

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
Кафедра обчислювальної техніки

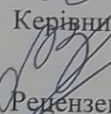
БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

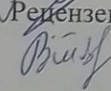
на тему:

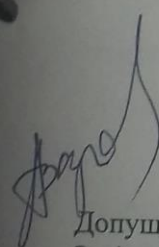
«Високоточний генератор низькочастотних сигналів на основі
самокаліброваного ЦАП»
08-54.БКР.038.00.000 ПЗ

Виконав студент 4 курсу, групи 2СП-216
спеціальності 123 — «Комп'ютерна інженерія»
освітня програма — «Системне програмування»

 Шульга Д. С.

Керівник д.т.н. доц. каф. ОТ
 Крупельницький Л.В.

Рецензент д.т.н. доц. каф. ПЗ
 Войтко В.В.


Допущено до захисту
Завідувач кафедри ОТ
д.т.н., проф. Азаров О. Д.

«10» 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ — 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
Кафедра обчислювальної техніки
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Галузь знань — 12 «Інформаційні технології»
Спеціальність — 123 «Комп'ютерна інженерія»
Освітньо-професійна програма «Системне програмування»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ОТ
д.т.н., проф. Азаров О. Д.
_____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Шульзі Денису Сергійовичу

1 Тема роботи: «Високоточний генератор низькочастотних сигналів на основі самокаліброваного ЦАП», керівник роботи Крупельницький Л.В. к.т.н., доцент кафедри ОТ, затверджено наказом вищого навчального закладу від «20» березня 2025 року № 97.

2 Термін подання студентом роботи 13.05.2025 р.

3 Вихідні дані до роботи: діапазон частот 20 Гц - 20 кГц, нелінійні спотворення — не більше 0.01%, нерівномірність АЧХ в смузі пропускання — не більше 0,1 Дб, частота дискретизації — не менше 48 кГц.

4 Зміст пояснювальної записки: вступ, аналіз існуючих технологій та підходів до генерації низькочастотних сигналів. Розробка високоточного генератора низькочастотних сигналів. Тестування генератора низькочастотних сигналів. Висновки. Перелік джерел посилання. Додатки.

5 Перелік графічного матеріалу: схема електрична принципова. Перелік ілюстративного матеріалу: характеристика конвертації ЦАП, співвідношення молодших розрядів, перехідний процес ПВЗ, блок схема ЦАП та графік затримки апертури, накладання спектрів при дискретизації, обмеження смуги сигналу

фільтром низьких частот, схема роботи інтерполюючого фільтру, реакція схеми на прямокутні імпульси з визначеними фронтами.

6 Консультанти розділів роботи представлені у таблиці 1.

Таблиця 1 — Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 – 3	к.т.н., доц. каф. ОТ Крупельницький Л.В.	21.03.25	13.05.25
Нормоконтроль	ас.. каф. ОТ Швець С. І.	14.05.25	30.05.25

7 Дата видачі завдання 21.03.2025 р.

8 Календарний план виконання БДР наведений у таблиці 2.

Таблиця 2 — Календарний план

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання	Підпис
1	Постановка задачі роботи	21.03.25	Ви
2	Пошук матеріалів та інформаційних джерел	21.03.25— 30.03.25	
3	Аналіз існуючих прототипів та визначення вимог до створюваної системи	21.03.25— 30.03.25	
4	Обґрунтування структури та принципів роботи системи	31.03.25— 13.04.25	
5	Розробка й тестування апаратно-програмної системи	14.04.25— 27.04.25	
7	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу	28.04.25— 11.05.25	
8	Перевірка якості виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи та усунення недоліків	13.05.25	

Студент Шульга Д.С.

Керівник роботи Крупельницький Л.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.3

Шульга Д.С. Високоточний генератор низькочастотних сигналів на основі самокаліброваного ЦАП. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 123 — Комп'ютерна інженерія, освітня програма — Системне програмування. Вінниця: ВНТУ, 2025. 74с.

На укр. мові. бібліогр: 23, рисунки: 44, таблиці:1.

У даній роботі проведено аналіз існуючих підходів до генерації низькочастотних сигналів та виконано огляд вже існуючих програмних засобів та технологій. Також було обрано та обґрунтовано технології для розробки генератора що дало змогу розробити і протестувати низькочастотний генератор сигналів на основі самокаліброваного ЦАП.

Ключові слова: ЦАП, самокалібрування, генератор низьких частот.

ABSTRACT

Shulga D.S. High-precision low-frequency signal generator based on self-calibrated DAC. Bachelor's thesis in specialty 123 - Computer Engineering, educational program – System Programming. Vinnytsia: VNTU, 2025. 74p.

In Ukrainian language. Bibleographer: 23, Fig.: 44, Tabl.: 1.

In this work, an analysis of existing approaches to generating low-frequency signals and a review of existing software tools and technologies were conducted. The technologies for developing the generator were also selected and justified, which made it possible to design and test a low-frequency oscillator based on a self-calibrating DAC.

Keywords: DAC, self-calibration, low frequency generator.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГЕНЕРАТОРІВ СИГНАЛІВ	5
1.1 Технології генерації сигналів	5
1.2 Низькочастотні генератори	9
1.3 Цифроаналогові перетворювачі.....	12
2 ОГЛЯД АНАЛОГІВ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ	24
2.1 Огляд існуючих рішень в галузі генерації сигналів	24
2.2 Структурна схема пристрою	31
2.3 Вибір технологій для реалізації проекту	32
3 РОЗРОБКА ВИСОКОТОЧНОГО ГЕНЕРАТОРА НИЗЬКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ЦАП	38
3.1 Побудова генератора сигналів з фазовим підлаштуванням частоти	38
3.2 Побудова сигма-дельта ЦАП.....	44
4 ТЕСТУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ	49
4.1 Моделювання підсилювача струму.....	49
4.2 Розрахунок передатної характеристики	54
ВИСНОВКИ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60
ДОДАТОК А Технічне завдання	63
ДОДАТОК Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи.....	67
ДОДАТОК В Графічна частина.....	68
ДОДАТОК Г Ілюстративна частина	70
ДОДАТОК Д Тестування	74

ВСТУП

Актуальність високоточного генератора низькочастотних сигналів на основі самокаліброваного ЦАП у сучасному світі визначається стрімким розвитком індустрії електронних приладів та систем сигналів. Все більше проєктів вимагають створення точних та надійних генераторів сигналів. Особливо це актуально для систем, які вимагають генерації низькочастотних сигналів з високою точністю, таких як медичне обладнання, індустріальні контролери та телекомунікаційні системи. Ця тематика була глибоко досліджена в роботах Азарова О.Д., Богомолова С.В., Крупельницького Л.В та інших науковців та розробників Вінницького національного технічного університету [1-4].

Мета полягає в підвищенні точності та стабільності генерування низькочастотних сигналів за допомогою створеного самокаліброваного ЦАП.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі **завдання**:

- провести аналіз існуючих підходів до генерації низькочастотних сигналів;
- виконати огляд аналогічних програмних засобів та технологій, використовуваних в індустрії електронних приладів;
- вибрати та обґрунтувати технології для розробки генератора;
- розробити програмний та апаратний компоненти генератора з використанням обраного стеку технологій;
- протестувати та оптимізувати розроблений генератор.

Об'єктом дослідження є процес підвищення точності генерування низькочастотних сигналів.

Предметом дослідження є методи побудови програмних та апаратних компонентів для генерації високоточних низькочастотних сигналів на основі самокаліброваного ЦАП.

Методи дослідження включають:

- аналіз наукових публікацій;
- огляд та вибір засобів та технологій розробки;
- розробку апаратних компонентів;
- тестування.

Новизна полягає в тому, що запропонований генератор низькочастотних сигналів на основі самокаліброваного ЦАП забезпечує кращу точність та стабільність сигналів, що дозволяє його ефективно використовувати в різноманітних системах, включаючи медичні, індустріальні та телекомунікаційні застосування.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості застосування розробленого генератора для підвищення якості та надійності систем, які вимагають генерації низькочастотних сигналів, а також для оптимізації процесу розробки таких приладів.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГЕНЕРАТОРІВ СИГНАЛІВ

1.1 Технології генерації сигналів

Генерація сигналів є актуальною в розробці електронних систем, включаючи комп'ютерні системи, телекомунікаційні мережі та аудіо- відеопристрої. Вона визначає процеси створення, обробки та передачі електричних або оптичних сигналів, які несуть інформацію. Глибоке розуміння генерації сигналів дозволяє інженерам та розробникам створювати надійні та ефективні системи, які забезпечують точну передачу даних та високу якість користувацького досвіду.

Пряме аналогове синтезування частоти є одним з найстаріших видів синтезаторів частот, відомих своєю простотою та легкістю реалізації. Використовуючи множники частоти, мікшери та дільники частоти, прямий аналоговий синтезатор частот генерує цільовий сигнал через операції додавання, віднімання, множення та ділення однієї або кількох стабільних та чистих відносних частот. Хоча ці синтезатори забезпечують швидку конвертацію та високу роздільну здатність, вони мають складну структуру, великий розмір та вагу. Крім того, підтримання низького рівня гармонік, шуму та паразитних частот є викликаючою проблемою. Внаслідок цього, з появи фазово-замкнених синтезаторів частот та прямих цифрових синтезаторів частот в останні роки, пряме аналогове синтезування частоти поступово витісняється [5].

