

КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ

Бакалавр

Освітній рівень

Генератор спеціальних сигналів

Назва теми


Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Телекомунікації та радіотехніка»

КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ

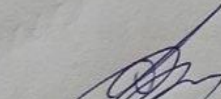
Виконав: здобувач 4 курсу, група ТР2-19-1

  
Підпис

Ярослав КОЛОМІЄЦЬ

Ініціали, прізвище


Керівник:..

  
Підпис, дата

Сергій ПІДЧЕНКО

Ініціали, прізвище

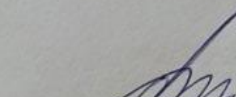
Нормоконтроль:

  
Підпис, дата

Віктор Стецюк

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав.кафедри телекомунікацій,  
медійних та інтелектуальних  
технологій

  
Підпис, дата

Сергій ПІДЧЕНКО

Ініціали, прізвище

12 червня 2023 р.

Хмельницький 2023

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій (ТМІТ)

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Шифр і назва

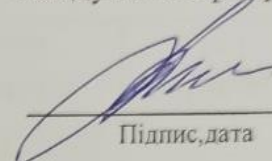
Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Шифр і назва

Освітня-професійна програма «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТМІТ



Підпис, дата

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ**

Коломійцю Ярославу Олександровичу

Прізвище, ім'я, по батькові здобувача

1 Тема проекту Генератор спеціальних сигналів

керівник проекту Підченко Сергій Костянтинівич, д.т.н, професор

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від «1» 03 2023р. № 5.

2 Строк подання студентом проекту на кафедру: 1.06.2023р.

3 Вихідні дані до проекту Ескіз та загальні принципи побудови синтезатора прямого цифрового синтезу для побудови на його базі генератора спеціальних сигналів з програмним керуванням за допомогою персонального комп'ютера.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)  
Аналіз методів генерування спеціальних сигналів та методів синтезу частоти; огляд існуючих цифрових функціональних генераторів та генераторів сигналів спеціальної форми, а також їхніх технічних характеристик;  
розробка структурної схеми генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора прямого цифрового синтезу;  
розробка схеми електричної принципової генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора прямого цифрового синтезу.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Схема електрична структурна генератора спеціальних сигналів.

2. Схема електрична принципова синтезатора прямого цифрового синтезу для генератора спеціальних сигналів.

3. Демонстраційні плакати.

6 Консультанти розділів кваліфікаційного проекту


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7 Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ п/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Вибір тематики проекту	до 1.03.23	обрано
2	Аналіз початкових даних проекту	до 5.03.23	виконано
3	Написання вступу та 1 розділу	до 15.03.23	виконано
4	Написання 2 розділу	до 15.04.23	виконано
5	Оформлення креслення структурної та функціональної схеми	до 15.04.23	виконано
6	Написання 3 розділу	до 1.05.23	виконано
7	Оформлення креслення принципової схеми та демонстраційних плакатів	до 10.05.23	виконано
8	Компоновка та формування висновків	до 15.05.23	виконано
9	Корекція зауважень керівника	до 17.05.23	виконано
10	Підготовка доповіді, оформлення документів супроводу проекту	до 18.05.23	виконано
11	Подання готового проекту на попередній захист	20.05.23	виконано
12	Корекція зауважень під час попереднього захисту	до 01.06.23	виконано
13	Рецензування, антиплагіат, підписи	до 12.06.23	виконано

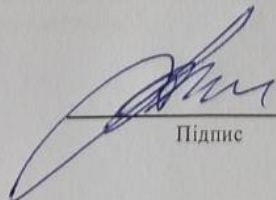
Здобувач

  
Підпис

Ярослав КОЛОМІЄЦЬ

Ініціали, прізвище

Керівник проекту

  
Підпис

Сергій ПІДЧЕНКО

Ініціали, прізвище

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційного проєкту:

«Генератор спеціальних сигналів».

Автор роботи: Коломієць Ярослав Олександрович.

Керівник роботи: докт. техн. наук, проф. Підченко Сергій Костянтинович.

Пояснювальна записка: 60 сторінок, 20 рисунки, 11 таблиць, 50 джерел.

Графічна частина: 2 креслення, 10 презентаційних слайдів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ГЕНЕРАТОР СИГНАЛІВ, ПРЯМИЙ ЦИФРОВИХ СИНТЕЗ, ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА, МІКРОПРОЦЕСОР, РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРІЙ.

*Метою кваліфікаційного проєкту є розробка генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора частоти прямого цифрового синтезу, який інтегровано із персональним комп'ютером.*

Проєкт присвячений розгляду структурної та схемотехнічної побудови програмованого синтезатора прямого цифрового синтезу для генератора спеціальних сигналів. Проведено аналітичний огляд методів генерування спеціальних сигналів та методів синтезу частоти, а також огляд існуючих цифрових функціональних генераторів та генераторів сигналів спеціальної форми, а також їхніх технічних характеристик. Розроблено структурну схему генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора прямого цифрового синтезу. Розроблено схему електричну принципову генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора прямого цифрового синтезу. Проведено необхідні електричні розрахунки для підтвердження працездатності прийнятих схемотехнічних рішень. Працездатність пристрою підтверджена лабораторним макетуванням та комп'ютерним моделюванням.

Ярослав КОЛОМІЄЦЬ

Ініціали, прізвище здобувача

12.06.2023

Підпис, дата



## ЗМІСТ

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ГЕНЕРУВАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ СИГНАЛІВ .....	9
1.1 Огляд методів генерування спеціальних сигналів та їхніх характеристик .	9
1.2 Огляд методів синтезу частоти.....	10
1.2.1 Прямий аналоговий синтез.....	10
1.2.2 Непрямий аналоговий синтез.....	12
1.2.3 Прямий цифровий синтез .....	13
1.3 Огляд існуючих цифрових генераторів спеціальних сигналів та їхніх характеристик.....	15
1.3.1 Функціональні генератори .....	15
1.3.2 Генератори сигналів довільної форми .....	20
Висновки до першого розділу .....	24
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ГЕНЕРАТОРА СПЕЦІАЛЬНИХ СИГНАЛІВ .....	28
2.1 Синтезатор прямого цифрового синтезу .....	28
2.2 Синтезатор прямого цифрового синтезу із акумулятором фази.....	31
2.3 Опис структурної схеми генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора прямого цифрового синтезу .....	33
Висновки до другого розділу.....	35
3 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СИНТЕЗАТОРА ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗУ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРА СПЕЦІАЛЬНИХ СИГНАЛІВ.....	36

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Коломієць Я.О.</i>			<b>Генератор спеціальних сигналів</b>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перев.</i>		<i>Підченко С.К.</i>					6	60
<i>Н. Контр.</i>		<i>Стецюк В.І.</i>			<b>ХНУ, ФІТ</b>			
<i>Затв.</i>		<i>Підченко С.К.</i>						
					<b>Пояснювальна записка</b>			

3.1 Вибір та обґрунтування елементної бази .....	36
3.2 Розробка схеми електричної принципової пристрою .....	47
3.3 Опис та технічні характеристики схеми електричної принципової синтезатора .....	56
Висновки до третього розділу .....	57
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61
ДОДАТОК А.....	67

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
						7
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

## ВСТУП

У сучасному світі, де технологічний прогрес стрімко розвивається, спеціальні сигнали відіграють важливу роль у багатьох галузях телекомунікацій та радіотехніки, зокрема для налагодження та тестування спеціалізованого обладнання. Такі пристрої дозволяють генерувати та формувати різноманітні сигнали, включаючи сигнали зі своєю власною спектральною щільністю, випадкові сигнали, а також сигнали із заданою формою. Наприклад, деякі генератори дозволяють генерувати сигнали з різними спектрами, тоді як інші пристрої формують сигнали з визначеною формою, такі як синусоїди або прямокутні сигнали. Також існують спеціальні пристрої, призначені для генерації спеціальних сигналів. Наприклад, функціональні генератори можуть створювати різноманітні сигнали, включаючи сигнали з заданою формою, амплітудою та частотою. Отже, під час генерації спеціальних сигналів важливо забезпечити високу точність та стабільність, оскільки ці сигнали можуть бути використані для тестування електронних пристроїв та проведення інших досліджень, де точність показники точності є критичним фактором.

**Метою кваліфікаційного проєкту** є розробка генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора частоти прямого цифрового синтезу, який інтегровано із персональним комп'ютером.

Для досягнення поставленої мети сформульовані та вирішені такі конструкторсько-технологічні задачі:

1. Аналіз методів генерування спеціальних сигналів та методів синтезу частоти
2. Огляд існуючих цифрових функціональних генераторів та генераторів сигналів спеціальної форми, а також їхніх технічних характеристик.
3. Розробка структурної схеми генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора прямого цифрового синтезу.
4. Розробка схеми електричної принципової генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора прямого цифрового синтезу.

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		8

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ГЕНЕРУВАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ СИГНАЛІВ

## 1.1 Огляд методів генерування спеціальних сигналів та їхніх характеристик

Підходи до генерації спеціальних сигналів включають використання електричних цифрових схем генераторів сигналів, які забезпечують можливість створення сигналів змінної амплітуди, частоти та форми. Сигнальні генератори зазвичай мають вбудовані функціональні можливості, що дозволяють генерувати різноманітні сигнали з довільною формою та спектральною щільністю, а також сигнали з різними видами модуляцій, такими як амплітудна, фазова та частотна модуляції. Для моделювання та аналізу методів генерації існують спеціалізовані програмні засоби, наприклад Matlab, Python, LabVIEW та інші, призначені для генерації спеціальних сигналів в складі імітаційної моделі проекту. Ці програми надають користувачам можливість створювати різноманітні сигнали, використовуючи математичні формули, функції та алгоритми.

Під час генерації спеціальних сигналів важливим є забезпечення їхньої високої стабільності. Для досягнення цих параметрів застосовуються різні технології та методи, такі як цифрова обробка сигналів, управління стабільністю або корекція шумів. Крім того, для оцінки якості та стабільності сигналів використовуються спеціалізовані прилади та обладнання, такі як осцилографи, спектральні аналізатори та інші.

Деякі методи генерації спеціальних сигналів включають використання функцій декодування та кодування. Ці функції дозволяють створювати сигнали зі специфічними параметрами, такими як, наприклад індекс частотної модуляція, частота несучого колювання, форма тощо. Також існує метод генерації спеціальних сигналів, який використовує синтез шляхом змішування сигналів. Цей підхід полягає у комбінації двох або більше сигналів з різними

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		9

характеристиками, такими як частота, амплітуда та фаза, для створення спеціального сигналу з заданими параметрами. Також можна використовувати фізичні принципи для генерації спеціальних сигналів, наприклад, використання п'єзоелектричних кристалів для створення звукових хвиль або електромагнітних коливань.

Іншим методом є використання імпульсної модуляції (pulse modulation). Цей підхід використовується для створення сигналів з дискретними значеннями, таких як сигнали з частотною модуляцією, амплітудною модуляцією та іншими характеристиками.

Вибір конкретного методу генерації спеціальних сигналів залежить від потреб і вимог конкретної ситуації, а також від технічних можливостей та обмежень, таких як наявність обладнання, програмного забезпечення, бюджету та часу. В будь-якому випадку, важливо мати якісні та стабільні спеціальні сигнали для виконання різноманітних завдань, таких як випробування та валідація електронних пристроїв, аналіз та обробка сигналів, передача та отримання інформації та інші застосування.

## 1.2 Огляд методів синтезу частоти

Синтезаторами частоти називаються електронні пристрої, що базуючись на сигналі коливання опорної частоти (зазвичай синусоїдальної форми), дозволяє отримати один або кілька сигналів з іншими частотами, відмінними від опорної частоти. Синтез можна здійснювати як некогерентним, так і когерентним методом [1-3].

### 1.2.1 Прямий аналоговий синтез

Некогерентний метод синтезу частоти передбачає використання кількох коливань опорних частот від незалежних джерел для отримання великої кількості коливань на виході синтезатора з частотами, відмінними від частот

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		10

опорних коливань. Цей метод називається прямий аналоговий синтезом частоти. Згідно даного методу фаза вихідного сигналу та фази коливань опорних генераторів знаходяться у випадковому, а не у кратному відношенні.

Структурна схема пристрою-синтезатора прямого аналогового синтезу зображена на рисунку 1.1. Вона складається із Опорних генераторів  $G_1$ - $G_6$ , двох змішувачів, а також двох смугових фільтрів (СФ).

Метод називається прямим через відсутність корекції помилки, отже, стабільність вихідного сигналу прямо пов'язана з стабільністю опорного сигналу і може бути високою: рівень фазового шуму невеликий, а швидкість зміни частоти визначається швидкістю перемикавання і може бути дуже великою. Також варто відзначити, що генератори не вимикаються при переході з однієї частоти на іншу, а отже, можна повернутися до попередньої частоти у будь-який момент продовжуючи роботу в тій же фазі. Дана властивість називається «фазовою пам'яттю». Для зміни частоти використовується банк опорних генераторів, що перемикаються.

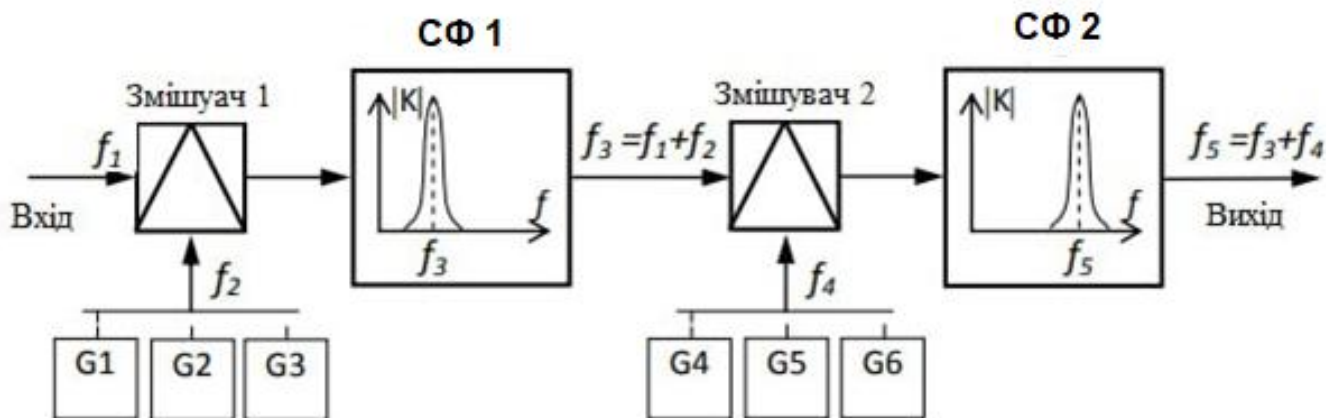


Рисунок 1.1 – Структурна схема прямого аналогового синтезатора

Цей метод є адекватним рішенням для радіотехнічних пристроїв із відносно невеликою кількістю каналів з невеликою кількістю каналів, а той час коли для забезпечення широкої зміни частоти потрібна велика кількість

опорних генераторів, що є може стати причиною підвищення вартості розробки такого пристрою.

### 1.2.2 Непрямий аналоговий синтез

Метод непрямого аналогового синтезу частоти відноситься до групи когерентних методів, що базуються на принципі порівняння частоти вихідного сигналу з частотою опорного генератора. У даному випадку, вихідний сигнал генерується з використанням генератора керованого напругою (ГКН). Структурна схема синтезатора непрямого синтезу на основі фазової автопідстроювання частоти (ФАПЧ) зображена на відповідній схемі на рисунку 1.2. Вона представляє собою замкнутий пристрій з від'ємним зворотною зв'язкою, де постійно порівнюються два сигнали з частотами  $f_{c1}$  і  $f_{c2}$ .

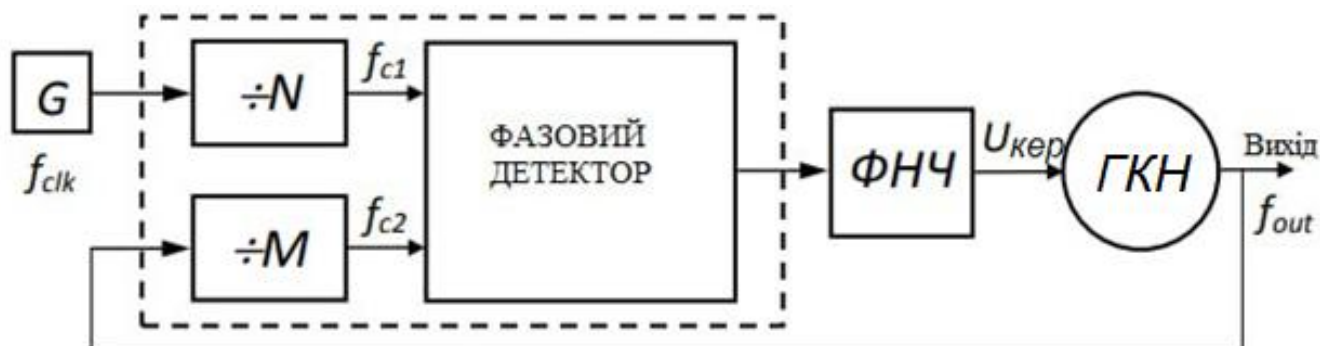


Рисунок 1.2 – Структурна схема синтезатора непрямого синтезу на основі фазової автопідстроювання частоти

Сигнал з частотою  $f_{c1}$  отримується шляхом ділення сигналу опорного генератора на число  $N$ . Сигнал з частотою  $f_{c2}$  отримується шляхом ділення частоти вихідного сигналу ГКН на число  $M$ . При відхиленні частоти  $f_{c1}$  від частоти  $f_{c2}$  фазовий детектор (ФД) генерує сигнал помилки з протилежним знаком, який після фільтрації подається на ГКН для підтримки рівності частот  $f_{c1}$  та  $f_{c2}$ . Крок сітки визначається цілочисловими подільниками частоти в

залежності від частоти порівняння, тобто, синтезатор збільшує частоту опорного генератора (ОГ) в  $N/M$  разів. Коефіцієнти ділення  $N$  і  $M$  можуть бути встановлені мікроконтролером (МК). Однак на практиці доцільно змінювати тільки значення  $M$ , оскільки це не впливає на частоту порівняння. До недоліків синтезатора слід віднести відносно високий рівень фазових шумів, джерелом яких є фазовий детектор, а також обмежену швидкість переключення частоти.

