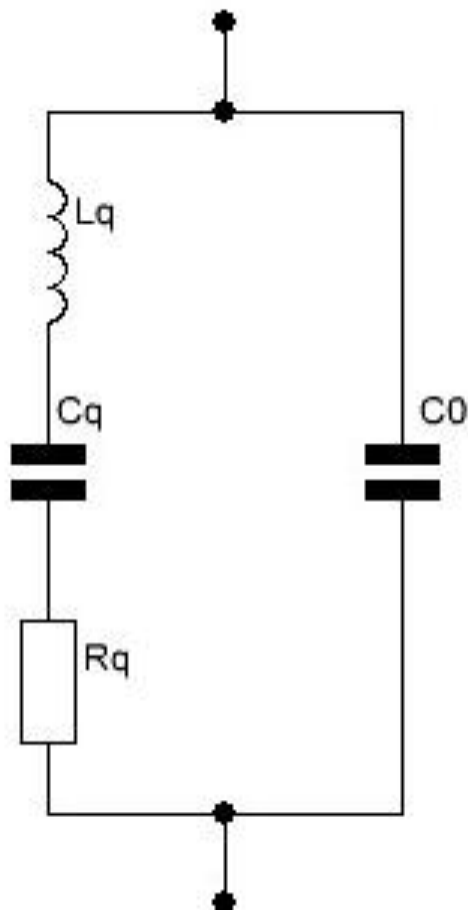


Рисунок 2.2 – Еквівалентна схема кварцового резонатора

Параметри схеми L_q , C_q , R_q – це динамічні параметри схеми заміщення (динамічна індуктивність, ємність та опір відповідно); C_0 – статична ємність резонатора. На частотах, які далекі від резонансної, КР поводить себе як конденсатор, ємність якого рівна статичній ємності C_0 еквівалентної схеми (див. Рисунок 2.2).

Динамічні параметри для схеми, яка зображена на Рисунку 2.2, розраховуються згідно співвідношень [1,2]:

1) динамічна індуктивність:

$$L_q = \frac{d_q S}{8\varepsilon^2 S_e}, \quad (2.15)$$

де d_q – щільність кварцу;
 S – товщина пластини;
 S_e – площа електродів;
 ε – електрична стала кварцу;

2) динамічна ємність:

$$C_q = \frac{8\varepsilon^2 S_e}{\pi^2 n^2 c' S}, \quad (2.16)$$

де n – номер механічної гармоніки;
 c' – модуль пружності;

3) опір:

$$R_q = \frac{d_q a_m}{4\varepsilon^2 S_e}, \quad (2.17)$$

де a_m – коефіцієнт затухання;

4) статична ємність:

$$C_0 = \frac{\varepsilon'' S_e}{4S\pi}, \quad (2.18)$$

де ε'' – діелектрична проникливість у напрямку товщини.

Значення параметрів L_q , C_q , R_q та C_0 схеми, що зображена на Рисунку 2.2, визначають частоти послідовного і паралельного резонансів КР.

Частота послідовного резонансу КР визначається згідно співвідношення:

$$W_q = \frac{1}{\sqrt{L_q C_q}}, \quad (2.19)$$

Частота паралельного резонансу КР визначається згідно співвідношення:

$$W_0 = \frac{1}{\sqrt{L_q \frac{C_0 C_q}{C_0 + C_q}}} \quad (2.20)$$

Характеристичний опір коливального контуру схеми заміщення КР:

$$\rho_q = \sqrt{\frac{L_q}{C_q}} \quad (2.21)$$

Добротність коливального контуру схеми заміщення КР:

Різниця частот паралельного та послідовного резонансу називається резонансним проміжком КР:

$$\Omega_n = \omega_0 - \omega_q, \quad (2.22)$$

де $\omega_0 = 2\pi f_0$, $\omega_q = 2\pi f_q$.

Резонансний проміжок залежить від номеру гармоніки згідно формули:

$$\Omega_n = \frac{\Omega}{n^2}, \quad (2.23)$$

де n – номер гармоніки КР.

Коефіцієнт зв'язку КР визначається згідно співвідношення:

$$p = \frac{C_q}{C_0}, \quad (2.24)$$

Коефіцієнт зв'язку та резонансний проміжок КР взаємопов'язані між собою відповідно до формули:

$$\frac{\omega_0 - \omega_q}{\omega_q} \approx \frac{p}{2}, \quad (2.25)$$

На Рисунку 2.3 зображені амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) – $A(\Delta f)$ та фазо-частотна характеристика (ФЧХ) – $\psi(\Delta f)$, які показують як розміщені резонансні частоти для КР на 5 МГц [2].

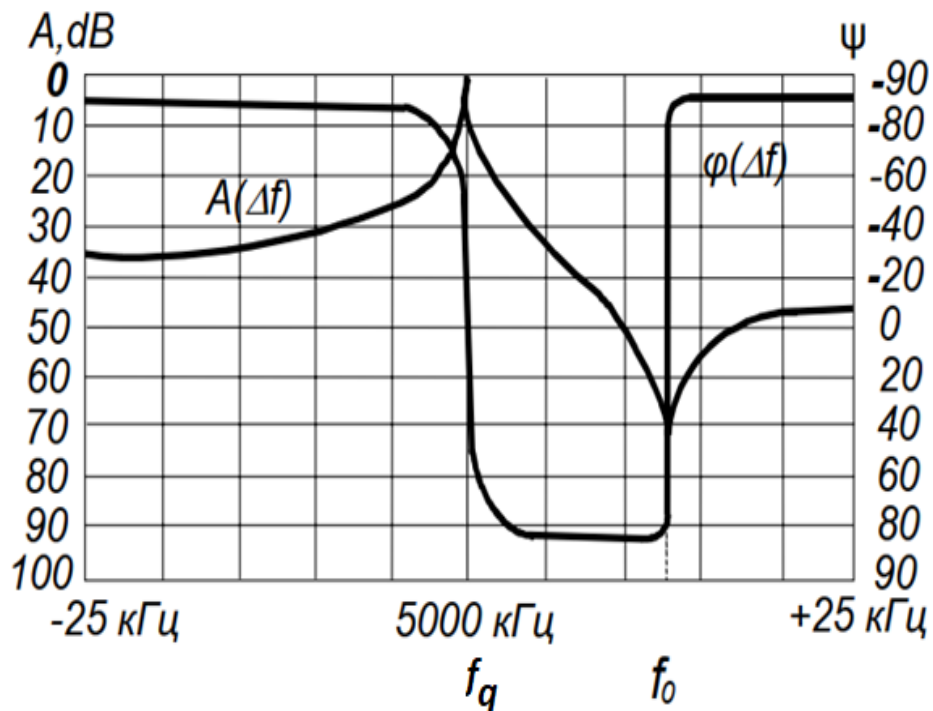


Рисунок 2.3 – ФЧХ та АЧХ КР 5 МГц

Значення добротності Q істотно залежить від якості кристалічної ґрадки кварцу, відсутності чи наявності дефектів, геометричних розмірів пластини та електродів, конструкції тримача, вакууму в корпусі та чистоти поверхні пластини.

На Рисунку 2.4 зображена залежність добротності КР від номеру механічної гармоніки.

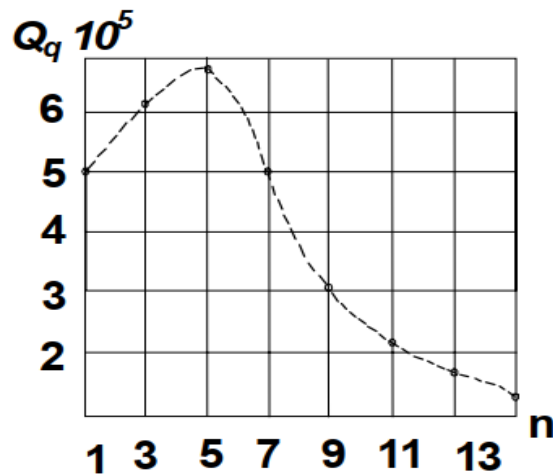


Рисунок 2.4 – Залежність добротності КР від номеру гармоніки

Добротність контуру схеми заміщення КР залежить від номеру механічної гармоніки. Залежність визначається конкретним типом КР. Починаючи із номеру механічної гармоніки $n = 7 \dots 9$ значення добротності Q суттєво збільшується (в декілька разів) а потім плавно зменшується (див. Рисунок 2.4) [2].

2.3 Використання кварцових генераторів в схемах DDS синтезаторів частоти

На сьогоднішній день одним із методів формування сигналів є прямий цифровий синтез частоти (Direct Digital Synthesis, DDS). Такі радіотехнічні пристрої здатні отримати на виході сигнал потрібної частоти або набору сигналів різних частот відповідно до сигналу керування. Даний метод передбачає синтез вихідного сигналу цифровими методами [5-7].

Синтезатори DDS, так само як і інші синтезатори частоти, потребують джерела опорних коливань, із якого і синтезується вихідний сигнал заданої частоти.

Поряд із DDS, поширеними також є такі методи синтезу частоти:

- прямиий аналоговий синтез (Direct Analog Synthesis, DAS). Згідно даного методу вихідний сигнал формується із опорного сигналу шляхом застосування аналогових операції змішування, фільтрації, а також множення та ділення;

- непрямий синтез (Indirect Synthesis, IS), що базується на фазовому автопідстроюванню частоти (Phase Locked Loop, PLL). Згідно цього методу вихідна частота генерується додатковим генератором, який охоплений петлею PLL. Найчастіше у якості додаткового генератора використовується керований напругою генератор (Voltage Controlled Oscillator, VCO);

- комбіновані методи – такі підходи, коли використовуються поєднання вищеописані методів, в тому числі із методами DDS синтезу.

До основних характеристик, що визначають якість синтезаторів частоти, належать наступні [5-8]:

- рівень шуму та побічних спектральних складових вихідного сигналу;
- смуга частот вихідного сигналу;
- швидкість перестроювання частоти;
- роздільна здатність вихідного сигналу за частотою;
- неперервність фази вихідного сигналу в результаті перестроювання частоти;
- можливості щодо модуляції сигналу.

Враховуючи вищеописані показники якості синтезаторів частоти, варто відзначити основні переваги DDS синтезаторів над іншими методами синтезу сигналів довільної частоти:

- цифровий інтерфейс керування частотою та фазою сигналу на виході синтезатора;

- надвисокий рівень роздільної здатності за частотою і фазою сигналу на виході;

- високошвидкісне перестроювання за частотою і фазою, відсутність розриву фази та інших артефактів;

- можливість реалізації параметричної компенсації відхилень за допомогою контролю температури [8,9].

Синтезатори DDS характеризуються надвисокою роздільною здатністю, так, за частотою вона може сягати порядку $10^{-2} \dots 10^{-3}$ Гц при значення вихідної частоти біля 10 МГц. Такі характеристики принципово не можуть бути забезпечені шляхом застосування інших методів синтезу частоти. Ще однією визначною характеристикою синтезаторів DDS є надвисока швидкість перестроювання на іншу частоту вихідного сигналу. Відомо, що синтезатори на основі PLL використовують петлю зворотного зв'язку і фільтрацію сигналу помилки, що значно сповільнює процес перестроювання. В той час як обмеження швидкості перестроювання DDS синтезаторів обмежується лише тільки швидкодією цифрового інтерфейсу керування (наприклад, МК). В результаті того, що вихідний сигнал DDS синтезатора формується одразу в цифровій формі, перестроювання за частотою відбувається без розриву фази та стає доступним здійснювати модуляцію вихідного сигналу різних видів.

В той же час, синтезатори DDS мають ряд обмежень, в основному пов'язаних із процесами дискретизації та цифро-аналогового перетворення (ЦАП). Так, наприклад, максимальне значення вихідної частоти сигналу не може перевищувати половині значення опорної частоти генератора. Даний факт обмежує застосування DDS в області високих (ВЧ) та надвисоких частот (НВЧ) [10-13].

Рівень шуму та кількість побічних спектральних складових вихідного сигналу залежить від якості ЦАП, а отже для приладів, що потребують високого рівня точності та технічних характеристик, вартість виготовлення може бути збільшена.

Потужність, яку споживає синтезатор DDS, прямопропорційна тактовій частоті опорного генератора, що може стати проблемою при проектуванні пристроїв із низьким рівнем споживання електричної енергії.

2.4 Висновки до другого розділу

В другому розділі магістерської роботи було зроблено наступне:

1. Розроблена узагальнена математична модель стабілізації параметрів КР з контролем впливу температури. Ця модель розроблена на основі багатовимірної системи з комбінованим керуванням, що складається із двох контурів керування, що можуть бути синтезовані окремо один від одного, що є важливим при розв'язанні задачі побудови КР із стабілізацією параметрів.

2. Розглянуто класичну електричну схему заміщення та проаналізовано її динамічні параметри з позиції розрахунку та моделювання системи компенсації температурного впливу на КР.

3. Розглянуто переваги використання КГ із температурною стабілізацією в якості опорного генератора для DDS синтезаторів частоти.

3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ КВАРЦОВОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВІ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ

3.1 Опис інтерфейсу користувача програми MATLAB/Simulink

3.1.1 Функціональні можливості програми MATLAB

MATLAB – це програмний комплекс, який реалізує широкий спектр математичних методів, засобів візуалізації даних, побудований на основі застосування матричних операцій. Це знайшло відображення у назві системи – MATrix LABoratory – матрична лабораторія [18].

Матриці широко застосовуються у складних математичних розрахунках, наприклад, при рішенні завдань математичного моделювання статичних та динамічних систем. Вони дають змогу описати багатофункціональні системи, що дає змогу моделювати найрізноманітніші процеси в телекомунікаціях [18].

Прикладом розширення програми MATLAB, яка може швидко збирати потрібну модель і описувати її роботу може служити основне розширення MATLAB/Simulink. Simulink працює з лінійними, нелінійними, безперервними, дискретними, багатомірними системами.

Також існує цілий набір інтегрованих програмних систем та пакетів програм для автоматизації математичних обчислювань: Eureka, Gauss, TK Solver!, Derive, Mathcad, Mathematica, Maple V та інші [18].

Система MATLAB складається з п'яти основних частин:

1) MATLAB – це мова матриць і масивів високого рівня з управлінням потоками, функціями, структурами даних, введенням та виведенням даних і особливостями об'єктно-орієнтованого програмування;

2) Середовище MATLAB. Це набір інструментів і пристосувань, з якими працює користувач або програміст MATLAB. Вона включає засоби для управління змінними в робочому просторі MATLAB. введення і виведення

даних, а також створення, контролю і налагодження m-файлів і додатків MATLAB;

3) Графічна система MATLAB включає команди високого рівня для візуалізації дво- і тривимірних даних, обробки зображень, анімації і ілюстрованої графіки. Вона також включає команди низького рівня, що дозволяють повністю редагувати зовнішній вигляд графічної інформації таким чином, як при створенні графічного (для користувача) інтерфейсу (GUI) для MATLAB додатків.

4) Бібліотека математичних функцій – це велика колекція обчислювальних алгоритмів від елементарних функцій, таких як сума, синус, косинус, комплексна арифметика, до складніших, таких як обернення матриць, знаходження власних значень, функції Бесселя. Швидке перетворення Фур'є.

5) Програмний інтерфейс – це бібліотека, яка дозволяє писати програми на Сі і Фортрані, які взаємодіють з MATLAB. Вона включає засоби для виклику програм з MATLAB (динамічний зв'язок): MATLAB викликається як обчислювальний інструмент і для читання або запису m-файлів.

На Рисунку 3.1 зображено інтерфейс користувача програми MATLAB. Дані наводиться короткий опис основних елементів інтерфейсу.

Елементи інтерфейсу вікна програми MATLAB [18]:

- шлях до робочої папки (Current Path). Показує шлях до поточної папки. Це може бути папка, що була створена для файлів поточного проекту;

- поточна папка (Current Folder). У цьому вікні відображається вміст поточної папки. Також тут можна виконувати прості команди керування файлами, наприклад, перейменування файлів, відкривати файлів для перегляду в MATLAB і переміщення файлів до підпапок;

- редактор коду (Editor). Вікно редактора може бути відсутнім під час першого запуску MATLAB. Воно з'являється автоматично, після відкриття

файлу сценарію. Як випливає з назви, вікно редактора призначене для редагування файлів, здебільшого для редагування файлів сценаріїв («m-файлів»);

- вікно команд (Command Window). Командне вікно надає інтерфейс для введення виразів і операторів, для негайного опрацювання програмою MATLAB. Може використовуватись як калькулятор, місце для експериментів і вивчення нових функцій. Це є основним засобом взаємодії з написаними програмами, що супроводжується підказками введення та вихідними повідомленнями;

- робочий простір (Workspace). Робоча область відображає поточні ініціалізовані змінні разом із їхніми значеннями та інформацією про їхню, що може бути корисним під час налагодження складних програм.

Розглянемо основи роботи в MATLAB. Після завантаження програми на екрані з'являється основне вікно системи. Воно містить три підвікна:

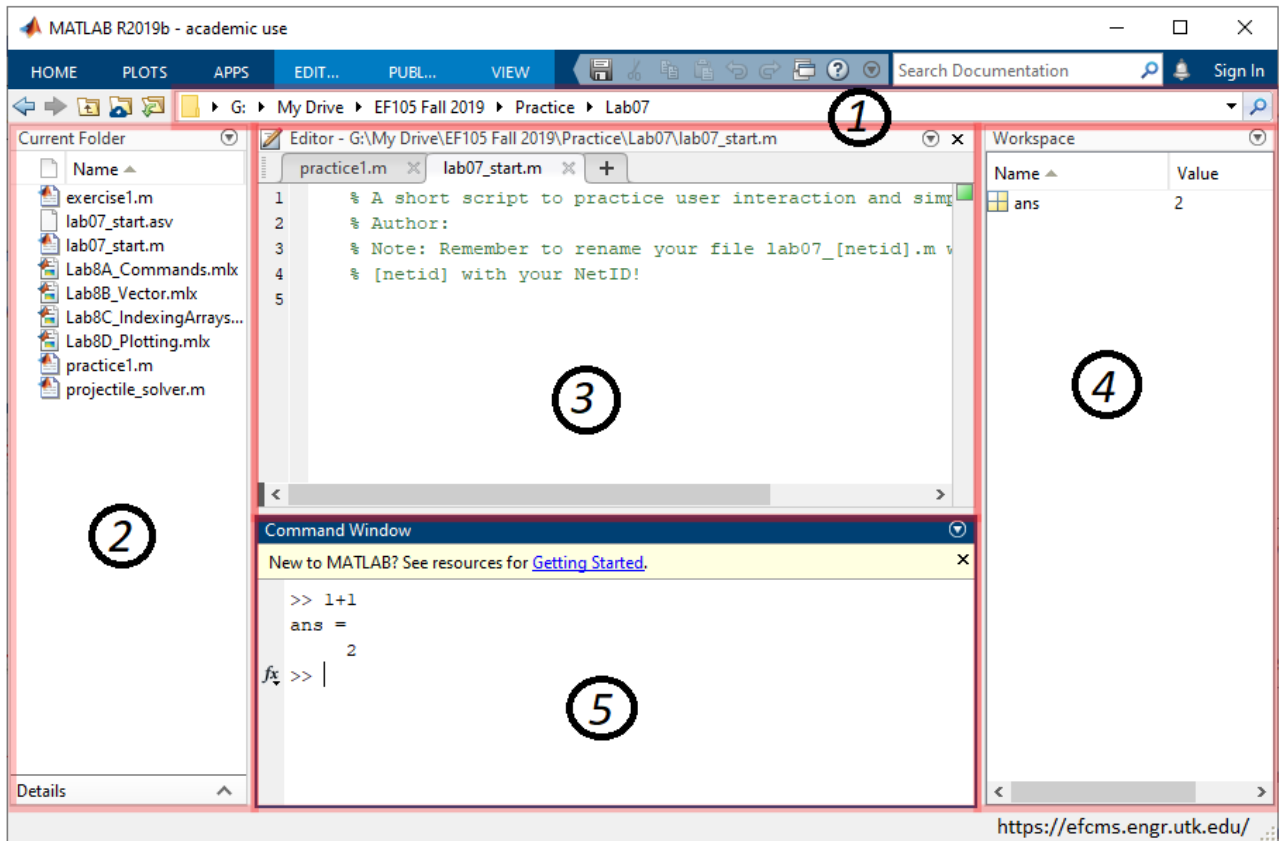
1) Command Window (вікно команд) – головне вікно, де знаходиться знак запрошення >>;

2) Command Histori (команди) – вікно, в якому відображаються всі команди, що виконувались в поточному і в попередніх сеансах роботи;

3) Workspace (робоча область) – вікно в якому зберігаються всі змінні, що були обчислені в поточному сеансі роботи.

Робота в середовищі MATLAB може здійснюватися у двох режимах [18]:

1) Режим калькулятора. Обчислення можна виконувати у режимі прямих обчислювань, тобто без підготовки програми. Робота з системою у такому режимі носить характер діалогу і відбувається згідно правила «задав питання, отримав відповідь». Користувач набирає на клавіатурі обчислювальний вираз, редагує його (коли треба) у командному рядку та завершує введення інформації натисканням клавіші ENTER.



- 1 – шлях до робочої папки (Current Path);
 2 – вміст робочої папки (Current Folder); 3 – редактор коду (Editor);
 4 – робочий простір (Workspace); 5 – вікно команд (Command Window)

Рисунок 3.1 – Інтерфейс програми MATLAB

2) Програмний режим. Це режим виклику програми, що створена та записана на диск мовою MATLAB і містить усі необхідні команди, які забезпечують введення даних, організацію обчислень та виведення результатів на екран.

У командному вікні у режимі діалогу проводяться обчислення та активізуються елементи середовища MATLAB. Виконувач завдання вводить команди або запускає на виконання файли з текстами на мові MATLAB. Інтерпретатор здійснює обробку введених даних та формує результати: числові та строкові данні, попередження та інформацію про помилках.

В обох режимах користувачу доступні практично всі обчислювальні можливості системи, у тому числі виведення інформації в графічній формі. Програмний режим дозволяє зберігати розроблені обчислювальні алгоритми і без додаткових операцій повторювати обчислення з іншими початковими даними [18].

3.1.2 Функціональні можливості середовища імітаційного моделювання Simulink

Для розробки моделей у Simulink основними є бібліотеки блоків, з яких складаються структурні схеми систем. У середовищі пакета MATLAB можна не тільки моделювати систему за її структурною схемою, але й отримати математичний опис моделі у різних формах, виконати аналіз її властивостей у часовій та частотній областях, синтезувати елементи системи керування, виконати оптимізацію [18].

Пакет блочного моделювання Simulink автоматично інтегрується з базовою системою MATLAB. Для перегляду того чи іншого розділу бібліотеки достатньо виділити його мишею – у правій частині вікна з'явиться набір піктограм компонентів активного розділу бібліотеки.

Simulink містить такі основні бібліотеки блоків:

- Sources – джерела вхідних сигналів і впливів;
- Sinks – вихідні блоки (запам'ятовування та реєстрація вихідних сигналів);
- Continuous – лінійні безперервні блоки;
- Discrete – дискретні блоки;
- Math або Math Operations в Simulink 5/6 – математичні блоки та функції;
- Functions & Tables в Simulink 4 або Look-Up Tables в Simulink 5/6 – містить компоненти таблиць та User Defined Functions в Simulink 5/6 – розділ за функціями користувача;
- Nonlinear – нелінійні блоки;

- Signals & Systems в Simulink 4 або Signal Routing в Simulink 5 – блоки маршрутизації сигналів, наприклад, Mux – мультиплексування ряду входів.