Принцип DDS (прямого цифрового синтезу) генерує аналогові хвильові форми, зазвичай гармоніки, але також можливі трикутні та квадратні (рис. 1.1). Це досягається створенням цифрового змінного сигналу, який потім перетворюється в аналоговий. Пристрої DDS, будучи цифровими, дозволяють швидке переключення між частотами, забезпечують високу частотну роздільну здатність та працюють в широкому діапазоні частот.

Сучасні пристрої DDS компактні, енергоефективні і можуть генерувати широкий діапазон частот з високою точністю. Низька вартість та гнучкість, а також можливість цифрового програмування вихідних хвильових форм роблять DDS привабливим рішенням порівняно з традиційними методами. Багатоканальні пристрої DDS, такі як двоканальні та чотирьохканальні моделі, дозволяють

незалежне програмування кількох синхронізованих виходів у компактних системах.

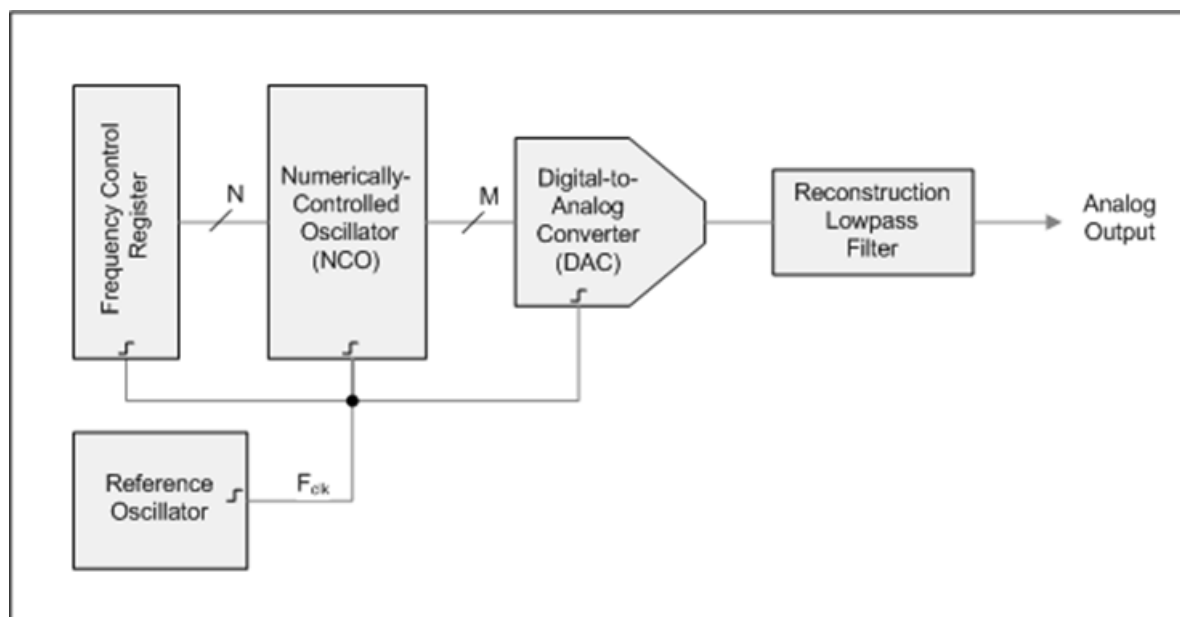


Рисунок 1.1 — Схема прямого цифрового синтезу

Типові частоти DDS покривають широкий діапазон, достатній для багатьох застосувань. Один чип забезпечує всі необхідні функції генерації частот, надаючи користувачеві гнучкість у цифровому керуванні. Для налаштування не потрібні зовнішні компоненти, лише доступ до інтерфейсу SPI. Вихідна фаза DDS керується з високою роздільною здатністю, що забезпечує точне програмування

Фазово-замкнутий контур (PLL) — це керувальна система, яка генерує вихідний сигнал, фаза якого фіксована щодо фази вхідного сигналу (рис.1.2). Підтримка синхронізації фаз між вхідним та вихідним сигналами також означає, що частоти цих сигналів збігаються, тому фазово-замкнутий контур може відстежувати вхідну частоту. Крім того, за допомогою дільника частоти PLL може генерувати стабільну частоту, яка є кратною вхідній частоті.

Щоб максимально використати швидке переключення та високу роздільну здатність DDS, необхідно збільшити ширину петлі PLL. Фільтр та необов'язковий дільник стають важливими для зниження шуму та непотрібних сигналів. Варто зазначити, що PLL збільшує амплітуду непотрібних сигналів, але не змінює їх частотний зсув від опорного сигналу. Тому фільтр необхідний для обмеження

непотрібних сигналів та шуму, генерованих DDS, у вузькому діапазоні. Після множення частоти на N , шум та непотрібні сигнали збільшуються на логарифм від N за основою 20, але лише в межах ширини фільтру. В кінцевому підсумку, вибір ширини фільтру та центральної частоти є компромісом між швидкістю переключення, якістю шуму та потребою в неперервному частотному покритті [6].

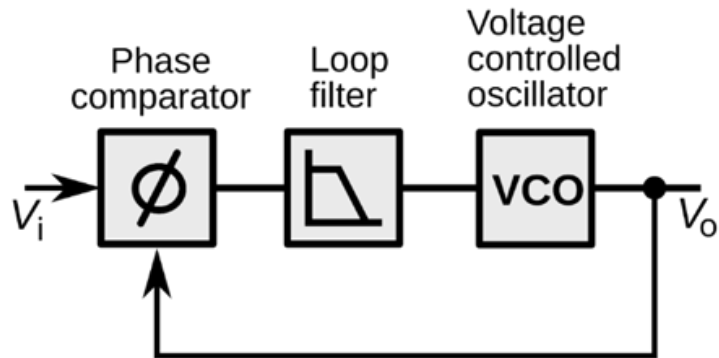


Рисунок 1.2 — Генератор сигналів на базі фазово-замкнутого контуру

Властивості фазово-замкнутих контурів (PLL) знаходять широке застосування в таких областях, як синхронізація годинників, демодуляція, синтез частот, множення годинників та відновлення сигналів з шумових комунікаційних каналів.

Зазвичай, опорний сигнал входить в чип і керує фазово-замкнутим контуром (PLL), який, в свою чергу, керує розподілом годинника системи. Розподіл годинника зазвичай балансується так, щоб годинник прибував до всіх кінцевих точок одночасно. Одна з цих кінцевих точок є входним сигналом зворотного зв'язку PLL. Функція PLL полягає у порівнянні розподіленого годинника з входним опорним сигналом та зміні фази та частоти вихідного сигналу до тих пір, поки опорний сигнал та входний сигнал зворотного зв'язку не будуть синхронізовані по фазі та частоті.

Однією з бажаних властивостей усіх PLL є те, щоб фази країв опорного сигналу та входного сигналу зворотного зв'язку були максимально збіжними. Середня різниця часу між фазами двох сигналів, коли PLL досягає синхронізації, називається статичним фазовим зміщенням (або постійною фазовою помилкою).

Варіація між цими фазами називається тривогою синхронізації. Ідеально, статичне фазове зміщення повинно бути нульовим, а тривога синхронізації — максимально низькою [7].

У цифрових бездротових комунікаційних системах (GSM, CDMA тощо) PLL використовуються для піднесення локального осцилятора під час передачі та пониження його під час прийому. У більшості мобільних телефонів ця функція зазвичай інтегрована в одному інтегрованому схемі, що зменшує вартість та розмір пристрою. Однак, через високі вимоги до якості базових станцій, передавальні та приймальні кола зазвичай виготовляються з дискретних компонентів, щоб досягти необхідного рівня якості. Модулі локальних осциляторів GSM зазвичай виготовляються з інтегрованої схеми синтезатора частот та дискретних резонаторних VCO.

Гібридні генератори частот представляють собою об'єднання кількох різних методів синтезу частот, що дозволяє досягти оптимального балансу між швидкістю переключення, точністю, стабільністю та шумом. Ці синтезатори використовують комбінацію прямих аналогових, прямих цифрових та фазово-замкнутих методів. Принцип їх роботи полягає в тому, що кожен метод доповнює інший, забезпечуючи комплексність та гнучкість генерації широкого діапазону частот. Недоліками є вища вартість та складність інтеграції.

Гібридні синтезатори поєднують наведені вище методи таким чином, що DAFS забезпечує швидке переключення, DDS — високу роздільну здатність та низький шум, а PLL — високу точність та стабільність. Це дозволяє досягти оптимального балансу характеристик, необхідних для різних застосувань, таких як радіо-, телекомунікації, радар, мікрохвильові ланки та медичні прилади. Наприклад, у радіо та телекомунікаціях гібридні синтезатори забезпечують високу точність та стабільність, необхідні для надійного передавання даних. У радарних системах вони забезпечують швидку переключення частот та високу точність, що важливо для точних вимірювань відстані та швидкості. У мікрохвильових ланках гібридні синтезатори генерують високочастотні сигнали з низьким шумом, забезпечуючи стабільність передачі. У медичних приладах, таких як ультразвукові

сканери, гібридні синтезатори забезпечують високу точність та стабільність, що критично важливо для точних вимірювань.