### 1.2.3 Прямий цифровий синтез

Прямий цифровий синтез (ПЦС), або англійською Direct Digital Synthesis (DDS), є когерентним методом синтезу частоти. Який має ряд істотних переваг. Перш за все це можливість застосування методу для генерації сигналів спеціальної та довільної форми, а також синтез гармонічних сигналів з високою точністю та стабільністю з одного або декількох початкових коливань. Другою особливою рисою методу прямого цифрового синтезу є повна цифрова визначеність, тобто частота, амплітуда та фаза сигналу точно відомі та контролюються у будь-який момент часу. І остання особливість полягає у мінімальній чутливості пристроїв до температурних змін та старіння. Єдиним елементом, який володіє істотним рівнем нестабільності, що характерно для аналогових пристроїв, є цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП).

Основні переваги та недоліки синтезаторів частоти ПЦС представлені в таблиці 1.1. До недоліків, в основному належать обмеження, що накладаються ЦАП для формування вихідного сигналу.

Синтезатори частоти в є ядром системи налаштування та визначають основні технічні характеристики обладнання електронних комунікацій. За технічними та економічними показниками синтезатори ПЦС відповідають більшості вимогам, що ставляться до синтезаторів частоти, забезпечуючи високий рівень інтеграції, можливість програмного керування та інші показники, наприклад, компактні розміри. На сьогодні синтезатори ПЦС випускається у формі інтегральних пристроїв, використовуючи

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		13

мікромініатюрні технології інтеграції, мають низький рівень споживання енергії та цифрові інтерфейси для програмного керування.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки прямого цифрового синтезу

Переваги	Недоліки
Цифрове керування частотою та фазою вихідного сигналу.	Максимальна вихідна частота не може перевищувати половину тактової частоти (на практиці вона ще менша).
Висока роздільна здатність за частотою та фазою.	Випадкові паразитні гармоніки на виході синтезатора ПЦС можуть мати більший рівень, ніж у інших методів синтезу.
Швидкий перехід на іншу частоту (фазу), перестроювання за частотою без розриву фази та інших паразитних перехідних процесів.	Сильна залежність спектральної чистоти вихідного сигналу від характеристик ЦАП.
Архітектура ПЦС, завдяки дуже малому кроку перестроювання за частотою, не потребує точного налаштування початкової частоти, а також забезпечує можливість параметричної температурної компенсації.	Потужність, яку споживає синтезатор ПЦС, пропорційна тактовій частоті і може досягати порядку 100 мВт, що може бути непридатним для пристроїв з автономним живленням на високих частотах.
Цифровий інтерфейс дозволяє реалізувати керування за допомогою мікроконтролерних пристроїв.	

## 1.3 Огляд існуючих цифрових генераторів спеціальних сигналів та їхніх характеристик

### 1.3.1 Функціональні генератори

Функціональним генератором називається радіотехнічний пристрій, який здатен генерувати декілька періодичних спеціальних сигналів, наприклад, прямокутної, трикутної, синусоїдальної форми, які формуються на одній частоті, що може перестроюватись в широкому частотному діапазоні [5]. Різноманітні форми вихідних сигналів роблять ці пристрої незамінними в процесі налагодження та тестування радіоапаратури.

На основі аналізу літературних джерел та патентних матеріалів, а також ринку генераторів сигналів, можна умовно виділити наступні групи функціональних генераторів, що використовують цифрових синтез.

1. Схеми із застосуванням синтезаторів частоти, які істотно підвищують стабільність частоти та точність встановлення частоти. Такі генератори є досить економічними, і їхня вартість наближається до вартості аналогових функціональних генераторів. Реалізована у них схема цифрового синтезу слугує лише для точного встановлення частоти сигналу, що дозволяє значно підвищити стабільність частоти генератора та задавати її у цифровому форматі, програмними засобами. Формування синусоїдального сигналу здійснюється або за допомогою, наприклад, LC-генераторів з системою ФАПЧ. Функція генерування трикутного сигналу в таких генераторах може бути відсутньою, а прямокутні імпульси отримуються за рахунок використання в схемі регенеративного порогового пристрою або тригера зі зворотним відліком (тоді частота прямокутного сигналу буде вдвічі менша за частоту синусоїдального сигналу). Отже, генератори цього типу використовуються аналоговий принцип формування основних сигналів, і сигнали, що були згенеровані, не мають рівнів та шумів квантування, які притаманні сигналам, отриманим за допомогою

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		15

цифрового синтезу. Саме цей факт виправдовує використання таких схем у порівнянні із сучасними схемами цифрового синтезу.

2. Функціональні генератори, схеми яких повністю реалізують метод ПЦС для отримання потрібної форми сигналів. Рівень характеристик таких сигналів залежить переважно від розрядності квантування та частоти вибірки сигналів з пам'яті формувача. Розміщення будь-якої кількості форм сигналів у пам'яті супроводжується розширенням обсягу пам'яті з додаванням кожного нового шаблону форми вихідного сигналу.

3. До останньої групи генераторів належать пристрої, які в повній мірі реалізують можливості ПЦС, в тому числі використовуючи цифрові методи синтезу для отримання сигналів довільної форми. Це призводить до підвищення витрат на виробництво таких генераторів, що пов'язані із використанням пам'яті з можливістю перезапису даних, засобів відображення та редагування форми сигналів тощо. Останній факт призводить до збільшення вартості генераторів довільної форми функціональних генераторів спеціальних сигналів.

На рисунку 1.3 зображено функціональний генератор VC2003, який побудовано на методі ПЦС.

Основні характеристики генератора VC2003 наведені в таблиці 1.2.



Рисунок 1.3 – Генератор сигналів VC2003

Таблиця 1.2 – Характеристики генератора VC2003

Характеристика	Значення
Вертикальна роздільна здатність	10 біт
Діапазон частот	Від 1 Гц до 3 МГц
Роздільна здатність	0,01 Гц, точність $5 \cdot 10^{-5}$
Нестабільність частоти	Не більше $5 \cdot 10^{-5}$ в температурному діапазоні від -40 до +85 °С
Форма вихідного сигналу	Синус, прямокутні імпульси TTL
Тривалість фронту TTL імпульсу	До 20 нс
Коефіцієнт нелінійних спотворень гармонічного сигналу	-40 дБ на частоті від 1 Гц до 1 МГц; -30 дБ в діапазоні частот від 1 до 3 МГц
Рівень вихідного сигналу	Від 5 мВ до 8 В на навантаженні 50 Ом
Нестабільність амплітуди	До 5%
Амплітудна модуляція (внутрішня 400 Гц, 1 кГц)	Від 1 до 100%
Зовнішній модулюючий сигнал	Від 100 Гц до 100 кГц
Режим перемикання частоти	Лінійний, логарифмічний
Швидкість перемикання	Від 0,02 до 5 с/крок
Одновременна індикація частоти і рівня вихідного сигналу	

Програмований функціональний генератор G5100, що базується на методі ПЦС і призначений для роботи в комп'ютеризованих вимірювальних системах. На рисунку 1.4 показано зовнішній вигляд генератора, а в таблиці 1.3 наведені основні його технічні характеристики. Даний генератор максимально простий у використанні і є одним із найбільш доступних на ринку.

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		17

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики генератора G5100

Характеристика	Значення
Діапазон частот	Від 1 Гц до 15 МГц
Режими	Свіп-генератор, функціональний генератор, генератор імпульсів
Підтримка синусоїдального, пилкоподібного, трикутного та імпульсного сигналів і сигналів TTL-рівня на виході генератора.	
Режим коливання частоти з внутрішнім та зовнішнім керуванням від 1:1 до 10:1, період	Від 0,05 до 9,95
Нелінійні спотворення для синусоїдальних сигналів	Менше 1% у діапазоні 10 Гц до 100 кГц
Нелінійні спотворення для трикутних сигналів	Менше 1% у діапазоні 1 Гц
Регулювання симетрії для пилкоподібних та імпульсних сигналів (20–80%)	
Дисплей	Матричний рідкокристалічний дисплей з роздільною здатністю 128 на 64 з розрядністю індикації рівній 4 знаки
Регульоване усунення постійної напруги	
Плавний та ступінчастий (-20 дБ) атенюатори	
Дистанційне керування з персонального комп'ютера через інтерфейс RS232C	
Запам'ятовування до 8 режимів роботи	
Інтерфейси: RS232C та GP-IB	



Рисунок 1.4 – Генератор сигналів G5100

Генератор Protek B821 – функціональний свіп-генератор змінної частоти суміщений із широкодіапазонним цифровим частотоміром. Зовнішній вигляд генератор показано на рисунку 1.5. Деякі технічні характеристики генератора наводяться в таблиці 1.4.



Рисунок 1.5 – Генератор Protek B821

Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата

Таблиця 1.4 – Характеристики генератора Protek B821

Форми вихідних сигналів	Синус, прямокутні і трикутні імпульси TTL з можливістю корекції симетрії
Частота для синусоїдального сигналу	Від 0,2 Гц до 20 МГц
Вбудований частотомір	8 розрядів, частота до 3 ГГц
Коливання частоти від вбудованого і зовнішнього джерела	
Атенюатор на виході з послабленням 20 дБ	

### 1.3.2 Генератори сигналів довільної форми

Генератори сигналів довільної форми представлені на ринку радіоапаратури різними моделями, починаючи від найпростіших і дешевих і до дорогих та багатофункціональних. Одним із прикладом таких пристроїв є генератор Protek 9305.

На рисунку 1.6 зображено фото генератора Protek 9305, а його основні характеристики наведені в таблиці 1.5. Лінійка моделей генераторів Protek 93XX із зазначенням максимальної частоти вихідного сигналу (синусоїдального) представлена в таблиці 1.6.



Рисунок 1.6 – Генератор Protek 9305

Таблиця 1.5 – Характеристики генератора Protek 9305

Характеристика	Значення
Формування сигналу шляхом прямого синтезу (DDS).	
Діапазон частот основних типів сигналів від 100 до 5 МГц	
Роздільна здатність по вертикалі 12 бітів, частота дискретизації 200 МГц	
Пам'ять форми сигналу 4096 пікселів	
Висока точність встановлення коефіцієнта заповнення	до 1/1000
Режими модуляції сигналу	АМ, ФМ, ЧС, ІМ.
Висока точність та роздільна здатність встановлення ЧМ-сигналів.	
Плавне регулювання фази у сигналах із високочастотним заповненням	
Роздільна установка частот старту та зупинки в режимі коливання частоти.	
Довільне встановлення глибини АМ (від 1 до 120%)	
10 каналів пам'яті для сигналів, що синтезуються.	
27 типів стандартних вихідних сигналів (також додатково довільно задаються бажаний сигнал синтезу)	
Вбудований частотомір із частотою вимірювання до 100 МГц	
RS232C інтерфейс, GPIB інтерфейс	

Таблиця 1.6 – Модельний ряд генераторів Protek 93XX

Модель	Макс. Частота генерування
9310	10 МГц
9320	20 МГц
9340	40 МГц
9380	80 МГц
93120	120 МГц

Генератор сигналів 33220А фірми Agilent Technologies має діапазон частот сигналів до 20 МГц з можливістю цифрового встановлення частоти з контролем за допомогою вбудованого частотоміру. Генератор формує 11

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		21

стандартних форм сигналів та сигнал довільної форми. Є підтримка формування сигналів АМ, ЧМ, ФМ, FSK та ШІМ модуляцій. Використовується прямий цифровий синтез; 14-бітове кодування зі швидкістю до 50 Мбит/с при довжині сигналу 64 К точок. Можлива лінійна та логарифмічна зміна частоти. Передбачено зв'язок з комп'ютером через інтерфейси USB, GPIB та LAN.

Також виробником випускається генератор 33280А, що має діапазон частоти синусоїдального сигналу від 1 мкГц до 80 МГц з роздільною здатністю 1 мкГц для синусоїди та прямокутних імпульсів.

На рисунку 1.7 зображено фото генератора Agilent 33220А. В таблиці 1.7 наводяться технічні характеристики генераторів 33220А та 33280А.



Рисунок 1.7 – Генератор Agilent 33220А

Таблиця 1.7 – Характеристики генераторів Agilent 33220А та 33280А

Характеристики	Параметри	33220А	33280А
1	2	3	4
Вхідні параметри	Частотний діапазон	1 мкГц – 20 МГц	1 мкГц – 80 МГц
	Роздільна здатність	1 мкГц	
	Похибка встановлення частоти	$\pm 20 \cdot 10^{-6}$	$\pm 2 \cdot 10^{-6}$
	Вихідний рівень	10 мВ...10 В на навантаженні 50 Ом	

1	2	3	
	Похибка встановлення на 1 кГц	$\pm(1\%$ на 1 мВ)	
Синусоїда	Нерівномірність АЧХ відносно 1 кГц	0,1 дБ при частоті менше 100 кГц, 0,15 дБ для частот від 100 кГц – 5 МГц, 0,3 дБ для частот від 5 МГц до 20 МГц	0,1 дБ при частоті менше 10 МГц, 0,2 дБ для частот від 10 МГц до 50 МГц, 0,4 дБ для частот від 50 МГц до 90 МГц
	Коефіцієнт гармонік	$\leq -70$ дБн (0,04%) до 20 кГц, $< -65$ дБн до 100 кГц, $< -50$ дБн до 1 МГц, $< -40$ дБн до 20МГц	$\leq -60$ дБн (0,2%) до 1 МГц, $< -57$ дБн до 5 МГц, $< -37$ дБ до 80 МГц.
Шум	Смуга частот (білий шум)	9 МГц	50 МГц
Довільна форма	Діапазон частот	1 мкГц – 6 МГц	1 мкГц – 25 МГц
	Довжина пам'яті	2– 64 тисячі точок	1– 64 тисячі точок
	Дозвіл ЦАП	14 біт (включаючи знак)	12 біт (включаючи знак)
	Частота дискретизації	50 МГц	200 МГц (фільтр смуги 50 МГц)
	Пам'ять	4 осередки	
	Вбудовані сигнали	Наростаюча та спадаюча експонента, кардіосигнал $\sin x/x$	

Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата

1	2	3	
АМ, ЧМ	Форми несучої	Синус, меандр, пила, довільна	
	Джерело модуляції	Зовнішній/внутрішній	
	Модулююче коливання (внутрішнє)	Синус, меандр, пилка, трикутник, шум, довільна (частота до 20 кГц)	
	Девіація частоти	До 10 МГц (пилова)	До 90 МГц (пилова)
	Коефіцієнт АМ	1... 120% (АМ): дозвіл 0,1%	

### Висновки до першого розділу

1. Генерування спеціальних сигналів є важливим аспектом багатьох галузей розробки, тестування та налагодження електронних пристроїв, аналізу сигналів та передача інформації. Для побудови таких пристроїв використовуються різні методи, включаючи використання електричних цифрових схем та програмне забезпечення. Вибір конкретного методу генерування залежить від потреб та вимог конкретної ситуації, а також від технічних можливостей та обмежень. Для забезпечення високої стабільності сигналів застосовуються різні технології та методи, такі як цифрова обробка сигналів та корекція шумів. Успішна генерація спеціальних сигналів вимагає також використання спеціалізованих пристроїв та обладнання для оцінки якості та стабільності сигналів, таких як осцилографи та спектральні аналізатори.

2. Синтезатори частоти використовуються для отримання сигналів з різними частотами на основі опорної частоти. Вони можуть працювати за некогерентним або когерентним методом. Прямий аналоговий синтез частоти є одним з методів некогерентного синтезу, який використовує кілька незалежних

джерел коливань для отримання багатьох коливань з відмінними частотами. Прямий цифровий синтез (ПЦС), також відомий як Direct Digital Synthesis (DDS), є когерентним методом синтезу частоти, який має значний набір переваг. Перш за все, цей метод дозволяє генерувати сигнали спеціальної та довільної форми, а також синтезувати гармонічні сигнали з високою точністю та стабільністю, використовуючи одне або кілька початкових коливань. Другою важливою особливістю методу прямого цифрового синтезу є його повна цифрова визначеність. Частота, амплітуда та фаза сигналу точно відомі та можуть бути контрольовані в будь-який момент часу. Остання особливість полягає у мінімальній чутливості пристроїв до температурних змін та старіння. Єдиним елементом, який може виявити значну нестабільність, що є типовою для аналогових пристроїв, є цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП).

3. Синтезатори частоти на основі ПЦС є ядром систем налаштування та визначають основні технічні характеристики обладнання для генерування спеціальних сигналів. З технічного та економічного погляду синтезатори ПЦС задовольняють більшість вимог, що ставляться до синтезаторів частоти. Вони забезпечують високий рівень інтеграції, можливість програмного керування, компактні розміри та інші показники. На сьогоднішній день синтезатори ПЦС випускаються у формі інтегральних пристроїв, використовуючи мікромініатюрні технології інтеграції, мають низький рівень споживання енергії та цифрові інтерфейси для програмного керування.

Основні переваги синтезаторів частоти ПЦС включають:

- цифрове керування частотою та фазою вихідного сигналу.
- висока роздільна здатність за частотою та фазою.
- швидкий перехід на іншу частоту (фазу) без розриву фази та інших паразитних перехідних процесів.
- архітектура пцс не вимагає точного налаштування початкової частоти та дозволяє параметричну температурну компенсацію.
- цифровий інтерфейс дозволяє програмне керування з використанням мікроконтролерних пристроїв.

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		25

Недоліки синтезаторів частоти ПЦС включають:

- максимальна вихідна частота обмежена половиною тактової частоти (на практиці зазвичай навіть менша).

- випадкові паразитні гармоніки на виході синтезатора пцс можуть мати вищий рівень порівняно з іншими методами синтезу.

- спектральна чистота вихідного сигналу сильно залежить від характеристик цап.

4. Синтезатори ПЦС вимагають помірного рівня споживання енергії, який пропорційний тактовій частоті і може становити близько 100 мВт, що може бути недоцільним для пристроїв з автономним живленням на високих частотах. Загалом, синтезатори частоти на основі прямого цифрового синтезу (ПЦС) виявляються ефективними та потужними засобами для генерації сигналів у багатьох застосуваннях, забезпечуючи високу точність, стабільність та гнучкість керування. Хоча вони мають деякі обмеження, їх переваги переважають та роблять їх популярними в електронних комунікаціях та інших областях, де важливо мати високоякісні сигнали з програмним керуванням.

5. У першому розділі кваліфікаційного проєкту також було досліджено функціональні генератори, які є важливими радіотехнічними пристроями, здатними генерувати різні форми періодичних сигналів на різних частотах. Ці пристрої мають широке застосування в налагодженні та тестуванні радіоапаратури, завдяки різноманіттю вихідних сигналів, які вони можуть генерувати. На підставі аналізу літературних джерел, патентних матеріалів та ринку генераторів сигналів були виокремлені декілька груп функціональних генераторів, що використовують цифровий синтез. Перша група використовує синтезатори частот для покращення стабільності та точності встановлення частоти. Ці генератори економічні і надають можливість точно встановлювати частоту сигналу, забезпечуючи стабільність генератора. Друга група повністю реалізує метод програмовано-контрольованого синтезу (ПЦС) для отримання різних форм сигналів. Рівень характеристик цих сигналів залежить від розрядності квантування та частоти вибірки з пам'яті формувача. Третя група

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		26

генераторів повністю використовує можливості ПЦС, включаючи цифрові методи синтезу для отримання сигналів довільної форми. Це призводить до збільшення витрат на виробництво таких генераторів.