Simulink містить і інші бібліотеки блоків

Розглянемо деякі бібліотеки Simulink, блоки яких будуть необхідні для моделювання динамічних систем.

Бібліотека Sources містить джерела входних сигналів і впливів, тобто блоки, які не мають входів, а мають тільки виходи:

– у блоці Constant можна задавати значення фіксованого сигналу, що діє протягом часу розрахунку;

– у блоці Step можна задавати вплив у вигляді окремого перепаду;

– блок Ramp – джерело наростаючого впливу;

– у блоці Sine Wave можна задавати синусоїдальний вплив;

– блок Repeating Sequence – джерело послідовності, яка повторюється;

– джерела часу моделювання – Clock та Digital Clock;

– джерело впливів Signal Generator використовується для створення одного з чотирьох найбільш розповсюджених типів сигналів:

- sine – синусоїдальний сигнал;
- square – прямокутний періодичний сигнал;
- sawtooth – пилообразний періодичний сигнал;
- random – випадковий сигнал.

Бібліотека Sinks включає блоки приймання даних, які не мають виходів, а мають тільки входи:

– Scope – осцилограф;

– XY Graph – графозбудувач у системі полярних координат;

– Display – вивод на екран дисплея;

– To File – запис даних у файл;

– To Workspace – запис у змінну робочого простору;

– Stop Simulation – блок перерви моделювання і його зупинки, якщо на його вході діє сигнал, не рівний нулю.

Бібліотека Continuous містить лінійні безперервні блоки, такі як:

- інтегруючий – Integrator;
- диференціюючий – Derivative;
- блок передавальної характеристики – Transfer Fcn, за допомогою якого, наприклад, задається передавальна функція аперіодичної та коливальної ланок;
- блок завдання лінеаризованої моделі – State-Space;
- блок фіксованої затримки – Transport Delay;
- блок керуємої затримки – Variable Transport Delay.

Математична бібліотека Math містить блоки арифметичних операцій:

- обчислення абсолютного значення числа Abs;
- знака числа Sign;
- округлення Rounding Function;
- скалярного добутку Dot Product;
- звичайного добутку Product, який використовують і для ділення;
- суми Sum,
- блоки масштабування Gain и Slider Gain;
- блок пошуку мінімуму та максимуму MinMax;
- блок тригонометричних функцій Trigonometric Function

та багато інших математичних блоків.

З кожним блоком поєднано вікно налаштувань, яке відкривається при активізації піктограми блока. Параметри блоків можуть бути константами, змінними, функціями та виразами. Будь-які змінні, від яких залежить параметр, повинні бути визначені в робочій зоні до початку процесу моделювання, інакше Simulink сигналізує про помилку в цьому блоці.

Спочатку необхідно відкрити вікно для нової моделі (кнопка Create a new model в панелі інструментів браузера бібліотек Simulink або команда File → New → Model в меню). Вікно відкривається із заголовком Untitled. Введемо заголовок майбутньої моделі. Для цього встановимо курсор миші в потрібне місце і двічі клацнемо лівою кнопкою миші, і можна вводити надпис.

З розділів бібліотек перетягуємо необхідні блоки при натиснутій лівій клавіші миші. Тільки що введений блок виділяється маленькими чорними прямокутниками по кутам блоку. Можна збільшувати/зменшувати блок в діагональних напрямках, якщо захопити курсором миші куток виділеного блоку.

Блоки моделей звичайно мають входи і виходи. Як правило, вихід якого-небудь блоку підключається до входу слідуєчого блоку і т.д. Для цього курсор миші встановлюється до виходу блоку, від якого повинно виходити з'єднання. Держачи натиснутою ліву кнопку миші, потрібно плавно перемістити курсор до входу наступного блоку. Побачив лінію зв'язку, потрібно відпустити ліву кнопку миші. Наприкінці з'єднання з'явиться жирна стрілка [18].

Перед запуском моделі треба ознайомитися з установкою загальних параметрів моделювання. Для цього виконаємо команду Simulation Parameters... в меню Simulation вікна Simulink. З'явиться вікно встановлення параметрів моделювання [18].

До числа найважливіших параметрів відноситься час моделювання – Simulation time. Він задається початковим часом Start time (звичайно 0) та кінцевим часом Stop time.

Першорядне значення мають дві опції: тип рішення і метод рішення. Можливо два типа рішення:

- Variable-step solvers – рішення зі змінним кроком;
- Fixed-step solvers – рішення з фіксованим кроком.

Як правило, кращі результати дає рішення зі змінним кроком: крок автоматично зменшується, якщо швидкість зміни результатів у процесі рішення зростає. І, навпаки, якщо результати змінюються слабо, крок рішення автоматично збільшується [18].

Методом з фіксованим кроком необхідно користуватись тільки тоді, коли фіксований крок обумовлені специфікою рішення задачі, наприклад, якщо її мета міститься в одержанні таблиці результатів з фіксованим кроком. Цей метод дає непогані результати, якщо поведінка системи описується майже монотонними функціями [18].

Друга з вказаних опцій – вибір метода моделювання. Для рішення диференціальних рівнянь можливо обрати наступні методи: discrete (дискретний), ode45, ode23 (три варіанти, включаючи метод Розенброка), rk45 (метод Дорманда-Принса), ode113 (метод Адамса) ode15s.

Важливим є і такий параметр моделювання, як точність інтегрування:

- Relative tolerance – відносна похибка інтегрування;
- Absolute tolerance – абсолютна похибка інтегрування.

За замовченням вони дорівнюють 10^{-3} і 10^{-6} .

На панелі інструментів Simulink знаходяться дві важливі кнопки управління моделюванням. Одна з них, у вигляді чорного трикутника (Start/Pause Simulation), запускає або припиняє процес моделювання, інша, у вигляді чорного квадрата (Stop), зупиняє його.

Після запису в файл (File → Save/Save As) як заголовок вікна буде фігурувати ім'я файлу, що за замовчуванням одержить розширення m.

Вже існуючу модель можна завантажити із меню Simulink (File → Open).

Розглянемо основні команди меню редагування Edit:

- Undo – відміна останньої операції;
- Redo – відновлювання останньої відміненої операції.
- Clear – знищення виділених об'єктів;
- Copy – копіювання виділених об'єктів у буфер;
- Paste – вставка об'єктів з буфера;
- Select All – виділення всіх об'єктів моделі;
- Copy model to clipboard – копіювання всієї моделі в буфер.

Simulink запускається із основного вікна MATLAB, для чого можливі два варіанти (див. Рисунок 3.2):

- Натиснути піктограму Simulink на панелі інструментів MATLAB;
- Ввести команду «simulink» в командний рядок MATLAB і натиснути клавішу ENTER.

Після виконання команди на екрані з'являється головне вікно програми (див. Рисунок 3.3).

Далі можна обрати шаблон проекту. Будемо працювати з Blank model. Після вибору шаблону проекту з'являється робоче вікно програми Simulink (Рисунок 3.3). Натиснувши кнопку Library Browser на панелі задач можна відкрити браузер доступних бібліотек та елементів (рисунок 3.4).

Він зображує бібліотеки блоків усіх пакетів, що вхопить до Simulink у вигляді ієрархічного дерева. Така організація доступу до блоків дозволяє скоротити кількість вікон для побудови моделі до двох (браузер і модель).

Для того щоб відкрити відповідний рівень ієрархії, натискають на знак «+» ліворуч назви пакета чи бібліотеки.

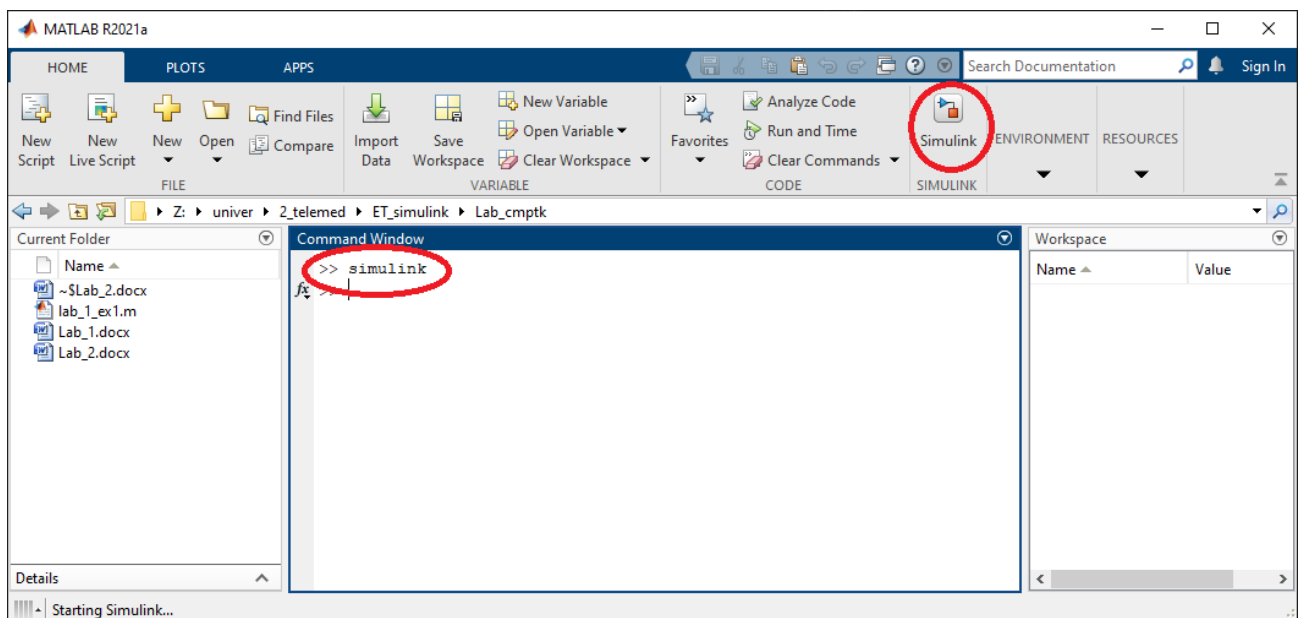


Рисунок 3.2 – Запуск Simulink

Нижче виводиться інформація стосовно виділеного блока, а праворуч ієрархічного дерева - зображення бібліотек або блоків.

Якщо вибрати пакет розширення, з яким треба працювати, і натиснути знак «+» ліворуч пакета, одержуємо список бібліотек вибраного пакета. Якщо двічі натиснути на назві бібліотеки, потрібної для подальшої роботи, праворуч з'являються всі блоки даної бібліотеки. Тепер браузер готовий до роботи, залишилось тільки «взяти» мишею потрібний блок і перетягнути його у вікно моделі [18].

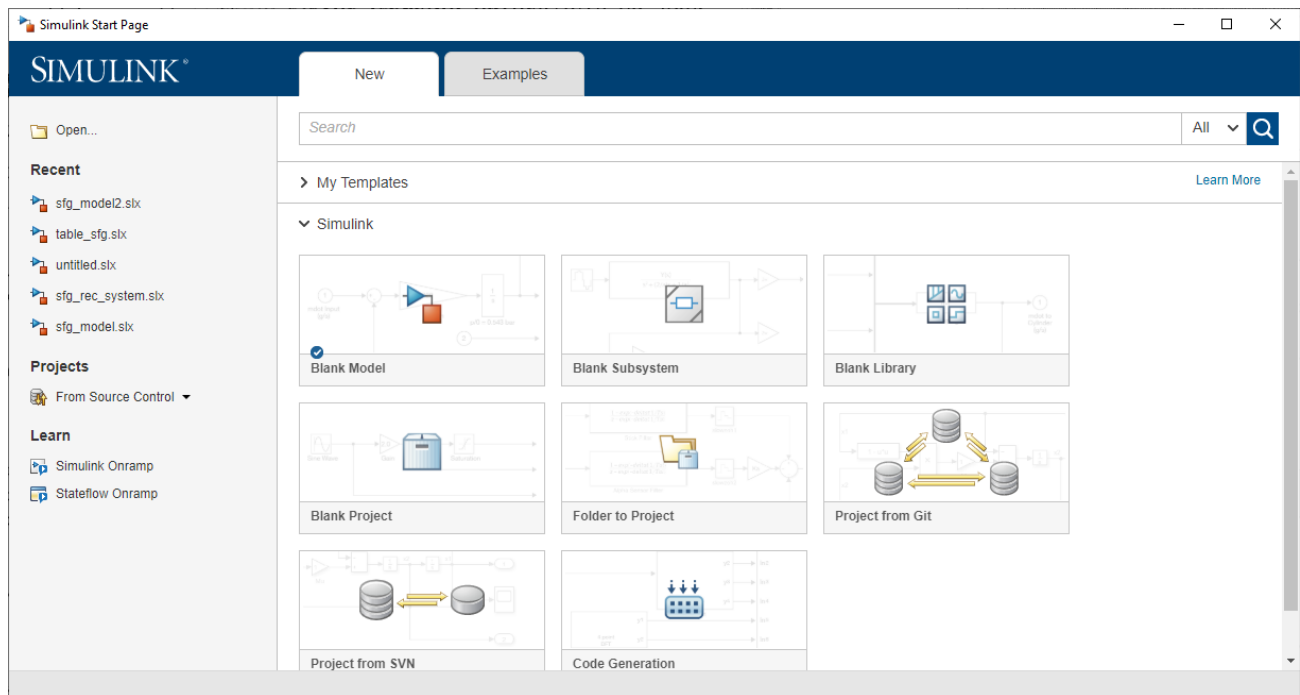


Рисунок 3.3 – Головне вікно Simulink

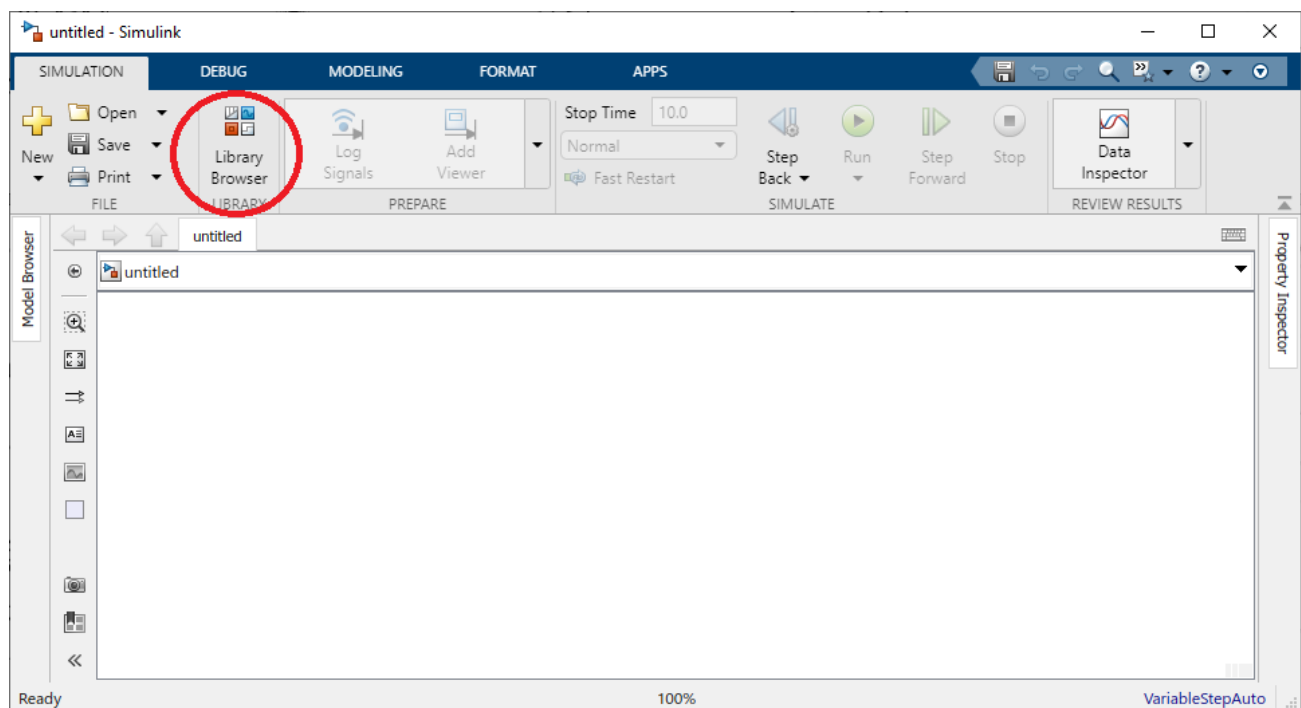


Рисунок 3.4 – Робоче вікно програми Simulink

3.2 Імітаційна модель двочастотного кварцового генератора під дією зміни температури

Як було зазначено в Розділі 1, температурна залежність КР визначається його температурно-частотними характеристиками (ТЧХ) – відповідно для кожної моди окремо.

Залежності ТЧХ представлені апроксимуючими поліномами третього порядку:

$$\delta_j = a_{j1} + a_{j2}T + a_{j3}T^2 + a_{j4}T^3 \quad (3.1)$$

де $\delta_j = \frac{\Delta f_j(T)}{f_{0j}}$ – відношення відхилення частоти до номінальної частоти

j моди КГ.

Імітаційна модель, побудована в середовищі MATLAB/Simulink, яка реалізує температурну залежність згідно поліномів (4.1) зображена на Рисунку 3.5

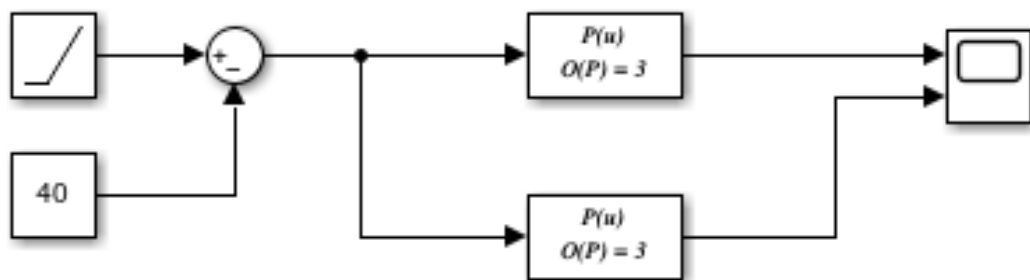
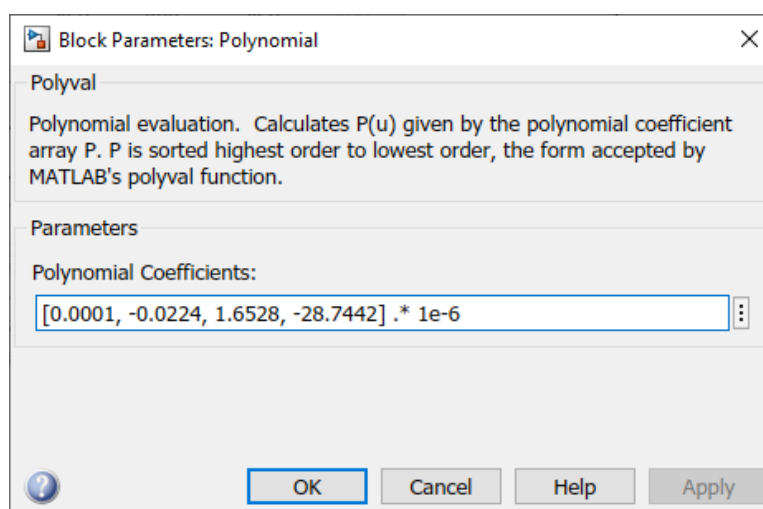


Рисунок 3.5 – Імітаційна модель температурної залежності КР

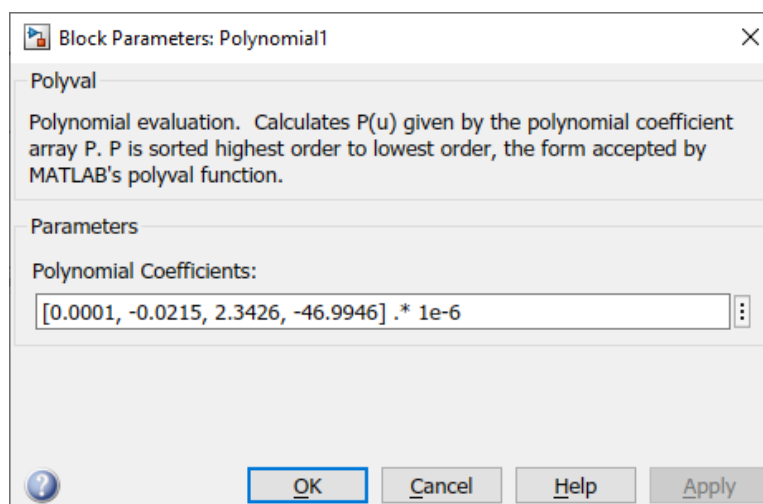
Моделювання відбувається в температурному діапазоні $T = -40 \dots 80$ °C. Лінійний закон зміни температури забезпечується шляхом застосування Simulink-елементу Ramp. Температурне зміщення $T = -40$ °C задається блоком Constant. Арифметична операція віднімання реалізована блоком Subtract.

Для реалізації поліноміальної функції були використані два блоки Polynomial.

Значення коефіцієнтів поліному були задані в діалоговому вікні блоків Polynomial (Рисунок 3.6).



a)



б)

Рисунок 3.6 – Діалогові вікна елементів Polynomial 1(а) та Polynomial 2 (б)

Параметр, який відповідає за оцінку температурної нестабільності частоти КР, називається температурним коефіцієнтом частоти (ТЧК), що визначається як відношення функції температурно-частотної характеристики (ТЧХ) КР до резонансної частоти.

На рисунку 3.7 зображені ТЧХ першої та третьої механічної гармоніки КР АТ-зрізу, які були отримані в результаті імітаційного моделювання [10].