1.2 Низькочастотні генератори

Низькочастотні генератори сигналів використовуються для генерації сигналів з частотою в діапазоні від кількох герц до кількох кілогерц. Ці пристрої мають широке застосування в електроніці, авіації, автотранспорті, біомедичних дослідженнях та освіті. Вони складаються з таких компонентів як: осцилятор, який генерує сигнали основний, амплітудний та фазовий, фільтри для видалення гармонік та шуму, а також ампліфікатор для підвищення амплітуди вихідного сигналу. Низькочастотні генератори можуть виробляти різні типи сигналів, включаючи синусоїдальні, квадратні, трикутні та пільсові, що робить їх відповідними для таких задач як тестування лінійних систем, аналіз передавальних характеристик, модуляція сигналів та вимірювання параметрів електронних компонентів.

RC-контури (резисторно-конденсаторні контури) широко використовуються в низькочастотних генераторах сигналів (рис. 1.3). Принцип їх роботи базується на зарядженні та розрядженні конденсатора через резистор. Час, необхідний для зарядки та розрядки конденсатора, визначає частоту вихідного сигналу. Цей час може бути точно налаштований шляхом вибору відповідних значень резисторів та конденсаторів.

Наприклад, RC-осцилятори можуть бути використані для генерації синусоїдальних сигналів. У таких осциляторах використовується фільтр з високою кількістю полів, що забезпечує стабільну синусоїдальну форму сигналу. Для генерації квадратних та пільсових сигналів можуть використовуватися RC-контури в комбінації з інверторами або компараторами, які переключають стан відповідно до досягнення певного порогу напруги. В той час як для формування трикутних сигналів використовується заряд та розряд конденсатора, що забезпечує трикутну форму вихідного сигналу. RC-контури також можуть бути використані для фільтрації вихідного сигналу, видаляючи гармоніки та шум, що забезпечує чистий

вихідний сигнал.

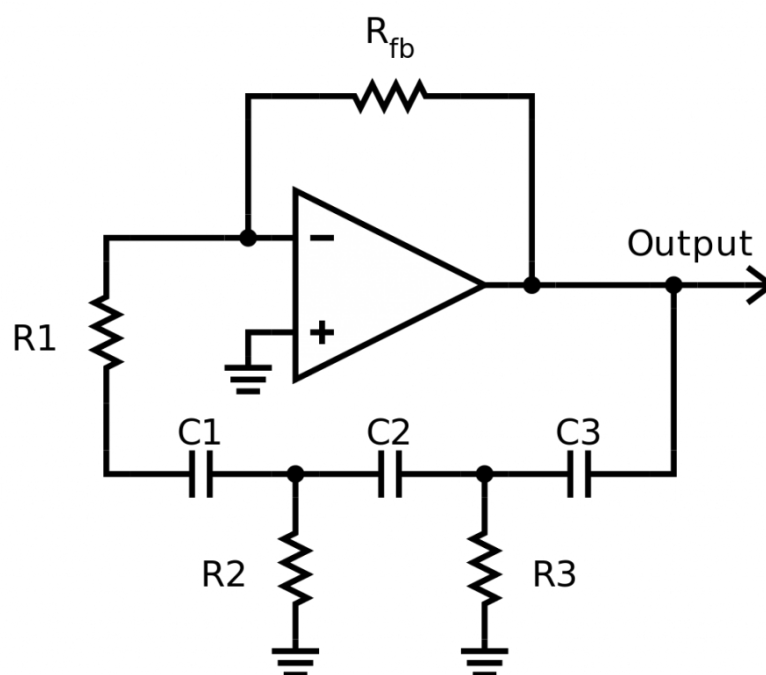


Рисунок 1.3 — Фазозміщуючий генератор на основі RC-каскадів

Однією з переваг RC-контурів є їх простота та надійність. Вони можуть бути легко налаштовані та інтегровані в різних схемах, що робить їх відповідними для широкого спектра застосувань в низькочастотних генераторах сигналів.

Міст Віна є спеціальним видом RC-контуру, але має більш складну та специфічну конфігурацію. Він використовує комбінацію резисторів та конденсаторів для створення балансованого моста, що дозволяє генерувати стабільні синусоїдальні сигнали. Міст Віна складається з чотирьох резисторів та двох конденсаторів, розташованих у формі моста. Баланс моста досягається на певній частоті, коли частота відповідає визначеним значенням резисторів та конденсаторів.

Для стабілізації амплітуди вихідного сигнала використовується нелінійний елемент, такий як лампа нагрівання або діод. Цей елемент регулює амплітуду сигнала, забезпечуючи, щоб вона не перетворилася в настільки велику, що призвело б до перенавантаження схеми. Міст Віна (рис. 1.4) забезпечує лінійне зарядження та розрядку конденсаторів, що дозволяє формувати синусоїдальний сигнал. Баланс моста забезпечує високу стабільність частоти, а нелінійний елемент

— стабільність амплітуди. Міст Віна широко використовується в низькочастотних генераторах сигналів через свою простоту, надійність та стабільність. Він може генерувати синусоїдальні сигнали з частотою від кількох герців до кількох кілогерців, що робить його відповідним для широкого спектра застосувань, таких як тестування електронних схем, освіта, біомедичні дослідження та аудіотехнології.

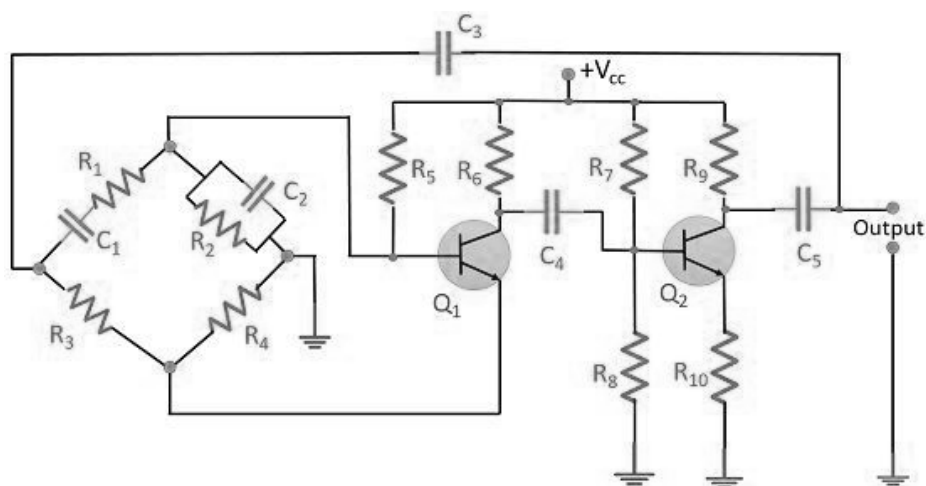


Рисунок 1.4 — Схема генератора на мосту Віна

Подвійний Т-подібний міст (Double T-Network) складається з двох Т-подібних мереж, кожна з яких містить три резистори або конденсатори, розташовані у формі літери Т. Ці мережі з'єднуються таким чином, що одна мережа під'єднується до вхідного сигналу, а інша — до вихідного. Така структура забезпечує високу стабільність та точність генерації та фільтрації сигналів.

Основна перевага подвійного Т-подібного міста полягає в його здатності досягти балансу між входом і виходом на певній частоті. Баланс досягається за рахунок вибору відповідних значень резисторів та конденсаторів. Коли частота входного сигналу відповідає цій певній частоті, вихідний сигнал стає стабільним і має визначений формат. Ця схема може також використовуватись для фільтрації вхідного сигналу та генерації вихідних [8].

1.3 Цифроаналогові перетворювачі

Цифроаналоговий перетворювач — це електронний пристрій, який перетворює цифрові дані на аналоговий сигнал. Це зазвичай потрібно для відтворення аудіо-, відео- та інших типів сигналів, які були закодовані у цифровому форматі. ЦАП отримує цифрові дані, які представляють дискретизовані значення аналогового сигналу, і перетворює їх на аналогові рівні напруги або струму. Це здійснюється за допомогою різних методів, наприклад ваговані резистори чи Т-подібні мережі. Після перетворення цифрових даних на аналогові рівні, вихідний сигнал може містити високочастотні компоненти, які не були присутні у оригінальному аналоговому сигналі, тому використовується фільтр нижніх частот (аналоговий фільтр) для видалення цих високочастотних компонентів і згладження сигналу.

Загальна структура ЦАП (рис. 1.5) складається з вхідного сигналу, який подається у цифровому коді та вихідного сигналу, що подається у аналоговому вигляді. Зазвичай, вихідний сигнал $A_{\text{вих}}$ може бути $\{0, 1\}$ або $\{-1, 1\}$. Чим більше бітів у вхідному коді перетворювача, тим точніше він може відтворювати довільні величини.