Дослідження у цій області має велике значення, оскільки функціональні генератори є ключовими пристроями у розробці та випробуванні радіоелектроніки. Подальші дослідження можуть спрямовуватись на покращення стабільності та точності генераторів, розширення їхніх можливостей і редукацію витрат на виробництво. Це допоможе покращити ефективність і якість розробки радіоапаратури та розширити її застосування у різних галузях, таких як телекомунікації, медицина та наукові дослідження.

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						27
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

## 2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ГЕНЕРАТОРА СПЕЦІАЛЬНИХ СИГНАЛІВ

### 2.1 Синтезатор прямого цифрового синтезу

Розглянемо структуру та принцип дії програмованого синтезатора ПЦС на прикладі задачі синтезу сигналу синусоїдальної форми.

Щоб отримати синусоїдальний сигнал, необхідно подати послідовність відліків функції  $y = \sin(x)$  на вхід ЦАП. Ці відліки повинні мати частоту дискретизації  $f_{clk}$ . Закон зміни функції  $y = \sin(x)$  у часі є складним, і його не можна прямо реалізувати цифровими методами. Отже, найбільш прийнятним методом для отримання відліків функції даної функції є використання таблиці.

Таблиця перекодування зберігається в програмованому запам'ятовувальному пристрої (ПЗП). Код, що надсилається на адресні входи ПЗП, виступає як аргумент функції  $y = \sin(x)$ , а вихідний код ПЗП відповідає значенню функції для даного аргументу. Аргумент функції  $y = \sin(x)$ , або поточна фаза, змінюється лінійно в часі, на відміну від значення функції.

Схема синтезатор ПЦС зображено на рисунку 2.1.

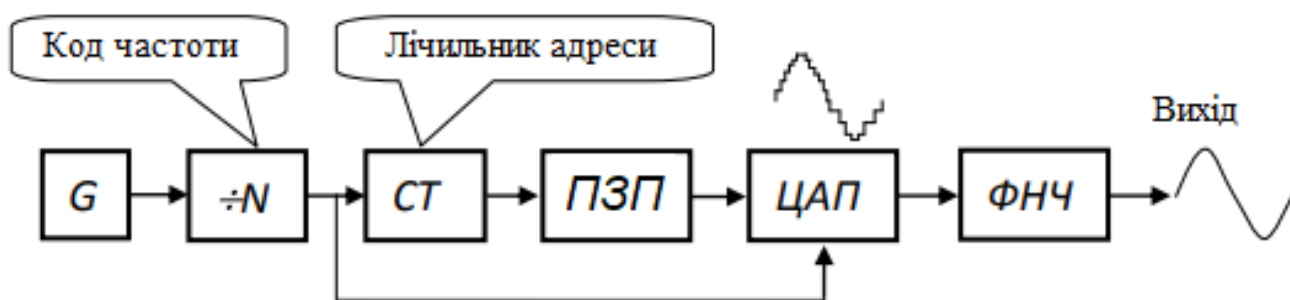


Рисунок 2.1. Функціональна схема синтезатора ПЦС

Для генерування синусоїдального сигналу застосовується синтезатор, що використовує двійковий лічильник для формування адреси в програмованому

запам'ятовувальному пристрої (ПЗП), де зберігається таблиця значень функції  $y = \sin x$  на протязі одного періоду. Відліки, отримані з виходу ПЗП, поступають на ЦАП, який створює синусоїдальний сигнал на виході. Напряга на виході ЦАП змінюється з кроком кроковим квантування, тому для подавлення гармонік, що відповідають тактовій частоті  $f_{\text{clk}}$ , потрібно використовувати фільтр низьких частот (ФНЧ). Після фільтрації сигнал подається на вихід синтезатора. Для зміни частоти вихідного сигналу використовується дільник частоти зі змінним коефіцієнтом ділення, на вхід якого подається тактовий сигнал з ОГ.

Недоліком синтезатора, зображеного на рисунку 2.1, є його обмежена здатність щодо перестроювання за частотою. Фактично, оскільки тактова частота ділиться на ціле число  $N$  разів, крок перестроювання буде змінним. Чим менше значення коефіцієнта ділення, тим більшою буде відносна величина кроку. Це призводить до неприпустимо грубого кроку передвоювання частоти при малих значеннях коефіцієнта ділення. Крім того, при перестроюванні частоти вихідного сигналу змінюється частота дискретизації, що ускладнює фільтрацію вихідного сигналу і призводить до неоптимального використання швидкісних характеристик ЦАП.

Дані недоліки були вирішуються шляхом заміни адресного лічильника ПЗП на акумулятор фази (АФ). На рисунку 2.2 показана схема 4-розрядного АФ, який складається з комбінаційного суматора SM (DD1) та регістра RG (DD2), який запам'ятовує результат сумування.

Заміна ПЗП на АФ дозволяє мінімізувати обмеження синтезатора щодо перестроювання за частотою. Алгоритм наступний: комбінаційний суматор отримує сигнал з опорного генератора і відліки фази з регістра, і результат сумування зберігається в регістрі. Цей результат використовується як адреса для ПЗП, де зберігається таблиця значень функції цільової функції.

Використання АФ дозволяє досягти більш точного та гладкого перестроювання частоти вихідного сигналу. Крім того, заміна адресного

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		29

лічильника на АФ дозволяє позбутися проблеми зі зміною частоти дискретизації, що спрощує фільтрацію сигналу і забезпечує оптимальне використання швидкісних характеристик ЦАП.

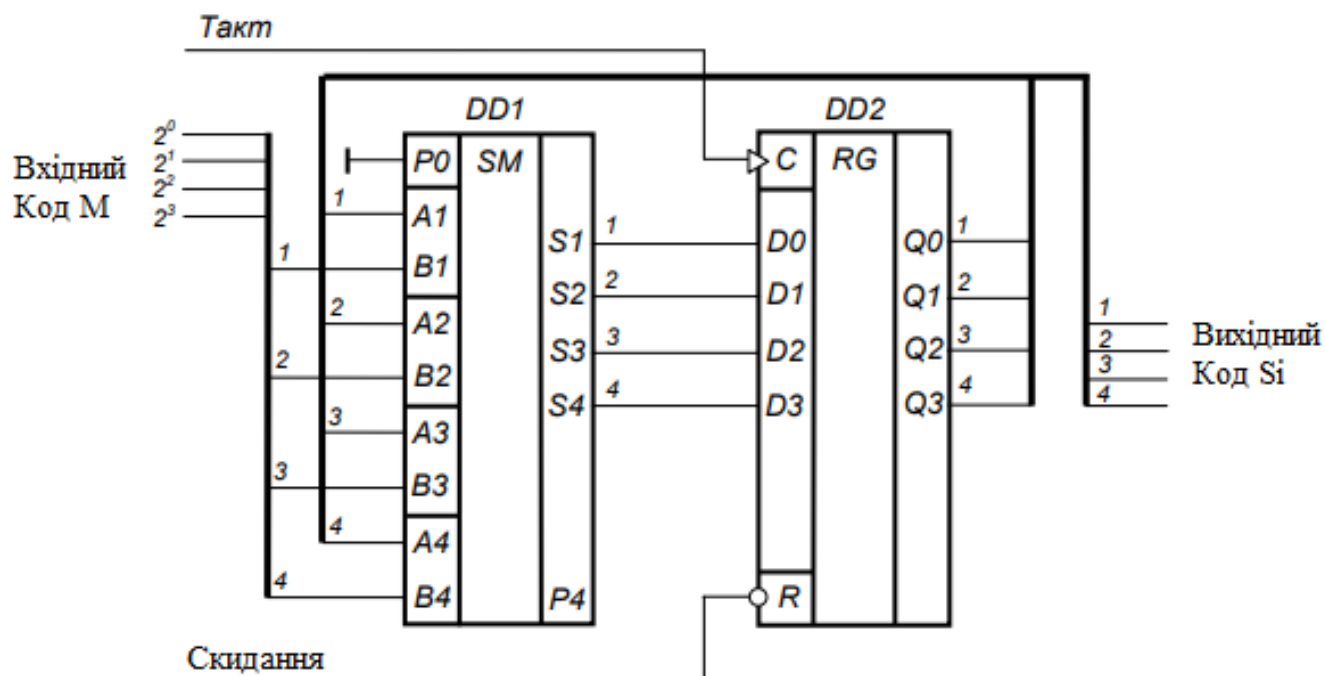


Рисунок 2.2 – Чотирьохрозрядний накопичувальний суматор

Алгоритм роботи накопичувального суматора описується співвідношенням:

$$S_i = S_{i-1} + M, \quad (2.1)$$

де  $S_i$  – результат сумування в поточному такті,

$S_{i-1}$  – результат сумування в попередньому такті,

$M$  – вхідний код.

Це означає, що в кожному наступному такті роботи пристрою вміст регістра збільшується на значення, задане вхідним кодом.

Накопичувальний суматор використовується як акумулятор фази, оскільки його вихідний код відповідає миттєвій фазі вихідного сигналу.

Постійний приріст, що додається до поточного значення накопичувального суматора, визначає крок фази за один такт роботи пристрою. Чим швидше змінюється фаза в часі, тим вища частота генерованого сигналу. Наприклад, якщо приріст дорівнює одному найменшому значущому розряду, то накопичувальний суматор поводить себе аналогічно до двійкового лічильника. Але якщо приріст фази становить, наприклад, 3, то код фази змінюється втричі швидше (див. рисунок 2.3). При збільшенні приросту фази в три рази, швидкість зміни миттєвої фази ( $i$ , отже, синтезованої частоти) також збільшується втричі.

Номера  $i$ , відповідні їм фази  $\Phi_i$ , відліки  $x_i = \sin(\Phi_i)$  та приклади вибірок синусоїд

$i$	0	1	2	3	4	5	6	7
$x_i$	0	0,707	1	0,707	0	-0,707	-1	-0,707

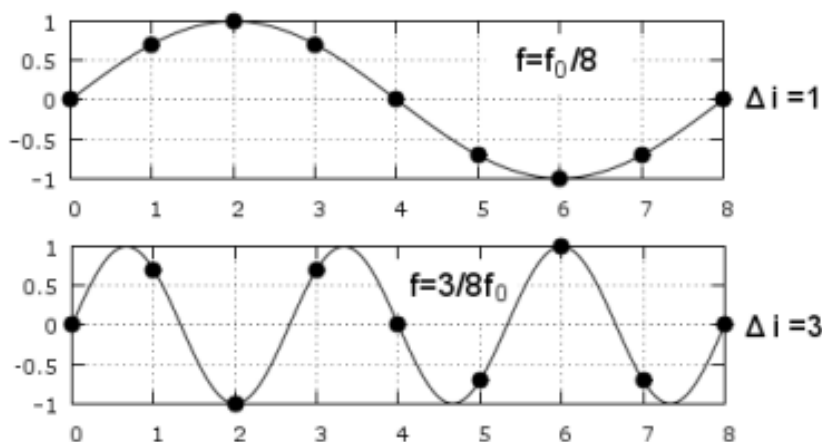
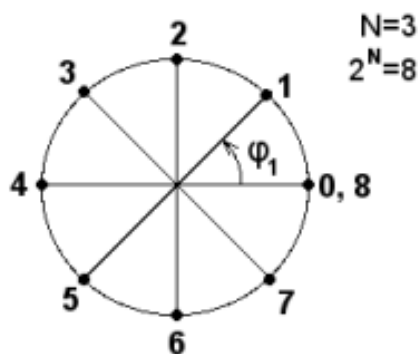


Рисунок 2.3 – Залежності синтезованої частоти від кроку фази

## 2.2 Синтезатор прямого цифрового синтезу із акумулятором фази

Схема ПЦС с АФ показана на рисунку 2.4. В схемі синтезатора АФ працює з періодичними переповненнями та забезпечуючи арифметику за модулем  $2^n$ . Дане періодичне переповнення відповідає періодичній функції  $\sin(x)$  з періодом  $2\pi$ , як показано на рисунку 2.3, тобто, частота переповнень АФ дорівнює частоті вихідного сигналу. Ця частота визначається співвідношенням:

Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата

$$f_{\text{вих}} = M * f_0 / 2^n, \quad (2.2)$$

де  $f_{\text{вих}}$  – вихідна частота,  
 $f_0$  – тактова частота,  $M$  – код частоти (вхідний код),  
 $n$  – розрядність акумулятора фази.

Таким чином, тактова частота ділиться на певне число, яке визначається кодом частоти та розрядністю акумулятора фази. При цьому крок перестроювання частоти не залежить від її значення і визначається виразом:

$$\Delta f_{\text{вих}} = f_0 / 2^n. \quad (2.3)$$

Зі виразу (2.3) випливає, що при збільшенні розрядності  $n$  зменшується крок перестроювання частоти. При цьому особливих обмежень тут немає. Наприклад, якщо розрядність накопичувального суматора складає 32 біти, а тактова частота становить 50 МГц, то частотна роздільна здатність становитиме порядку 0,01 Гц.

Так, у синтезаторі ПЦС з АФ послідовність кодів миттєвої фази сигналу змінюється лінійно. На рисунку 2.4 це схематично показано за допомогою зростаючих ліній з лінійно наростаючою амплітудою.

Швидкість зміни фази визначається кодом частоти, що надходить на вхід АФ. За допомогою ПЗП, фаза, що змінюється за лінійним законом транслюється на відповідні відліки вихідного сигналу, який в свою чергу, змінюється уже за синусоїдальним.

Ці відліки надходять на ЦАП, де формується квантований синусоїдальний сигнал, гармоніки тактової частоти  $f_0$ , якого можуть бути відфільтровані за допомогою ФНЧ. Після цього на виході отримується синусоїдальний сигнал.

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		32

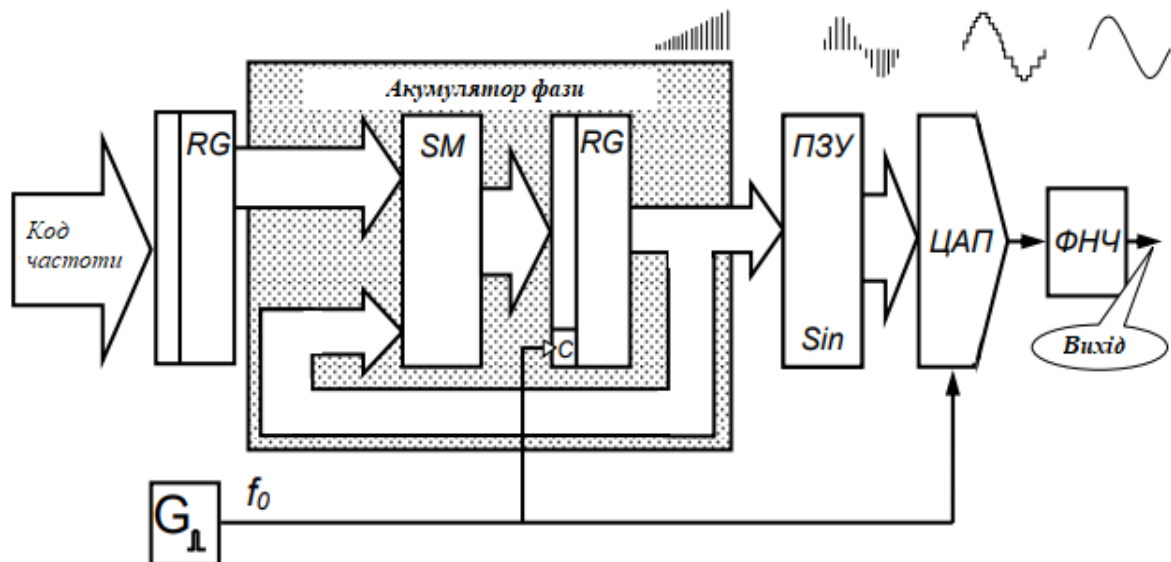


Рисунок 2.4 – Синтезатор прямого цифрового синтезу з акумулятором фази

Періодичність послідовності відліків залежить від коду частоти, розрядності АФ та розрядності коду фази, що використовується. Цей період може бути дуже різним і залежить від вхідних параметрів. За допомогою правильного підбору цих параметрів можна досягти бажаної стабільності синтезованої частоти.

Стабільність синтезованої частоти є важливою характеристикою синтезатора. Це означає, що частота сигналу, який генерується синтезатором, залишається сталою з часом і не піддається великим коливанням. Для досягнення високої стабільності частоти в синтезаторах використовуються різні методи і технології, включаючи точне керування генерацією сигналу, використання стабілізаційних зворотних зв'язків та компенсацію впливу.

### 2.3 Опис структурної схеми генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора прямого цифрового синтезу

Структурна схема генератора сигналів спеціальної форми на базі синтезатора ПЦС та МК показана на рисунку 2.5.