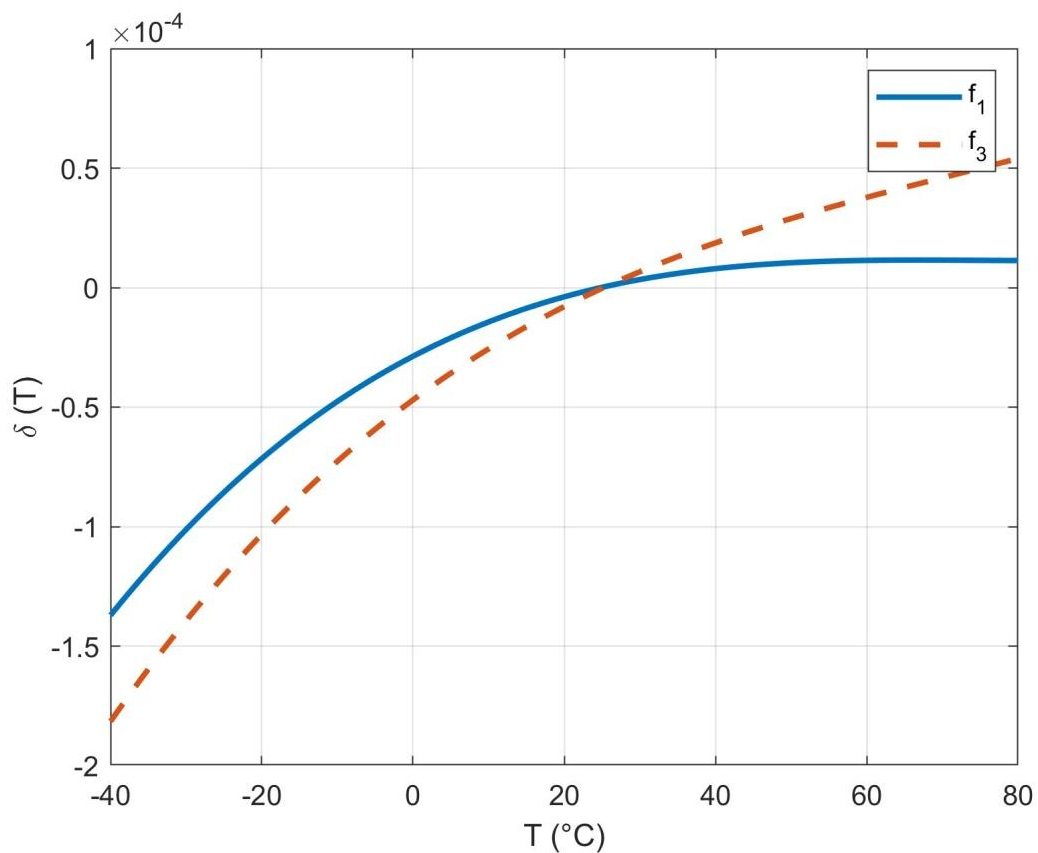


Рисунок 3.7 – Температурно-частотні характеристики першої та третьої моди КР АТ-зрізу

3.3 Імітаційна модель двочастотного кварцового генератора з урахуванням температурного впливу

Імітаційна модель КГ, яка враховує температурний режим КР була розроблена та протестована в середовищі імітаційного моделювання

MATLAB/Simulink.

На рисунку 3.8 зображена модель двочастотного КГ із температурним впливом на першу та третю частоти генератора.

Функціональні залежності ТЧХ реалізовані на базі елементів Polynomial. Арифметичні операції додавання та множення реалізовані за допомогою Simulink-елементів Sum та Product відповідно.

Модель двочастотного КГ складається із двох контурів, що реалізують температурну залежність відповідно першої та третьої моди КР (Рисунок 3.8, а).

Для зручності тестування та компактності Simulink-проекту, модель двочастотного КГ була оформлена у вигляді підсистеми, зовнішній вигляд якої представлений у вигляді блоку із входними та вихідними сигналами (Рисунок 3.8,б).

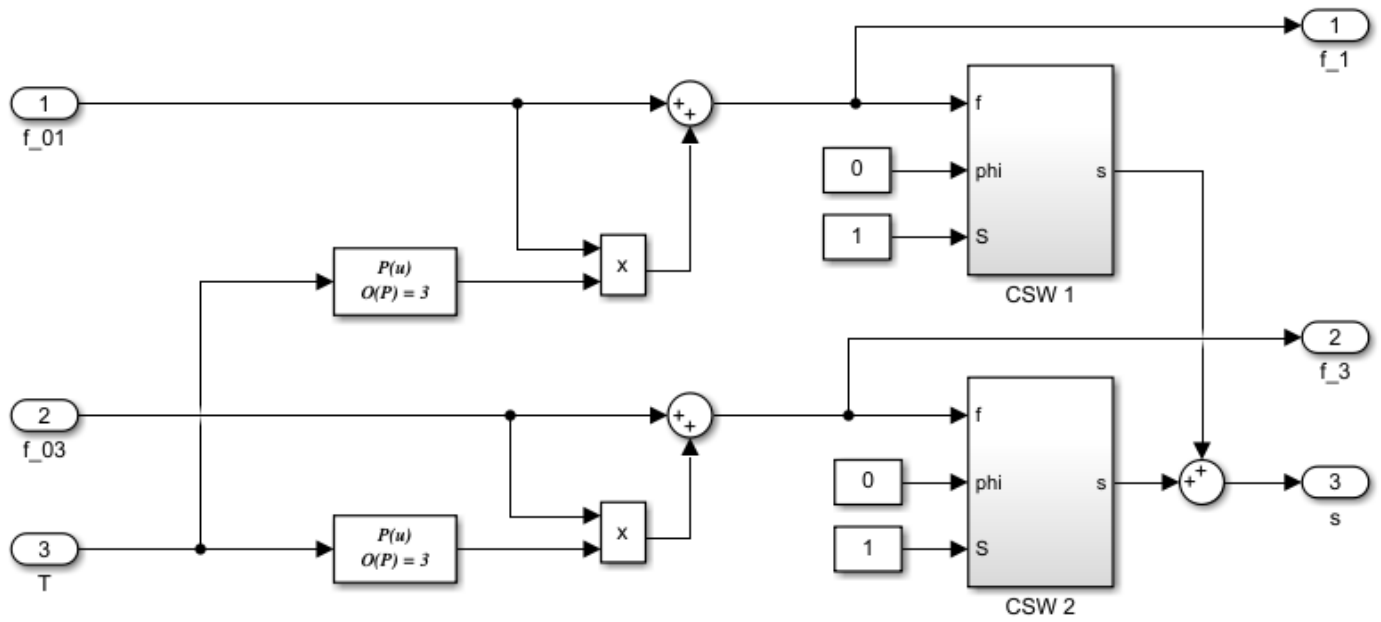
Вхідні сигнали модель двочастотного КГ (2-Freq. Osc.):

- $f_0 = 9999143$ Гц – номінальна частота першої моди КР;
- $f_1 = 29979567$ Гц – номінальна частота третьої моди КР;
- $T = -40 \dots 80$ °C – робоча частота КР (змінюється лінійно в даному діапазоні).

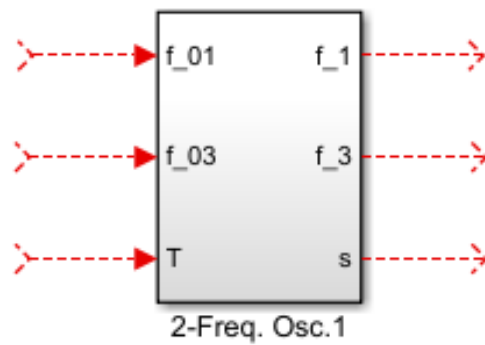
Вихідні сигнали моделі:

- f_{01} – частота першої моди КГ для заданої температури;
- f_{02} – частота третьої моди КГ для заданої температури;
- s – вихідний сигнал КГ.

Також до складу моделі двочастотного КГ, зображеної на Рисунку 3.8,б, входять два допоміжні Simulink-блоки, призначення яких моделювати гармонічні коливання відповідно першої та третьої моди КР.



а)



б)

Рисунок 3.8 – Імітаційна Simulink-модель двочастотного КГ,
яка враховує зміну температурного режиму:
внутрішня структура моделі (а), зовнішній інтерфейс (б)

Внутрішня структура підсистеми Continuous Sine Wave (CSW) зображена на Рисунку 3.9.

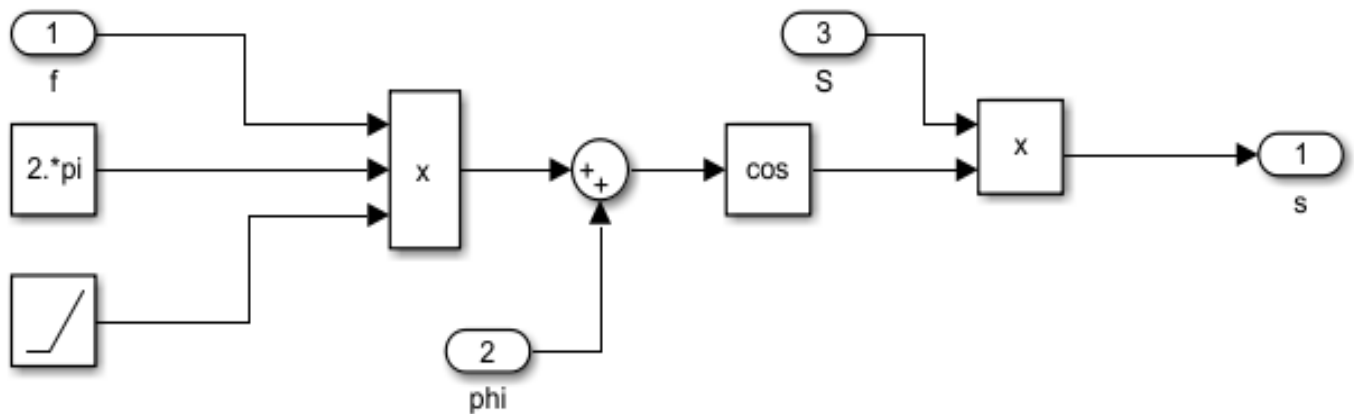


Рисунок 3.9 – Підсистема Continuous Sine Wave (CSW)

Модуль CSW призначений для моделювання генератора гармоніки КГ із заданою резонансною частотою. Крім миттєвого значення резонансної частоти, в якості вхідних параметрів системи приймаються початкова фаза ϕ та амплітуда S гармонічного коливання. Лінійний закон зміни повної фази забезпечується шляхом застосування Simulink-елементу Ramp.

Висновки до третього розділу

В третьому розділі магістерської роботи було зроблено наступне:

1. Розглянуто функціональні можливості програмного забезпечення MATLAB/Simulink. Середовище MATLAB є потужною системою, яка дозволяє вирішувати багато складних обчислювальних задач методами математичного аналізу, програмування та моделювання. Програма Simulink є розширенням системи MATLAB, яка була розроблена як візуальна мова програмування та імітаційного моделювання.

2. Засобами імітаційного моделювання, що надаються програмами

MATLAB/Simulink, було проведено моделювання температурних властивостей КГ та розроблено ряд імітаційних моделей.

3. Побудовано імітаційну модель двочастотного КГ, яка враховує дестабілізуючі фактори впливу температури на основі ТЧХ КР.

4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ КОЛИВАНЬ DDS- СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТИ НА ОСНОВІ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ КВАРЦОВОГО РЕЗОНАТОР ОПОРНОГО ГЕНЕРАТОРА

4.1 Структурна схема DDS синтезатора частоти на базі кварцового генератора із стабілізацією температури

На рисунку 4.1 зображена структурна схема DDS синтезатора частоти, в якому в якості опорного генератора використано КГ із стабілізацією параметрів температурного впливу за рахунок контролю температури [9, 10].

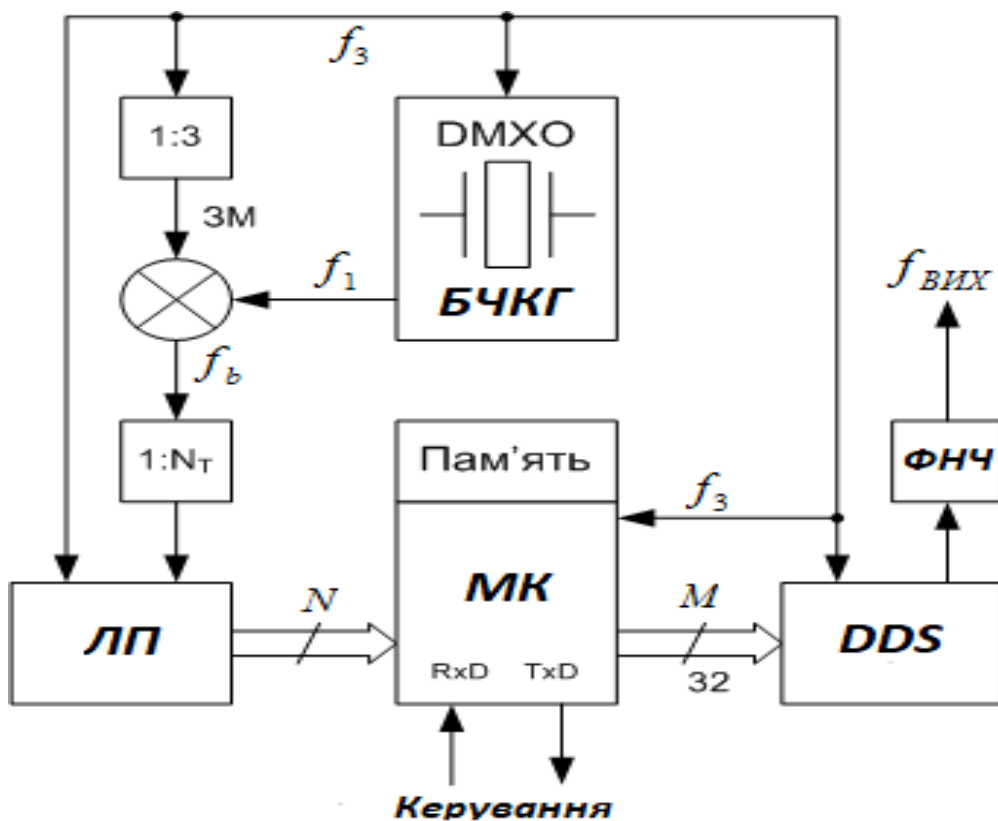


Рисунок 4.1 - структурна схема DDS синтезатора частоти на базі КГ із температурною стабілізацією

Схема, зображена на Рисунку 4.1 складається із багаточастотного (двочастотного) кварцового генератора (БЧКГ), лічильника періоду (ЛП), мікроконтролера (МК), синтезатора частоти DDS, фільтра низьких частот (ФНЧ), змішувача (ЗМ).

Опорний КГ працює в двочастотному режимі, збуджуючись на двох модах – f_1 та f_3 – відповідно першою та третьою механічною гармонікою КР.

Виділення різницевої частоти відбувається за рахунок подачі на змішувач сигналу f_1 та сигналу f_3 , поділеного на три за допомогою подільника частоти. Виділений сигнал різницевої частоти подається на подільник 1:N та потім на лічильник періоду.

Компенсація відхилень частоти DDS синтезатора виконується за допомогою сигналу, що надходить із ЛП. Значення параметру N подільника частоти задає роздільні здатність та період компенсації. На основі цього сигналу, який практично лінійно залежить від температури КГ, МК виробляє цифрових сигнал корекції частоти для DDS синтезатора.

4.2 Розробка системи температурного контролю кварцового генератора

Імітаційна модель температурного контролю КР, яка була побудована та протестована в програмному середовищі імітаційного моделювання MATLAB/Simulink, зображена на Рисунку 4.2.

Номинальні значення частот $f_{1,3}$ задаються за допомогою блоків Constant. Вихідна частота першої гармоніки генератора збільшується втричі за допомогою елемента Gain, вихідний сигнал від якого подається на модель змішувача (Mixer) з метою виділення сигналу різницевої частоти (рисунок 4.2).

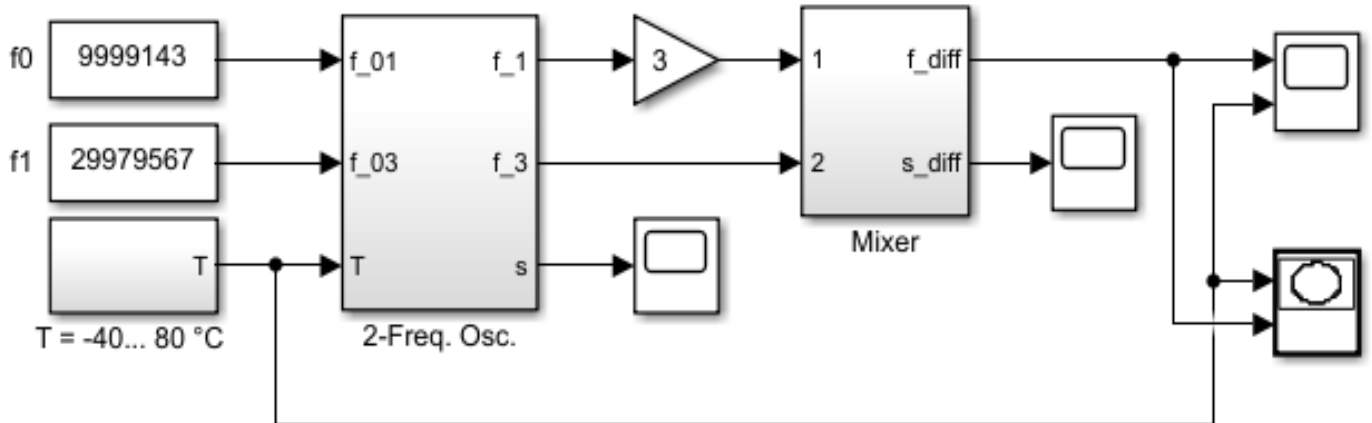


Рисунок 4.2 – Модель блоку температурного контролю КР

Алгоритм моделювання передбачає лінійне наростання температури в межах від -40 до $+80$ °C, що реалізовано за допомогою підсистеми, внутрішня структура якої зображена на Рисунку 4.3.

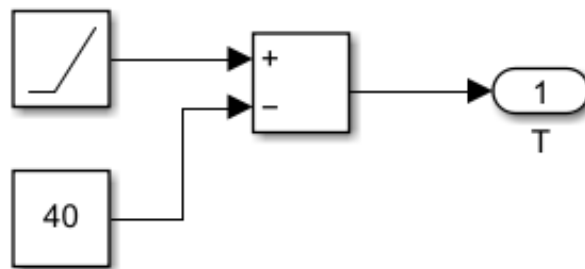


Рисунок 4.3 – Лінійне наростання температури КР

Структура моделі змішувача показана на Рисунку 4.4. Вона включає усі вищеписані під моделі та блоки, в тому числі, модель CSW (Рисунок 3.9).

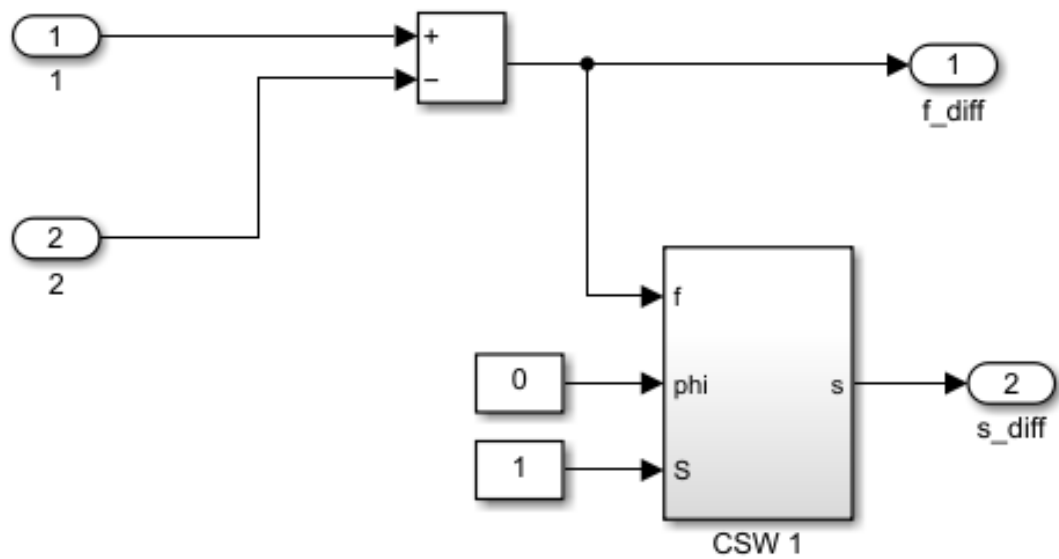


Рисунок 4.4 – Модель змішувача

Результати моделювання показані на Рисунках 4.5 – 4.7:

- Рисунок 4.5 – вихідний сигнал двочастотного КГ, що складається із суми першої та третьої механічної гармоніки КР;
- Рисунок 4.6 – часовий графік сигналу різницевої частоти на виході блоку змішувача (Міхер) моделі, що зображена на Рисунку 4.2
- Рисунок 4.7 – залежності різницевої частоти від температури КР

Як видно із Рисунку 4.7, а залежність різницевої частоти f_0 від температури має практично лінійний характер, а отже може бути з достатньою точністю описана лінійної апроксимуючою функцією:

$$f_0 = a + kT, \quad (4.1)$$

Апроксимована залежність $f_0(T)$ зображена на Рисунку 4.7, б.

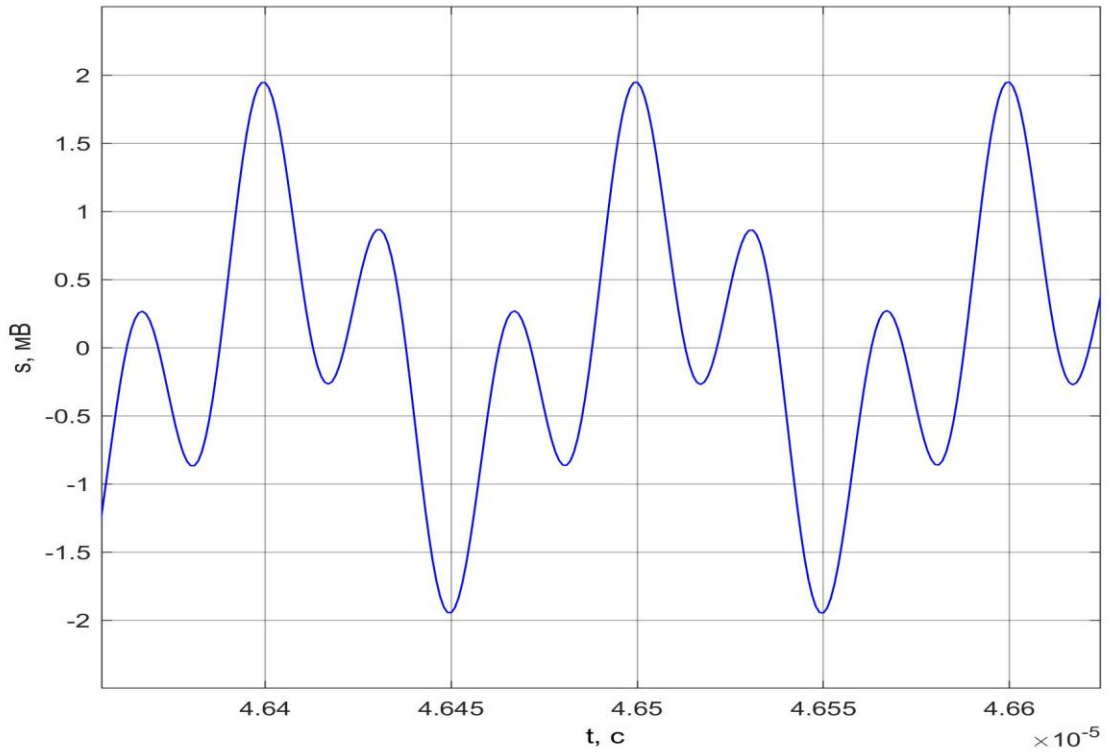


Рисунок 4.5 – Вихідний сигнал КГ, що працює на двох частотах.