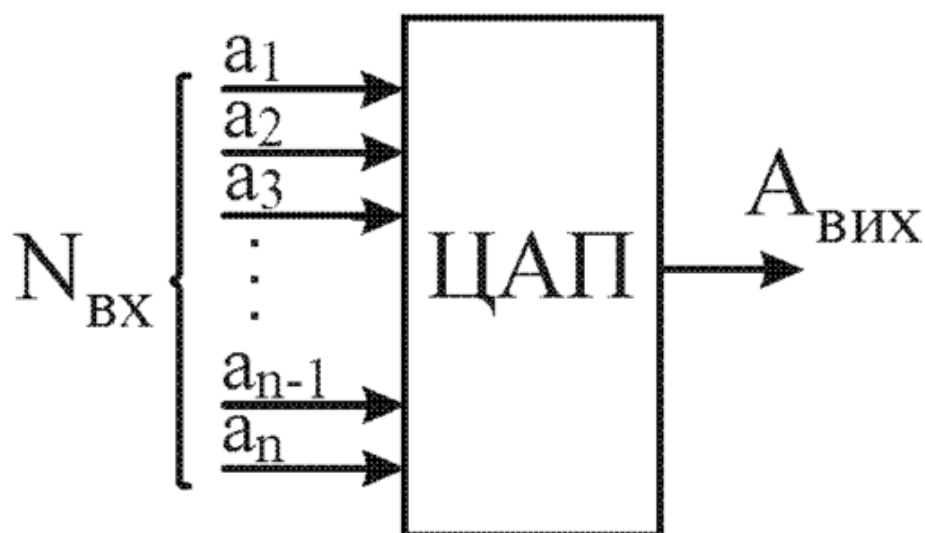


Рисунок 1.5 — Узагальнена структура ЦАП

Найбільш поширеним типом ЦАП є перетворювачі, які використовують метод підсумовування стандартних значень (рис. 1.6). Величина сигналу на виході

ЦАП визначається сумою вибраних стандартних значень, які залежать від бітів вхідного цифрового коду. Кожен біт може бути або 0, або 1, і відповідно до цього включатися або виключатися певне стандартне значення. Ці стандартні значення генеруються джерелами, які об'єднані в блок стандартних значень. Процес вибору стандартних значень реалізується за допомогою ключових елементів, які включають або виключають необхідні значення. Підсумовування вихідного сигналу відбувається за допомогою підсумовувача стандартних значень.

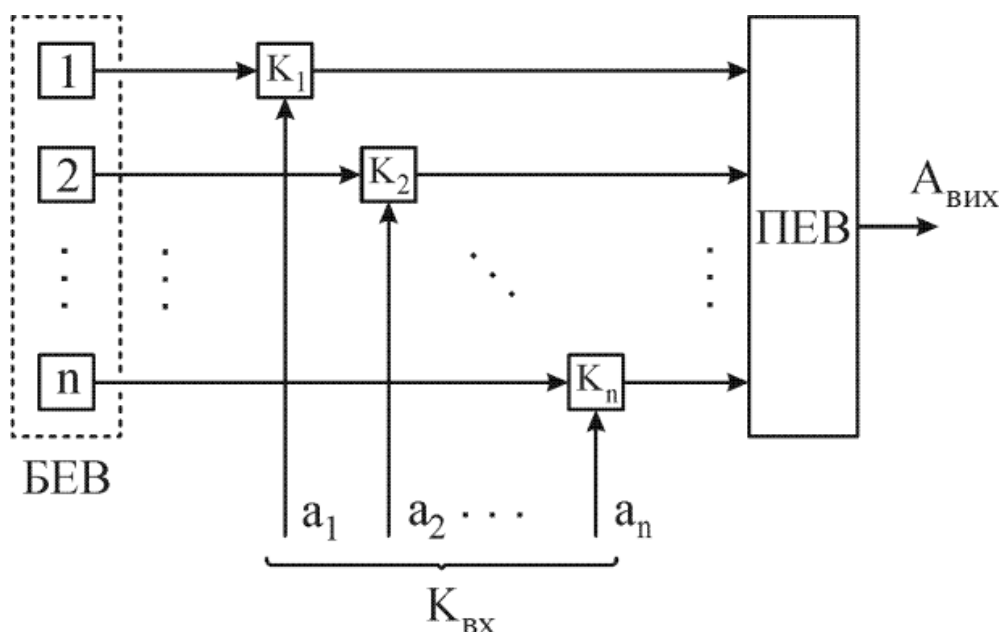


Рисунок 1.6 — Структура ЦАП з підсумовуванням еталонних величин

З поступовим збільшенням вхідного аналогового сигналу $U_{вх}(t)$ від нуля до його максимального значення, яке відповідає повній шкалі ЦАП, вихідний цифровий сигнал $D(t)$ формує крокову криву. Ця залежність відома як характеристика конвертації ЦАП. В ідеальних умовах середини кроків розташовуються по прямій лінії, що представляє ідеальну характеристику конвертації. Однак, реальна характеристика може значно відрізнитися від ідеальної за розмірами, формою кроків та їх розташуванням на графіку. Існує кілька параметрів для кількісного опису цих відхилень.

Роздільна здатність перетворювача чітко визначається кількістю окремих значень, які може видавати вихідний сигнал у межах його діапазону. Для m -розрядного двійкового перетворювача кількість можливих значень становить 2^m

степені m . Роздільна здатність перетворювача визначається як одна друга в степені m (рис.1.7).

Вхідний опір цифроаналогового перетворювача (ЦАП) впливає на те, як вхідний сигнал впливає на результат вимірювання. Якщо цей опір малий або змінний, це може призвести до додаткових погрешностей.

Зсув нуля - це різниця між вихідною напругою ЦАП, коли на вхід подається нульовий код, або середньою вхідною напругою аналого-цифрового перетворювача (АЦП), необхідною для отримання нульового коду на виході. Цю похибку може спричинити витік струму через ключі ЦАП, напруга зміщення підсилювача або компаратора. Для компенсації похибки нуля застосовують зовнішнє регулювання зсуву нуля. Похибку нуля можна вимірювати у відсотках від повного діапазону або як частку найменшого значущого розряду.

Для точного визначення похибки лінійності, лінія, що ілюструє функцію перетворення, повинна проходити через нуль, аби не додавати додаткових погрешностей [12].

Використання надлишкових систем числення для ваг розрядів ЦАП має значні переваги. Воно дозволяє уникнути розривів в характеристиці перетворення ЦАП і здійснювати процедуру самокорекції ваг розрядів, що лінеаризує похибки розрядів і значно покращує лінійність перетворювача. Для струмових ЦАП особливо важливі такі компоненти, як програмовані постійні струми (ППС). ППС можуть використовуватися для покращення навантажувальної здатності ЦАП та додаткового підсилення сигналу в вихідних каналах.

Роздільна здатність, вхідний опір та зсув нуля - ключові параметри, що визначають точність і надійність роботи ЦАП. Контролювання цих параметрів дає змогу досягти високої якості перетворення сигналів. Похибки повної шкали та зсуву нуля ЦАП можна мінімізувати шляхом регулювання аналогової частини схеми або корекції обчислювального алгоритму цифрової частини пристрою.

Похибка масштабу (похибка повного діапазону) вказує на величину відхилення фактичного коефіцієнта перетворення від розрахункового. Тобто, похибка повного діапазону — це різниця між номінальним значенням повного

діапазону перетворювача, визначеним співвідношенням, та його реальним значенням. Її причинами виникнення можуть бути неточності в опорній напрузі, резистивному ділянці або коефіцієнті підсилення підсилювача. Вона визначається як різниця між справжньою вихідною напругою та передбачуваним значенням для повного діапазону вихідного коду. Корекцію похибки масштабу можна здійснити, налаштувавши коефіцієнт підсилення вихідного підсилювача або опорну напругу.

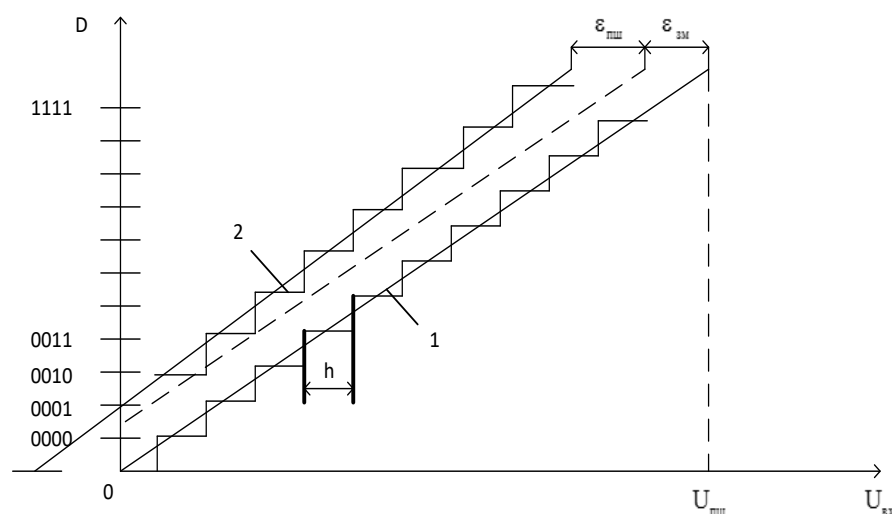


Рисунок 1.7 — Характеристика конвертації ЦАП

Коефіцієнт перетворення цифроаналогового перетворювача (ЦАП) визначає кут нахилу характеристичної кривої перетворювача. В ідеалізованому випадку, коли всі біти вхідного коду знаходяться у максимальному стані, напруга на виході повної шкали повинна бути трохи нижчою за опорну напругу – на величину, що відповідає найменш значущому біту (молодшому розряду). У ЦАП з виходом по струму, нахил цієї кривої обумовлений величиною резистора зворотного зв'язку, який є частиною підсилювача, що перетворює струм на напругу. Якщо номінальний опір цього резистора перевищує заплановане значення, коефіцієнт перетворення зростає. І навпаки, якщо значення опору нижче від номінального, коефіцієнт перетворення знижується. Це відбувається через відхилення фактичних величин молодших розрядів від тих, які передбачаються співвідношеннями. Фактичні значення молодших розрядів визначаються цим відповідним співвідношенням (рис. 1.8).