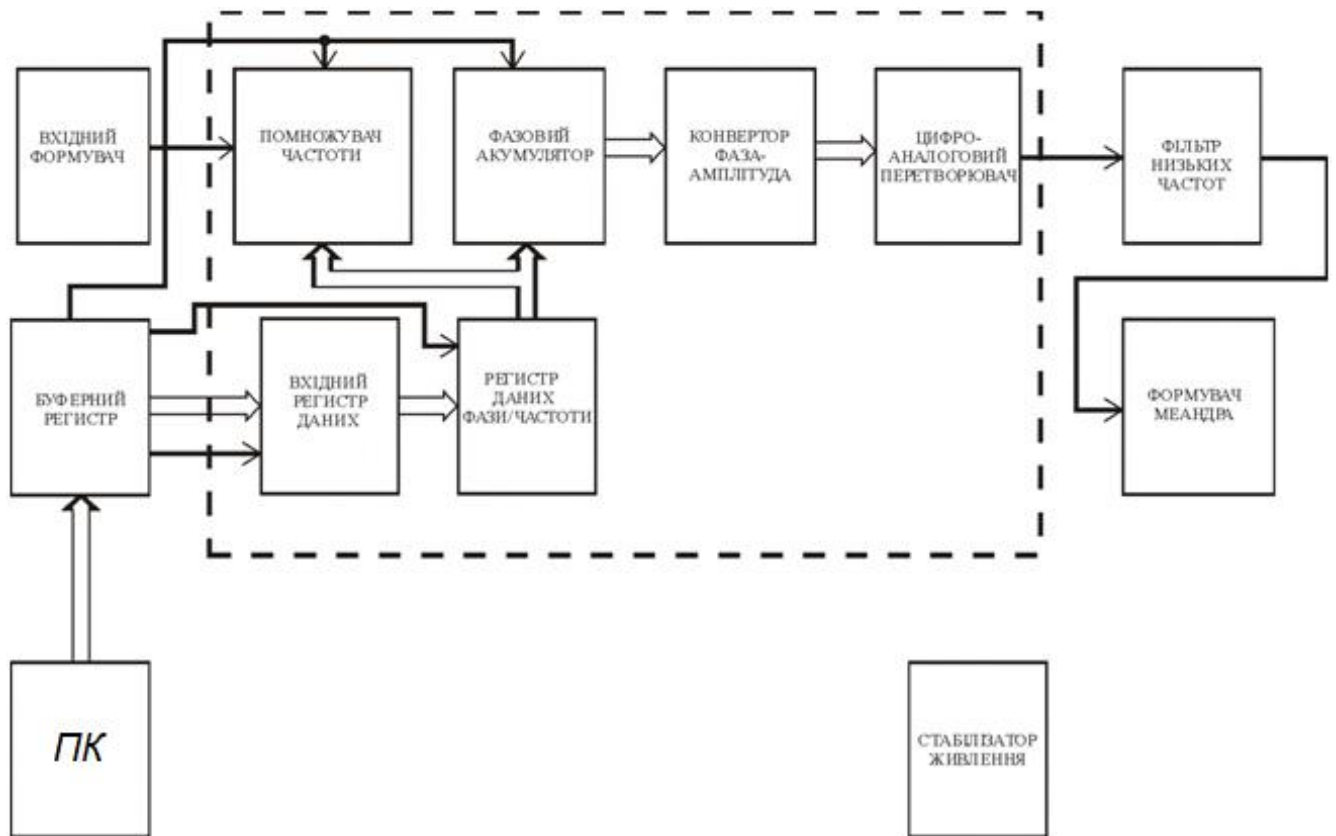


Рисунок 2.5 – Структурна схема синтезатора частоти прямого синтезу

Структурна схема пристрою, зображеного на рисунку 2.5, складається з таких елементів:

- 1) програма керування на персональному комп'ютері (ПК), що призначена для керування усіма функціями та режимами генератора спеціальних сигналів;
- 2) вхідний формувач (ВФ) синхронізуючих імпульсів, що призначений для формування обмеженого за рівнем вхідного джерела опорних коливань;
- 3) буферний регістр для узгодження шини ядра синтезатора ПЦС та портом керування ПК;
- 4) головний блок синтезатора ПЦС, що складається із помножувача частоти, АФ, конвертора фаза-амплітуда, ЦАП, вхідного регістру даних, регістру даних фази/частоти;
- 5) блоку ФНЧ для усунення паразитних гармонік синтезатора;

б) вихідний формувач сигналу (меандру, або сигналу іншої форми) із вихідного синусоїдального сигналу;

7) блок живлення для забезпечення стабільної напруги живлення пристрою.

### Висновки до другого розділу

1. В другому розділі кваліфікаційного проєкту була розглянута структура та принцип дії програмованого синтезатора ПЦС на прикладі синтезу сигналу синусоїдальної форми. Щоб отримати синусоїдальний сигнал, було використано послідовність відліків функції, яка була збережена в таблиці у ПЗП. Змінюючи адресу в ПЗП за допомогою акумулятора фази, було отримано вихідний сигнал на виході ЦАП.

2. Одним із недоліків синтезатора, який використовував адресний лічильник ПЗП, є обмеження щодо перестроювання за частотою. Проблема вирішується заміною адресного лічильника на акумулятор фази, що дозволяє досягти більш точного та гладкого перестроювання частоти вихідного сигналу. Заміна також дозволяє уникнути проблеми зі зміною частоти дискретизації, спрощує фільтрацію сигналу і забезпечує оптимальне використання швидкісних характеристик ЦАП.

3. Таким чином, використання програмованого синтезатора ПЦС на основі акумулятора фази дозволяє ефективно генерувати синусоїдальні сигнали з точністю та гладкістю перестроювання за частотою. Цей підхід має потенціал для застосування у різних областях, де потрібна генерація сигналів з високою якістю та гнучкістю управління частотою.

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		35

### 3 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СИНТЕЗАТОРА ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗУ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРА СПЕЦІАЛЬНИХ СИГНАЛІВ

#### 3.1 Вибір та обґрунтування елементної бази

Для реалізації синтезатора ПЦС було обрано мікросхему AD9851 від компанії ANALOG DEVICES. Схематичне зображення даної мікросхеми та нумерація і розташування виводів зображені на рисунку 3.1.

В таблиці 3.1 наведено опис та призначення виводів мікросхеми AD9851.

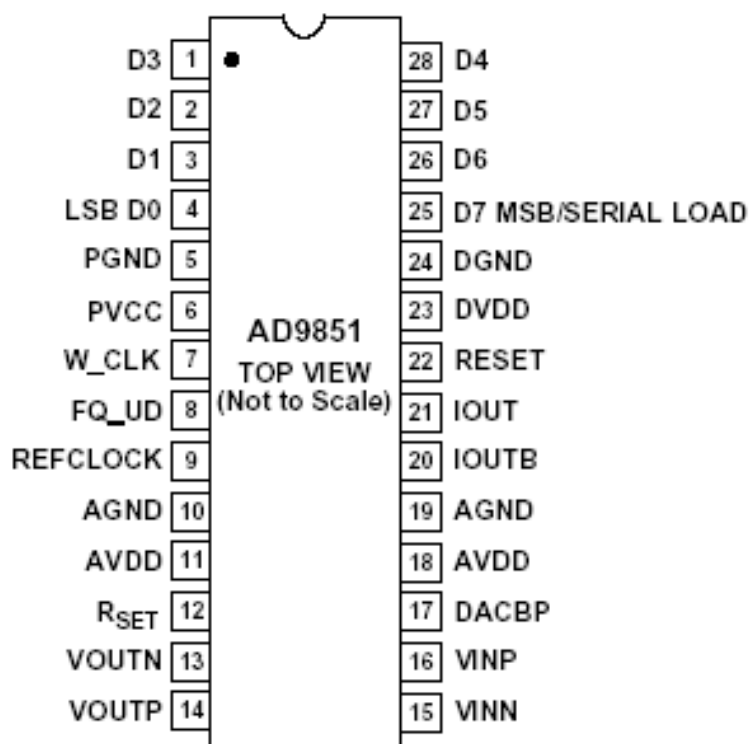


Рисунок 3.1 – Розташування виводів мікросхеми AD9851

Структурна схема мікросхеми AD9851 представлена на рисунку 3.3. На цій схемі позначені такі виводи:

- +Vs – вхід підключення джерела живлення;
- GND – “земля”;
- DAC Rset – вивід підключення резистора ЦАП;

Таблиця 3.1 – Призначення виводів AD9851

Номер виводу	Назва	Призначення
4-1, 28-25	D0-D7	Входи даних
5	PGND	Вивід “землі” помножувача на 6
6	PVCC	Вивід живлення помножувача на 6
7	W_CLK	Строб запису даних
8	FQ_UD	Строб перезавантаження слова керування
9	REF_CLK	КМОН/ТТЛ вхід опорної частоти
10,19	AGND	Аналогова “земля”
11,18	AVDD	Аналогове живлення
12	Rset	Вивід для підключення зовнішнього резистора ЦАП, який задає струм $Rset=39,93/IOUT$
13	VOUTN	Інверсний вихід компаратора
14	VOUTP	Прямий вихід компаратора
15	VINN	Інверсний вхід компаратора
16	VINP	Прямий вхід компаратора
17	DACBP	Не під’єднується
20	IOUTB	Інверсний вихід ЦАП
21	IOUT	Прямий вихід ЦАП
22	RESET	Вхід скиду ІМС
23	DVDD	Вхід живлення цифрової частини ІМС
24	DGND	Цифрова “земля”

ANALOG OUT – аналоговий вихід;

ANALOG IN – аналоговий вхід;

CLOCK OUT – вихід імпульсної послідовності;

WORD LOAD CLOCK – строб завантаження керуючого слова до вхідного регістра;

FREQUENCY UPDATE – строб завантаження керуючого слова з вхідного регістра до регістру керування;

REF CLOCK IN – вхід опорної частоти;

6X REFCLK MULTIPLIER – помножувач опорної частоти на 6.

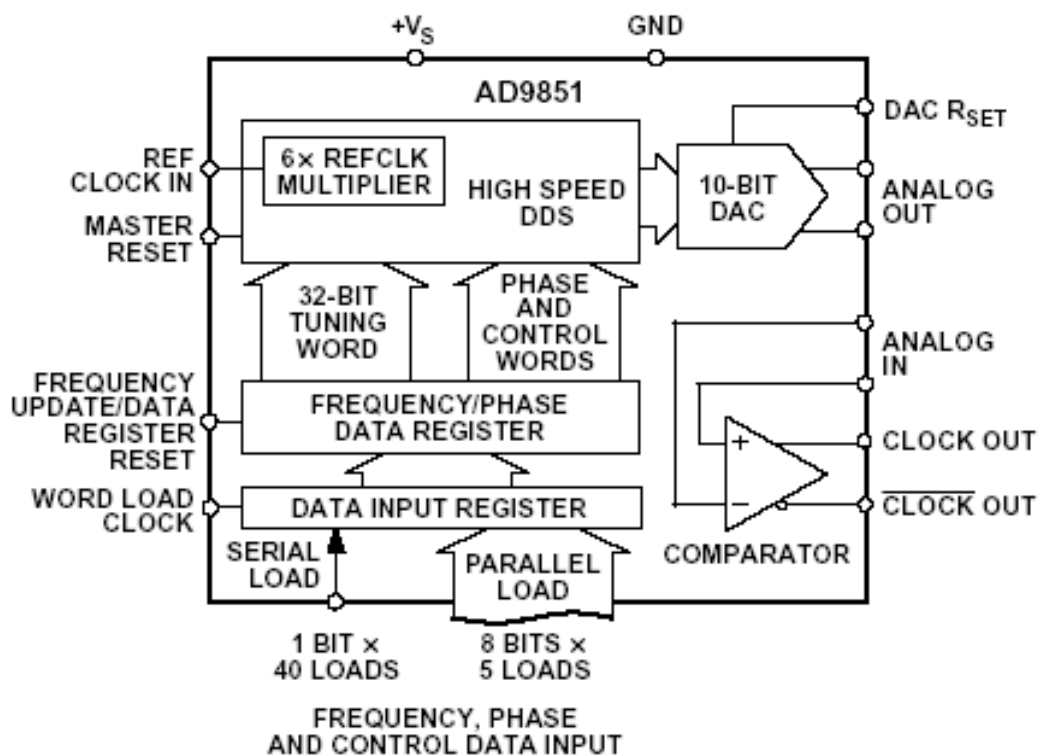


Рисунок 3.2— Структурна схема мікросхеми AD9851

Особливості мікросхеми AD9851:

- вбудований високоефективний 10-розрядний ЦАП і високошвидкісний компаратор з гістерезисом;
- 32-розрядне слово установки частоти;
- спрощений інтерфейс керування: паралельний чи послідовний асинхронний формат завантаження;
- 5-розрядна модуляція і зсув фази;
- однополярне живлення з +2.7 В по +5.25 В;
- мала потужність: 555 мВт ;

Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата

- функція низького споживання, 4 мВт;
- ультрамалий 28-вивідний корпус SSOP.

Основні характеристики мікросхеми AD9851 зведено в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Характеристики мікросхеми AD9851

Параметр	Значення	Одиниця виміру
Максимальна тактова частота (без включення вбудованого помножувача на б)	180	МГц
Максимальна тактова частота (з включеним вбудованим помножувачем на б)	30	МГц
Напруга живлення	5	В
Максимальний споживаний струм	130	мА
Розрядність регістру настройки частоти	32	Біт
Розрядність вихідного ЦАП	10	Біт
Максимальний вихідний струм ЦАП	20	мА
Максимальна помилка виходу ЦАП	10	±10% шкали
Максимальне зміщення виходу ЦАП	10	мкА
Залишковий фазовий шум $f=5,2$ МГц, розстройка 1кГц (без включення вбудованого помножувача на б)	-132	дБ/Гц
Залишковий фазовий шум $f=5,2$ МГц, розстройка 1кГц (з включеним вбудованим помножувачем на б)	-125	дБ/Гц

Мікросхема AD9851 представляє собою високоінтегрований пристрій, який застосовує ефективну технологію прямого цифрового синтезу частоти з метою створення заданого сигналу. Її внутрішній високошвидкісний ЦАП та компаратор спільно формують цифровий програмований частотний синтезатор

та тактовий генератор. За допомогою стабільного джерела тактування, мікросхема AD9851 здатна стабільно генерувати цифрово-програмовані синусоїдальні коливання з програмованою частотою й фазою. Ці синусоїдальні коливання можуть використовуватися як джерело частоти або конвертуватися в прямокутні коливання для використання як тактовий генератор у функціональних генераторах та генераторах сигналів спеціальної форми.

Мікросхема AD9851 має швидкісне ядро прямої цифрової синтезу (ПЦС), яке працює з 32-розрядним словом керування частотою. Це дозволяє змінювати вихідну частоту з високою роздільною здатністю, приблизно 0,04 Гц, при системному тактуванні 180 МГц. Характерною особливістю мікросхеми AD9851 є унікальна схема множення на  $6 \times \text{REFCLK}$ , що усуває необхідність високошвидкісного опорного генератора. Цей процес множення  $6 \times \text{REFCLK}$  має мінімальний вплив на співвідношення сигнал-шум та фазовий шум, забезпечуючи стабільні і якісні сигнали.

У мікросхеми AD9851 також є підтримка п'яти бітів програмування для роздільної здатності фази, що дозволяє зміщувати вихідну фазу з кроком 11.250. Крім того, мікросхема має внутрішній високошвидкісний компаратор, який може бути налаштований для отримання зовнішнього фільтрованого виходу ЦАП, що дозволяє генерувати синхронні вихідні імпульси.

Мікросхема AD9851 дозволяє завантажувати дані для настроювання частоти, керування і фазової модуляції асинхронно в режимі паралельного або послідовного завантаження. У паралельному форматі використовуються п'ять ітераційних процедур, кожна з яких містить 8-розрядне слово (байт) керування. Перші 8 біт визначають параметри, такі як вихідна фаза, режим множення на  $6 \times \text{REFCLK}$ , режим низького споживання та формат завантаження. Решта байтів містять 32-розрядне слово настроювання частоти. Для послідовного завантаження використовується передача 40-бітного послідовного потоку даних через одну з вхідних ліній паралельної шини.

Мікросхема AD9851 використовує передову КМОП-технологію (комплементарний метал-оксид-поліуповільнювач) для забезпечення високої

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		40

функціональності при мінімальному споживанні потужності. При живленні +5 В, ця мікросхема витрачає всього 500 мВт енергії при максимальній тактовій частоті 180 МГц. Це дозволяє досягти ефективної роботи і зменшити вплив на загальну потужність системи, в яку вона вбудована.

Мікросхема AD9851 пропонується в компактному корпусі типу SSOP з 28 виводами для поверхневого монтажу. Вона здатна працювати в широкому температурному діапазоні, включаючи розширений індустріальний діапазон від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ , якщо живлення становить більше 3,0 В. В комерційних умовах, при напрузі живлення менше 3,0 В, мікросхема забезпечує нормальну роботу в температурному діапазоні від  $0^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ . Це розширене температурне покриття дозволяє використовувати мікросхему у різних умовах та застосуваннях, забезпечуючи надійну та стабільну роботу.

У проектованому пристрої планується використовувати паралельний інтерфейс мікросхеми AD9851.

Часові діаграми запису керуючого слова показано на рисунку 3.3.

Структура керуючого слова показана в таблиці 3.3.

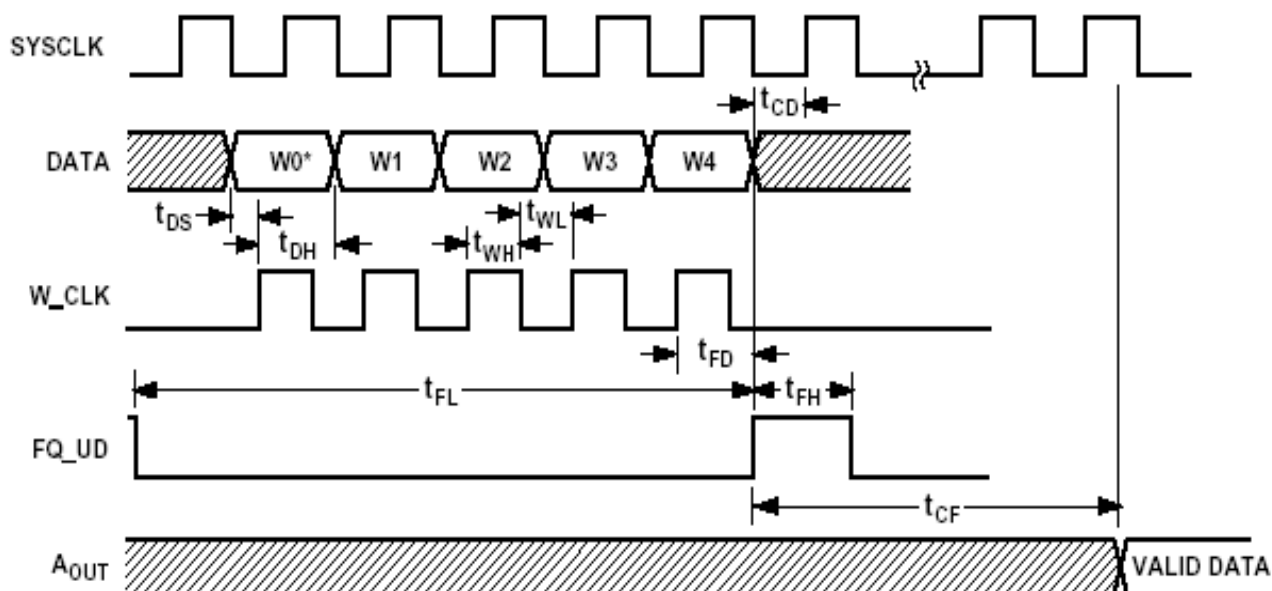


Рисунок 3.3 – Часові діаграми запису керуючого слова AD9851

Таблиця 3.3 – Структура керуючого слова AD9851

Word	Data[7]	Data[6]	Data[5]	Data[4]	Data[3]	Data[2]	Data[1]	Data[0]
W0	Phase-b4 (MSB)	Phase-b3	Phase-b2	Phase-b1	Phase-b0 (LSB)	Power-Down	Logic 0*	6× REFCLK Multiplier Enable
W1	Freq-b31 (MSB)	Freq-b30	Freq-b29	Freq-b28	Freq-b27	Freq-b26	Freq-b25	Freq-b24
W2	Freq-b23	Freq-b22	Freq-b21	Freq-b20	Freq-b19	Freq-b18	Freq-b17	Freq-b16
W3	Freq-b15	Freq-b14	Freq-b13	Freq-b12	Freq-b11	Freq-b10	Freq-b9	Freq-b8
W4	Freq-b7	Freq-b6	Freq-b5	Freq-b4	Freq-b3	Freq-b2	Freq-b1	Freq-b0 (LSB)

Для встановлення зв'язку між синтезатором частоти та персональним комп'ютером (ПК) використовується адаптер паралельного інтерфейсу, який складається з набору регістрів, що розташовані у просторі введення/виведення (I/O). Ці регістри порту адресуються відносно базової адреси порту. Зазвичай, стандартними значеннями базової адреси порту є 3BCh, 378h та 278h. Крім цього, адаптер може використовувати апаратний запит переривання, зазвичай IRQ7 або IRQ5. Адаптер дозволяє передавати дані між синтезатором частоти і ПК шляхом паралельної комунікації. Регістри порту на адаптері надають можливість зчитувати та записувати необхідні дані для керування синтезатором частоти, а також отримувати результати вимірювань або статусні сигнали з синтезатора. Додатково, адаптер підтримує апаратний запит переривання, що дозволяє ПК отримувати сповіщення від синтезатора про події або стан пристрою. Це сприяє більш ефективній комунікації між синтезатором і ПК, оскільки ПК може отримувати інформацію про важливі події або зміни стану пристрою в реальному часі.