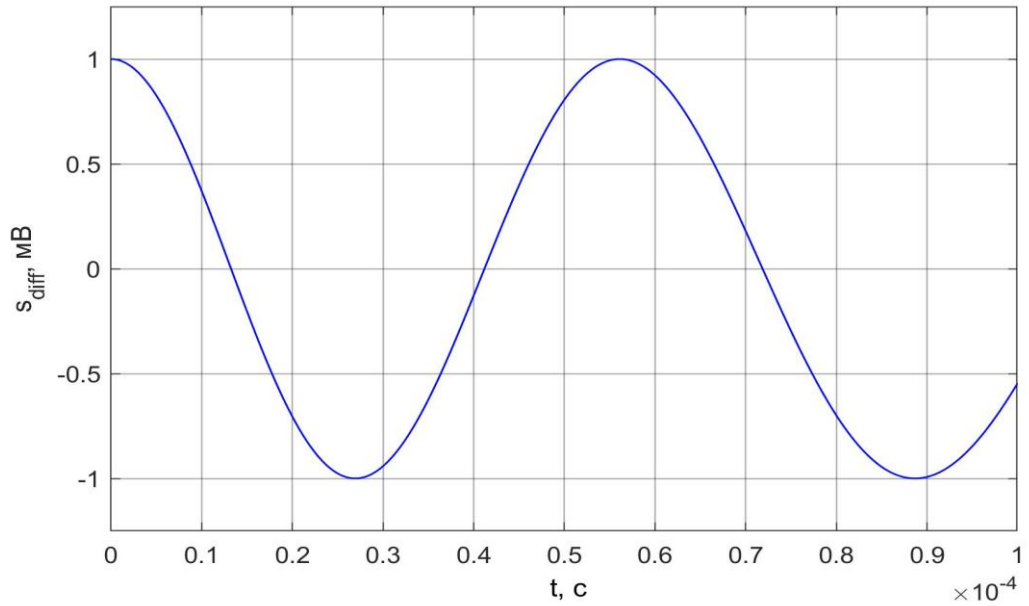
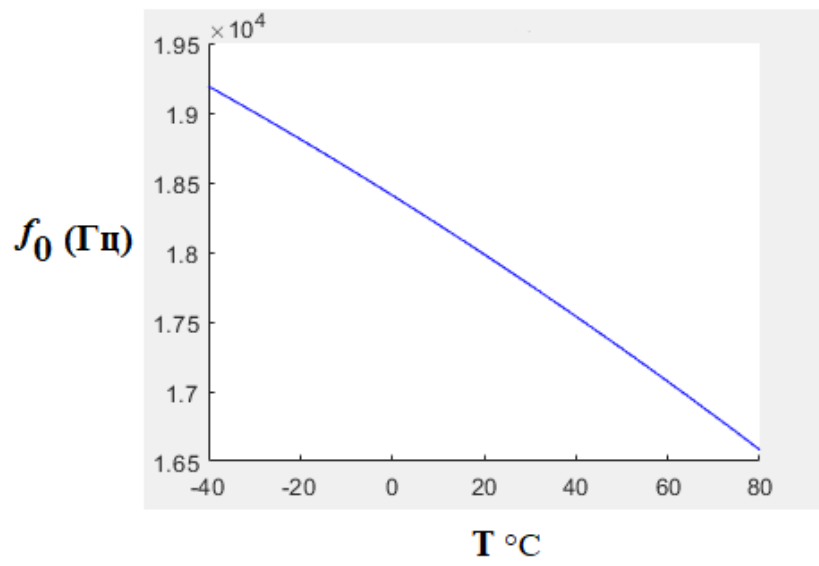
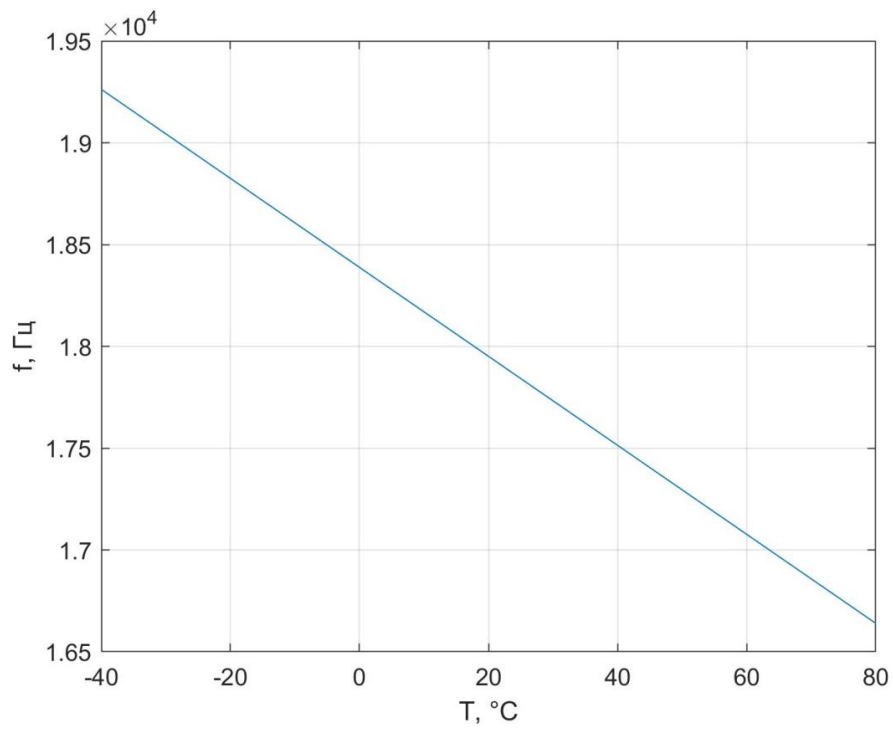


Рисунок 4.6 – Сигнал різницевої частоти на виході змішувача



а)



б)

Рисунок 4.7 – Залежність різницевої частоти від температури КР: результат моделювання (а), лінійна апроксимація (б)

4.3 Розробка системи температурної стабілізації для DDS синтезатора частоти

4.3.1 Технічні характеристики DDS синтезатора AD9850

В якості прикладу DDS синтезатора частоти було розглянуто мікросхему AD9850 фірми Analog Devices (AD) [15].

Синтезатор AD9850 – це високоінтегрований пристрій, який використовує технологію прямого цифрового синтезу (DDS) в поєднанні з внутрішнім високошвидкісним, високопродуктивним ЦАП і компаратором, щоб сформувати повноцінний цифровий програмований синтезатор частоти і функцію генератора тактових імпульсів [15].

При підключенні до високоточного джерела синхронізації AD9850 генерує спектрально чисту, програмно керовану за частотою та фазі, аналоговий вихідну гармонічний сигнал. Ця синусоїда може бути використана безпосередньо як джерело частоти сигналу, або перетворена в прямокутний сигнал для застосування в гнучких генераторах тактових імпульсів.

Високошвидкісне ядро DDS AD9850 підтримує підстроювання частоти за допомогою 32-бітне слова, що призводить до роздільної здатності підстроювання на виході 0,0291 Гц (для опорного тактового сигналу 125 МГц).

Архітектура схеми AD9850 дозволяє генерувати вихідні частоти до половини опорної тактової частоти (або 62,5 МГц), а вихідна частота може бути змінена в цифровому вигляді (асинхронно) зі швидкістю до 23 мільйонів разів в секунду [15].

Пристрій також забезпечує п'ять біт цифрової фазової модуляції, що дозволяє зміщувати фазу на виході з кроком 180° , 90° , 45° , $22,5^\circ$, $11,25^\circ$ та будь-яку їх комбінацію. Також до складу AD9850 входить високошвидкісний

компаратор, який може бути сконфігурований на приймання зовнішнього відфільтрованого виходу ЦАП для генерації прямокутного сигналу з низьким рівнем джиттера на виході [16, 17].

Таке конструкторське рішення дозволяє використання пристрою в якості гнучкого генератора тактових імпульсів. Керуюче слово для підстроювання частоти, управління і фазової модуляції завантажуються в AD9850 через паралельний байт або послідовний формат завантаження [15].

Паралельний формат завантаження складається з п'яти ітеративних завантажень 8-бітового керуючого слова (байте):

- перший байт відповідає за фазовою модуляцією, дозволом вимкнення живлення та форматом завантаження;
- байти 2-5 складають 32-бітне слово підстроювання частоти.

Послідовне завантаження здійснюється за допомогою 40-бітового послідовного потоку даних на одному виводі. Синтезатор AD9850 випускається в компактному 28-вивідному корпусі SSOP з виводами для монтажу на лицьову поверхню. Він призначений для роботи в розширеному промисловому діапазоні температур від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$ [15-17].

В Таблиці 4.1 наведені основні технічні характеристики DDS синтезатора AD9850 [15-17].

Таблиці 4.1 – Технічні характеристики DDS синтезатора AD9850 [15-17]

<i>I</i>
Частота тактового сигналу (базова): 125 МГц
Інтегровані високоякісний ЦАП і швидкодіючий компаратор
SFDR ЦАП > 50 дБ за частоти вихідного сигналу 40 МГц
32-розрядне слово налаштування частоти

<i>I</i>
Спрощений інтерфейс керування: паралельний байтовий або послідовний формати завантаження
Можливість фазової модуляції
Робота від однієї напруги живлення 3.3 В або 5 В
Низьке енергоспоживання: - 380 мВт для 125 МГц (5 В) - 155 мВт для 100 МГц (3.3 В)
Функція зниженого енергоспоживання
Компактний 28-вивідний корпус SSOP

На Рисунку 4.8 зображена блок-схема DDS синтезатора AD9850 [15].

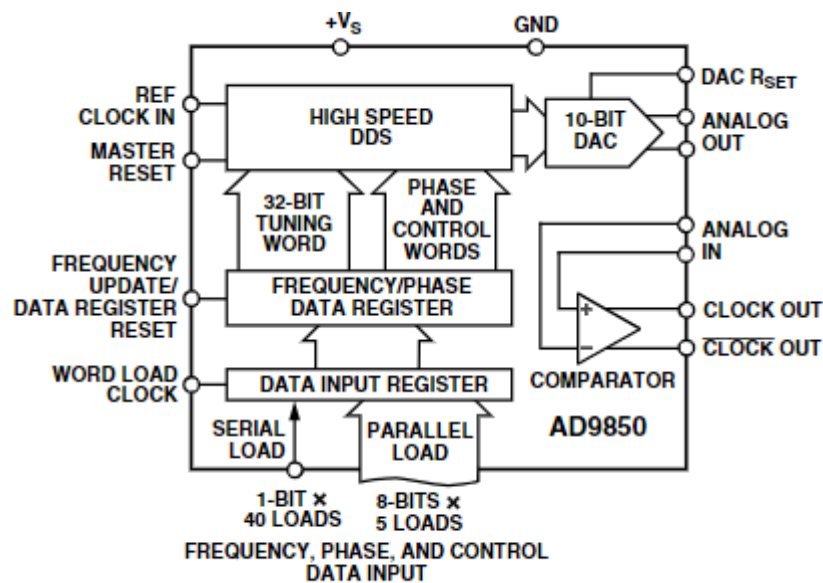


Рисунок 4.8 – Блок-схема DDS синтезатора AD9850 [15]

На Рисунку 4.9 зображено фото синтезатор DDS AD9850, виконаного у вигляді модуля-розширення [17].

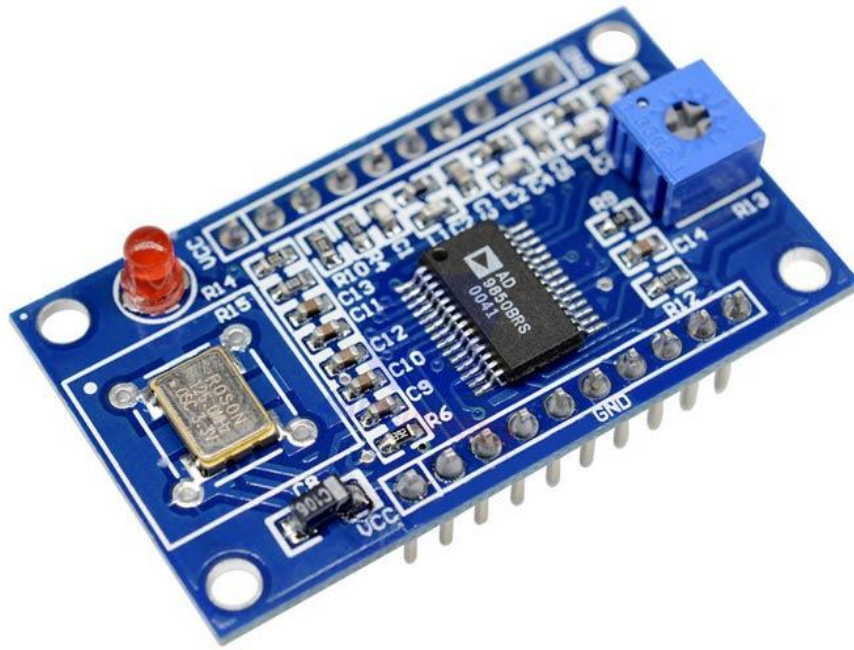


Рисунок 4.8 – Синтезатор DDS AD9850 у вигляді модуля-розширення [17]

4.3.2 Імітаційна модель синтезатора DDS в середовищі MATLAB/Simulink

Спрощена імітаційна модель синтезатора DDS, який базується на основних функціях та технічних характеристиках реального синтезатора AD9850 була розроблена і протестована в середовищі MATLAB/Simulink.

Імітаційна модель DDS синтезатора показана на Рисунку 4.9. Модель представлена у вигляді підсистеми, яка має такі входи (Рисунок 4.9, а):

- M – керуюче слово (32-бітне число);
- FCLK – значення частоти опорного КГ;
- Phi – фазовий зсув;

та виходи:

- f – значення вихідної частоти синтезатора;
- s – часовий графік вихідного гармонічного сигналу.

Внутрішня структура підсистеми моделі DDS синтезатора показана на

Рисунку 4.9, б. Ця модель також в свою чергу складається із двох підсистем: блоку перетворювача коду в частоту (Code To Frequency Converter, CToF Conv), блоку CSW, який був розглянутий в розділі 3.3 (Рисунок 3.9) та елементу Constant, який задає амплітуду вихідного аналогового сигналу.

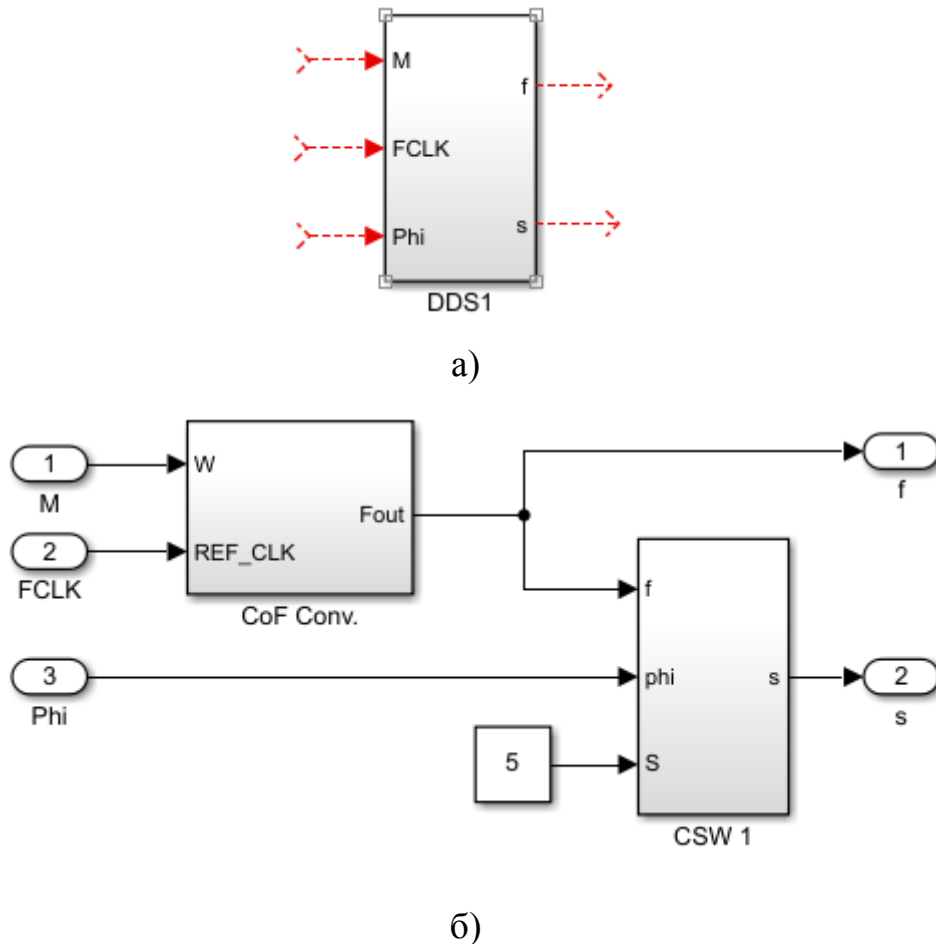


Рисунок 4.9 – Імітаційна модель DDS синтезатора:
зовнішній інтерфейс підсистеми (а), внутрішня реалізація моделі (б)

Реалізація блоку перетворювача коду в частоти показана на Рисунку 4.10. Вхідними параметрами даної підсистеми є:

- W – керуюче слово (32-бітне число);
- REF_CLK – опорна частота.

Підсистема повертає значення частоти, на яку необхідно пере налаштувати DDS синтезатор для заданого значення кодового слова W. Також до складу даної

підсистеми входять елементи два Constant для реалізації арифметичних операцій над бітовим словом, елемент Gain для імітації роботи реального DDS синтезатора, коли максимальна вихідна частота обмежена половиною значення тактової частоти, а також блоки Sum, Subtract та Multiply для реалізації відповідних операцій.

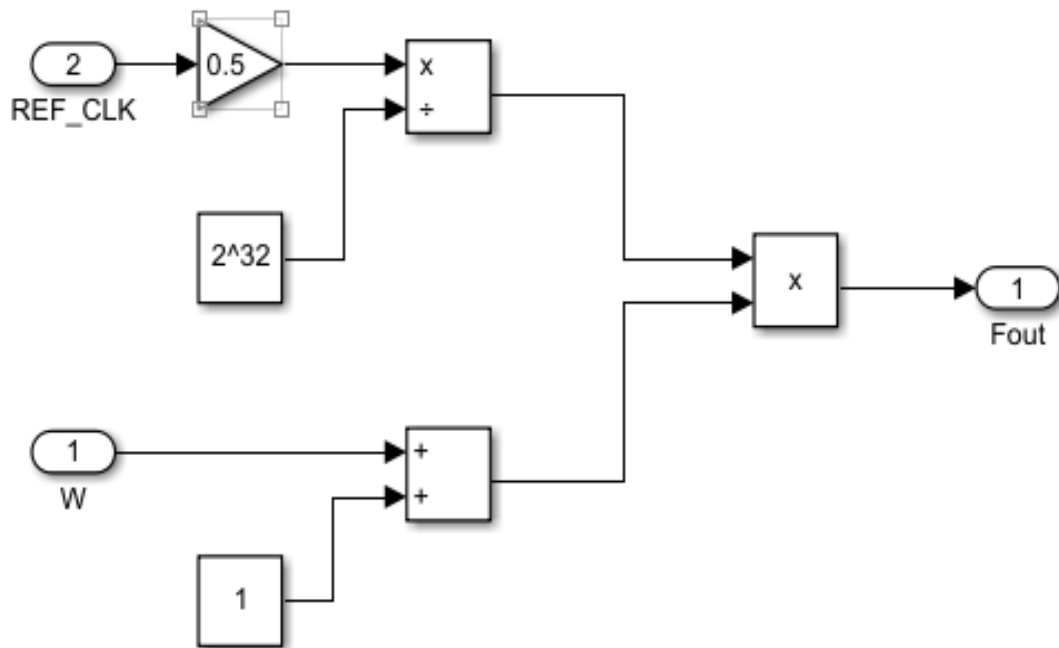


Рисунок 4.10 – Внутрішня структура моделі перетворювача код-частота

4.3.4 Розробка моделі стабілізатора та алгоритму стабілізації DDS синтезатора на основі контролю температури кварцового генератора

Представимо частоту сигналу опорного КГ у вигляді суми:

$$f_{clk} = f_{nom} + \Delta f(T), \quad (4.2)$$

де f_{nom} – номінальна частота опорного КГ (третя гармоніка);

$\Delta f(T)$ – температурне відхилення номінальної частоти опорного КГ від

номінальної.

Згідно імітаційної моделі, яка зображена на Рисунку 4.10, та з урахуванням (4.2), вихідний сигнал моделі DDS-синтезатора має такий вигляд:

$$f_{out} = 0,5 \cdot f_{clk} \frac{n+1}{2^{32}}, \quad (4.3)$$

Для даної моделі в якості частоти f_{clk} використовується третя гармоніка f_3 КР, модель якого зображена на Рисунок 3.9. Температурне відхилення враховане згідно ТЧХ, апроксимація якої задана виразом (3.1) для $j = 3$.

Розрахунок керуючого кодового слова відбувається згідно формули:

$$n = \frac{f_{dds} \cdot 2^{32}}{0,5 f_3(T)} - 1, \quad (4.4)$$

де f_{dds} – очікуване значення частоти на виході DDS синтезатора;

$f_3(T)$ – температурно-залежна частота третьої гармоніки КР, що використовується як опорна частота DDS синтезатора.

Імітаційна модель температурного стабілізатора була розроблена та протестована в середовищі MATLAB/Simulink. На Рисунку 4.11 показана структура даного блоку.