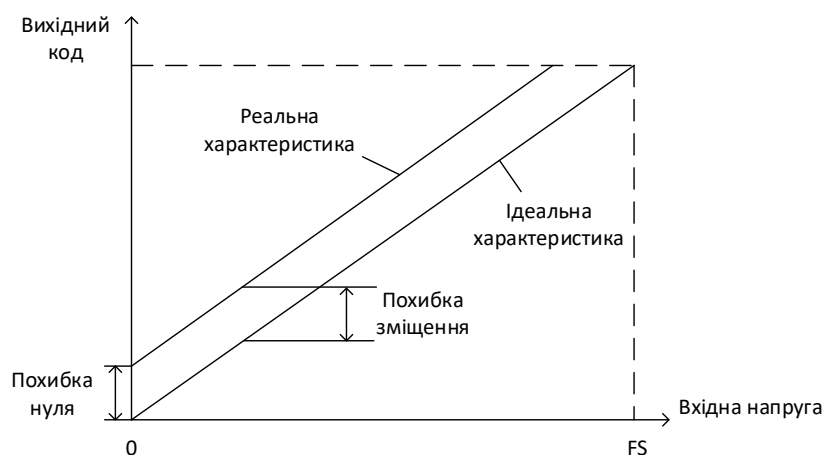


Рисунок 1.8 — Співвідношення молодших розрядів

Нелінійність, або інтегральна нелінійність, визначає відхилення фактичної характеристики перетворювача від еталонної прямої. Величина цього відхилення залежить від обраного способу лінеаризації. Один з таких способів передбачає побудову прямої так, щоб найбільше відхилення реальних даних від неї було удвічі меншим. Проте, для практичного втілення цього методу потрібне детальне знання характеру реальних вимірювань перетворювача, що є складним завданням в умовах масового виробництва. Ще одним варіантом є проведення прямої через граничні точки реальних вимірів перетворювача. В цьому випадку, виникає максимальне відхилення, або похибка лінійності. Тому зазвичай похибку лінійності обчислюють, використовуючи пряму, яка проходить через крайні точки реальних даних (рис. 1.9).

Визначення нелінійності полягає в встановленні зв'язку між аналоговим вихідним сигналом та цифровим входом ЦАП. Перетворення пройшло без похибок, якщо аналоговий сигнал на виході прямо пропорційно залежить від вхідного двійкового коду. Це дозволяє передбачити вихідний сигнал для кожного конкретного значення вхідного коду.

Отже, загальна величина аналогових вихідних даних, має співпадати з аналоговим сигналом, що генерується при одночасному їх увімкненні. Таким чином активування різних комбінацій розрядів фіксуючи відповідний аналоговий сигнал є головним етапом для забезпечення простоти та ефективності методу перевірки нелінійності. Після цього, кожен розряд з цієї комбінації активується

окремо, записуючи відповідне значення вихідної напруги і їх алгебраїчна сума зіставляється із загальною сумою, що отримана при одночасному включенні всіх розрядів. Різниця між цими сумами визначає похибку лінійності для певної характеристики перетворювача. Найбільша похибка лінійності, зазвичай, спостерігається при одночасному ввімкненні усіх розрядів з-за суми їх похибок.

Перетворювач вважається лінійним, якщо його максимальна похибка лінійності не перевищує половини значення молодшого розряду. Для зменшення нелінійності використовують метод кінцевих точок або метод найкращої прямої. (рис. 1.10)

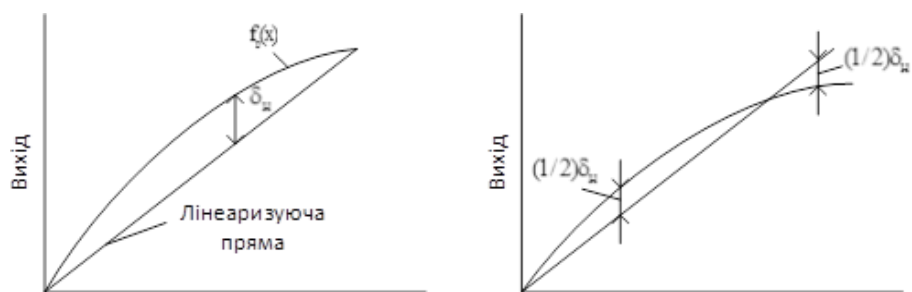


Рисунок 1.9 — Використання прямої на крайніх точках

Нелінійність разом з диференціальною нелінійністю відіграє важливу роль у визначенні якості перетворювачів, так як інші похибки, можуть бути виправлені за допомогою відповідних методів калібрування. Диференціальна нелінійність визначається як відхилення збільшення вихідного сигналу перетворювача від номінального значення молодшого розряду при послідовному змінненні вхідного коду на одиницю. Ціллю є досягти щоб при зміні вхідного коду на одиницю вихідний сигнал змінювався на значення молодшого розряду.

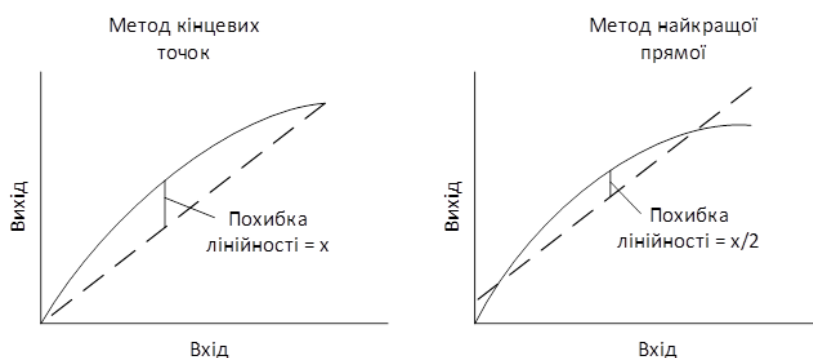


Рисунок 1.10 — Методи зменшення нелінійності

Нелінійність визначається як максимальне відхилення реальної характеристики перетворення від оптимальної, яка визначається емпірично, щоб мінімізувати значення похибки нелінійності. Її вимірювання здійснюється в відносних одиницях, але в технічних характеристиках може також вказуватися в частках молодшого розряду.

Похибка диференційної лінійності окреслює дві ключові риси ЦАП: відсутність пропусків кодів та монотонність перетворювальної характеристики. Відсутність пропусків кодів гарантує, що коли вхідна напруга змінюється від мінімального до максимального значення діапазону перетворення ЦАП генерує всі можливі вихідні коди. Нормування відсутності пропусків кодів показує еквівалентну розрядність ЦАП, тобто найбільшу кількість розрядів, для яких не пропускаються відповідні кодові комбінації. Під час тестування ЦАП з струмовим виходом, до його виходу під'єднують операційний підсилювач, котрий перетворює вихідний струм ЦАП на напругу. Водночас, резистор зворотного зв'язку, що є складовою ЦАП, приєднують без будь-яких додаткових підстроювальних елементів, щоб мати змогу виміряти похибку зміщення нуля та похибку повної шкали.

Співвідношення сигнал-шум (SNR) — критичний динамічний параметр для цифроаналогових перетворювачів (ЦАП). Шум, згенерований вхідним сигналом, вхідними колами та самим перетворювачем, фактично впливає на розмір квантування, потенційно надаючи вихідним значенням статистичні характеристики. SNR слугує інтегральним показником якості ЦАП, забезпечуючи загальну оцінку спотворень, внесених перетворювачем.

SNR є усередненим значенням, і воно може відрізнятися від миттєвих співвідношень сигнал/шум. Справжній процес вимірювання завжди зазнає впливу шуму, який може бути електричним або породжуватися зовнішніми чинниками, наприклад, вібрацією, коливаннями температури та вологості. Контроль середовища може допомогти зменшити шум. У випадках, коли характеристики шуму відомі та відмінні від сигналу, його можна відфільтрувати або обробити сигнал. Якщо сигнал сталий або періодичний, а шум є випадковим, покращення

SNR можливо через усереднення вимірювань.

Покращення шумових показників системи досягне через коректне узгодження входів і виходів її компонентів, що сприяє зменшенню впливу зовнішніх електромагнітних завад. У випадку, коли спектр корисного сигналу відрізняється від спектру шуму, поліпшення співвідношення сигнал-шум можливе через обмеження смуги пропускання системи.

Часова апертура, час затримки апертури та дрижання апертури – це параметри ЦАП і пристроїв вибірки-зберігання, що найменш зрозумілі та часто ігноруються. Ключовою динамічною характеристикою пристрою вибірки-зберігання є його здатність оперативно від'єднувати конденсатор зберігання від вхідного буферного підсилювача. Невеликий (але ненульовий) інтервал часу, необхідний для цього, називається часовою апертурою.

Напруга, утримувана в кінці цього проміжку, визначається швидкістю зміни вхідного сигналу та похибкою, що виникає внаслідок перемикання. Якщо команда утримування застосовується до вхідного сигналу з різними нахилами, то утримане значення буде середнім значенням за період апертури. Модель першого порядку передбачає, що кінцеве значення напруги на конденсаторі зберігання приблизно дорівнює середньому значенню сигналу, прикладеного до перемикача під час його перемикання (рис. 1.11).