Адаптер паралельного інтерфейсу дозволяє налаштувати певні параметри для відповідності конкретним вимогам системи або застосунку. Такі параметри включають базову адресу порту та апаратний запит переривання. Завдяки цьому адаптеру можна забезпечити ефективний обмін даними між синтезатором частоти та персональним комп'ютером (ПК). Це дозволяє зручно керувати та моніторити роботу синтезатора частоти з боку користувача.

Порт адаптера має зовнішню восьмибітну шину даних, п'ятибітну шину сигналів стану і чотирьохбітну шину сигналів керування. Цей порт дозволяє здійснювати запит апаратного переривання шляхом генерації імпульсу на вході

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		42

АСК# (див. таблицю 3.1). Сигнали, які передаються через порт, виводяться на роз'єм DB-25S, що забезпечує фізичне з'єднання зовнішніх пристроїв з адаптером паралельного інтерфейсу.

Синтезатор частоти та ПК обмінюються вхідними та вихідними даними за допомогою восьмибітної шини даних. Ця шина здатна передавати вісім бітів інформації одночасно, що забезпечує швидку передачу даних між пристроями.

Сигнали стану передаються за допомогою п'ятибітної шини. Ці сигнали вказують поточний стан пристрою або події, які сталися в процесі його роботи.

Для передачі команд та сигналів керування між синтезатором частоти та ПК використовується чотирьохбітна шина сигналів керування. Ці сигнали включають команди для керування режимами роботи, ініціалізації, синхронізації, передачі даних та інші команди, які необхідні для належного функціонування синтезатора частоти.

Паралельний порт між синтезатором частоти і ПК відкриває широкі можливості для взаємодії між ними. Цей порт дозволяє передавати дані між пристроями та керувати різними режимами роботи. Він створює зручну та ефективну зв'язок, який дозволяє контролювати та налаштовувати синтезатор частоти з боку користувача.

В Таблиці 3.4 та описано функції та сигнали, які використовуються в паралельному порті AD9851.

Зауваження: \*I/O задає напрям передачі (вхід/вихід) сигналу порту. Вхід Аск# з'єднаний через резистор 10 кОм з живленням +5В.

У стандартному паралельному порті доступні три восьмибітних регістри, які розташовані у послідовних адресах в просторі введення/виведення. Ці адреси починаються з базової адреси порту (BASE) і послідовно збільшуються для кожного регістра.

У стандартному паралельному порті існує перший регістр, відомий як регістр даних (Data Register - DR), який має адресу BASE. Введені дані до цього регістра виводяться на лінії виводу інтерфейсу. При зчитуванні значення з

регістра можуть повертатись раніше записані дані або поточний стан ліній, залежно від конкретної реалізації адаптера.

Таблиця 3.4 – Сигнали паралельного порту AD9851

Контакт DB-25S	Провідник у шлейфі	Призначення		
		I/O*	Reg.Bit	Сигнал
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
1	1	O/I	$\overline{CR:0}$	Strobe#
2	3	O(I)	DR:0	Data 0
3	5	O(I)	DR:1	Data 1
4	7	O(I)	DR:2	Data 2
5	9	O(I)	DR:3	Data 3
6	11	O(I)	DR:4	Data 4
7	13	O(I)	DR:5	Data 5
8	15	O(I)	DR:6	Data 6
9	17	O(I)	DR:7	Data 7
10	19	I**	SR:6	Ack#
11	21	I	SR:7	Busy
12	23	I	SR:5	Paper End
13	25	I	SR:4	Select
14	2	O/I	$\overline{CR:1}$	Auto LF#
15	4	I	SR:3	Error#
16	6	O/I	CR:2	Init#
17	8	O/I	$\overline{CR:3}$	Select In#
18-25	10, 12, 14, 16	18, 20, 22, 24, 26	GND	GND

Наприклад, якщо в регістр даних записати восьмибітове значення, де всі біти встановлені в "1", і ці біти виводяться через мікросхему з відкритим

колектором, то це значення можна зчитати з реєстра даних. В такому випадку, якщо на виході виникає коротке замикання до землі, вихідний струм зазвичай становить близько 30 мА, і напруга на виході наближається до 1,5 В, що приймається приймачем як логічна одиниця.

Регістр стану (Status Register - SR) представляє собою п'ятибітний порт для введення сигналів стану і має адресу BASE+1. Опис бітів реєстра стану (SR) наведено нижче:

- Біт SR.7 (Busy) відображає стан лінії Busy (11) у зворотному форматі. Коли лінія має низький рівень, біт встановлюється в 1, що означає дозвіл на виведення наступного байта.

- Біт SR.6 (ACK) відображає стан лінії Ack# (10).

- Біт SR.5 (PE) відображає стан лінії Paper End (12). Логічна одиниця вказує на кінець паперу.

- Біт SR.4 (Select) відображає стан лінії Select (13). Логічна одиниця сигналізує, що принтер вибраний.

- Біт SR.3 (Error) відображає стан лінії Error (15). Логічний нуль вказує на наявність помилки в принтері.

- Біт SR.2 (PIRQ) є прапорцем переривання за сигналом Ack# (лише для порту PS/2). Біт очищається, якщо сигнал Ack# викликав апаратне переривання. Значення 1 встановлюється після апаратного перезапуску (Reset) та після зчитування реєстра стану.

- Біти SR.1 та SR.0 є зарезервованими.

Регістр керування (Control Register - CR) розташований за адресою BASE+2. Це чотирибітний порт виводу, який дозволяє як записувати, так і зчитувати дані (біти 0-3). Вихідний буфер цього реєстру зазвичай має тип "відкритий колектор". Це означає, що лінії виходу можуть використовуватись як входи під час програмування їх у високий рівень. Біти 0, 1 та 3 цього реєстру є інвертованими. Інвертування означає, що якщо біт має значення "0", то після запису він стає "1", а якщо біт має значення "1", то після запису він стає "0".

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		45

Призначення бітів регістра керування (Control Register - CR) виглядає так:  
CR.7, CR.8 – зарезервовано.

CR.5 (Direction) – використовується для керування напрямом передачі (тільки для портів PS/2). Запис значення одиниці переводить порт в режим вводу, але стан біту при зчитуванні залишається невизначеним.

CR.4 (ACKINTEN) – при встановленні одиничного значення дозволяє переривання за заднім фронтом на лінії Ask# - сигнал замовлення наступного байту.

CR.3 (Select In) – при встановленні одиничного значення відповідає низькому рівню на виході Select In# (17) – сигналу, що дозволяє роботу принтера за інтерфейсом Centronics.

CR.2 (Init) – при нульовому значенні відповідає низькому рівню на виході Init# (16) - сигналу апаратного перевстановлення принтера (Reset).

CR.1 (Auto LF) – при встановленні одиничного значення відповідає низькому рівню на виході Auto LF# (14) - сигналу автоматичного переведення рядка (LF - Line Feed) після отримання символу повернення каретки (CR - Carriage Return).

CR.0 (Strobe) – при встановленні одиничного значення відповідає низькому рівню на виході Strobe# (1) - сигналу стробування вихідних даних. Процедура виводу байта через стандартний порт за інтерфейсом Centronics включає такі кроки:

1. Запис байта в регістр даних (Data Register - DR) відбувається шляхом передачі вказаного байта до відповідного регістра через активацію сигналу IOWR# (сигнал запису). Ця операція виконується в одному циклі запису.

2. Наступним кроком є перевірка готовності пристрою та зчитування значення з регістра стану (Status Register - SR). Готовність пристрою перевіряється шляхом зчитування біта SR.7, який вказує на стан лінії Busy. Цей процес повторюється до досягнення готовності пристрою або до спрацювання програмного тайм-ауту. Зчитування з регістра стану виконується шляхом

активації сигналу IORD# (сигнал зчитування), і ця операція потребує принаймні одного циклу зчитування.

3. Після отримання готовності пристрою, відбувається вивід стробу даних. Цей процес реалізується шляхом запису в регістр керування (Control Register - CR) з установкою біта 0 у логічну одиницю (за допомогою сигналу IOWR#). Потім, через наступний запис в регістр керування, строб даних знімається (біт 0 встановлюється у логічну нуль). Зазвичай, для перемикання одного біта стробу, перед його зміною регістр керування спочатку зчитується, що потребує ще одного циклу запису.

Таким чином, для передачі байта через інтерфейс Centronics за допомогою стандартного порту необхідно виконати наступні кроки: спочатку здійснити запис байта в регістр даних, потім перевірити готовність пристрою шляхом зчитування значення з регістра стану і, нарешті, вивести строб даних шляхом запису в регістр керування.

Для забезпечення сталої напруги 5 В рекомендується використовувати параметричний стабілізатор MC7805, який базується на інтегральному лінійному стабілізаторі MC7805. Цей стабілізатор живлення забезпечує високу ефективність стабілізації при вихідному струмі до 1 А. Крім того, він може успішно працювати в широкому температурному діапазоні від -40 до +85 °С.

### 3.2 Розробка схеми електричної принципової пристрою

Для належного функціонування ядра синтезатора ПЦС використовується вхідний формувач (ВФ), схема якого показана на рисунку 3.6. Його основна роль полягає в підготовці та формуванні вхідного опорного тактового сигналу. Вхідний формувач забезпечує правильної форми сигналу та належних характеристик, що забезпечують надійну та стабільну роботу ядра СЧПС.

Функціонально ВФ може бути представлений у вигляді трьох основних складових: коло подільника, симетричний обмежувач і компаратор з петлею гістерезису.

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		47

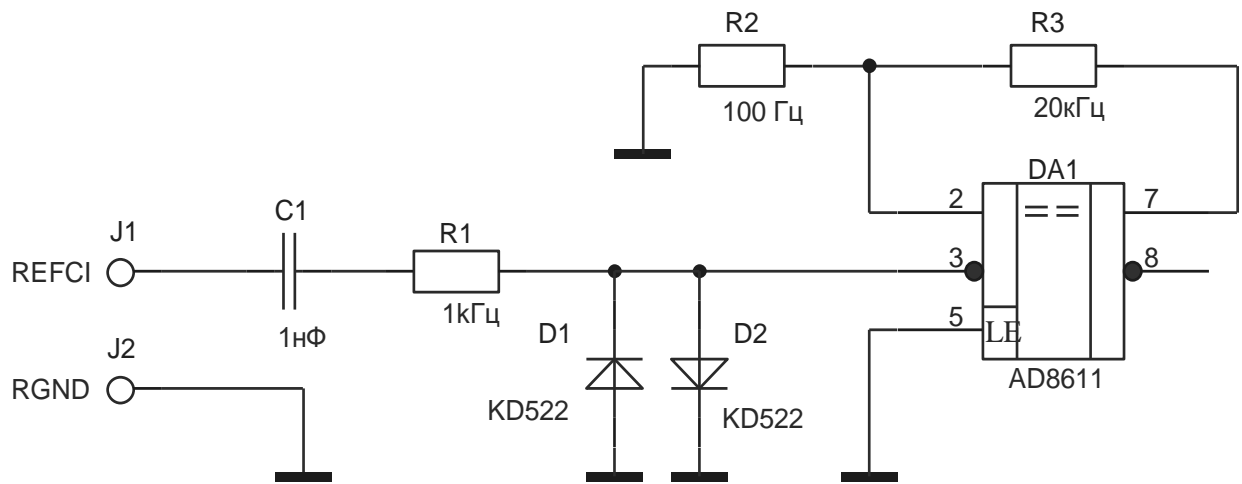


Рисунок 3.6 – Вхідний формувач

У даній конструкції подільника, включається коло, яке складається з конденсатора, який послідовно з'єднаний з входом. Його головна функція полягає у блокуванні постійної складової вхідного сигналу, щоб забезпечити належну роботу компаратора. Симетричний обмежувач, в свою чергу, реалізований за допомогою резистора R1, а також діодів VD1 і VD2. Резистор R1 використовується для обмеження струму, що протікає через відкриті діоди. За допомогою діодів КД522А досягається симетричне обмеження сигналу на рівні  $\pm 0,5$  В.

В даній схемі для компаратора використовується швидкісна мікросхема AD8611, з часом переключення не більше 4 нс. Інверсний вхід компаратора з'єднується через резистор R2 з загальним провідником для порівняння вхідного сигналу з рівнем 0 В. Додатково, коло гістерезису, що складається з резисторів R2 і R3, забезпечує підвищену стійкість компаратора до завад і генерує вихідні коливання з двома рівнями. Амплітуда вихідного сигналу формувача відповідає рівням ТТЛ. Ширина петлі гістерезису компаратора визначається згідно виразу:

$$V_{HI} = (V_s - 1.5) - \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 17 \text{ мВ} \quad (3.1)$$

Резистор R8 використовується як навантаження для формувача сигналів. У схемі буферний регістр виконує функцію забезпечення інтерфейсу між ядром синтезатора ПЦС та паралельним портом ПЕОМ.

Буферний регістр складається з двох синхронних регістрів DD1 і DD2 типу 74НСТ574. На вхід регістра надходять наступні сигнали від ПЕОМ:

- паралельні дані D0-D7;
- сигнали керування ядром СЧПС;
- сигнал стробу запису в регістр.

Тестовий сигнал CHECK передається з буферного регістра до ПЕОМ.

Сигнали керування, які надходять на входи регістра, з'єднані з позитивним джерелом живлення через резистори R4-R7 з опором 2,2 кОм. Це забезпечує підвищену стійкість до завад.

Обмін даними між ПЕОМ та синтезатором ПЦС здійснюється за допомогою сигналу STROBE. При спрацюванні фронту цього сигналу, дані від ПЕОМ перезаписуються в буферний регістр і стають доступними для ядра синтезатора.

Ядро синтезатора ПЦС включає мікросхему DD1 типу AD9851 і відповідає за основні функції синтезу синусоїдальних сигналів.

Це ядро складається з наступних компонентів:

- вхідний регістр даних, який використовується для прийому вхідних даних, необхідних для налаштування частоти та фази сигналу.

- Регістр даних для зберігання фази та частоти, який виконує функцію зберігання налаштувань фази та частоти сигналу.

- помножувач, що застосовується для множення частоти на 6, забезпечуючи необхідне збільшення частоти сигналу.

- Акумулятор фази, який відповідає за накопичення фазових змін сигналу відповідно до налаштувань, збережених у регістрі даних.

- ЦАП, який перетворює цифровий сигнал, отриманий після обробки внутрішніми компонентами ядра, на аналоговий синусоїдальний сигнал.

До ядра синтезатора надходять наступні сигнали:

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		49

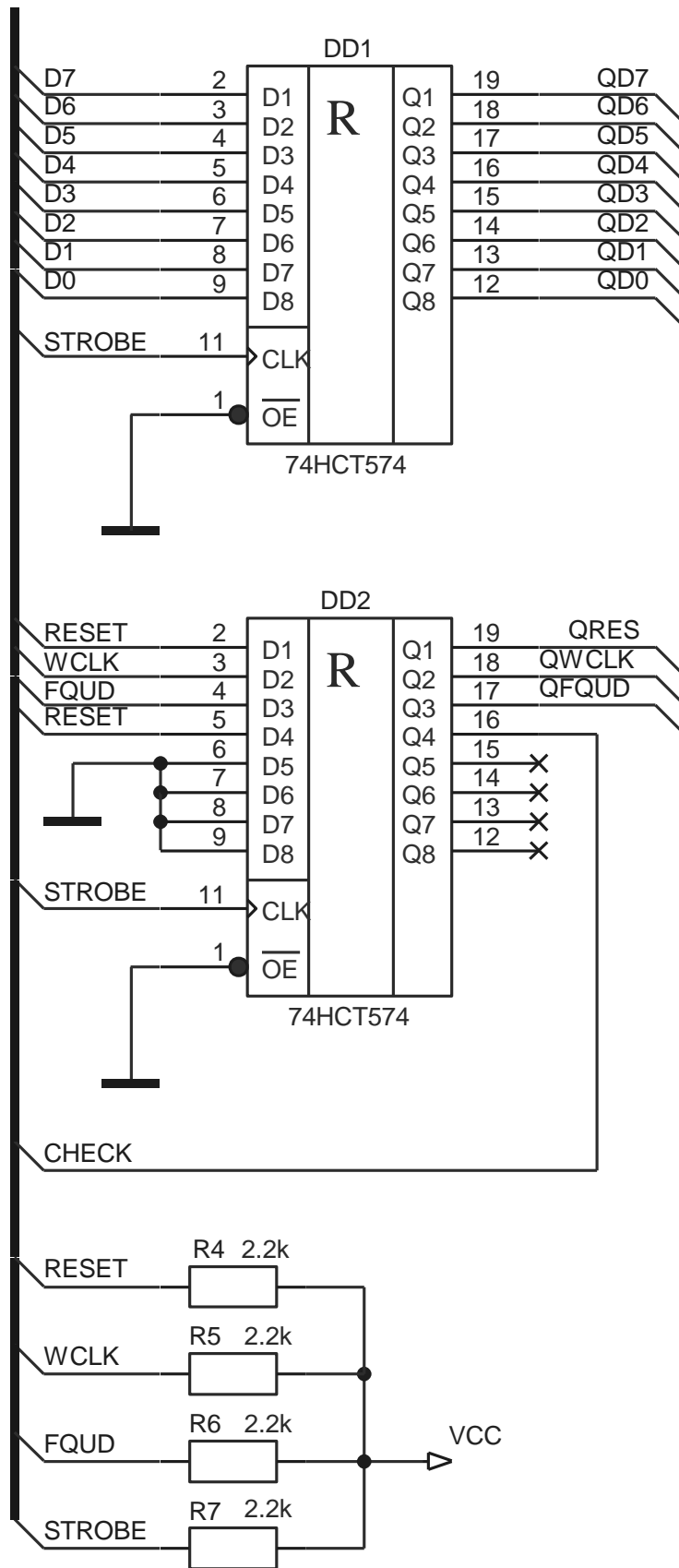


Рисунок 3.7 – Буферний регістр

Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата

- REFCLK, який виступає в якості опорного або системного тактового сигналу. Фронтний фронт імпульсу REFCLK ініціює виконання операцій у ядрі синтезатора, сприяючи його правильній роботі.