Модель температурного стабілізатора (Рисунок 4.11) складається з трьох підсистем, кожна з яких виконує наступні функції:

1) оцінка температури КР на основі апроксимованої температурної залежності різницевої частоти згідно (4.1);

2) розрахунок температурного відхилення частоти третьої гармоні КР згідно ТЧХ (3.1) для $j = 3$;

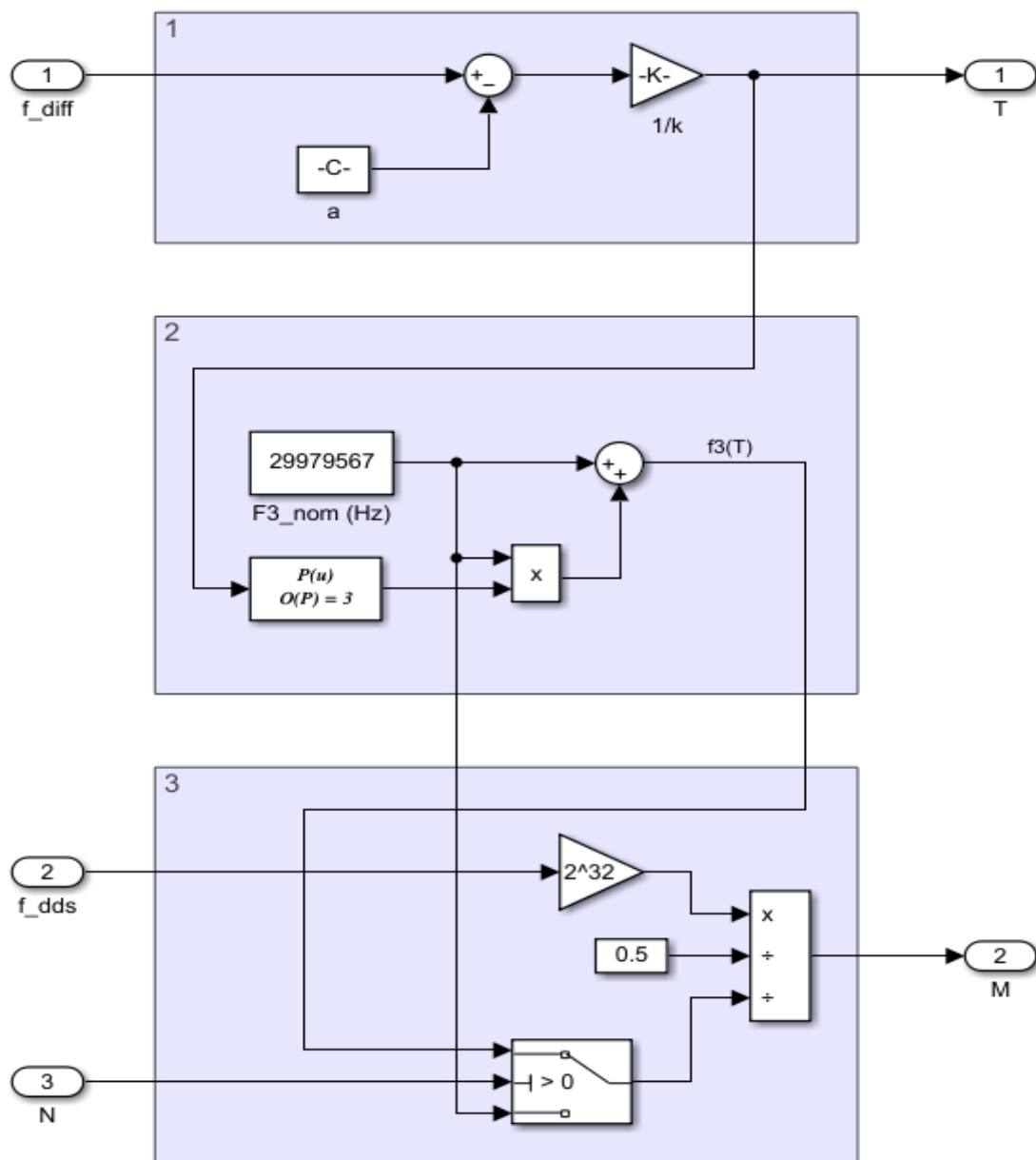
3) розрахунок оптимального значення кодового слова для керування DDS синтезатором згідно виразу (4.4).

На рисунку 4.12 показано модуль температурного стабілізатора у вигляді підсистеми Simulink з наступними вхідними параметрами:

- f_{diff} – значення різницевої частоти;
 - f_{dds} – частота, яку необхідно забезпечити на виході DDS синтезатора;
 - N – контрольний біт, який відповідає за ввімкнення (1) чи вимкнення (0) функції температурної стабілізації;

та вихідними параметрами:

- T – температура КР;
- M – оптимальне кодове слово DDS синтезатора.



1 – оцінки температури, 2 – розрахунок температурного відхилення частоти,

3 – визначення оптимального значення кодового слова

Рисунок 4.11 Імітаційна модель температурного стабілізатора

Для порівняння результату роботи моделі DDS синтезатора в режимі із стабілізацією та без стабілізації, було реалізовано можливість керувати ввімкненням режиму стабілізації за допомогою контрольного біту. Це було зроблено за допомогою елементу перемикача Switch, який в залежності від контрольного біту, підставляє в розрахункову підсистему скореговане значення опорної частоти або номінальне.

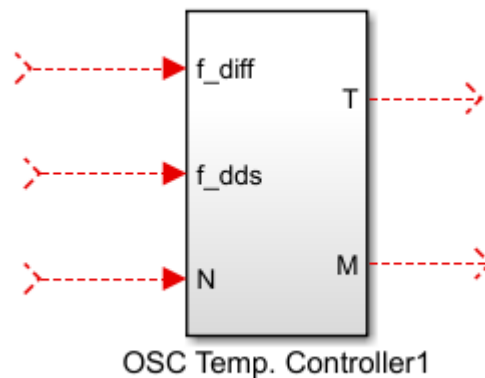


Рисунок 4.12 – Зовнішній інтерфейс підсистеми температурного стабілізатора

На базі температурного стабілізатора, модель якого зображена на Рисунку 4.12, була розроблена імітаційна модель керованого DDS синтезатора (Рисунок 4.13). Особливістю цієї моделі є застосування температурного стабілізатора для визначення оптимального керованого слова для синтезатора DDS.

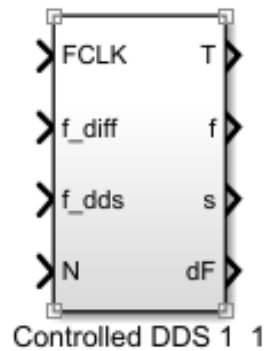
Вхідними параметрами моделі керованого DDS синтезатора є:

- FCLK – частота опорного КГ;
- f_{diff} – різницева частота;
- f_{dds} – частота, яку необхідно забезпечити на виході DDS синтезатора;
- N – контрольний біт, який відповідає за ввімкнення (1) чи вимкнення (0) функції температурної стабілізації;

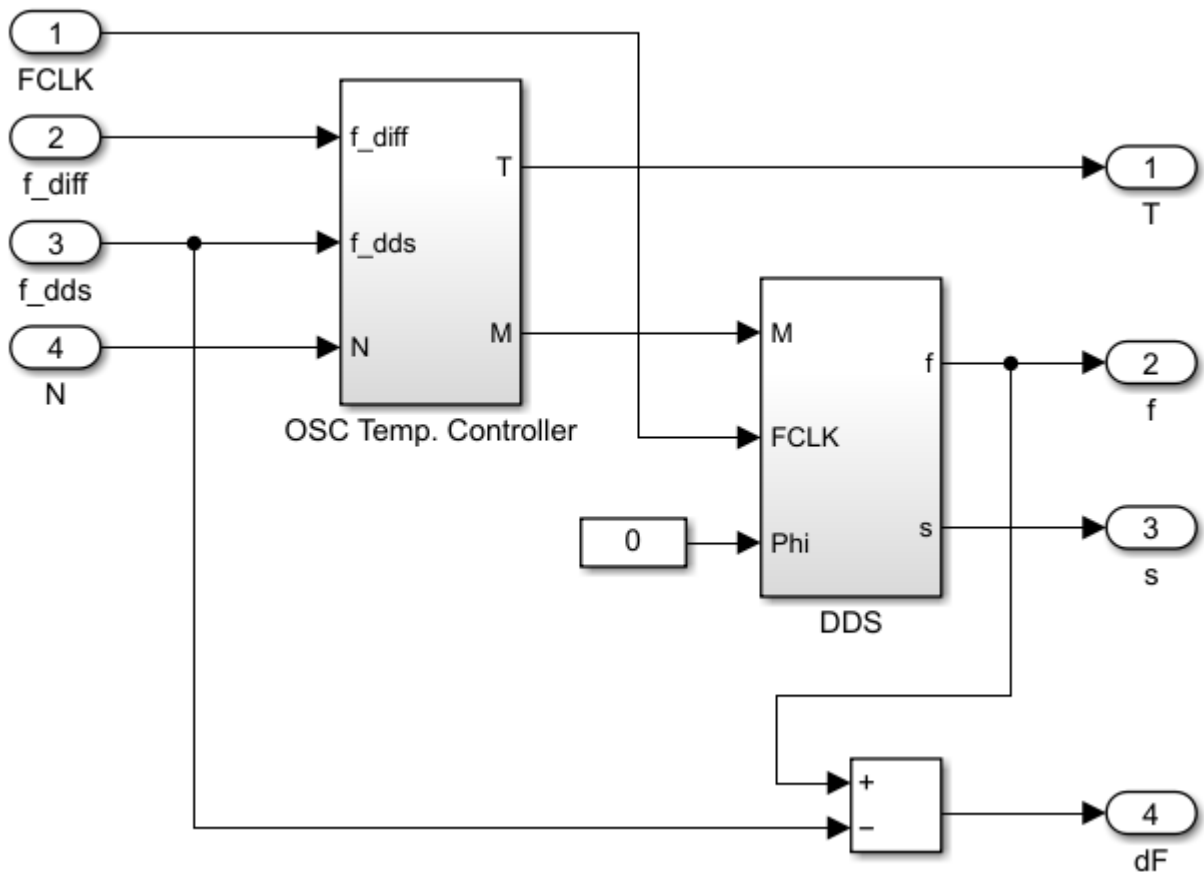
вихідні параметри:

- T – значення температури;

- f – вихідна частота DDS синтезатора;
- s – вихідний гармонічний сигнал DDS синтезатора;
- dF – абсолютне відхилення частоти на виході DDS синтезатора.



a)



б)

Рисунок 4.13 – Імітаційна модель керованого DDS синтезатора на базі температурного стабілізатора:
зовнішній інтерфейс підсистеми (а), внутрішня реалізація моделі (б)

Загальна імітаційна модель, яка включає в себе усі вищеописані блоки, зображена на Рисунку 4.14. Вона складається із моделі двочастотного КГ, змішувача для виділення різницевої частоти, двох синтезаторів DDS та допоміжних блоків Constant для задання параметрів моделювання, блоків Display для виведення температури КР та блоку XY Plot для побудови залежностей відхилення вихідної частоти DDS синтезатора.

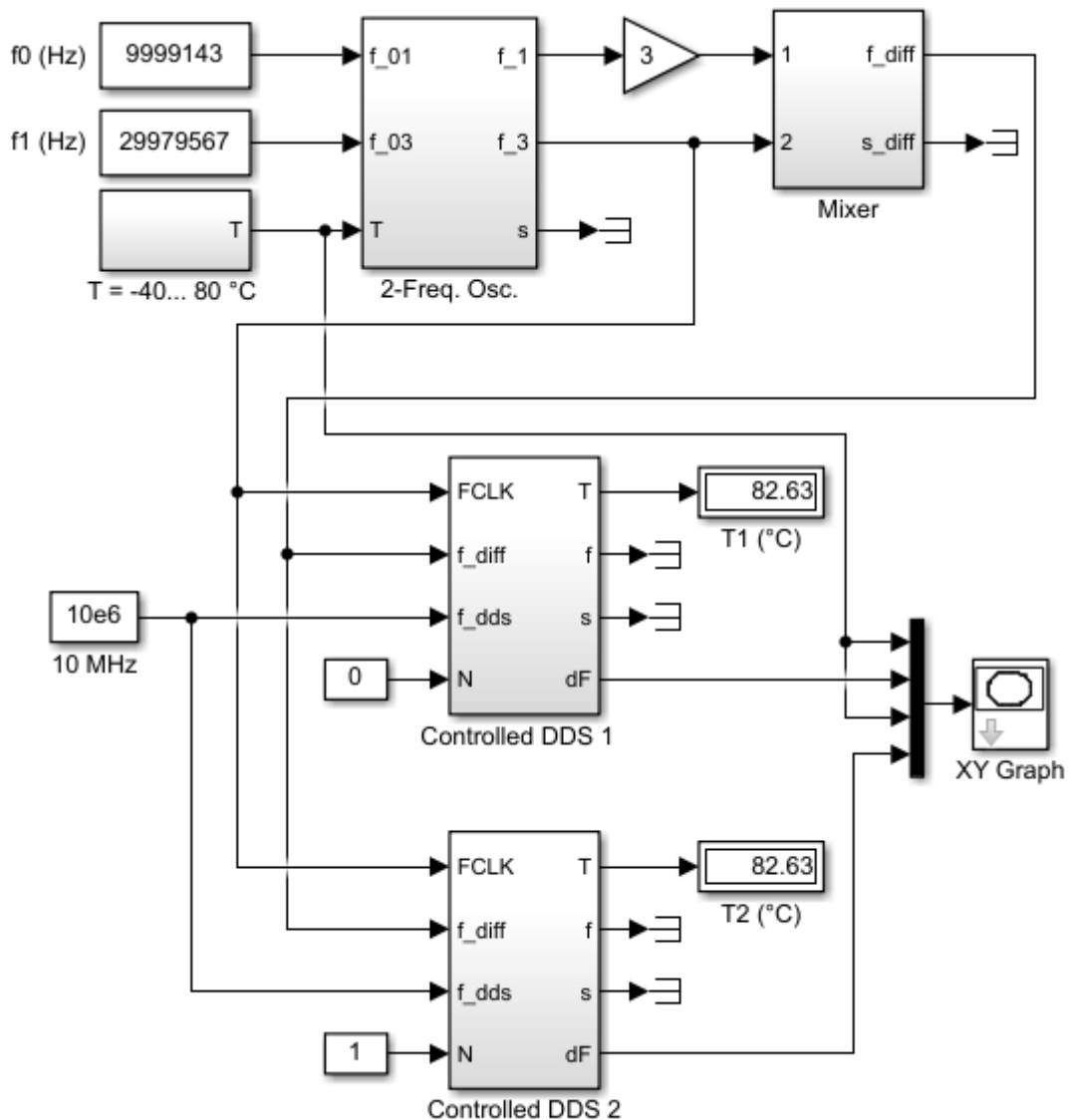


Рисунок 4.14 – Імітаційна модель DDS синтезатора із температурною компенсацією на частоті 10 МГц

До складу імітаційна модель, що зображена на рисунку 4.15, входять два керованих DDS синтезатора (Controlled DDS 1,2), які використовують спільний КГ в якості опорного генератора, відповідно із увімкненою та вимкненою

функцією стабілізації.

Імітаційне моделювання проводилось для робочого діапазону температури від -40 до 80 $^{\circ}\text{C}$, що лінійно наростала протягом часу моделювання.

Результат моделювання – температурні залежності відхилення вихідної частоти DDS синтезаторів з увімкненою (1) та вимкненою функцією стабілізації показані на Рисунку 4.15.

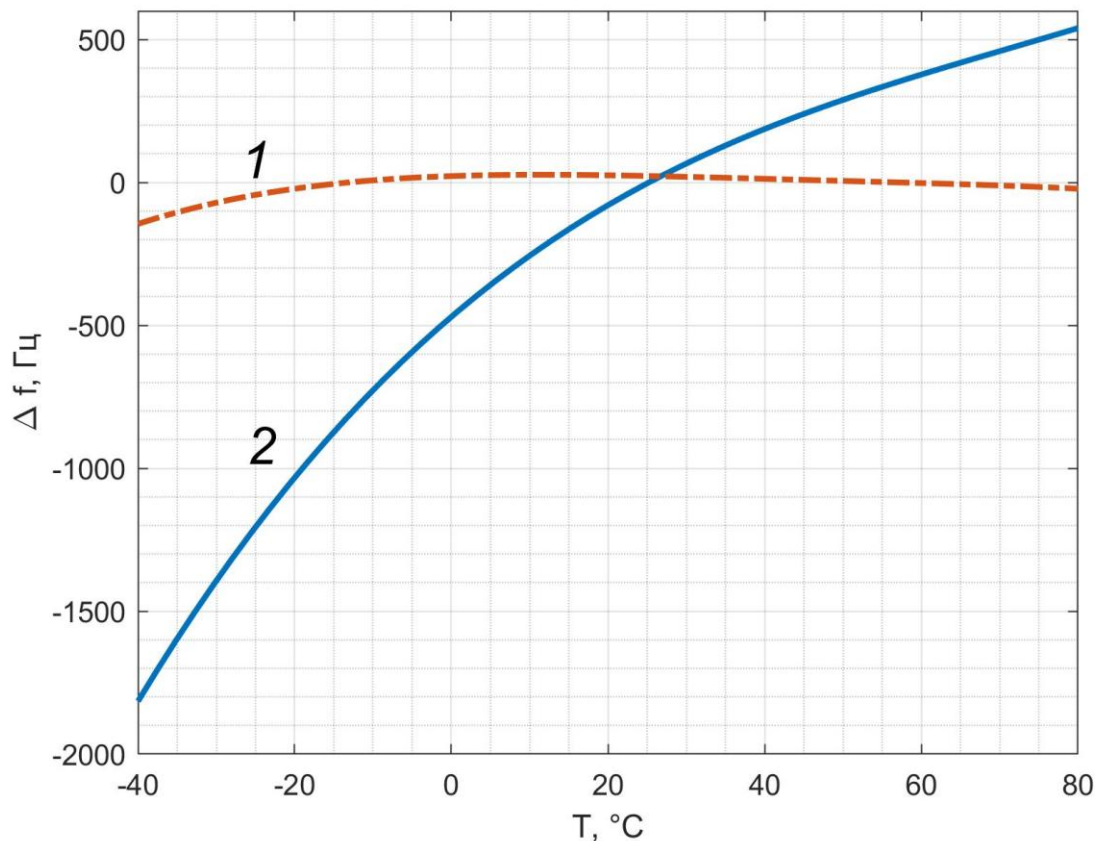


Рисунок 4.15 – Температурні залежності відхилення вихідної частоти DDS синтезаторів з увімкненою (1) та вимкненою функцією стабілізації

Співставлення отриманих результатів показує, що навіть за відносно невисокої стабільності коливань f_1 та f_3 , метод температурної стабілізації DDS синтезатора із опорним КГ дозволяє суттєво зменшити відхилення вихідної частоти DDS синтезатора.

Як видно із Рисунка 4.15, ефективність стабілізації особливо проявляється

при роботі в умовах, які суттєво відрізняються від номінальних. Моделювання показало, що для нижньої межі робочої температури ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), за рахунок температурної стабілізації вдається зменшити відхилення вихідної частоти DDS синтезатора майже на один порядок.

Звичайно, реальні результати очікуються значно гіршими ніж ті, що були отримані в результаті комп'ютерного моделювання. Причинами цього є ідеалізації параметрів моделей, нехтуванням динамічних температурних характеристик КР та інших дестабілізуючих факторів, які погіршують стабільність частоти КГ. Однак, показана принципова можливість та доцільність застосування даного методу для стабілізації параметрів кварцових радіотехнічних пристроїв.

Висновки до четвертого розділу

В четвертому розділі магістерської роботи було зроблено наступне:

1. Описано структурну схему системи температурної компенсації відхилень частоти синтезатора DDS, яка базується на температурному контролі КР опорного генератора.

2. Розроблено та протестовано імітаційну модель системи температурного контролю КР, який працює в багаточастотному режимі збудження. В результаті моделювання отримано залежність різницевої частоти від температури, яка була апроксимована лінійною функцією (поліномом 1-го порядку).

3. Розроблено спрощену імітаційну модель DDS синтезатора частоти, яка базується на технічних характеристиках реального пристрою (DDS синтезатора AD9850 фірми Analog Devices).

4. Розроблено імітаційну модель керованого DDS-синтезатора частоти, яка складається із модуля температурного компенсатора відхилення частоти та моделі DDS синтезатора. Температурний компенсатор здійснює вимірювання сигналу різницевої частоти, на основі яких отримує інформацію про

температурний стан КР та на основі цих даних корегує кодове слово для DDS синтезатора з метою мінімізації відхилення частоти на його виході.

5. Проведено імітаційне моделювання роботи DDS-синтезатора із опорним генератором, який працює в широкому діапазоні зміни температури, відповідно із увімкненою стабілізацією параметрів та без стабілізації. Отримані результати показали суттєвих вигреш у випадку застосування стабілізації (майже на один порядок зменшення відхилення частоти у випадку роботи близько до нижньої межі робочого температурного діапазону КР), однак для реальних пристроїв ці результати будуть не настільки високі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ

Відповідно до поставленої мети та задач дослідження, в магістерській роботі були вирішені наступні науково-технічні задачі:

1. Проведено аналіз літературних джерел за темою роботи, щодо практичної доцільності застосування кварцових резонаторів для забезпечення стабільності генерування опорних частот для радіотехнічних пристроїв (в тому числі, мікропроцесорних та мікроконтролерних пристроїв та синтезаторів частоти DDS).

2. Проведено аналіз дестабілізуючих факторів, які призводять до нестабільності коливань кварцових генераторів (зокрема методів компенсації температурного впливу).

3. Розроблено пакет імітаційних моделей в програмному середовищі MATLAB/Simulink. До складу цього пакету входить: модель температурно-залежного багаточастотного кварцового генератора, спрощена модель 32-розрядного DDS-синтезатора частоти, та система температурної стабілізації вихідних коливань DDS-синтезатора. Дані моделі є представляють собою практичне значення магістерської роботи.

В результаті проведеного імітаційне моделювання роботи DDS-синтезатора із опорним генератором для широкому діапазоні зміни температури із стабілізацією параметрів та без стабілізації, були отримані результати, які показують суттєвих вигравш у випадку застосування стабілізації (майже на один порядок зменшення відхилення частоти у випадку роботи близько до нижньої межі робочого температурного діапазону КР). А саме, моделювання показало, що для нижньої межі робочої температури ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), за рахунок температурної стабілізації вдається зменшити відхилення вихідної частоти DDS синтезатора приблизно на один порядок (150 Гц із стабілізацією та 1.8 кГц без стабілізації).

Наукова новизна роботи полягає у набутті подальшого розвитку методу стабілізації параметрів кварцових генераторів за рахунок контролю температури кварцового резонатора, що працює в багаточастотному режимі збудження.

Метод стабілізації застосовано до опорного генератора DDS синтезатора частоти.

Розглянутий метод також має ряд недоліків, до яких зокрема належить необхідність вимірювання температурно-частотних характеристик кварцового резонатора, оскільки ця інформація не надається розробниками в технічній документації до промислових кварцових резонаторів.

Реальні результати очікуються значно гіршими ніж ті, що були отримані в результаті комп'ютерного моделювання. Причинами цього є ідеалізації параметрів моделей, нехтуванням динамічних температурних характеристик КР та інших дестабілізуючих факторів, які погіршують стабільність частоти КГ. Однак, показана принципова можливість та доцільність застосування даного методу для стабілізації параметрів кварцових радіотехнічних пристроїв.

Апробацію результатів дослідження було проведено у вигляді тез доповіді на XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук», яка проходила в м. Хмельницькому 18-19 листопада 2022 року.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Підченко С.К. Теорія і реалізаційні основи інваріантних багаточастотних п'єзореzonансних пристроїв та систем/Монографія//Хмельницький: ХНУ, 2014. – 400 с.
2. Підченко С.К. П'єзореzonансні пристрої. Фізичні принципи роботи, основні параметри та характеристики /Ф.Ф. Колпаков, С.К. Підченко. – Консп. Лекцій з курсу “Радіопередавальні пристрої”. – Хмельницький: ТУП, – 2003. – 59 с.
3. What is Crystal Oscillator Circuit and its Working? [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.watelectronics.com/crystal-oscillator-circuit-working-applications/> – 1.11.2022.
4. External Crystal Oscillator Modes [Electronic resource]. – Access mode: <https://microchipdeveloper.com/8bit:lp> – 1.11.2022.
5. Андреев О.В. Пристрої генерування та формування радіосигналів: навч. посібник [електронне видання] / О.В. Андреев, В.В. Ципоренко, В.Г. Ципоренко, І.І. Полещук – Житомир: ЖДТУ, 2018. – 138 с.
6. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Пристрої генерування та формування сигналів” з напрямку 6.050901 «Радіотехніка», укл. Марченко С.В. Дніпродзержинськ; ДДТУ, 2015. – 20 с.
7. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Пристрої генерації та формування сигналів" для студентів спеціальностей 7.090701 "Радіотехніка" усіх форм навчання./Укл. С. П. Гулін, В. Г. Козодавов.- Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – 53 с.
8. Шинкарук О.М. Приймання та оброблення сигналів : навчальний посібник / О.М. Шинкарук, В. І. Правда, Ю. М. Бойко. – Хмельницький : ХНУ, 2013. – 365 с.
9. V. Stofanik, I. Balaz and M. Minarik, "Digitally temperature compensated DDS," Proceedings of the 2001 IEEE International Frequency Control Symposium and

PDA Exhibition (Cat. No.01CH37218), 2001, pp. 816-819, doi: 10.1109/FREQ.2001.956387.