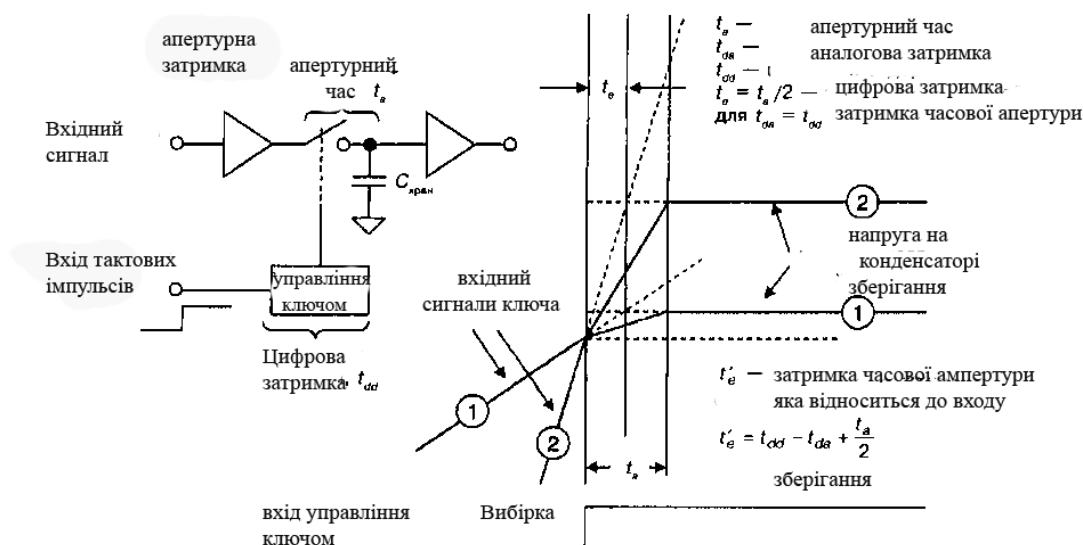


Рисунок 1.11 — Перехідний процес ПВЗ

Ефективний час затримки апертури — це невелика фіксована затримка, яку вносить перемикач під час увімкнення. Ця затримка може виражатися як у позитивному, так і в негативному часовому проміжку, демонструючи період від моменту спрацювання тактового імпульсу до фактичного зчитування вхідного сигналу. Виміряти час затримки апертури можливо, застосувавши біполярний синусоїдальний сигнал на цифроаналоговий перетворювач та скоригувавши затримку тактового імпульсу. Це робиться таким чином, щоб вихідний сигнал ЦАП знаходився на середині діапазону.

Затримка апертури не призводить до помилок, якщо триває короткий час, проте діє як усталена затримка, яка може вплинути на синхронізацію вибірок або аналоговий вхід. У ситуаціях одночасного зчитування, або під час прямої I/Q демодуляції, коли необхідно досягти узгодженості двох або більше АЦП, різниця в затримках апертури між перетворювачами може спровокувати помилки при сигналах, що швидко змінюються.

Час перехідного процесу ЦАП, або час усталювання, показує, скільки триває процес досягнення заданої точності після зміни вхідного сигналу на повну шкалу (рис. 1.12). Цей параметр критичний у типових системах збору даних, де ЦАП використовується спільно з аналоговим мультиплексором. Вихід мультиплексора може миттєво змінюватися між каналами на повну шкалу, впливаючи на вхід ЦАП. Якщо мультиплексор та ЦАП не встановилися з потрібною швидкістю, це може призвести до взаємного впливу каналів, навіть якщо працювати з сигналами постійного струму або низькими частотами.

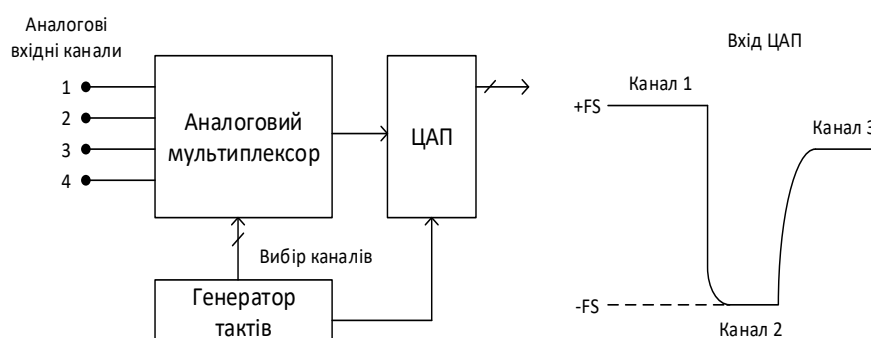


Рисунок 1.12 — Блок-схема ЦАП та графік затримки апертури

Розглянемо особливості основних типів цифроаналогових перетворювачів.

Широтно-імпульсний модулятор є найпростішою формою ЦАП. У цьому пристрої стабільне джерело напруги або струму періодично вмикається на тривалість, яка пропорційна цифровому коду, що перетворюється. Отримана імпульсна послідовність потім проходить через аналоговий фільтр низьких частот, що відфільтровує її. Цей метод широко використовується для регулювання швидкості електродвигунів і набуває все більшої популярності в аудіотехніці, зокрема завдяки збільшенню частоти дискретизації.

Самокалібровані ЦАП використовують внутрішню калібрувальну схему для визначення та виправлення помилок, які можуть виникнути через неідеальні характеристики компонентів, температурні зміни або відхилення в під час виробництва. Цей процес починається з виконання серії тестових перетворень, де відомі цифрові значення перетворюються в аналогові сигнали. Вихідні аналогові сигнали порівнюються з очікуваними значеннями, що дозволяє визначити помилки. Визначені помилки зберігаються у пам'яті ЦАП і використовуються для корекції вихідних значень під час реального перетворення. Це може бути здійснено за допомогою вбудованого корекційного алгоритму або таблиці поправок. Самокалібровані ЦАП також можуть автоматично виконувати калібрування від часу до часу, щоб виправити будь-які зміни, які могли виникнути через температурні зміни або відхилення компонентів.

Основні переваги самокаліброваних ЦАП включають високу точність перетворення, що критично важливо для застосувань, де незначні помилки можуть мати великий вплив на результат. Це особливо важливо в таких галузях, як високоякісне аудіо, де мінімальні помилки можуть значно вплинути на якість звуку чи медичні прилади де вони потрібні для точного відтворення сигналів, отриманих від медичних датчиків, таких як ЕКГ та ЕНМГ [9].

R-2R ЦАП використовують спеціальні схеми, складені з резисторів з опорами R і $2R$, відомі як матриці імпеданса. Ці матриці можуть бути організовані в два способи: пряма матриця струмів та інверсна матриця напруг. Застосування однакових резисторів дозволяє суттєво покращити точність, оскільки порівняно

просто виготовити набір прецизійних елементів з однаковими параметрами. R-2R ЦАП дозволяють відкинути обмеження по розрядності, досягаючи значної точності, особливо з лазерною підгонкою на одній підложці. Основний час на перетворення витрачається в операційному підсилювачі, тому він повинен мати максимальну швидкодію.

ЦАП зважуючого типу, з іншого боку, використовують резистори або джерела струму для кожного біту перетворюваного двійкового коду. Сила струму джерела пропорційна вазі відповідного біта. Таким чином, всі ненульові біти коду підсумовуються з вагою. Цей метод є одним з найшвидших, але має низьку точність через необхідність використання великої кількості різних прецизійних джерел чи резисторів, а також через непостійний імпеданс. Зважуючі ЦАП, як правило, мають розрядність не більше 8 біт.

Дельта-сігма ЦАП, як один з видів ЦАП передискретизації, працює на принципі вимірювання щільності імпульсів. Імпульсний сигнал з модульованою щільністю подається на перетворювач малої розрядності. Цей сигнал генерується за допомогою від'ємного зворотного зв'язку, який виступає як фільтр високих частот для шуму квантування. Передискретизація дозволяє використовувати ЦАП з меншою розрядністю для досягнення більшої розрядності кінцевого перетворення.

Більшість ЦАП з високою розрядністю побудовані на цьому принципі завдяки його високій лінійності та низькій вартості. Дельта-сігма ЦАП зазвичай побудований на основі простого одnobітного ЦАП, що демонструє майже лінійну характеристику. Для генерації сигналу з модульованою щільністю імпульсів можуть використовуватися прості дельта-сігма модулятори першого порядку або більш складні модулятори високого порядку, такі як MASH (багатоетапне формування шуму). Зі збільшенням частоти передискретизації зменшуються вимоги до вихідного фільтра низьких частот, а також покращується подавлення шуму квантування. Сигма-дельта ЦАП використовують перекодування цифрового сигналу в потік бітів з високою частотою дискретизації, що забезпечує високу точність та динамічний діапазон, але вимагає складні фільтри. Флеш-ЦАП, з

іншого боку, використовують масив порівнювачів, які одночасно порівнюють вхідний цифровий сигнал з набором аналогових рівнів, забезпечуючи дуже швидке перетворення, але вимагають багато порівнювачів [11].