- QRES, сигнал ініціалізації. По передньому фронту імпульсу QRES, фазовий акумулятор і регістр даних фази/частоти в ядрі СЧПС скидаються, встановлюючи частоту на 0 Гц та фазу на 00, для синтезованого сигналу.

- QFQUD, сигнал відновлення частоти. По передньому фронту імпульсу QFQUD, дані з вхідного регістра передаються в фазовий акумулятор та помножувач частоти.

- D0-D7, восьмибітні дані. Цими даними завантажується 32-розрядне слово для встановлення частоти та 8-розрядне слово для фази/контролю даних ядра СЧПС.

- QWCLK, тактування завантаження слова даних у вхідний регістр даних ядра СЧПС.

Після завершення сигналів QRES і QFQUD, фазовий акумулятор, що включає в собі програмовану затримку фази (ПЗП) та цифровий сигнальний процесор (DSP), починає формувати послідовність 32-розрядних відліків лінійно-наростаючого сигналу згідно з встановленою частотою/фазою, яка зберігається у регістрі даних. Ці відліки передаються до конвертора фаза-амплітуда, який перетворює їх на 10-розрядні значення періоду синусоїдального сигналу, що відповідає встановленій частоті та фазі. На виході цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) формується синусоїдальний струм. Частота вихідного струму визначається з використанням виразу:

$$f_{OUT} = \frac{(N \cdot f_{CLK})}{2^{32}} \quad (3.2)$$

де  $N$  – десяткове значення 32-х– розрядного слова установки частоти;

$f_{CLK}$  – системна тактова частота;

$f_{OUT}$  – вихідна частота.

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		51

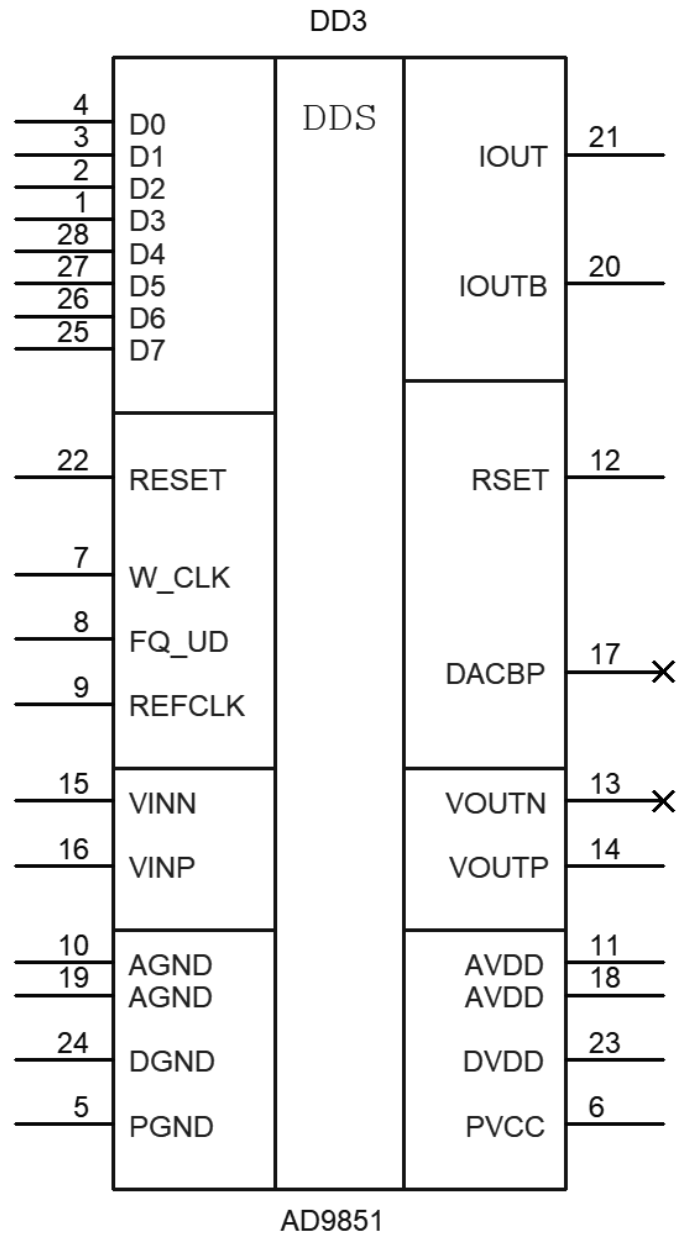


Рисунок 3.8 – Синтезатора ПЦС на базі мікросхеми AD9851

Значення струму повної шкали задає резистор R9 і розраховується, як

$$I_{OUT} = \frac{39.93}{R_9} = 10 \text{ мА}. \quad (3.3)$$

З метою забезпечення найменших спотворень, важливо, щоб навантаження на вихід IOU(B) мікросхеми DD3 було рівним навантаженню на вихід IOU.

Фільтр нижніх частот, зображений на рисунку 3.9, є пасивним фільтром нижніх частот Батерворта 4-го порядку. Цей фільтр складається з компонентів R14, C11, L1, C14, L2 та R15.

Смуга пропускання фільтра, в якій амплітуда сигналу знижується на 3 дБ, становить 15 МГц. Хвильовий опір фільтра дорівнює 200 Ом. Активне навантаження фільтра на вихід IOUТ мікросхеми DD3 становить 100 Ом, що дозволяє досягнути амплітуди вихідного синусоїдального сигналу 1 В. Крутизна затухання фільтра за межами смуги пропускання складає не менше 20 дБ на октаву.

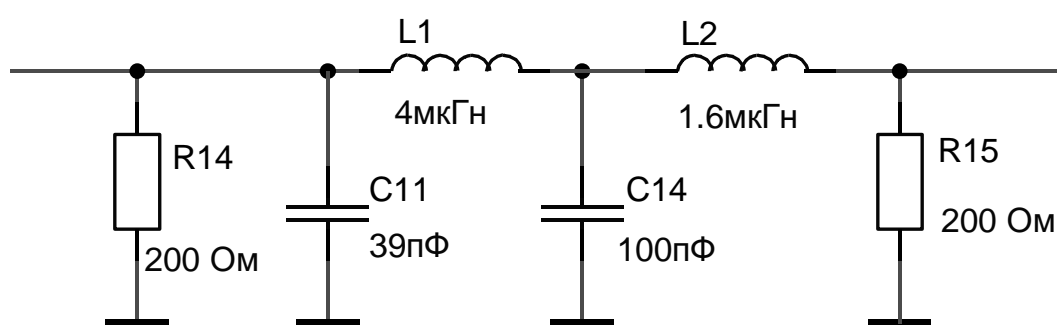


Рисунок 3.9—Фільтр нижніх частот

Передавальна характеристика фільтра описується виразом

$$K = \frac{1}{(\omega^2 + 1.8478\omega + 1)(\omega^2 + 0.76537\omega + 1)} \quad (3.3)$$

$$\text{де } \omega_n = \frac{\omega}{\omega_0}.$$

Графік амплітудно-частотних характеристик фільтра нижніх частот можна знайти на рисунку 3.10.

Формувач меандру генерує на виході прямокутні коливання з рівнем TTL. Частота і фаза вихідного сигналу формувача відповідають частоті і фазі вхідного синусоїдального сигналу. Для реалізації формувача використовується високочастотний компаратор напруги, який входить до складу мікросхеми DD3, а також компоненти R12, R13, C9 та R11. Сигнали з виходів мікросхеми

DD3, IOUT і IOUTB, додаються і усереднюються через коло, що складається з R12, R13 та C9. Отримана постійна напруга використовується як опорний рівень для компаратора. На другий вхід компаратора подається сигнал з виходу ФНЧ. Коли вхідна синусоїдальна напруга по черзі перетинає поріг опорного рівня, компаратор перемикається з майже 50% робочим циклом. Резистор R11 використовується як навантаження виходу компаратора.

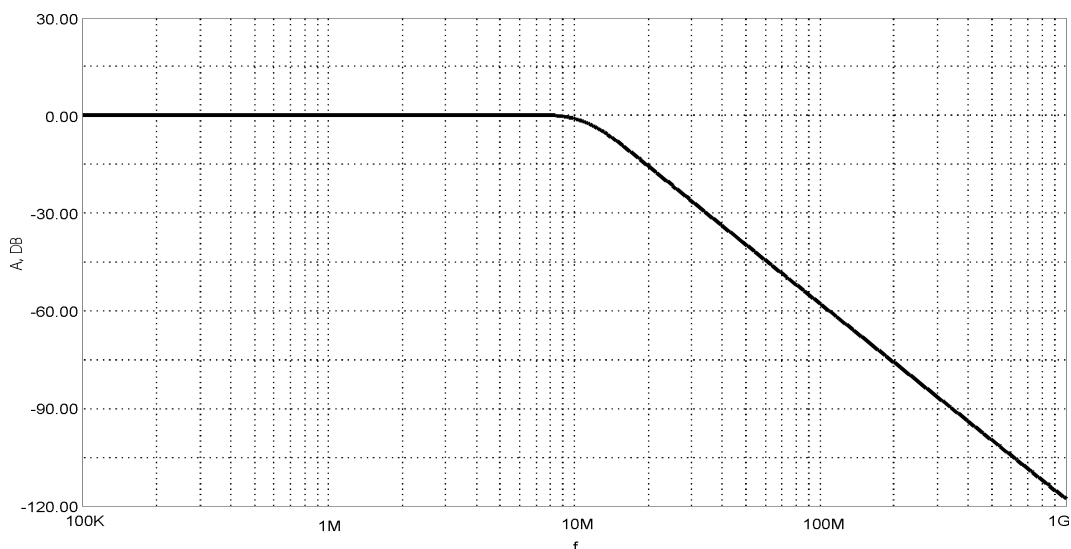


Рисунок 3.10— Амлітудно—частотна характеристика фільтра нижніх частот

Завдання блока живлення полягає у підтримці стабільної напруги на рівні 5 В для відповідних компонентів пристрою при використанні зовнішнього джерела постійного струму з напругою від 7 до 15 В. Для цього використовується мікросхема лінійного стабілізатора MC7805. Для зниження низькочастотних коливань напруги живлення використовуються електролітичні конденсатори великої ємності C3, C15 і C16, а для зменшення шумів на лініях живлення під час високочастотних переключень елементів пристрою використовуються керамічні конденсатори C2, C4 - C8, C10, C12 і C13.

Для індикації наявності напруги живлення використовується коло R15HL1.

Синусоїдальний сигнал подається на вихід "SOUT". Керуючі кодові слова для встановлення частоти та фази синтезованого сигналу, а також спеціальні керуючі сигнали надходять з керуючої пам'яті зовнішнього осередку пам'яті на

плату синтезатора і зберігаються в буферному регістрі. Потім сигнали даних і керування з буферного регістра передаються на вхідний регістр даних ядра СЧПС.

Сигнал опорного тактування надходить до вхідного формувача, де він піддається множенню на множник частоти з коефіцієнтом 6. Крім того, опорні такти також подаються до фазового акумулятора, який створює послідовність лінійно зростаючих відліків. Сигнал QFQUUD використовується для створення кодових слів, які визначають частоту та фазу ядра СЧПС, а також для надання команд на заборону або дозвіл множення на множник частоти. Фазовий акумулятор видає послідовність відліків, які лінійно зростають і відповідають заданій частоті та фазі.

Після цього ці відліки передаються до конвертора фаза-амплітуда, де вони змінюються на відліки синусоїдального сигналу. Потік відліків синусоїди надходить до цифро-аналогового перетворювача, який створює аналогові синусоїдальні коливання.

Синусоїдальний сигнал, що пройшов фільтрацію, виводиться на вихід "SOUTF". Через фільтр нижніх частот проходить цей сигнал, що приглушує непотрібні спектральні компоненти синусоїдального сигналу.

На виході "DOUT" отримується прямокутне коливання. Фільтрований синусоїдальний сигнал, що пройшов через фільтр нижніх частот, поступає на вихідний формувач, який генерує прямокутний сигнал (меандр) зі шпаруватістю 2.

Дискретизація перетворення частоти синусоїдальних і імпульсних вихідних сигналів визначається за формулою:

$$\Delta f = \frac{f_{CLK}}{2^{32}} \quad (3.4)$$

де  $f_{CLK}$  – частота системного тактування.

### 3.3 Опис та технічні характеристики схеми електричної принципової синтезатора

В проєкті була розроблена схема синтезатора частоти для декаметрового діапазону хвиль, яка використовує мікропроцесорне керування та характеризується мінімальною кількістю компонентів. Запропонований синтезатор використовує передові технології і має наступні важливі характеристики та функції:

Генерація нефільтрованого синусоїдального сигналу у діапазоні частот від 0 до 50 МГц з ефективною напругою 90 мВ на навантаженні 50 Ом.

Генерація фільтрованого синусоїдального сигналу у діапазоні частот від 0 до 15 МГц з ефективною напругою 236 мВ на навантаженні 200 Ом. Це досягається за допомогою фільтра нижніх частот, який приглушує непотрібні спектральні компоненти сигналу.

Генерація прямокутних коливань з рівнем ТТЛ тактування у діапазоні частот від 0 до 50 МГц.

Плавна та періодична зміна вихідної частоти з встановленим діапазоном і кроком перебудови.

Множення вхідного тактового сигналу на 6. Вхідна частота тактового сигналу становить номінально 30 МГц, і ця частота може бути помножена на 6 за допомогою пристрою множення частоти.

Дискретність зміни фази синусоїдальних та прямокутних вихідних сигналів синтезатора становить -11.25 градусів.

Синтезатор має два режими налаштування синтезованої частоти: автоматичний та ручний.

Зміна вихідної частоти здійснюється без переривання фази сигналу.

Час, необхідний для встановлення робочого режиму пристрою зі зовнішнього джерела живлення, не перевищує 5 хвилин.

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		56

## Висновки до третього розділу

1. В третьому розділі кваліфікаційного проекту для реалізації синтезатора прямого цифрового синтезу (ПЦС) було обрано мікросхему AD9851, розроблену компанією ANALOG DEVICES. Ця високоінтегрована мікросхема використовує ефективну технологію прямого цифрового синтезу для створення заданого сигналу. Її основними компонентами є внутрішній високошвидкісний ЦАП та компаратор, які спільно формують програмований цифровий синтезатор частоти та тактовий генератор. За допомогою стабільного джерела тактування, мікросхема AD9851 забезпечує стабільне генерування цифрово-програмованих синусоїдальних коливань з програмованою частотою й фазою. Ці коливання можуть використовуватися як джерело частоти або конвертуватися в прямокутні коливання для використання як тактовий генератор у функціональних генераторах та генераторах сигналів спеціальної форми. Використання мікросхеми AD9851 в синтезаторі ПЦС дозволяє забезпечити стабільне та точне генерування сигналів з програмованою частотою та фазою. Ця високоінтегрована мікросхема пропонує широкий діапазон функціональних можливостей, включаючи програмовану частоту, роздільну здатність фази та синхронні вихідні імпульси.

2. Зв'язок між синтезатором частоти та персональним комп'ютером забезпечується за допомогою адаптера паралельного інтерфейсу, який забезпечує паралельну комунікацію та можливість передачі даних між пристроями. Цей адаптер дозволяє зчитувати та записувати необхідні дані для керування синтезатором, а також отримувати результати вимірювань та статусні сигнали. Крім того, апаратний запит переривання сприяє ефективній комунікації, дозволяючи ПК отримувати сповіщення про події та стан пристрою в реальному часі. Адаптер паралельного інтерфейсу надає можливість налаштування параметрів для відповідності вимогам системи або застосунку. Це дозволяє забезпечити ефективний обмін даними між

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		57

синтезатором частоти та ПК та зручне керування пристроєм з боку користувача.

Отже, використання мікросхеми AD9851 у синтезаторі прямого цифрового синтезу разом з адаптером паралельного інтерфейсу створює потужну та ефективну систему для генерації та керування сигналами з програмованою частотою. Це відкриває широкі можливості в різних застосуваннях, включаючи радіозв'язок, тестування та вимірювання, дозволяючи користувачеві контролювати і моніторити роботу синтезатора частоти з високою точністю та гнучкістю.

3. Вхідний формувач виконує важливу роль у підготовці та формуванні вхідного опорного тактового сигналу для правильної роботи ядра синтезатора ПЦС. Використання вхідного формувача дозволяє забезпечити належну форму сигналу та необхідні характеристики, що сприяють надійній та стабільній роботі синтезатора. Функціонально, вхідний формувач може бути представлений трьома основними складовими: колом подільника, симетричним обмежувачем і компаратором з петлею гістерезису. Коло подільника відповідає за ділення опорного сигналу, що дозволяє отримати бажану частоту сигналу на виході. Симетричний обмежувач використовується для нормалізації амплітуди вхідного сигналу та його перетворення у прямокутний сигнал з однаковими рівнями високого та низького стану. Компаратор з петлею гістерезису забезпечує стабільність та зменшує вплив шумів та збурень на вихідний сигнал. Вхідний формувач є необхідною складовою частиною синтезатора ПЦС, оскільки він гарантує правильну підготовку та формування вхідного опорного сигналу, що є важливим для досягнення точності та стабільності генерації сигналу. Дослідження та розробка вхідного формувача сприяють подальшому вдосконаленню синтезаторів прямого цифрового синтезу та їх застосуванню у різноманітних сферах, таких як телекомунікації, медична техніка, радіолокація та багато інших.