10. Підченко, С.К. Моделювання термокомпенсованого DDS в середовищі MATLAB / Підченко, С.К.; Марков, С.В.; Лаба, О.А.; Акулінічев, А.А. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – Вип. 1 – С. 77-80.

11. Гайдук О. В. та ін. Радіотелекомунікаційні технології: Радіопередавальні та радіоприймальні пристрої. - Ніжин: ТОВ “Видавництво “Аспект-Поліграф”, 2007. - 320 с.

12. В. М. Кичак В. М. Телекомунікаційні системи передачі : підручник / В.М. Кичак, О. М. Шинкарук, Г. Г. Бортник, І. І. Чесановський, О. В. Стальченко. – Хмельницький : Видавництво НАДПСУ, 2016. – 424 с.

13. Ткачук, В. М. Радіопередавальні пристрої : навчальний посібник / В. М. Ткачук, С. М. Цирульник, Т. А. Петренко. – Вінниця : Т. П. Барановська, 2015. – 188 с.

14. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Волоконно-оптичні системи передачі. Навчальний посібник — Вінниця: ВНТУ, 2005. — 225 с.

15. Analog devices – CMOS, 125 MHz Complete DDS Synthesizer [Electronic resource]. – Access mode: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48610/AD/AD9850.html>

16. AD9850 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.analog.com/en/products/ad9850.html>

17. AD9850 DDS Signal Generator Module [Electronic resource]. – Access mode: <https://components101.com/modules/ad9850-dds-signal-generator-module>.

18. Рябенький В.М. Основи моделювання систем і процесів в електротехніці (Використання пакету прикладних програм MATLAB/Simulink). Навчальний посібник / Під редакцією проф. В.М. Рябенького. – Львів: новий Світ – 2000, 2008. – 385 с.

19. Підченко С.К. Температурно-динамічні характеристики кварцових п'єзореzonаторів АТ- та SC зрізів / Таранчук А.А., Лаба О.А // Вимірювальна та

обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2003. – № 2. – С. 49-55.

20. Stofanik V. Digitally Temperature-Compensated DDS / Balaz I., Minarik M // Proceedings of the 2001 IEEE/EIA International Frequency Control Symposium, pp. 816-819.

21. Stofanik V. An improvement in the temperature-compensated DDS / Balaz I., Minarik M // Proceedings of the 2001 IEEE/EIA International Frequency Control Symposium, pp. 662-664.

ДОДАТОК А

МАТЛАБ-код для розрахунку температурних характеристик
кварцового резонатора

Лістинг А.1. Побудова ГЧХ КР АТ-зрізу:

```
a = [-28.7442, 1.6528, -0.0224, 0.0001; -46.9946, 2.3426,  
-0.0215, 0.0001];  
a = a.*1e-6;  
  
T = -40:80;  
  
delta1 = a(1,1) + a(1,2) .* T + a(1,3) .* T.^2 + a(1,4) .*  
T.^3;  
delta2 = a(2,1) + a(2,2) .* T + a(2,3) .* T.^2 + a(2,4) .*  
T.^3;  
  
plot(T,delta1,T,delta2,'--', 'LineWidth', 2);grid on  
xlabel('T (°C)')  
ylabel('\delta (T)')  
legend({'f_1', 'f_3'})
```

Лістинг А.2. Апроксимація температурної залежності різницевої частоти

```
T1 = -15.65;  
T2 = 56.65;  
  
f01 = 1.873e4;  
f02 = 1.715e4;  
  
a = f01 - (f02-f01)*T1/(T2-T1);  
k = (f02-f01)/(T2-T1);  
  
T = -40:80;  
f = a + k*T;  
  
plot(T,f); grid on  
xlabel('T, °C')  
ylabel('f, ??')
```

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ДИПЛОМНА РОБОТА

«Метод стабілізації параметрів кварцових радіотехнічних пристроїв»

Спеціальність 172 – «Телекомунікації та радіотехніка»

Виконав: студент 2 курсу, група ТРМ-21-1

І.Ю. Буднік

Керівник: д-р. техн. наук, проф.

С.К. Підченко

Хмельницький, 2022

ВСТУП

Стабільність частоти коливань, які генерується кварцовими генераторами є основним показником якості побудованих на їхній основі радіотехнічних пристроїв. Наприклад, типовим рішенням є використання кварцового генератора в якості джерела опорних коливань для цифрових синтезаторів прямого синтезу частоти (DDS). Незважаючи на те, що кварцові генератори характеризуються високою стабільністю вихідних коливань, такі пристрої також схильні до впливу низки дестабілізуючих факторів, наприклад старіння, вібраційного впливу, нестабільності теплового режиму тощо. Останній фактор є найбільш критичним і повинен бути врахований при побудові пристроїв, що функціонують в широкому діапазоні зміни температур.

Одним із підходів щодо вирішення проблеми компенсації нестабільності частоти кварцових генераторів, що використовується в якості опорного генератора DDS, є використання багаточастотного режиму збудження кварцового резонатора для контролю його поточного стану.

Актуальність теми дослідження. Для забезпечення стабільності частоти вихідних коливань кварцових генераторів (генерації стабільних часових інтервалі), актуальною задачею є розробка нових і удосконалення існуючих методів компенсації дестабілізуючих впливів.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення стабільності вихідних коливань кварцових генераторів за рахунок контролю температурного стану кварцового резонатора, який працює в багаточастотному режимі збудження.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані та вирішені наступні задачі:

- аналіз та класифікація дестабілізуючих факторів, які негативно впливають на технічні характеристики кварцових генераторів;
- аналіз існуючих методів підвищення ефективності кварцових генераторів та методів компенсації температурного впливу;
- аналіз математичних моделей багаточастотних кварцових резонаторів як багатовимірних об'єктів керування;
- розробка структурної схеми двочастотного кварцового генератора із цифровою стабілізацією параметрів;

- розробка алгоритму компенсації відхилення частоти коливання кварцового генератора, що використовується в якості джерела опорних коливань у складі DDS синтезатора частоти;

- розробка імітаційної моделі та проведення моделювання кварцового генератора, що працює в двочастотному режимі збудження та тестування алгоритму компенсації температурної нестабільності.

Об'єкт дослідження: процес стабілізації параметрів кварцових генераторів з урахуванням температурного стану кварцового резонатора.

Предмет дослідження: метод стабілізації частоти вихідних коливань DDS синтезатора, де в якості опорного джерела коливань використовується кварцових резонаторів із компенсацією нестабільності частоти за рахунок контролю температури кварцового резонатора, що працює в багато частотному режимі збудження.

Методи дослідження: для вирішення поставлених задач були використані методи математичного моделювання, математичного аналізу, теорії електричних кіл, алгоритмізації та програмування.

Наукова новизна отриманих результатів: набув подальшого розвитку метод стабілізації параметрів кварцових генераторів із компенсацією нестабільності частоти за рахунок контролю температури кварцового резонатора, що працює в багаточастотному режимі збудження. Метод стабілізації застосовано до опорного генератора DDS синтезатора частоти.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблена імітаційна модель двочастотного кварцового генератора із стабілізацією вихідних коливань за рахунок контролю температури кварцового резонатора;

- розроблена імітаційна модель DDS синтезатора частоти, який використовує двочастотний кварцовий генератор із стабілізацією частоти коливань у якості опорного генератора;

- розроблено алгоритм компенсації відхилення частоти DDS синтезатора, який використовує двочастотний КГ із стабілізацією частоти коливань у якості опорного генератора.

Апробація результатів дослідження. За результатами магістерської роботи, відповідно до теми дослідження, були підготовлені тези, які були опубліковані в збірнику тез доповідей XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук», яка проходила в м. Хмельницькому 18-19 листопада 2022 року.

1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ КВАРЦОВИХ ПРИСТРОЇВ

Фізичні основи та класифікація кварцових резонаторів

Кварцовий резонатор – це електромеханічний пристрій, що працює на основі п'єзоелектричного ефекту (ПЕЕ), який виникає у п'єзоелементі, та виготовлений із кристалу кварцу – кристалу двоокису кремнію. Для будь-якого п'єзоелементу характерним є поява електричного заряду внаслідок дії механічного навантаження, що називається прямим п'єзоелектричним ефектом, а також виникнення механічного напруження в результаті електричної поляризації – зворотний п'єзоелектричний ефектом.

До складу кварцового резонатора входить п'єзоелемент, тримач та корпус, в той час, коли сам п'єзоелемент складається із кристалічного елементу та електродів. Кристалічні елементи, що виготовлені із кристалів кварцу, мають форму бруска прямокутної форми, круглої лінзи чи пластини, або пластини прямокутної чи квадратної форми.

П'єзоелемент здійснює механічні коливання, параметр яких залежать від його форми та структури.

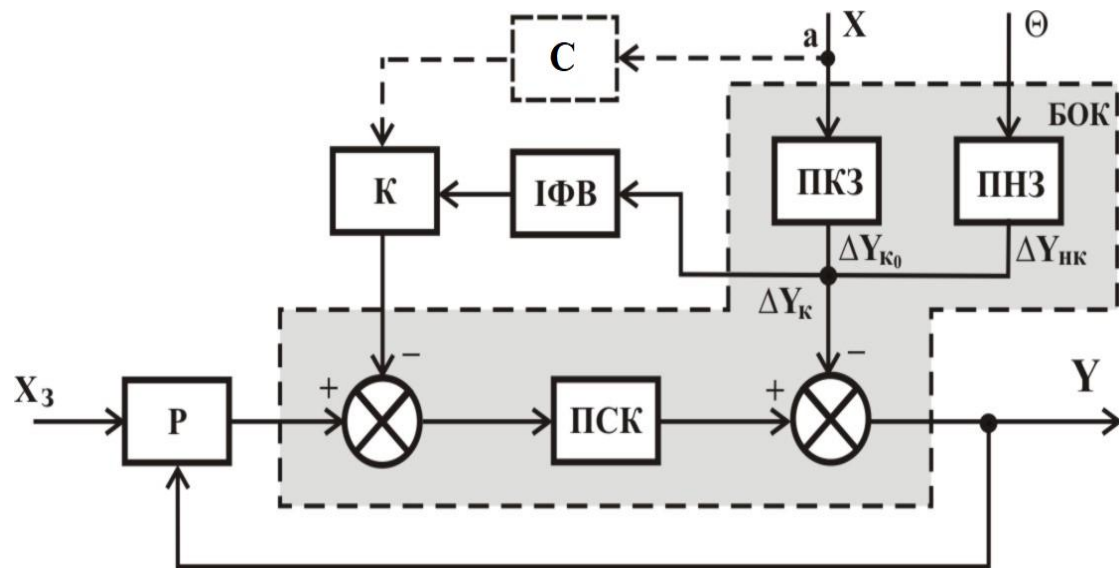
Механічні коливання можуть бути наступних типів:

- коливання зсуву за контуром,
- коливання зсуву за товщиною,
- коливання косоного зсуву, згинання, кручення, стискання тощо.

Колівання цих типів можуть виникати на основній частоті (першій моді), а також на вищих гармоніках. Параметри та порядок вихідних коливань визначаються характеристиками даного конкретного резонатора.

Збудження кварцового резонатора може відбуватись на основній резонансній частоті механічних коливань а також на побічних частотах, оскільки кварцовий резонатор є електромеханічною коливальною системою із великим числом ступенів свободи.

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КВАРЦОВОГО ГЕНЕРАТОРА ІЗ СТАБІЛІЗАЦІЄЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВПЛИВУ



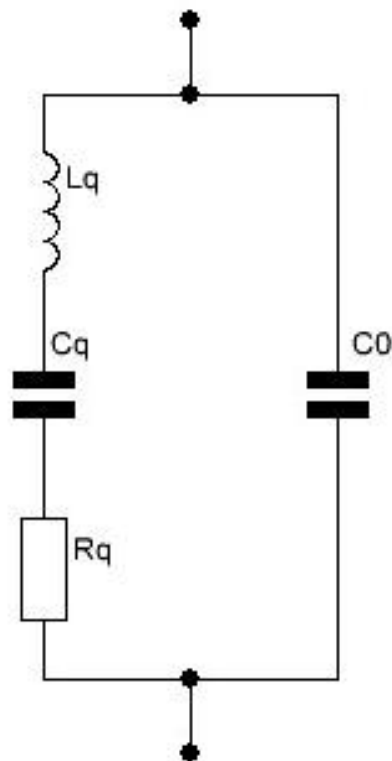
Модель кварцового резонатора як об'єкта керування

Узагальнена модель інваріантної КР з контролем впливу температури розроблена на основі багатовимірної системи з комбінованим керуванням, яка складається із двох контурів керування, що можуть бути якої синтезовані окремо один від одного. Останній факт є важливим при розв'язанні задачі побудови КР із стабілізацією параметрів.

БОК – багатомірний об'єкт керування; ПКЗ – перетворювач контрольованого збурення; ПСК – перетворювач сигналу керування (номінальна передатна характеристика ПРП); ПНЗ – перетворювач неконтрольованого збурення; ІФВ – ідентифікатор ФВ; К – компенсатор; Р – регулятор; Д – блок датчиків

Згідно схеми на Рисунку ідентифікація зовнішнього фактору впливу (температурного впливу) здійснюється за допомогою блоку ідентифікатора фактору впливу (ІФП), який виконує неперервні спостереження за вектором Y_{c0} володіючи інформацією про характеристики A перетворювача сигналу керування (ПСК).

Еквівалентна електрична схема кварцового резонатора



Підключений до електричного кола кварцовий резонатор має властивості коливального RLC-контуру, у випадку роботи на частотах, які близькі до резонансної частоти кварцового резонатора, та як звичайний конденсатор, якщо роботі частоти відрізняються від резонансної частоти.

Еквівалентна електрична схема кварцового резонатора із однією резонансною частотою зображена на Рисунку.

Динамічні параметри схеми: 1) динамічна індуктивність L_q , 2) динамічна ємність C_q , 3) опір R_q , 4) статична ємність C_0 .

На частотах, які далекі від резонансної, кварцовий резонатор поводить себе як конденсатор, ємність якого рівна статичній ємності C_0 еквівалентної схеми.

Частота послідовного резонансу	Частота паралельного резонансу	Характеристичний опір	Добротність коливального контуру	Резонансний проміжок
$W_q = \frac{1}{\sqrt{L_q C_q}}$	$W_0 = \frac{1}{\sqrt{L_q \frac{C_0 C_q}{C_0 + C_q}}}$	$\rho_q = \sqrt{\frac{L_q}{C_q}}$	$Q = \frac{\rho_q}{R_q}$	$\Omega_n = \omega_0 - \omega_q$

3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ КВАРЦОВОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВІ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ

Імітаційна модель двочастотного кварцового генератора під дією зміни температури

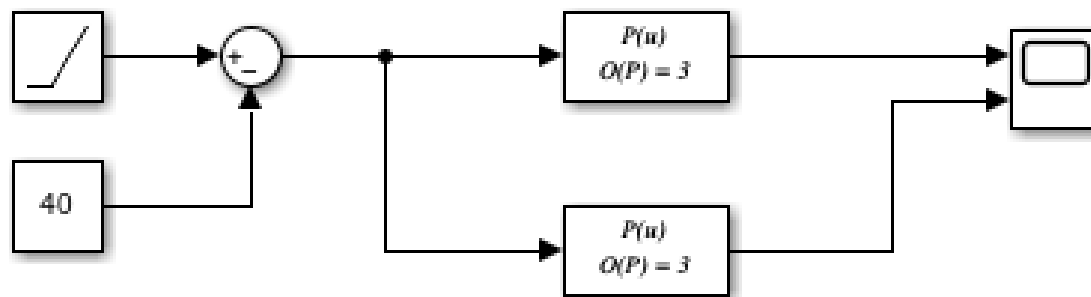
Як було зазначено в Розділі 1, температурна залежність кварцового резонатора визначається його температурно-частотними характеристиками (ТЧХ) – відповідно для кожної моди окремо.

Залежності ТЧХ представлені апроксимуючими поліномами третього порядку:

$$\delta_j = a_{j1} + a_{j2}T + a_{j3}T^2 + a_{j4}T^3$$

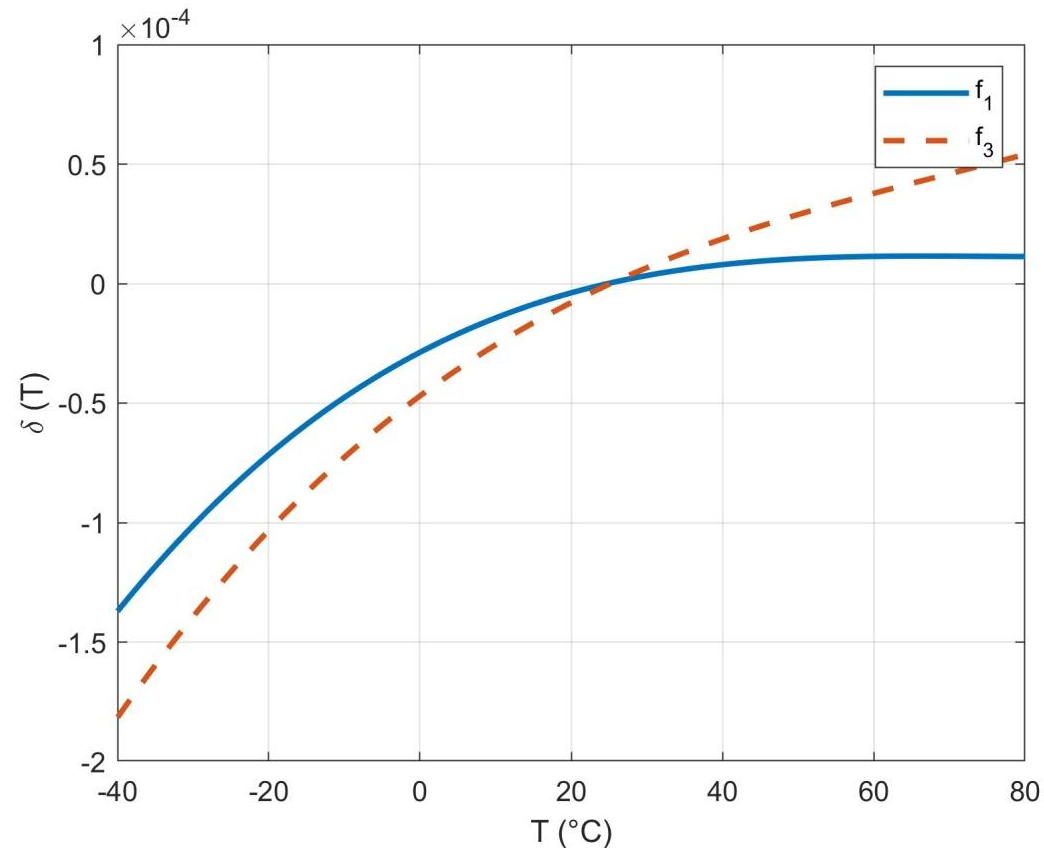
де $\delta_j = \frac{\Delta f_j(T)}{f_{0j}}$ – відношення відхилення частоти до номінальної частоти j моди КГ.

Імітаційна модель, побудована в середовищі MATLAB/Simulink, яка реалізує температурну залежність згідно поліномів зображена на Рисунку



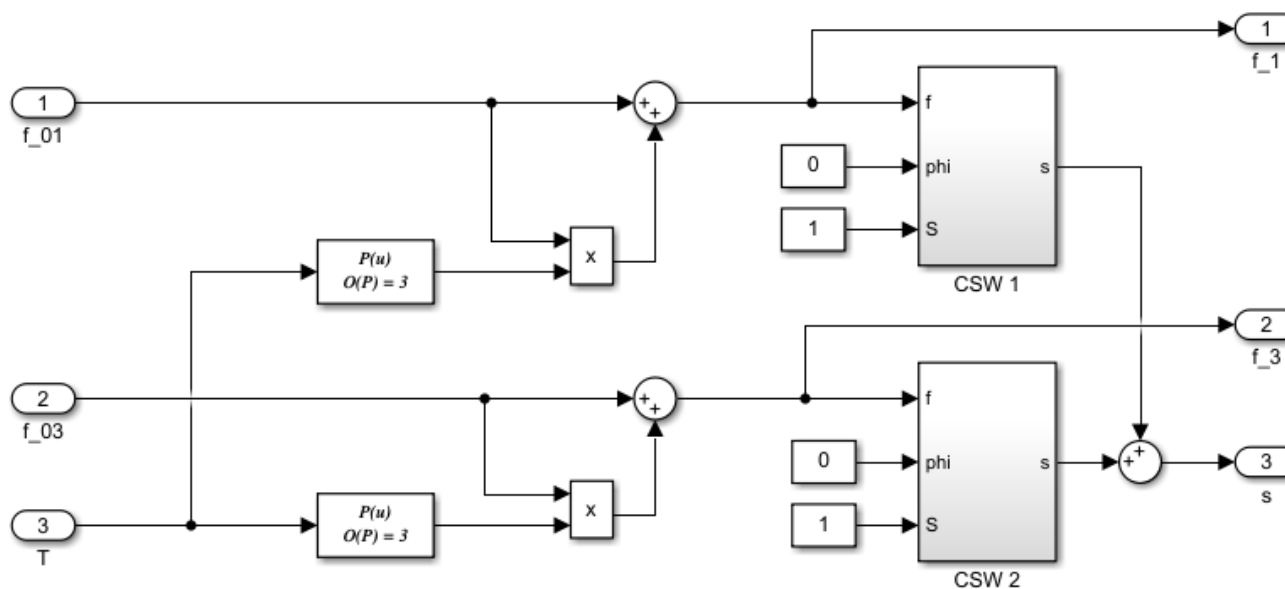
Моделювання відбувається в температурному діапазоні $T = -40 \dots 80$ °C. Лінійний закон зміни температури забезпечується шляхом застосування Simulink-елементу Ramp. Температурне зміщення $T = -40$ °C задається блоком Constant. Арифметична операція віднімання реалізована блоком Subtract. Для реалізації поліноміальної функції були використані два блоки Polynomial.

На рисунку зображені ГЧХ першої та третьої механічної гармоніки КР АТ-зрізу, які були отримані в результаті імітаційного моделювання.



Імітаційна модель двочастотного кварцового генератора з урахуванням температурного впливу

Імітаційна модель кварцового генератора, яка враховує температурний режим КР була розроблена та протестована в середовищі імітаційного моделювання MATLAB/Simulink.