Сегментний ЦАП забезпечує найвищу можливу швидкодію, активуючи один з дискретних елементів, які відповідають кожному можливому значенню вихідного сигналу. Наприклад, восьмибітовий ЦАП містить 255 дискретних елементів, а 16-бітовий — 65535. Ця архітектура дозволяє швидко та точно перетворювати цифрові дані, але вимагає значної кількості компонентів, особливо при великій розрядності [12].

2 ОГЛЯД АНАЛОГІВ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ

2.1 Огляд існуючих рішень в галузі генерації сигналів

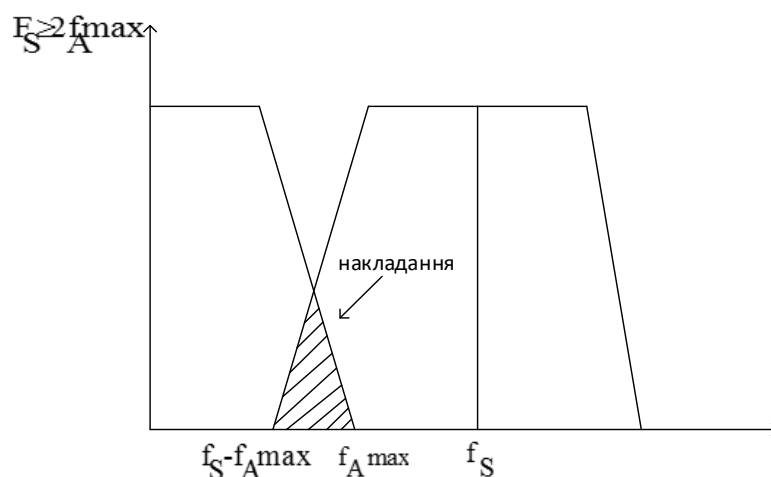
У сучасних цифрових системах використовуються два основні методи цифроаналогового перетворення: однобітовий та мультибітовий. Хоча більшість високоточних ЦАП використовують мультибітове перетворення, однобітові перетворювачі володіють власними, унікальними перевагами. Наприклад, однобітові ЦАП демонструють вищу лінійність на низьких рівнях сигналу, чого складно досягти за допомогою класичної мультибітової технології.

Високоякісні системи потребують динамічний діапазон, що перевищує 96 дБ, що, у свою чергу, вимагає застосування мінімум 17-розрядних ЦАП. На ранніх етапах розвитку цифрових систем широко застосовувались 18-розрядні паралельні ЦАП з резистивною матрицею R-2R для формування вагових струмів. Незважаючи на їхню відносну доступність, забезпечення монотонності їхньої характеристики перетворення було суттєвою проблемою.

Окрім того, цифрове відтворення стикається із клопотом надмірного шуму та спотворень, що виникають через накладання спектрів. Для того, щоб позбутися цих проблем, на вході цифроаналогового перетворювача (ЦАП) використовують цифрові інтерполяційні фільтри. Вони відтворюють проміжні значення сигналу, спираючись на вибірки, записані на носіях.

Вимоги до цифрових систем, що зберігають вибірки неперервно змінних сигналів у дискретні миті часу, впливають з теореми Котельнікова. Згідно з нею, сигнал можна відтворити без спотворень за умови, що ширина смуги його частотного спектру є меншою за половину частоти вибірок. Отже, частота вибірок повинна перевищувати подвійне значення найвищої частоти відтворюваного сигналу. Недотримання цієї вимоги може призвести до накладання спектрів та, відповідно, до спотворень.

Для згладження вихідного сигналу ЦАП зазвичай використовують аналогові фільтри низьких частот, які запобігають накладанню спектрів, подавляючи сигнали з частотами, що перевищують певну границю. Ці фільтри можуть послаблювати сигнали в межах цієї границі, але це ледь впливає на якість відтворення (рис. 2.1).



б)

Рисунок 2.1 — Накладання спектрів при дискретизації

Цифрові фільтри для цифроаналогових перетворювачів інтерполюють вхідні дані, а далі згладжують їх, використовуючи фільтр з обмеженою імпульсною характеристикою (КІХ-фільтр). Ступінь зменшення дзеркальних складових в смузі затримки визначається порядком цього фільтра. Найчастіше на практиці застосовують 4- або 8-кратну інтерполяцію.

Дельта-сігма ЦАПи використовують відмінні підходи для забезпечення широкого динамічного діапазону відтворюваних сигналів (рис. 2.2). Дельта-сігма модулятори змінюють спектр шуму квантування, переносячи більшу частину енергії шуму у високочастотну область, де його просто прибрати за допомогою аналогового фільтра низького порядку.

Вхідний цифровий інтерполюючий фільтр інтегровано на одному кристалі з дельта-сігма ЦАП, що сприяє простоті складання конструкції та зменшенню витрат. Частотний розподіл вихідного сигналу типового дельта-сігма модулятора з вхідним інтерполюючим фільтром передбачає зміщення основної частки енергії шуму у високочастотний діапазон, звідки її легко видалити (рис. 2.3).

Дельта-сігма модулятор ЦАП реалізований як повністю цифровий пристрій, який перетворює вхідну серію багаторозрядних слів на малорозрядні бінарні коди. Ці коди контролюють роботу ключів паралельного ЦАП з низькою розрядністю, одночасно змінюючи розподіл енергії шуму квантування, зміщуючи його у область високих частот. Для забезпечення необхідних операцій в алгоритмі роботи дельта-

сігма модулятора третього порядку передбачено затримку даних на один такт (рис. 2.4).

Як кінцевий перетворювач "код-аналог", найпростіше застосувати однобітові цифрово-аналогові перетворювачі (ЦАП), що функціонують як аналогові комутатори. Наприклад, в інтегральних мікросхемах (ІМС) серії 18-розрядних дельта-сігма ЦАП CS433х виробництва Crystal Semiconductor реалізовано такий метод, забезпечуючи при цьому 128-кратну перевибірку.

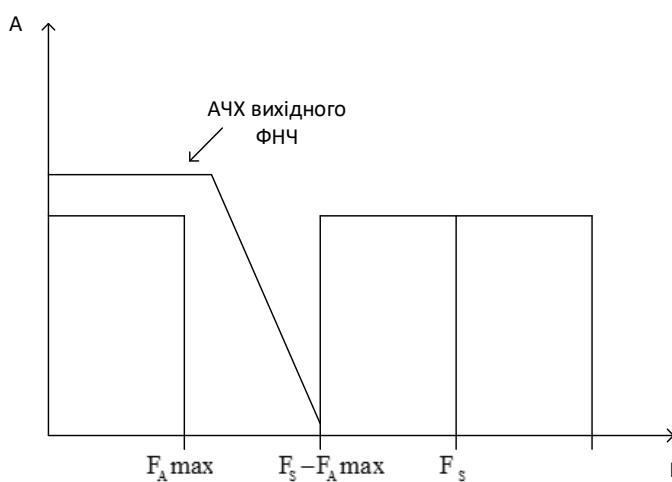


Рисунок 2.2 — Обмеження смуги сигналу фільтром низьких частот



Рисунок 2.3 — Схема роботи інтерполюючого фільтра

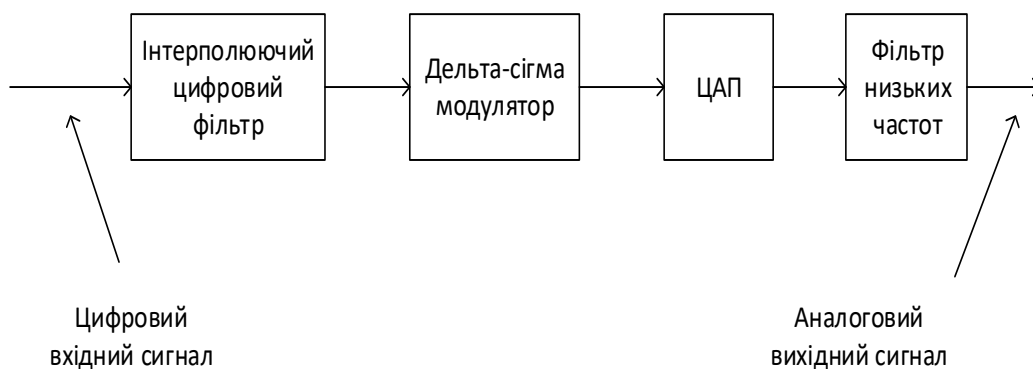


Рисунок 2.4 — Блок-схема дельта-сігма ЦАП

National Instruments PXI-5421 (рис. 2.5) — це модульний генератор сигналів, який використовує самокалібрований ЦАП для перетворення цифрових даних в аналогові сигнали. Цей генератор може генерувати сигнали з частотою до 1 МГц з роздільною здатністю 16 біт. Він використовується для тестування електронних схем, медичних приладів, аудіо систем та інших застосувань, де вимагається висока точність та стабільність.

Однією з ключових особливостей PXI-5421 є вбудована можливість калібрування, яка забезпечує високу точність та стабільність перетворення. Цей генератор може створювати широкий діапазон форм сигналів, включаючи синусоїдальні, квадратні, трикутні та пільсові сигнали. Простий інтерфейс програмного забезпечення дозволяє користувачам легко налаштувати параметри сигналів та керувати генератором.



Рисунок 2.5 — National Instruments PXI-5421

PXI-5421 є частиною модульної системи PXI, що дозволяє легко інтегрувати його з іншими модулями для створення комплексних тестових систем. Це рішення особливо корисне для розробників та інженерів, яким потрібно високоточне та надійне обладнання для тестування та досліджень. Висока точність та стабільність PXI-5421 забезпечують надійні результати в різних застосуваннях, включаючи електроніку, медичні дослідження та освіту.