4. Реалізована схема включає фільтр нижніх частот Батерворта 4-го порядку, який забезпечує приглушення паразитних спектральних компонентів

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		<i>58</i>

сигналу, що дозволяє отримати фільтрований синусоїдальний сигнал з встановленою амплітудою. Формувач меандру генерує прямокутні коливання з рівнем ТТЛ, які використовуються як тактовий сигнал. Мікросхема синтезатора забезпечує зміну вихідної частоти без переривання фази сигналу та має низький час встановлення робочого режиму. Отриманий синтезатор частоти є ефективним та надійним пристроєм для генерації сигналів у декаметровому діапазоні хвиль. Він може бути використаний у різних застосуваннях, включаючи функціональні генератори, генератори сигналів спеціальної форми та інші системи, де потрібно точне і стабільне генерування частот. Розроблена схема має потенціал для подальшого вдосконалення та розширення функціональних можливостей шляхом використання новітніх технологій та компонентів.

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		59

## ВИСНОВКИ

У даному проєкті було розроблено структурні та принципову схеми генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора прямого цифрового синтезу для застосування в сучасних системах засобах телекомунікацій та радіотехніки, оскільки генерування спеціальних сигналів відіграє важливе значення в різних галузях, включаючи телекомунікації, радіозв'язок, медичну діагностику та тестування електронних пристроїв.

Для досягнення поставленої мети розробки генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора частоти прямого цифрового синтезу було вирішено ряд конструкторсько-технологічних задач, включаючи аналіз методів генерації сигналів та синтезу частоти, огляд існуючих генераторів сигналів спеціальної форми, розробку структурної схеми та електричної принципової схеми генератора.

Використання методу прямого цифрового синтезу дозволяє генерувати сигнали спеціальної та довільної форми з високою точністю та стабільністю. Цей метод забезпечує цифрову визначеність частоти, амплітуди та фази сигналу, а також мінімальну чутливість до температурних змін та старіння.

Розроблена схема синтезатора частоти для декаметрового діапазону хвиль має компактну структуру та високу функціональність. Вона здатна генерувати синусоїдальні сигнали різної форми та амплітуди, прямокутні коливання з рівнем ТТЛ тактування, а також забезпечує можливість зміни вихідної частоти без переривання фази сигналу.

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						<i>60</i>
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Колпаков Ф. Ф. Теорія і реалізаційні основи інваріантних п'єзореzonансних коливальних систем : монографія / Ф. Ф. Колпаков, С. К. Підченко. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», 2011. – 326 с.

2. Pidchenko S. K. Design Methodology to Construct Information Measuring Systems Built on Piezoresonant Mechanotrons with a Modulated Interelectrode Gap : the monograph / S. K. Pidchenko, A. A. Taranchuk // Applied Measurement System. Published by InTech, Rijeka, Croatia. – 2012. – Chapter 12. – Pp. 229–258.

3. Підченко С. К. Демодулятор QPSK сигналів для прийому інформації від космічних апаратів дистанційного зондування Землі / С. К. Підченко, А. А. Таранчук, О. В. Кальватинський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : XI міжнар. наук.- техн. конференція, 5–8 червня 2012 р. : зб. наук. праць. – Хмельницький, 2012. – С. 78.

4. Pidchenko S. Digital Synthesizer with Temperature and Vibration Compensation of Frequency Instability / S. Pidchenko, A. Taranchuk, V. Stecjuk // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunication and Computer Science: Proceedings of the International Conference TCSET'2014 February 25, 2014. – Lviv–Slavske, Ukraine. – Pp. 291–292.

5. Підченко С. К. Підвищення температурної стабільності кіл синхронізації квадратурних демодуляторів OFDM систем / С. К. Підченко, А. А. Таранчук, О. В. Кальватинський // Вісн. Хмельниц. нац. університету. Технічні науки. – 2012. – № 6. – С. 217–222.

6. 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.

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		61

7. ДСТУ ГОСТ 2.104:2006. Основні написи (ГОСТ 2.104–2006, IDT). – На заміну ГОСТ 2.104–68 ; чинний від 2007–07–01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2007. – 19 с. – (Єдина система конструкторської документації).

8. Пат. № 86099 Україна, МПК Н 03L 9/00. Пристрій генерування / С. К. Підченко, А. А. Таранчук, В. І. Стецюк, О. В. Кальватинський ; заявник і патентовласник Хмельниц. нац. університет. – № u201308554 ; заявл. 8.07.2013 ; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 23. – 8 с.: іл.

9. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology [Electronic resource]. – 2015. – № 10, Vol. 2. – Access mode: <http://www.jmest.org/vol-2-issue-10october-2015/> (last access: 17.03.2016).

10. Василенко М. В. Теорія коливань : навч. посіб. / М. В. Василенко. – Київ : Вища школа, 1992. – 430 с.

11. Стеклов В. К. Телекомунікаційні мережі : підруч. для студ. вищих навч. закладів за напр. «Телекомунікації» / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман. – Київ : Техніка, 2001. – 390 с.

12. Воробйов П. С. Програмування C# : посіб. для вищої школи / П. С. Воробйов, А. О. Гриценко, К. І. Лісовик ; під заг. ред. П. С. Воробйова. – 2-ге вид. – Київ ; Харків : Вища школа, 2014. – 704 с.

13. Балашов В. О. Мережі та обладнання широкосмугового доступу за технологіями xDSL : навч. посіб. для студ. з напряму підготов. «Телекомунікації» / В. О. Балашов, П. П. Воробієнко, А. Г. Лашко, Л. М. Ляховецький ; Одес. нац. акад. зв'язку ім. О. С. Попова. – Одеса : Вид. центр ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2010. – 208 с.

14. Управління телекомунікаціями із застосуванням новітніх технологій [Текст] : підруч. для вищ. навч. закл. для спец. за напрямом підгот. «Телекомунікації» / В. Г. Кривуца [та ін.]. – Київ : Техніка, 2007. – 384 с.

15. Підченко С.К. Теорія і реалізаційні основи інваріантних багаточастотних п'єзорезонансних пристроїв та систем/Монографія//Хмельницький: ХНУ, 2014. – 400 с.

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		62

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. Шинкарук О.М. Приймання та оброблення сигналів : навчальний посібник / О.М. Шинкарук, В. І. Правда, Ю. М. Бойко. – Хмельницький : ХНУ, 2013. – 365 с.

21. 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.

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

23. 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.

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

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		63

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

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

27. Підченко С.К. Температурно-динамічні характеристики кварцових п'єзрезонаторів АТ- та SC зрізів / Таранчук А.А., Лаба О.А // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2003. – № 2. – С. 49-55.

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

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

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

31. Комп'ютерні мережі - Частина 1 навчальний посібник: навч. посіб. для студ. спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» та 126 «Інформаційні системи та технології» / Б. Ю. Жураковський, І.О. Зенів; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 336 с.

32. Прикладне застосування теорії хаотичних систем у телекомунікаціях: монографія / [Ю.Я. Бобало, С.Д. Галюк, М.М. Климаш, Р.Л. Політанський]; Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Львів: Коло, 2015. – 178 с.

33. Підченко С. К. Узагальнена модель багатоканального багато-частотного кварцового генератора / С. К. Підченко // Вісник Технологічного університету Поділля. Серія 1. Технічні науки. – 1997, № 1.– С.76 – 80.

34. Підченко С.К. Принципи побудови багаточастотних кварцових генераторів на базі багатоканальних цифрових систем автоматичного підстроювання частоти / С.К. Підченко, А.А. Таранчук, О.А. Лаба // Вісник

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		64

технологічного університету Поділля: Том 1. Технічні науки. – Хмельницький, 2004. – №2. – С.139-142.

35. Підченко С.К. Високостабільний кварцовий генератор з цифровою компенсацією температурної нестабільності частоти / С.К. Підченко, А.А. Таранчук, О.В. Кальватинський, О.О. Гуменюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. - № 2 - С. 86-91.

36. Підченко С.К. Чисельне інтегрування рівнянь руху багаточастотних п'єзореzonансних коливальних систем в середовищі MATLAB / С.К. Підченко, С.В. Швець // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, 2012. – № 2. – С. 46-49.

37. Колпаков Ф.Ф. Термодинамічні характеристики кварцового резонатора “Сонет” в двочастотному режимі збудження / Ф.Ф. Колпаков, С.К. Підченко, А.А. Таранчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Збірник наукових праць. Вип. 8. – Хмельницький, 2001. – С. 157-159.

38. Підченко С.К. Інваріантні п'єзореzonансні коливальні системи / С.К. Підченко, Ф.Ф. Колпаков, А.А. Таранчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 1. – С. 174-190.

39. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник/ За ред. Ю.Л.Мазора, Є.А.Мачуського, В.І.Правди. - К.: Вища шк., 1999. - 838 с.

40. Волощук Ю.І. Сигнали та процеси у радіотехніці: Підручник для студентів вищих навчальних закладів, т.1, — Харків: «Компанія СМІТ», 2003. – 580 с.

41. Прудіус І.Н. Основи антенної техніки: Навч. посібник. - Львів, 2000. - 224 с.

42. Елементна база радіоелектронної апаратури: Пасивні радіокомпоненти В 4 ч. Ч. 1. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КГП ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.О.Піддубний. І.О.Товкач. - Електронні текстові дані (1 файл: 1,05 Мбайт). -Київ : КШ ім. Ігоря Сікорського, 2021. - 98 с.

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		65

43. Троцишин І.В. Фізичні основи електронних приладів: Навч. посібник / І.В.Троцишин - Хмельницький: ХДУ. - 2004. - 488 с.
44. Швець Є.Я. Матеріали і компоненти електроніки: навч. посібник /Є.Я.Швець, І.Ф.Червоний, Ю.В.Головка - Запоріжжя, ЗДІА, 2011. - 278 с.
45. Василенко І.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: навч. посібник. / І.І.Василенко, В.В.Широков, Ю.І.Василенко. - Львів: «Магнолія-2006», 2009. - 242 с.
46. Журавльова Л.В. Електроматеріалознавство: [підруч.] / Л.В.Журавльова, В.М.Бондар. – К.: Грамота, 2006. – 312 с.
47. Сулима В.С. Електрорадіоматеріали: навчальний посібник. / В.С.Сулима. Укр. інж.-пед. акад. – Харків: УПА, 2010. – 128 с.
48. Матвійків М.Д. та ін. Елементна база електронних апаратів: Підручник /М.Д.Матвійків, В.М. Когут, О.М. Матвійків. – 2-ге вид. – Львів: Видавництво Національного ун-ту "Львівська політехніка", 2007. – 428 с
49. Елементна база радіоелектронних апаратів. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів на пряму підготовки 6.050902 – Радіоелектронні апарати/ Укл. В.П.Войтенко. – Чернігів: ЧНТУ, 2015. [Електронний ресурс] : Режим доступу: [http://Inel\Archive\Kources\2\\_курс\Елементна база РЕА](http://Inel\Archive\Kources\2_курс\Елементна база РЕА).
50. Технологія конструкційних матеріалів: Підручник / М.А.Сологуб, І.О.Рожнецький, І.О.Некоз та ін.; Заг. ред. М.А. Сологуба. - 2-ге вид., перероб. і доповн. К.: Вища шк., 2002

					<i>КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ</i>	Арк.
						66
<i>Зм.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

## ДОДАТОК А

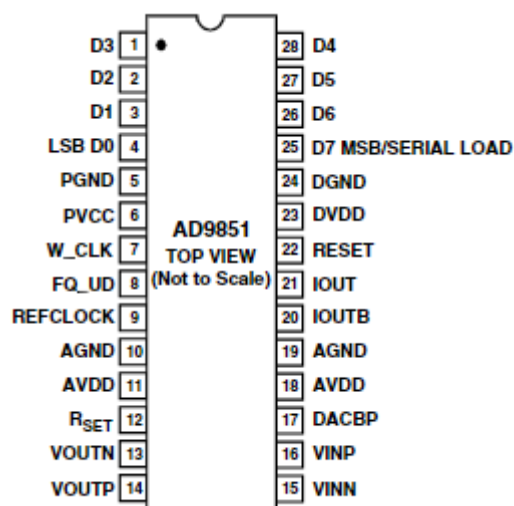
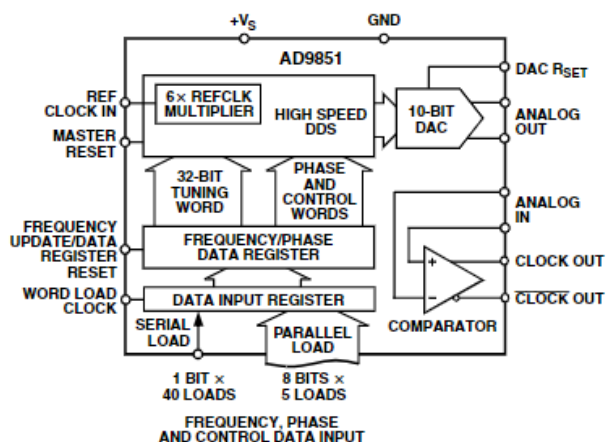
### Параметри синтезатора DDS AD9851

#### FEATURES

- 180 MHz Clock Rate with Selectable 6 Reference Clock Multiplier
- On-Chip High Performance 10-Bit DAC and High Speed Comparator with Hysteresis
- SFDR >43 dB @ 70 MHz A OUT
- 32-Bit Frequency Tuning Word
- Simplified Control Interface: Parallel or Serial Asynchronous Loading Format
- 5-Bit Phase Modulation and Offset Capability
- Comparator Jitter <80 ps p-p @ 20 MHz
- 2.7 V to 5.25 V Single-Supply Operation
- Low Power: 555 mW @ 180 MHz
- Power-Down Function, 4 mW @ 2.7 V
- Ultrasmall 28-Lead SSOP Packaging

#### APPLICATIONS

- Frequency/Phase-Agile Sine Wave Synthesis
- Clock Recovery and Locking Circuitry for Digital Communications
- Digitally Controlled ADC Encode Generator
- Agile Local Oscillator Applications in Communications
- Quadrature Oscillator
- CW, AM, FM, FSK, MSK Mode Transmitter



Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата	

КПТР. 2019019.01.01.00 ПЗ

Арк.

67

Кваліфікаційний проєкт на тему  
«ГЕНЕРАТОР СПЕЦІАЛЬНИХ СИГНАЛІВ»

ГРУПА ТР2-19-1

Ярослав КОЛОМІЄЦЬ

Керівник:

д.т.н. професор Підченко Сергій Константинович

# Мета і Завдання

**Метою кваліфікаційного проекту** є розробка генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора частоти прямого цифрового синтезу, який інтегровано із персональним комп'ютером.

Для досягнення поставленої мети сформульовані та вирішені такі конструкторсько-технологічні задачі:

1. Аналіз методів генерування спеціальних сигналів та методів синтезу частоти
2. Огляд існуючих цифрових функціональних генераторів та генераторів сигналів спеціальної форми, а також їхніх технічних характеристик.
3. Розробка структурної схеми генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора прямого цифрового синтезу.
4. Розробка схеми електричної принципової генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора прямого цифрового синтезу.

# Огляд методів генерування спеціальних сигналів та їхніх характеристик

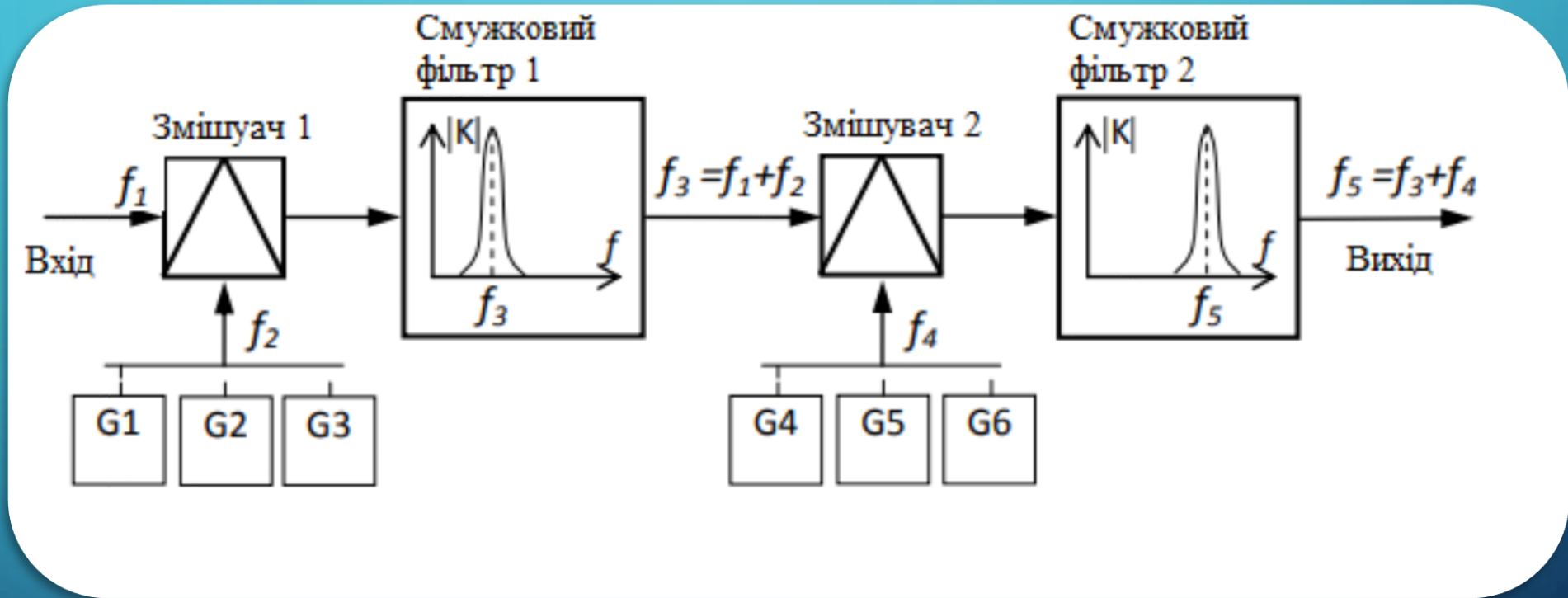
Генерація спеціальних сигналів є важливим інструментом у різних галузях, таких як телекомунікації, радіо, медична діагностика, тестування електронних пристроїв та інші.

Є два методи генерації спеціальних сигналів. Один з найпоширеніших це використання функції генерації випадкових чисел, таких як Гаусовий білий шум. Наприклад вони можуть генерувати різноманітні сигнали такі як сигнал з довільною спектральною щільністю, випадковими сигналами, сигналами з певною формою та інші.

Другий метод генерації – це використання математичних формул та алгоритмів, вони забезпечують певну форму сигналу. Деякі функції можуть генерувати сигнали з різними спектрами, а інші - сигнали з певною формою, наприклад, синусоїди або прямокутні сигнали.