Імітаційна Simulink-модель двочастотного КГ

Модель двочастотного кварцового генератора складається із двох контурів, що реалізують температурну залежність відповідно першої та третьої моди кварцового резонатора.

Для зручності тестування та компактності Simulink-проекту, модель двочастотного кварцового генератора була оформлена у вигляді підсистеми, зовнішній вигляд якої представлений у вигляді блоку із вхідними та вихідними сигналами.

Вхідні сигнали модель двочастотного КГ (2-Freq. Osc.):

- $f_0 = 9999143$ Гц – номінальна частота першої моди КР;

- $f_1 = 29979567$ Гц – номінальна частота третьої моди КР;

- $T = -40 \dots 80$ °C – робоча частота КР (змінюється лінійно в даному діапазоні).

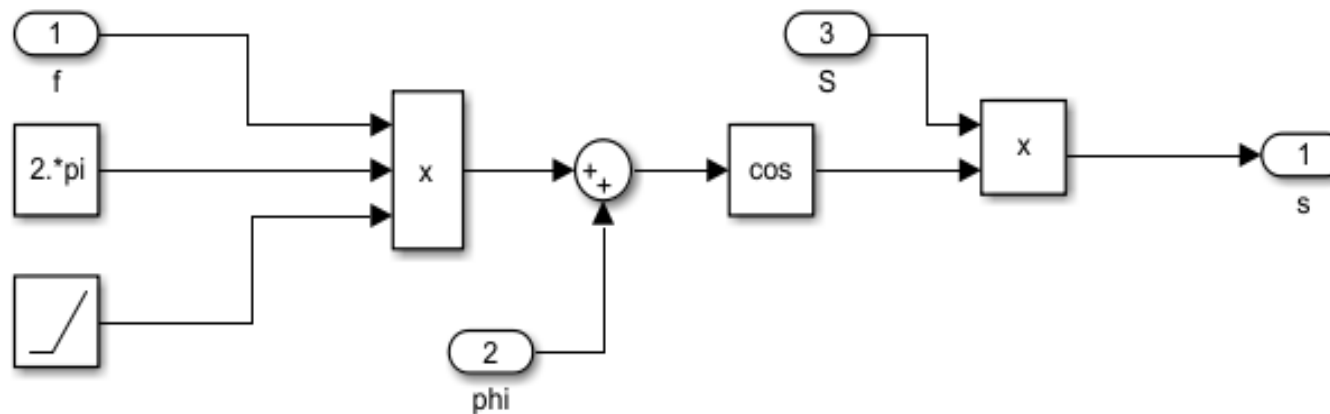
Вихідні сигнали моделі:

- f_{01} – частота першої моди для заданої температури;

- f_{02} – частота третьої моди для заданої температури;

- s – вихідний сигнал.

Також до складу моделі двочастотного КГ, зображеної на Рисунку, входять два допоміжні Simulink-блоки, призначення яких моделювати гармонічні коливання відповідно першої та третьої моди.



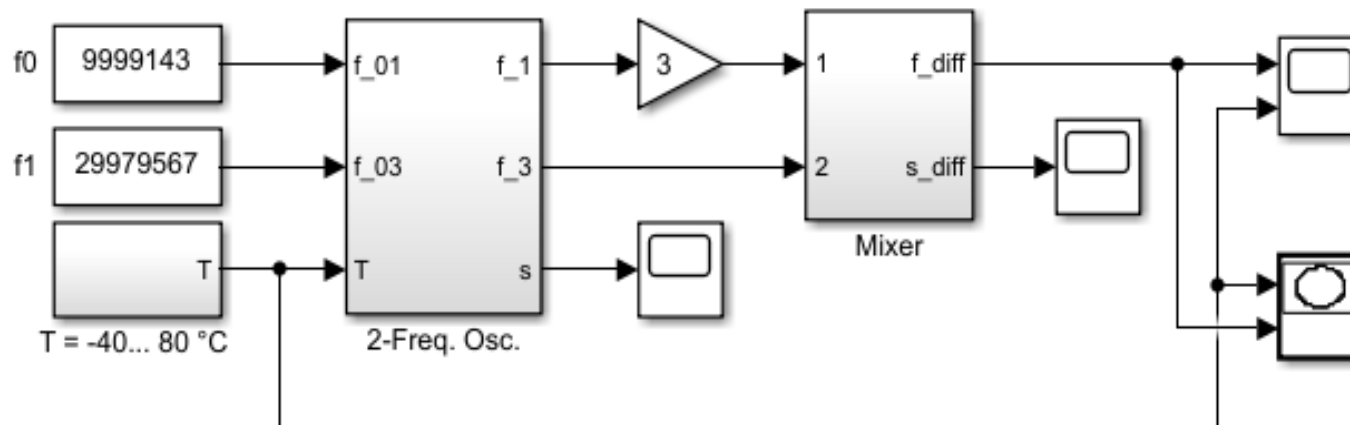
Підсистема Continuous Sine Wave (CSW)

4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ КОЛИВАНЬ DDS-СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТИ НА ОСНОВІ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ КВАРЦОВОГО РЕЗОНАТОР ОПОРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Розробка системи температурного контролю кварцового генератора

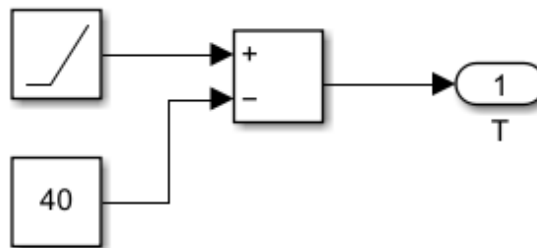
Імітаційна модель температурного контролю КР, яка була побудована та протестована в програмному середовищі імітаційного моделювання MATLAB/Simulink, зображена на Рисунку.

Номінальні значення частот $f_{1,3}$ задаються за допомогою блоків Constant. Вихідна частота першої гармоніки генератора збільшується втричі за допомогою елемента Gain, вихідний сигнал від якого подається на модель змішувача (Mixer) з метою виділення сигналу різницевої частоти.



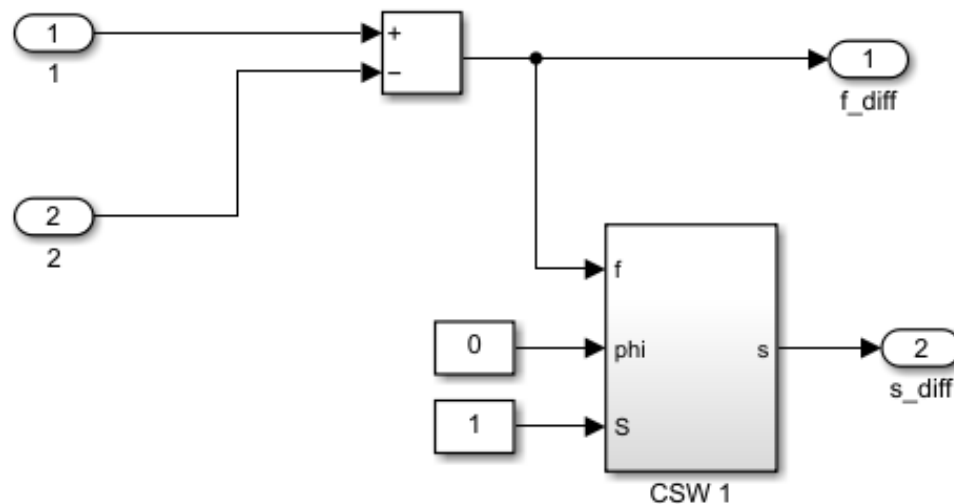
Модель блоку температурного контролю КР

Алгоритм моделювання передбачає лінійне наростання температури в межах від -40 до $+80$ °С, що реалізовано за допомогою підсистеми, внутрішня структура якої зображена на Рисунку 4.3.



Лінійне наростання температури кварцового резонатора

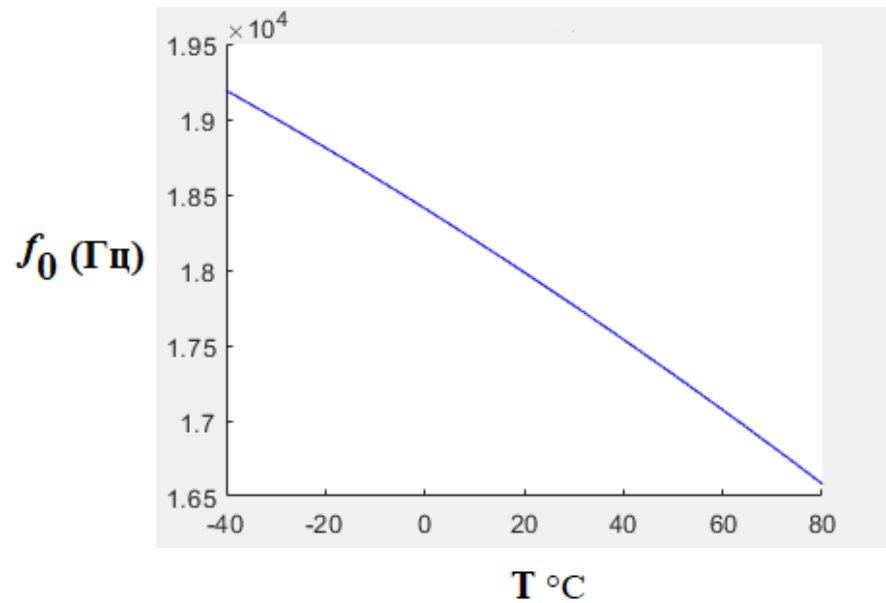
Структура моделі змішувача включає усі вищеописані під моделі та блоки, в тому числі, модель CSW.



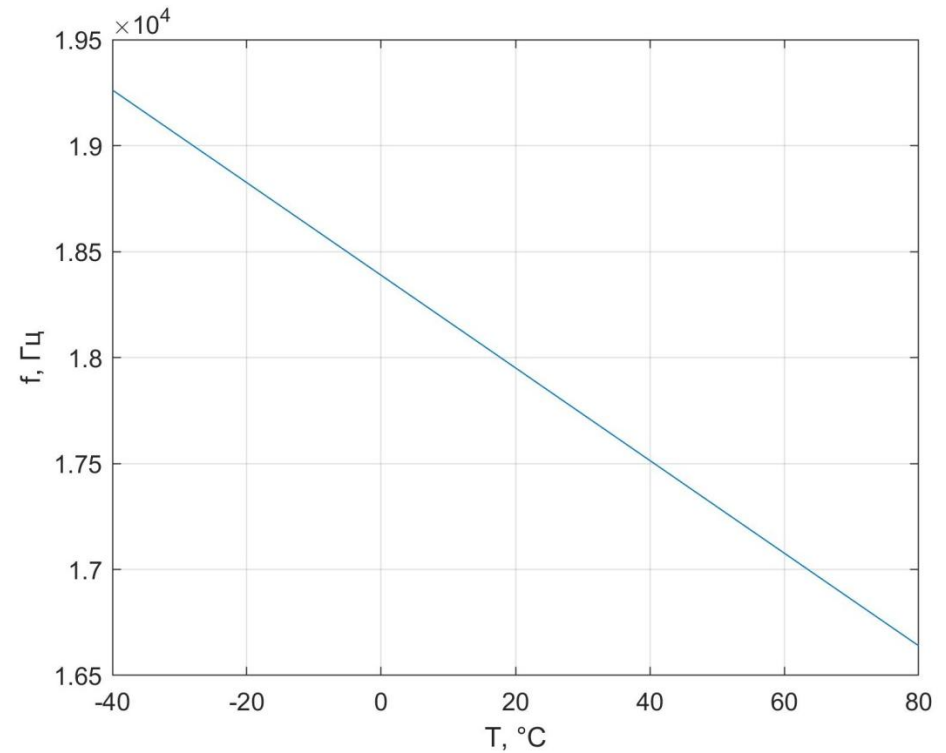
Модель змішувача

Як видно із Рисунок, а залежність різницевої частоти f_0 від температури має практично лінійний характер, а отже може бути з достатньою точністю описана лінійною апроксимуючою функцією

$$f_0 = a + kT,$$



а)

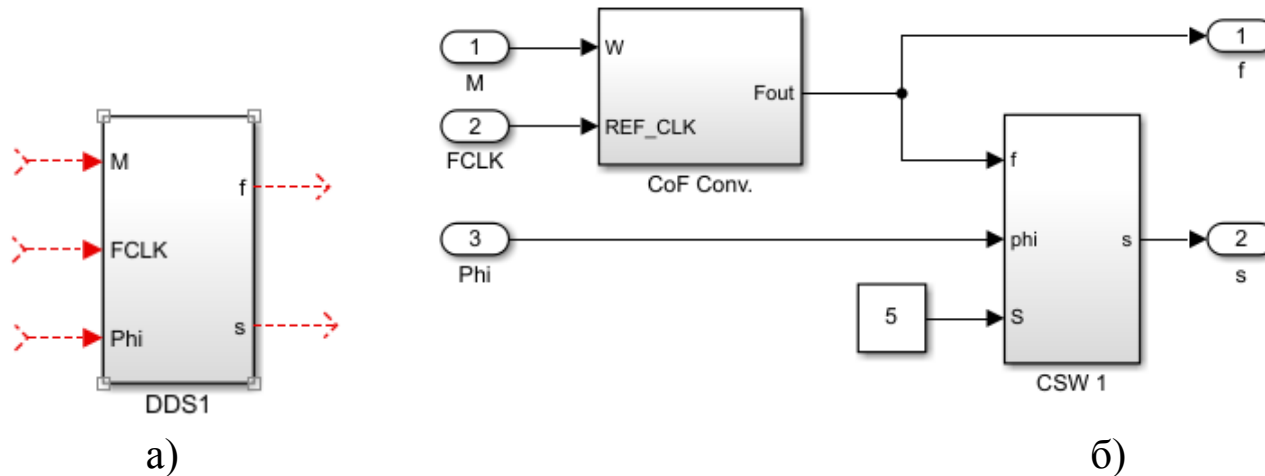


б)

Залежність різницевої частоти від температури КР: результат моделювання (а), лінійна апроксимація (б)

Імітаційна модель синтезатора DDS в середовищі MATLAB/Simulink

Спрощена імітаційна модель синтезатора DDS, який базується на основних функціях та технічних характеристиках реального синтезатора AD9850 була розроблена і протестована в середовищі MATLAB/Simulink.



Імітаційна модель DDS синтезатора:

зовнішній інтерфейс підсистеми (а), внутрішня реалізація моделі (б)

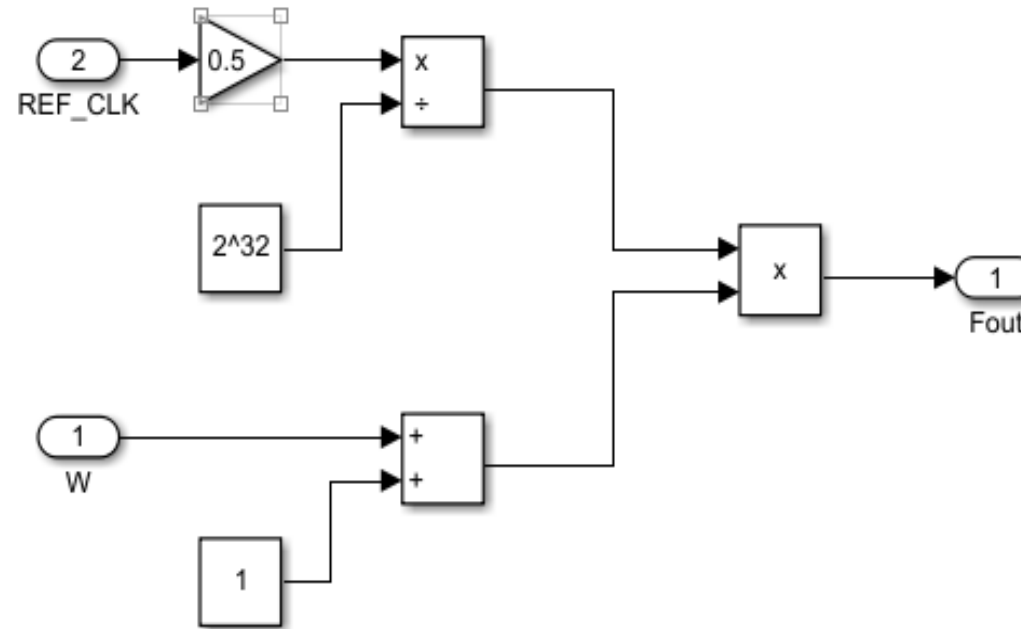
Модель представлена у вигляді підсистеми, яка має такі входи:

- M – керуюче слово (32-бітне число);
- FCLK – значення частоти опорного КГ;
- Phi – фазовий зсув;

та виходи:

- f – значення вихідної частоти синтезатора;
- s – часовий графік вихідного гармонічного сигналу.

Реалізація блоку перетворювача коду в частоти показана на Рисунку



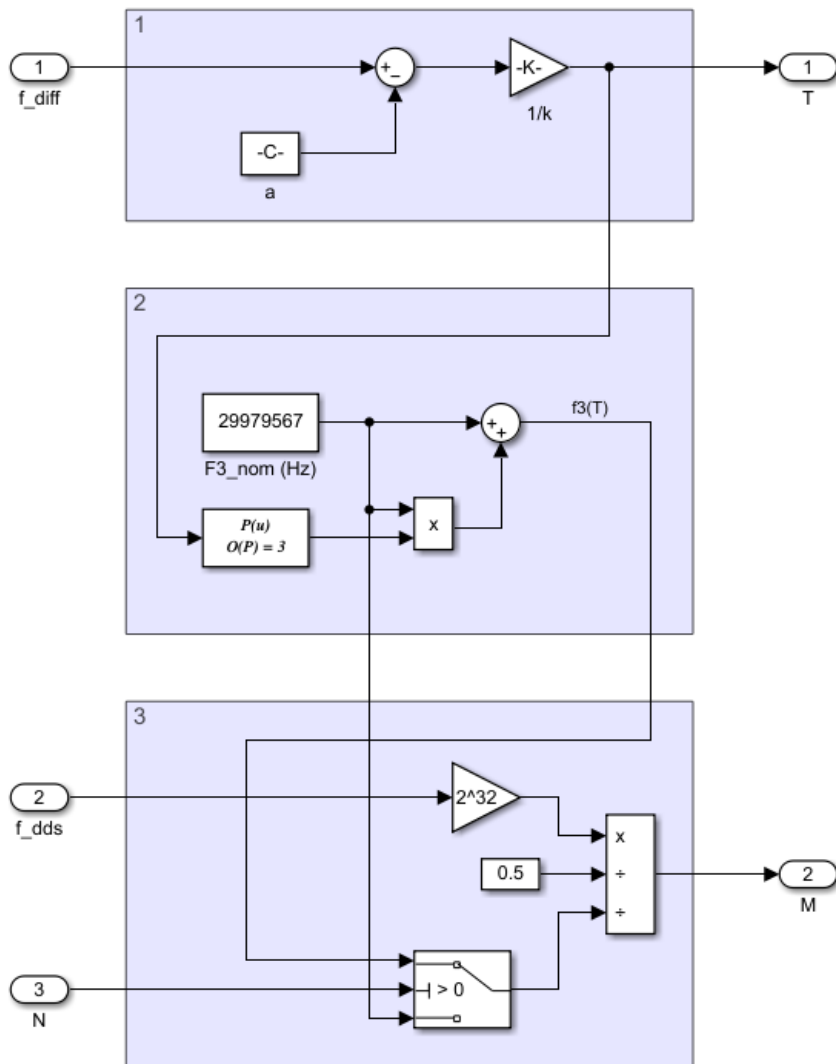
Внутрішня структура моделі перетворювача код-частота

Вхідними параметрами даної підсистеми є:

- W – керуюче слово (32-бітне число);
- REF_CLK – опорна частота.

Підсистема повертає значення частоти, на яку необхідно пере налаштувати DDS синтезатор для заданого значення кодового слова W. Також до складу даної підсистеми входить елементи два Constant для реалізації арифметичних операцій над бітовим словом, елемент Gain для імітації роботи реального DDS синтезатора, коли максимальна вихідна частота обмежена половиною значення тактової частоти, а також блоки Sum, Subtract та Multiply для реалізації відповідних операцій.

Розробка моделі стабілізатора та алгоритму стабілізації DDS синтезатора на основі контролю температури кварцового генератора



Імітаційна модель температурного стабілізатора була розроблена та протестована в середовищі MATLAB/Simulink.

Модель температурного стабілізатора складається з трьох підсистем, кожна з яких виконує наступні функції:

- 1) оцінка температури КР на основі апроксимованої температурної залежності різницевої частоти
- 2) розрахунок температурного відхилення частоти третьої гармоні КР згідно ТЧХ
- 3) розрахунок оптимального значення кодового слова для керування DDS синтезатором

вхідні параметрами:

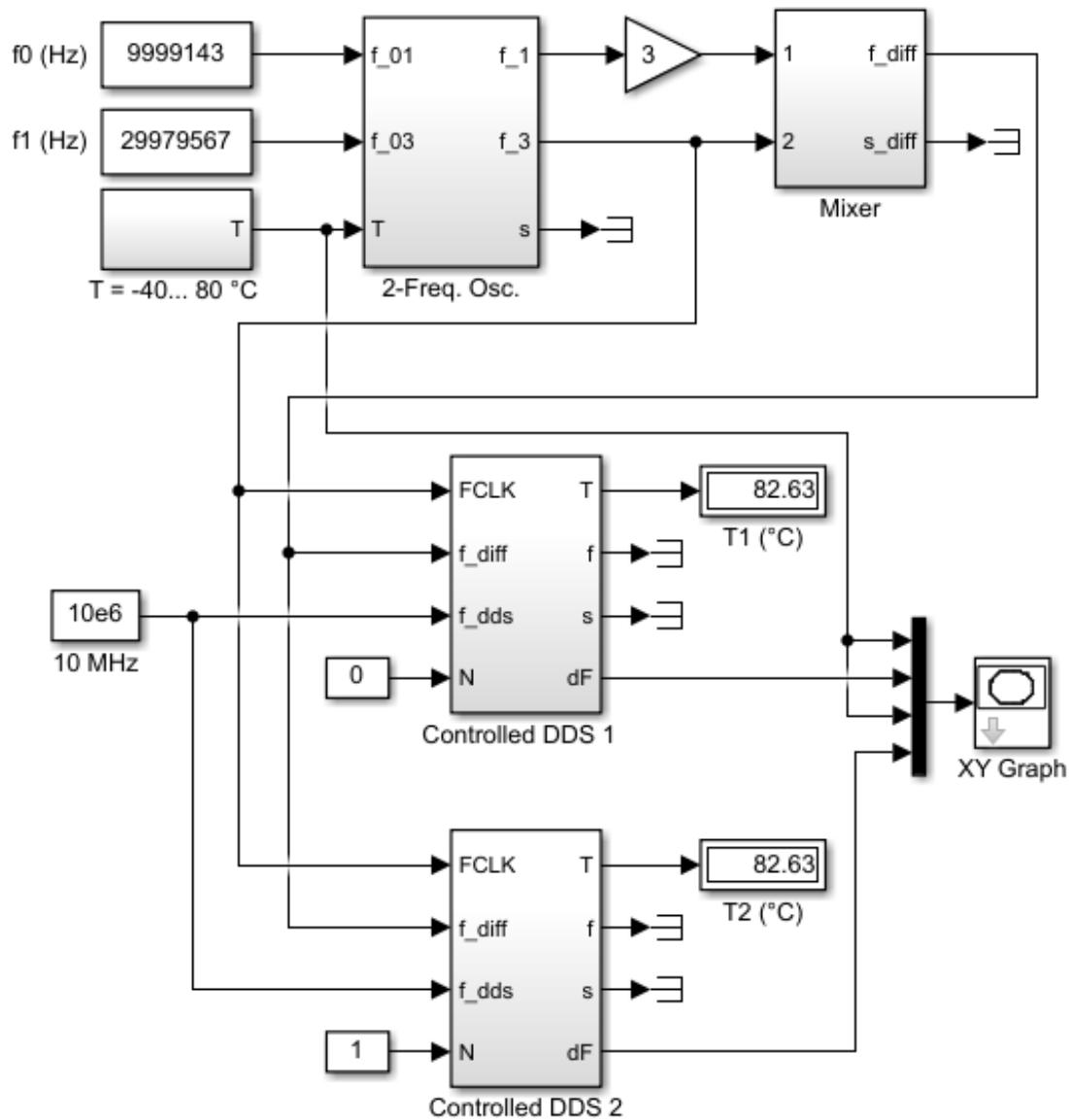
- f_diff – значення різницевої частоти;
- f_dds – частота, яку необхідно забезпечити на виході DDS синтезатора;
- N – контрольний біт, який відповідає за ввімкнення (1) чи вимкнення (0) функції температурної стабілізації;

вихідні параметрами:

- T – температура КР;
- M – оптимальне кодове слово DDS синтезатора.