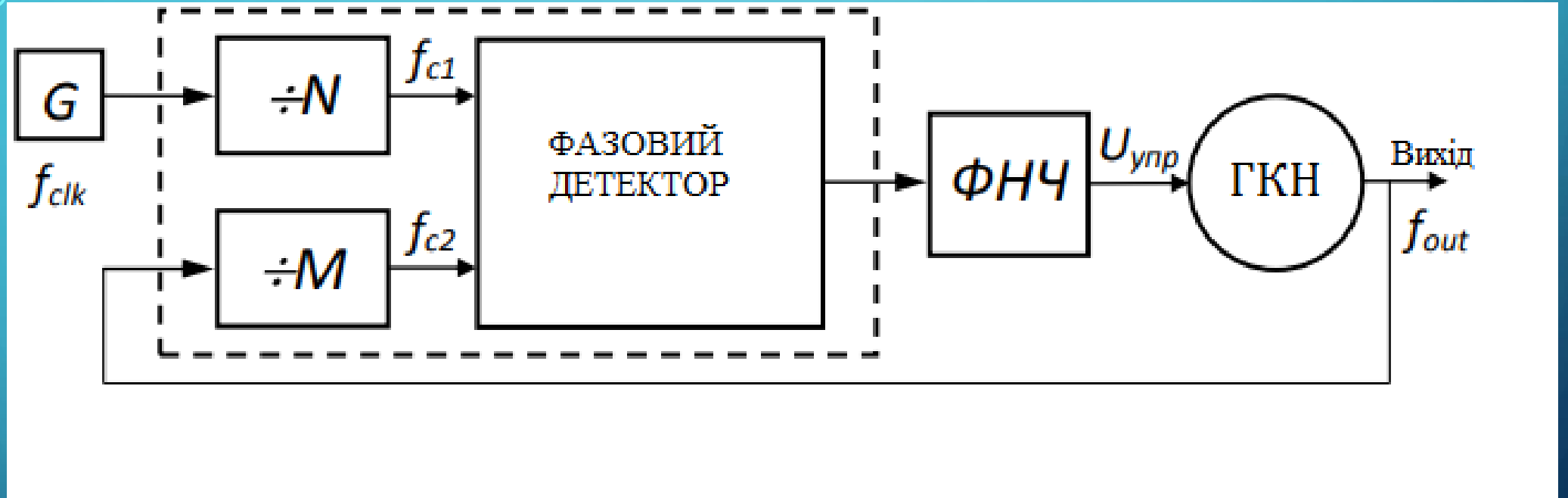
# Прямий аналоговий синтез

Структурна схема прямого аналогового синтезатора



# Непрямий аналоговий синтез

Структурна схема синтезатора непрямого синтезу на основі фазової автопідстроювання частоти



# ПРЯМИЙ ЦИФРОВИЙ СИНТЕЗ

Переваги	Недоліки
1	2
Цифрове керування частотою та фазою вихідного сигналу.	Максимальна вихідна частота не може перевищувати половину тактової частоти (на практиці вона ще менша).
Висока роздільна здатність за частотою та фазою.	Випадкові паразитні гармоніки на виході синтезатора ПЦС можуть мати більший рівень, ніж у інших методів синтезу.
Швидкий перехід на іншу частоту (фазу), перестроювання за частотою без розриву фази та інших паразитних перехідних процесів.	Сильна залежність спектральної чистоти вихідного сигналу від характеристик ЦАП.

1	2
Архітектура ПЦС, завдяки дуже малому кроку перестроювання за частотою, не потребує точного налаштування початкової частоти, а також забезпечує можливість параметричної температурної компенсації.	Потужність, яку споживає синтезатор ПЦС, пропорційна тактовій частоті і може досягати порядку 100 мВт, що може буди непридатним для пристроїв з автономним живленням на високих частотах.
Цифровий інтерфейс дозволяє реалізувати керування за допомогою мікроконтролерних пристроїв.	

# Функціональні генератори та генератори довільної форми



Генератор сигналів VC2003

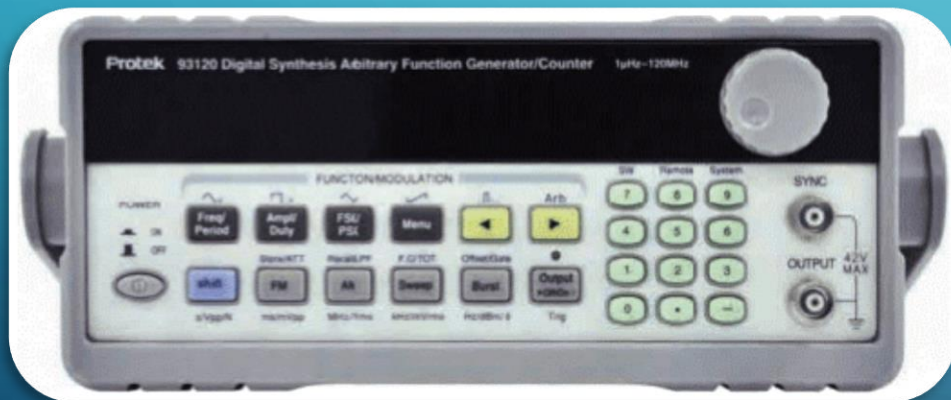


Генератор сигналів G5100



Генератор Protek B821

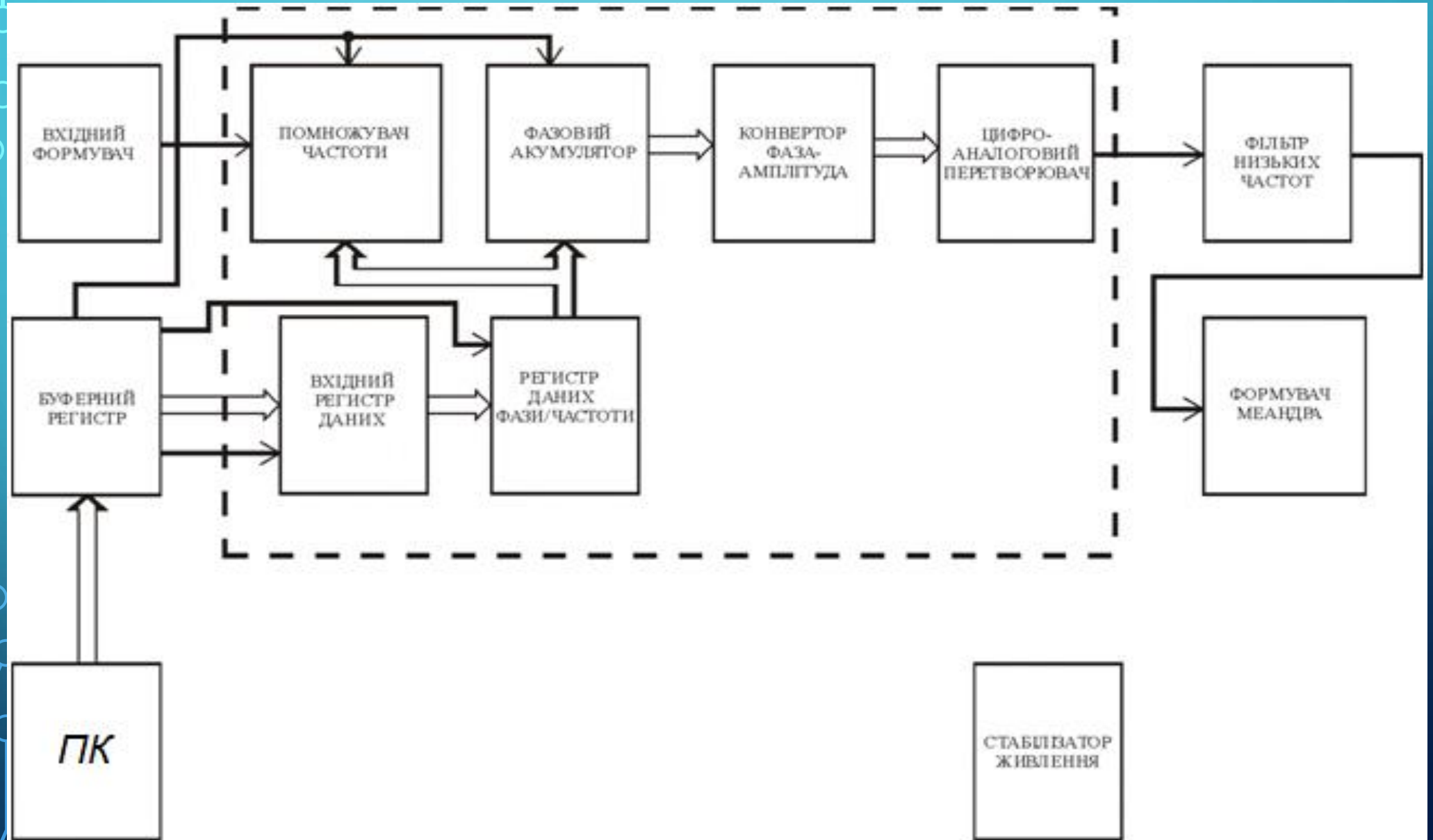
Генератор Protek 9305



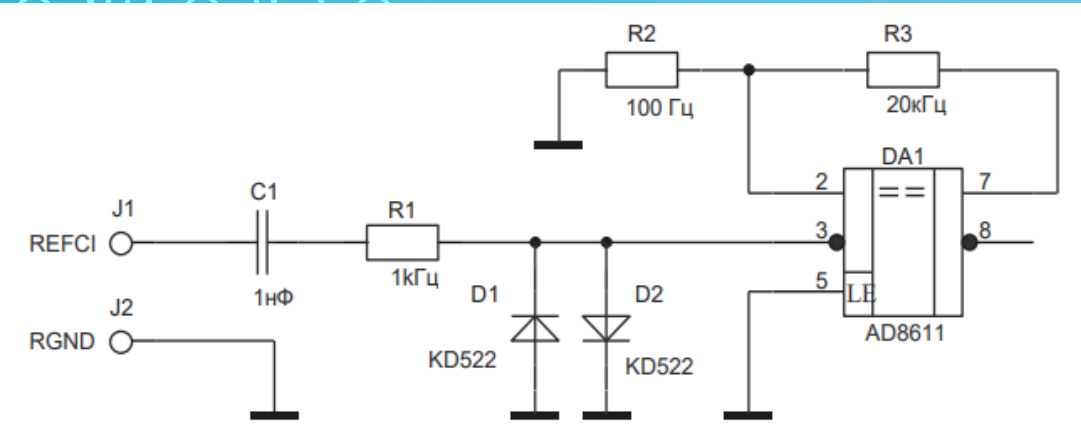
Генератор Agilent 33220A



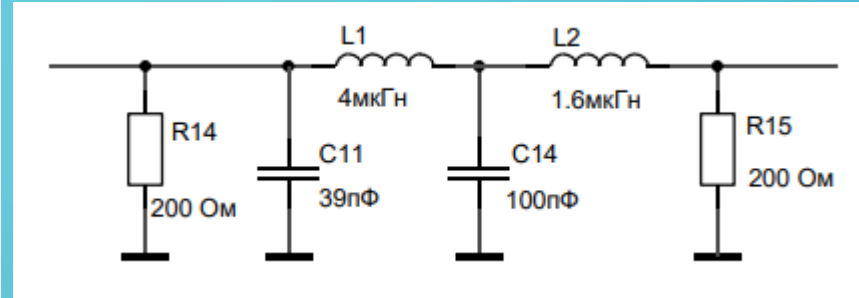
# СТРУКТУРНА СХЕМА ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛІВ СПЕЦІАЛЬНОЇ ФОРМИ НА БАЗІ СИНТЕЗАТОРА ПЦС ТА МК



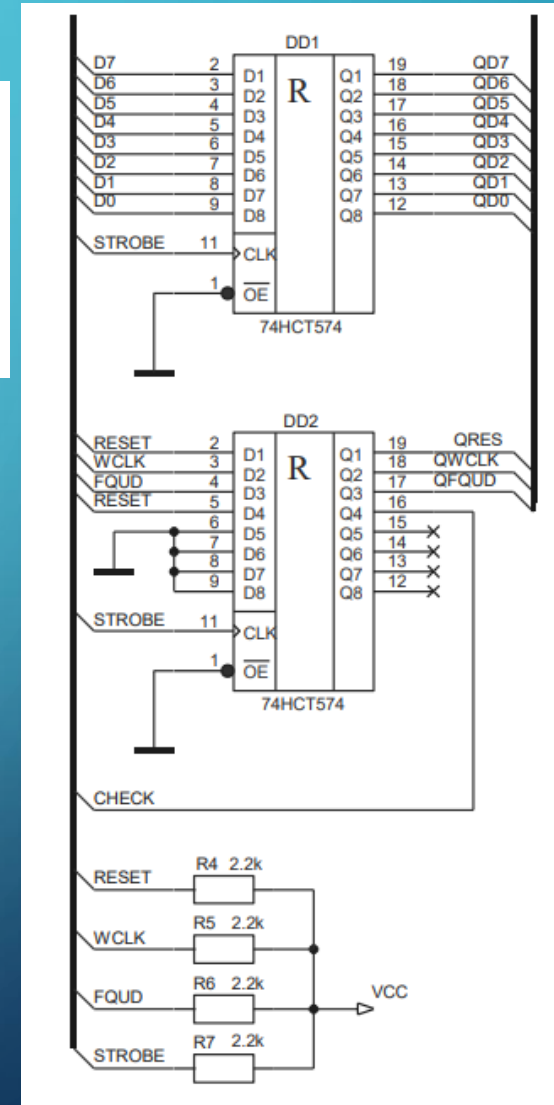
# РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СИНТЕЗАТОРА ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗУ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРА СПЕЦІАЛЬНИХ СИГНАЛІВ



Вхідний формувач



Фільтр нижніх частот



Буферний регістр

## Висновок

У даному проєкті було розроблено структурні та принципову схеми генератора спеціальних сигналів на базі синтезатора прямого цифрового синтезу для застосування в сучасних системах засобах телекомунікацій та радіотехніки, оскільки генерування спеціальних сигналів відіграє важливе значення в різних галузях, включаючи телекомунікації, радіозв'язок, медичну діагностику та тестування електронних пристроїв.

Завідувачу кафедри  
телекомунікацій, медійних та  
інтелектуальних технологій (ТМІТ)  
Підченко С.К.  
здобувача вищої освіти  
студента 4 курсу, гр. ТР2-19-1  
Коломійця Ярослава Олександровича

### 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 кваліфікаційного проекту до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений 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.

06.06.23 р.

дата



підпис

Ярослав КОЛОМІЄЦЬ



Mon Jun 12 15:21:04 EEST 2023, Стецюк Віктор Іванович, Хмельницький національний університет, ХНУ

## Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 1.0%

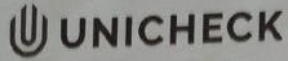
Словари проверки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Ошибок в документах: 8%

ID: 115695 Название: Генератор спеціальних сигналів Добавлено в БД: 2023-06-12 Авторы: Коломієць Ярослав Олександрович Руководители: Підченко Сергій Костянтинович Консультанты: Опоненты:	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	63125	553	1544 (2%)	28 (5%)

### Источник плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы





Ім'я користувача:  
Kafedra TMIT KhNU

Дата перевірки:  
12.06.2023 11:13:59 EEST

Дата звіту:  
12.06.2023 11:18:33 EEST

ID перевірки:  
1015557942

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

ID користувача:  
100005657

Назва документа: Коломієць\_TP2-19-1

Кількість сторінок: 56 Кількість слів: 10297 Кількість символів: 73850 Розмір файлу: 702.69 KB ID файлу: 1015209834

## 3.8% Схожість

Найбільша схожість: 1.33% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1011250446)

2.86% Джерела з Інтернету

184

Сторінка 58

2.48% Джерела з Бібліотеки

102

Сторінка 59

## 0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

Не знайдено жодних посилань

## 0% Вилучень

Немає вилучених джерел

## Модифікації

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

Замінені символи

2

**ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДИЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

## ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ ДО ЗАХИСТУ

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

Назва: Вимірювач параметрів антенних систем

Автор: **Коломієць Ярослав Олександрович**

Спеціальність: **172 Телекомунікації та радіотехніка**

Освітня програма: Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: **д.т.н., проф. Підченко Сергій Костянтинівич**

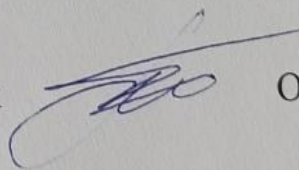
Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	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.	<b>Відповідає</b>
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 укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження: Запозичення у розмірі 1,0 % (Unicheck) та 3,8% (Anti-Plagiarism), виявлені в роботі є випадковими і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.

08.06.2023 р.

Відповідальний за перевірку Unicheck



Олег ПИВОВАР

Відповідальний за перевірку Anti-Plagiarism

Віктор СТЕЦЮК

Керівник роботи:



Сергій ПІДЧЕНКО

Зав. каф. ТМІТ



Сергій ПІДЧЕНКО



## РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційний проєкт  
Ярослава КОЛОМІЙЦЯ  
“ГЕНЕРАТОР СПЕЦІАЛЬНИХ СИГНАЛІВ”

Тема кваліфікаційного проєкту “Генератор спеціальних сигналів” присвячена питанням генерування сітки опорних частот і є актуальною у зв’язку з широким використанням методів цифрової обробки інформації в сучасних телекомунікаційних системах.

В пояснювальній записці кваліфікаційного проєкту виконано аналіз технічної літератури, що дозволило прийняти оптимальні рішення під час проектування генератора на основі синтезатора частоти.

Технічно грамотно та достатньо повно обґрунтований вибір технічних рішень, проведені необхідні розрахунки та дослідження, розроблені електричні схеми приладу.

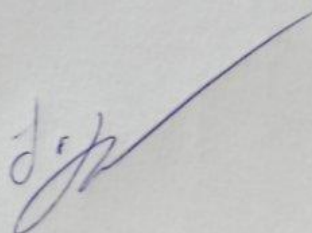
Під час розробки схеми електричної принципової схеми вміло використовувались стандартні схемотехнічні рішення, що дозволило суттєво підвищити ефективність процесу проектування.

Матеріали кваліфікаційного проєкту мають практичну цінність і можуть бути використані на підприємствах відповідного профілю для впровадження у виробництво.

До недоліків можна віднести відсутність в проєкті питань, пов’язаних з проектуванням друкованої плати для виготовлення генератора спеціальних сигналів.

В цілому кваліфікаційний проєкт виконано на достатньо технічному рівні, а його автор, Ярослав КОЛОМІЄЦЬ заслуговує на оцінку “добре”.

к.т.н., доцент кафедри  
фізики та електротехніки



Ігор ГУЛА