Для порівняння результату роботи моделі DDS синтезатора в режимі із стабілізацією та без стабілізації, було реалізовано можливість керувати ввімкненням режиму стабілізації за допомогою контрольного біту. Це було зроблено за допомогою елемента

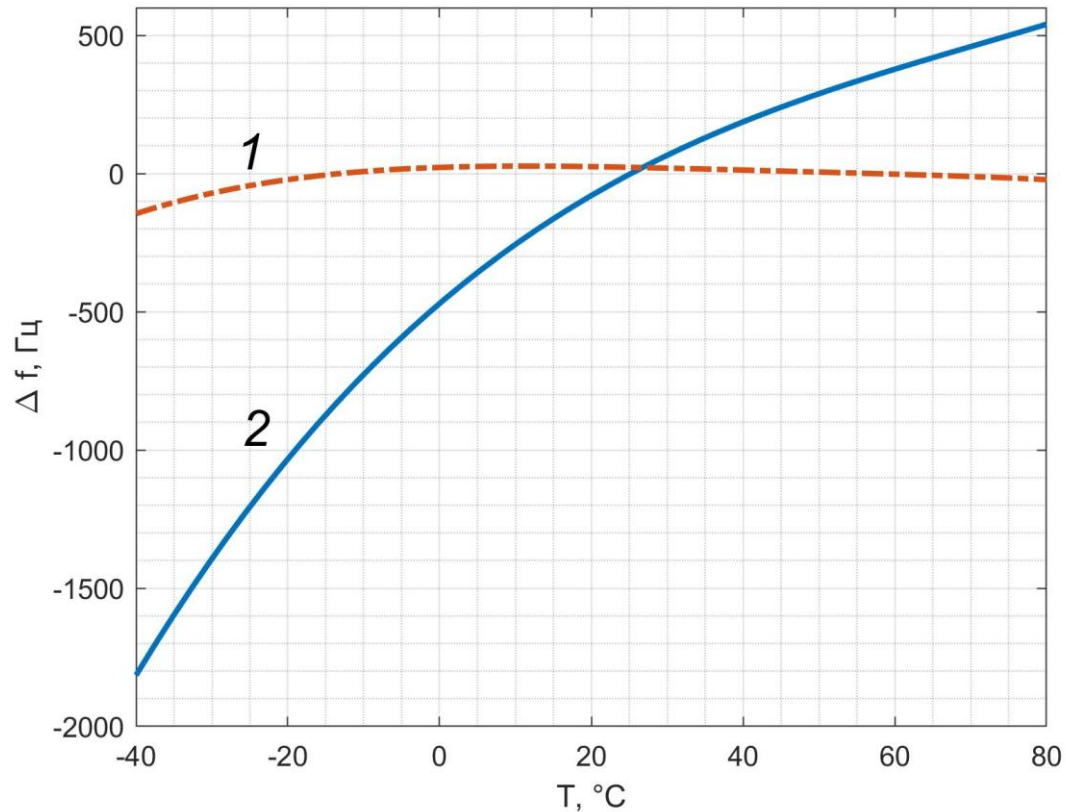
перемикача Switch, який в залежності від контрольного біту, підставляє в розрахункову підсистему скореговане значення опорної частоти або номінальне.



Загальна імітаційна модель, складається із моделі двочастотного КГ, змішувача для виділення різницевої частоти, двох синтезаторів DDS та допоміжних блоків Constant для задання параметрів моделювання, блоків Display для виведення температури КР та блоку XY Plot для побудови залежностей відхилення вихідної частоти DDS синтезатора.

До складу моделі входять два керовані DDS синтезатора (Controlled DDS 1,2), які використовують спільний КГ в якості опорного генератора, відповідно із увімкненою та вимкненою функцією стабілізації.

Імітаційне моделювання проводилось для робочого діапазону температури від -40 до 80 °C, що лінійно наростала протягом часу моделювання.



Результат моделювання – температурні залежності відхилення вихідної частоти DDS синтезаторів з увімкненою (1) та вимкненою функцією стабілізації показані на Рисунок

Співставлення отриманих результатів показує, що навіть за відносно невисокої стабільності коливань f_1 та f_3 , метод температурної стабілізації DDS синтезатора із опорним КГ дозволяє суттєво зменшити відхилення вихідної частоти DDS синтезатора.

Як видно із графіків, ефективність стабілізації особливо проявляється при роботі в умовах, які суттєво відрізняються від номінальних. Моделювання показало, що для нижньої межі робочої температури (-40 °C), за рахунок температурної стабілізації вдається зменшити відхилення вихідної частоти DDS синтезатора майже на один порядок.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного імітаційне моделювання роботи DDS-синтезатора із опорним генератором для широкому діапазоні зміни температури із стабілізацією параметрів та без стабілізації, були отримані результати, які показують суттєвих виграш у випадку застосування стабілізації (майже на один порядок зменшення відхилення частоти у випадку роботи близько до нижньої межі робочого температурного діапазону кварцового резонатора). А саме, моделювання показало, що для нижньої межі робочої температури ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), за рахунок температурної стабілізації вдається зменшити відхилення вихідної частоти DDS синтезатора приблизно на один порядок (150 Гц із стабілізацією та 1.8 кГц без стабілізації).

Наукова новизна роботи полягає у набутті подальшого розвитку методу стабілізації параметрів кварцових генераторів за рахунок контролю температури кварцового резонатора, що працює в багаточастотному режимі збудження. Метод стабілізації застосовано до опорного генератора DDS синтезатора частоти.

Розглянутий метод також маж ряд недоліків, до яких зокрема належить необхідність вимірювання температурно-частотних характеристик кварцового резонатора, оскільки ця інформації не налається розробниками в технічній документації до промислових кварцових резонаторів.

Реальні результати очікуються значно гіршими ніж ті, що бути отримані в результаті комп'ютерного моделювання. Причинами цього є ідеалізації параметрів моделей, нехтуванням динамічних температурних характеристик кварцового резонатора та інших дестабілізуючих факторів, які погіршують стабільність частоти кварцових генераторів. Однак, показана принципова можливість та доцільність застосування даного методу для стабілізації параметрів кварцових радіотехнічних пристроїв.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

Міністерство освіти і науки України
Хмельницький національний університет



ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
за матеріалами XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції
«Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2022»

18-19 листопада 2022

Хмельницький 2022

УДК 004:37:001:62

Збірник наукових праць за матеріалами XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2022». Хмельницький – 2022. – 331с.

У збірнику наукових праць подані перспективні практичні розробки аспірантів, студентів та здобувачів в області сучасних інформаційних технологій. Розглянуто актуальні проблеми комп'ютерних наук, комп'ютерної інженерії, прикладної математики й інженерії програмного забезпечення, приведено ряд робіт по впровадженню інформаційних технологій у виробництво та управління. Висвітлено перспективні розробки сучасних систем пошуку, обробки й захисту інформації, медійних та комунікаційних системи.

УДК 004:37:001:62

Матеріали конференції відтворені з авторських оригіналів. При макетуванні можливі незначні зміни компоновки контенту авторських оригіналів.

Участь у конференції та складові всіх її етапів (розгляд праць, макетування, публікація збірника наукових праць та видача сертифікатів) є безкоштовними для всіх учасників. Оргкомітет конференції висловлює подяку учасникам конференції та сподівається на подальшу співпрацю.

З питань проведення конференції та подальшого обміну інформацією звертатись на e-mail конференції: apkt.khnu@gmail.com

ЗМІСТ

Авсієвич В.Р., Кузьмін А.А.

Дослідження вразливостей системи розумної парковки та способи їх усунення 11

Алексеєво В.О., Бармак О.В.

Інформаційна система прогнозування поширення респіраторних захворювань в невеликих популяціях..... 15

Барчук Д.О., Нічепорук А.А., Казанцев А.Д., Нічепорук А.О.

Оцінка ризиків інформаційної безпеки системи розумного будинку на основі методології Octave Allegro 20

Баїшта А.Р., Кравчук С.С.

Концепція застосування доповненої реальності для інтерфейсу користувача програмної системи пошуку громадських місць з можливостями інклюзивного доступу..... 24

Баїшук І.О., Микитенко Д.А., Частоколенко І.П.

Система програмно-апаратного комплексу для моніторингу ключових кліматично-пожежних параметрів приміщення у режимі реального часу 30

Бельфер Р.Е.

Архітектура багаторівневої однорангової мережі 32

Білик О.В.

Інформаційна система «Вчена рада факультету» 35

Богатирчук Д.В.

Сучасний стан та перспективи України на світовому рівні ІТ технологій..... 39

Борусевич А.В., Куперштейн Л.М.

Інтелектуальна інформаційна технологія визначення типу операційної системи віддаленого вузла..... 43

Буднік І.Ю., Підченко С.К.

Метод стабілізації параметрів кварцових радіотехнічних пристроїв 46

Вакулко Я.І., Шевченко В.Л.

Програмне забезпечення виділення об'єктів піксельного зображення і зображення і пошуку шаблонів в задачах доповненої реальності..... 49

УДК 621.373.5

Буднік І.Ю., Підченко С.К.

Хмельницький національний університет

МЕТОД СТАБІЛІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ КВАРЦОВИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИБОРІВ

Представлено метод стабілізації кварцових радіотехнічних пристроїв за рахунок компенсацією температурної нестабільності частоти. Підвищення стабільності частоти досягається за рахунок більш точної компенсації температурних впливів на основі ідентифікації теплового стану кварцового резонатора в двочастотному режимі збудження. Запропоновано структуру високостабільного кварцового генератора з цифровою компенсацією на основі двочастотного резонатора з двома парами електродів для збудження опорної та термочутливої мод коливань.

Даний метод дозволяє суттєво зменшити похибки ідентифікації теплового стану резонатора за рахунок усунення температурних градієнтів між областю збудження коливань резонатора і датчиком температури та підвищити стабільність вихідних коливань.

The method of stabilization of quartz radio engineering devices by compensation of temperature instability of frequency is presented. Increase of frequency stability is achieved due to more accurate compensation of temperature effects on the basis of identification of the thermal state of the quartz resonator in the dual-frequency excitation mode. The structure of a highly stable quartz oscillator with digital compensation based on a two-frequency resonator with two pairs of electrodes for excitation of the reference and temperature-sensitive modes of oscillations is proposed.

This method can significantly reduce the errors of identification of the thermal state of the resonator due to the elimination of temperature gradients between the excitation region of the resonator oscillations and the temperature sensor and increase the stability of the output oscillations.

Сьогодні кварцові генератори (КГ) широко застосовуються у складі радіотехнічних та мобільних телекомунікаційних пристроях передачі даних, в комп'ютерній техніці, а також в телекомунікаційному та навігаційному устаткуванні та вимірювальній техніці. Широке застосування КГ висуває доволі жорсткі вимоги до генераторів стабільних часових інтервалів, які в переважній більшості визначають основні технічні характеристики радіотехнічних пристроїв.

Таким чином, метою роботи є підвищення рівня стабілізації частоти коливань КГ за рахунок більш точної компенсації температурних впливів на основі

ідентифікації теплового стану кварцового резонатора в двочастотному режимі збудження.

В загальному випадку багаточастотне збудження КР дозволяє трактувати п'єзорезонансну коливальну систему як багатомірний об'єкт, в моделі якого явно фігурують контрольовані збурення:

$$\begin{aligned}
 y_i(p) &= y_{z,i}(p) + \Delta y_{\kappa,i}(p) + \Delta y_{\text{нк},i} = \\
 &= W_{z,i}(p)x_{z,i}(p) + \sum_{j=1, j \neq i}^m [W_{ij}(p)x_{z,j}(p)] + \\
 &+ \sum_{k=1}^n A_{i,k}(p)x_{\kappa,k}(p) + \Delta y_{\text{нк},i}(p),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де $X_z(p) = \{x_{z,i}\}_{i=1}^m$ – вектор заданого керування; $X_\kappa(p) = \{x_{\kappa,k}\}_{k=1}^n$ – вектор контрольованого збурення; $W(p)$, $A(p)$ – передатні функції каналів керування і каналів збурення відповідно; $\Delta y_{\text{нк},i}(p)$ – додатковий рух за рахунок неконтрольованих збурень.

Структурна схема КГ з цифровою компенсацією (КГ/ЦК) зображена на рисунку 1.

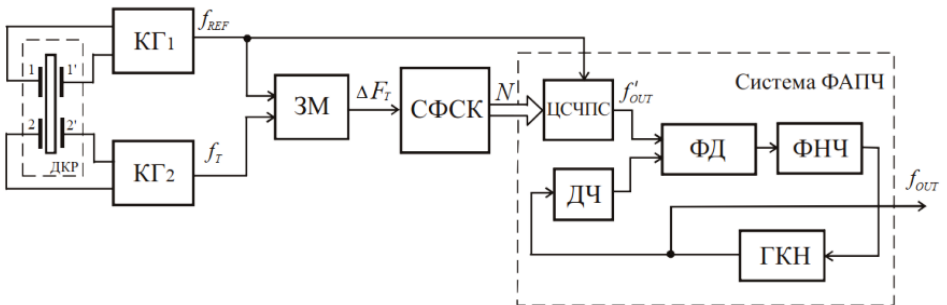


Рисунок 1 – Структура кварцового генератора із цифровою стабілізацією параметрів

Запропонована схема містить двочастотний кварцовий резонатор (ДКР), перший кварцовий генератор (КГ1), другий кварцовий генератор (КГ2), змішувач (ЗМ), схему формування сигналу компенсації (СФСК), цифровий синтезатор прямого синтезу (ЦСЧПС) та схему перенесення спектру коливань на базі системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), яка в свою чергу складається з фазового детектора (ФД), фільтра низької частоти (ФНЧ), дільника частоти (ДЧ) та генератора керуваного напругою (ГКН).

За рахунок розташування двох пар електродів на одній пластині мінімізується градієнтні та динамічні похибки, що виникають в ДКР під впливом температури. Перша пара електродів (1-1') використовується для збудження коливальних опорної моди f_{REF} , а друга пара електродів (2-2') – для збудження термочутливої моди f_T . Для виділення різницевої частоти опорної та термочутливої мод коливальних ΔF_T в схему був введений змішувач ЗМ, на виході якого виділяється сигнал різницевої частоти $\Delta F_T = f_{REF} - f_T$.

Отже, запропонований метод дозволяє зменшити похибки ідентифікації теплового стану КР за рахунок усунення температурних градієнтів між областю збудження коливальних резонатора і датчиком температури, що притаманно для класичних функціональних методів. Описаний генератор з цифровою компенсацією може бути використаний в якості джерела високостабільного опорного сигналу в схемах опорних частот для телекомунікаційних та вимірювальних систем.

Перелік посилань

1. Підченко С.К. Високостабільний кварцовий генератор з цифровою компенсацією температурної нестабільності частоти / С.К. Підченко, А.А. Таранчук, О.О. Гуменюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2013. № 2. С.86-91.
2. Колпаков Ф.Ф. Теорія і реалізаційні основи інваріантних п'єзореzonансних коливальних систем [Текст]: [монографія] / Ф.Ф. Колпаков, С.К. Підченко. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського "Харк. авіац. ін-т". – 2011. – 326 с.
3. Zelensky A.A. The principles of developing invariant piezoresonance units with controlled dynamics / A.A. Zelensky, S.K. Pidchenko, A.A. Taranchuk // Eastern European journal of enterprise technologies // Scientific journal. – Kharkov: Technological center, 2012. – Vol. 6/11 (60). – pp. 17-22.

Завідувачу кафедри
телекомунікацій, медійних та
інтелектуальних технологій (ТМІТ)
Підченку Сергію Костянтинівичу
здобувача вищої освіти, студента 2 курсу,
гр. ТРМ-21-1
Будника Іллі Юрійовича

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщена та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

2.12.22
дата



підпис

Будник І.Ю.

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 0.0%

Словари проверки: en_US, ru_RU, ua_UA. Ошибок в документах: 9%

ID: 109135 Название: Метод стабілізації параметрів кварцових радіотехнічних пристроїв Добавлено в БД: 2022-12-08 Авторы: Буднік Ілля Юрійович Руководители: Підченко Сергій Костянтинович Консультанты: Оponentы:	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	65919	606	1477 (2%)	25 (4%)

Источник плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы

Ім'я користувача:
Kafedra TMIT KhNU

Дата перевірки:
09.12.2022 08:36:14 EET

Дата звіту:
09.12.2022 08:40:50 EET

ID перевірки:
1013251934

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

ID користувача:
100005657

Назва документа: Буднік_ТРМ-21

Кількість сторінок: 87 Кількість слів: 10376 Кількість символів: 83746 Розмір файлу: 1.73 MB ID файлу: 1013010503

Виявлено модифікації тексту (можуть впливати на відсоток схожості)

5.3% Схожість

Найбільша схожість: 1.73% з Інтернет-джерелом (<http://elar.khmnu.edu.ua/bitstream/123456789/9683/1/%D0%91%D0%..>)

3.97% Джерела з Інтернету

45

Сторінка 89

3.07% Джерела з Бібліотеки

119

Сторінка 89

3.28% Цитат

Цитати

4

Сторінка 90

Не знайдено жодних посилань

0% Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

8

Підозріле форматування

18
сторінок

РІШЕННЯ КАФЕДРИ

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: *Метод стабілізації параметрів кварцових радіотехнічних пристроїв*

Автор: **Будник Ілля Юрійович**

Спеціальність: **172 Телекомунікації та радіотехніка**

Освітня програма: **Телекомунікації та радіотехніка**

Науковий керівник: **д.т.н., доц. Підченко Сергій Костянтинович**

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	<u>Відповідає</u>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укріплення запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження: Запозичення у розмірі 5,3% відносяться до загальноновживаних фраз та не є плагіатом.

Відповідальний за контроль
плагіату за системою Unischek та антиплагіатизм (ХНУ):

9.12.22р.



Олег ПИВОВАР

Зав. каф. ТМІТ



Сергій ПІДЧЕНКО

9.12.22р.

ВІДГУК

на магістерську дипломну роботу студента групи ТРМ-21-І Іллі БУДНИКА «Метод стабілізації параметрів кварцових радіотехнічних пристроїв»

Метою роботи є підвищення стабільності вихідних коливань кварцового генератора за рахунок контролю температурного стану п'єзореzonатора, який працює в багаточастотному режимі збудження.

В дипломній роботі представлено метод стабілізації частоти коливань DDS синтезатора, де в якості опорного джерела коливань використовується кварцовий генератор із компенсацією нестабільності частоти за рахунок контролю температури кварцового резонатора, що працює в багаточастотному режимі збудження. Розроблено математичну модель кварцового генератора із стабілізацією температурного впливу. Проведено імітаційне моделювання системи температурної стабілізації кварцового генератора в двухчастотному режимі збудження. Запропоновано систему температурної стабілізації коливань DDS-синтезатора частоти на основі кварцового резонатора із суміщенням функцій стабілізації коливань та ідентифікації температурних збурень.

У процесі виконання дипломної роботи Ілля БУДНИК проявив себе старанний, ініціативний, креативний фахівець, що продемонстрував вміння застосовувати отримані знання для вирішення завдань в галузі електроніки та телекомунікацій.

В цілому магістерська дипломна робота виконана на високому науково-технічному рівні, а її автор Ілля БУДНИК заслуговує на оцінку «добре».

Керівник:

д.т.н., професор



Сергій ПІДЧЕНКО

РЕЦЕНЗІЯ
на магістерську дипломну роботу
студента групи ТРМ-21-І Іллі БУДНИКА
«Метод стабілізації параметрів кварцових радіотехнічних пристроїв»

Стабільність частоти коливань, які генерується кварцовими генераторами (КГ) є основним одним із основних показників радіотехнічних пристроїв на їх основі. Наприклад, типовим рішенням є використання КГ в якості джерела опорних коливань для цифрових синтезаторів прямого синтезу частоти (DDS). Незважаючи на те, що КГ характеризуються високою стабільністю вихідних коливань, вони схильні до впливу низки дестабілізуючих факторів, зокрема температури. Тому актуальність теми магістерської дипломної роботи Іллі БУДНИКА не викликає сумнівів.

В роботі розглянутий один із перспективних підходів щодо вирішення проблеми компенсації нестабільності частоти КГ, який базується на використанні багаточастотного режиму збудження кварцового резонатора (КР) для контролю його поточного стану. Проведено аналіз дестабілізуючих факторів, які призводять до нестабільності коливань кварцових генераторів (зокрема методів компенсації температурного впливу). Розроблено пакет імітаційних моделей в програмному середовищі MATLAB/Simulink. До складу цього пакету входить: модель температурно-залежного багаточастотного кварцового генератора, спрощена модель 32-розрядного DDS-синтезатора частоти, та система температурної стабілізації вихідних коливань DDS-синтезатора.

В результаті проведеного імітаційного моделювання роботи DDS-синтезатора із опорним генератором для широкому діапазоні зміни температури із стабілізацією параметрів та без стабілізації, були отримані результати, які показують суттєвих вигравш у випадку застосування стабілізації (майже на один порядок зменшення відхилення частоти у випадку роботи близько до нижньої межі робочого температурного діапазону КР).

Апробацію результатів дослідження було здійснено на XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук», яка проходила в м. Хмельницькому 18-19 листопада 2022 року.

В цілому магістерська дипломна робота Іллі БУДНИКА є актуальною в області сучасних технологій телекомунікацій та радіотехніки та заслуговує оцінки «добре».

Рецензент:
зав. кафедри АКІТ, д.т.н., професор



Валерій МАРТИНЮК