Tektronix AWG5200 (рис. 2.6) — це високоточний генератор сигналів, який використовує самокалібрований ЦАП для перетворення цифрових даних в аналогові сигнали. Цей генератор може генерувати сигнали з частотою до 1 ГГц з роздільною здатністю до 16 біт. AWG5200 використовується в розробці електронних пристроїв, медичних дослідженнях, телекомунікаціях та освіті, де вимагається висока точність та стабільність.

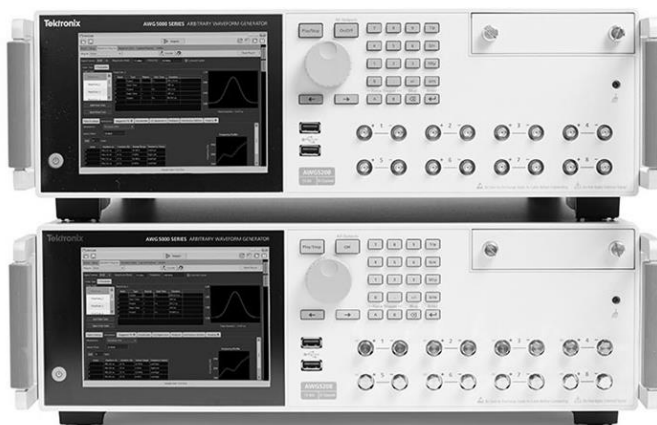


Рисунок 2.6 — AWG5200

Різниця з попереднім пристроєм полягає в тому що пристрій має ширші можливості для створення складних та налаштованих сигналів, що робить його особливо корисним для специфічних застосувань. Також має покращене програмне керування, що забезпечує гнучкість в автоматизації тестування та експериментів. З недоліків можна відзначити складність інтеграції, навідміну від PXI-5421.

Keysight 33600A (рис. 2.7) — це серія функціональних генераторів сигналів, які використовують самокалібрований ЦАП. Ці пристрої можуть генерувати

сигнали з частотою до 30 МГц з роздільною здатністю до 14 біт. Keysight 33600A використовується для тестування електронних схем, медичних приладів, аудіо систем та інших застосувань, де вимагається висока точність та стабільність.

Однією з ключових особливостей Keysight 33600A є висока точність перетворення, забезпечена за рахунок самокалібрування. Ця технологія дозволяє автоматично коригувати власні помилки, що забезпечує стабільну точність навіть при змінах умов. Keysight 33600A може створювати широкий діапазон форм сигналів, включаючи синусоїдальні, квадратні, трикутні та пільсові сигнали, а також дозволяє користувачам програмно створювати складні сигнали.



Рисунок 2.7 — Keysight 33600A

Простий інтерфейс програмного забезпечення Keysight 33600A дозволяє користувачам легко налаштувати параметри сигналів та керувати генератором. Цей інтерфейс підтримує програмне керування, що забезпечує гнучкість в автоматизації тестування та експериментів. Keysight 33600A також має широкий діапазон форм сигналів та можливість генерувати сигнали з високим динамічним діапазоном, що робить його відповідним для складних застосувань.

Analog Devices AD5754R (рис. 2.8) — це високоточний ЦАП, який може бути використаний в генераторах сигналів для перетворення цифрових даних в аналогові сигнали. Цей ЦАП має роздільну здатність 16 біт і підтримує частоту до 1 МГц. AD5754R використовується в розробці генераторів сигналів для електронних схем, медичних приладів, телекомунікацій та аудіо систем, де

вимагається висока точність та стабільність.

Однією з ключових особливостей AD5754R є вбудована можливість калібрування, яка забезпечує високу точність та стабільність перетворення. Ця технологія дозволяє автоматично коригувати власні помилки, що забезпечує стабільну точність навіть при змінах умов. AD5754R може створювати широкий діапазон форм сигналів, включаючи синусоїдальні, квадратні, трикутні та пільсові сигнали, а також дозволяє користувачам програмно створювати складні сигнали.

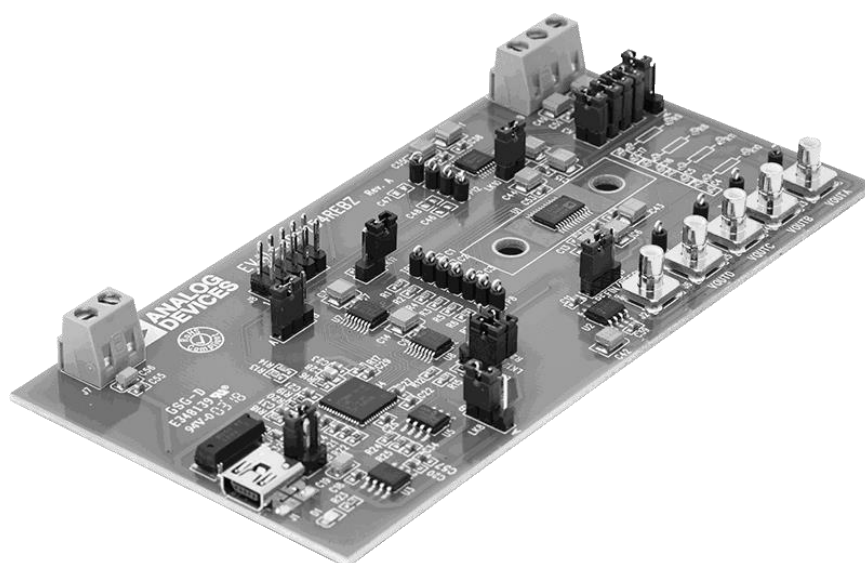


Рисунок 2.8 — Analog Devices AD5754R

Простий інтерфейс програмного забезпечення, який може бути інтегрований з модулями управління та обробки даних, дозволяє користувачам легко налаштувати параметри сигналів та керувати генератором. AD5754R підтримує програмне керування, що забезпечує гнучкість в автоматизації тестування та експериментів. Цей ЦАП має низьку витрату енергії, що робить його відповідним для мобільних та енергоефективних застосувань.

Texas Instruments DAC8811(рис. 2.9) — це високоточний ЦАП, який може бути використаний в генераторах сигналів для перетворення цифрових даних в аналогові сигнали. Цей ЦАП має роздільну здатність 16 біт і підтримує частоту до 1 МГц. DAC8811 використовується в розробці генераторів сигналів для електронних схем, медичних приладів, телекомунікацій та аудіо систем, де вимагається висока точність та стабільність.

Однією з ключових особливостей DAC8811 є вбудована можливість калібрування, яка забезпечує високу точність та стабільність перетворення. Ця технологія дозволяє автоматично коригувати власні помилки, що забезпечує стабільну точність навіть при змінах умов. DAC8811 може створювати широкий діапазон форм сигналів, включаючи синусоїдальні, квадратні, трикутні та пільсові сигнали, а також дозволяє користувачам програмно створювати складні сигнали.

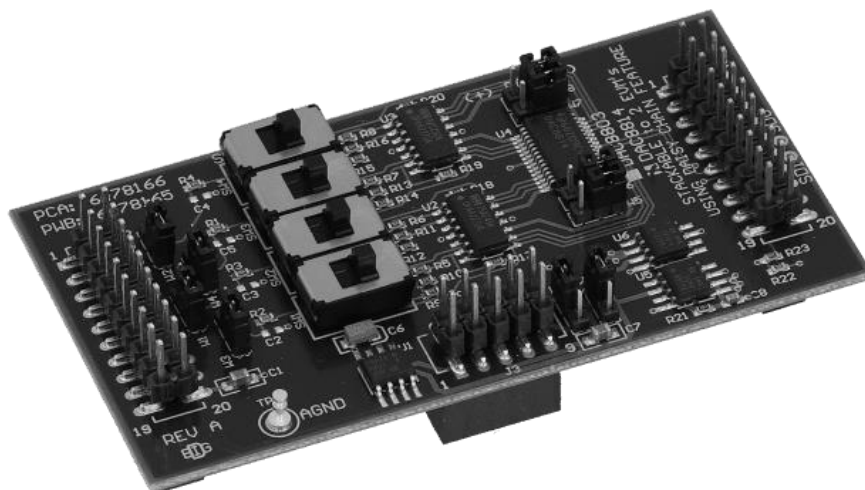


Рисунок 2.9 — Texas Instruments DAC8811

Простий інтерфейс програмного забезпечення, який може бути інтегрований з модулями управління та обробки даних, дозволяє користувачам легко налаштувати параметри сигналів та керувати генератором. DAC8811 підтримує програмне керування, що забезпечує гнучкість в автоматизації тестування та експериментів. Цей ЦАП має низьку витрату енергії, що робить його відповідним для мобільних та енергоефективних застосувань [14].

2.2 Структурна схема пристрою

Розглянемо один з аналогів для побудови власної схеми, який може послужити основою для розробки та оптимізації проєкту (рис. 2.10).

На цій схемі зображено ЦАП з додатковим підсилювачем на виході. Спочатку цифровий сигнал потрапляє в блок, який його зберігає. Потім цей сигнал передається в основну частину, де за допомогою ряду резисторів і опорних напруг — позитивної та негативної — створюється аналоговий сигнал.

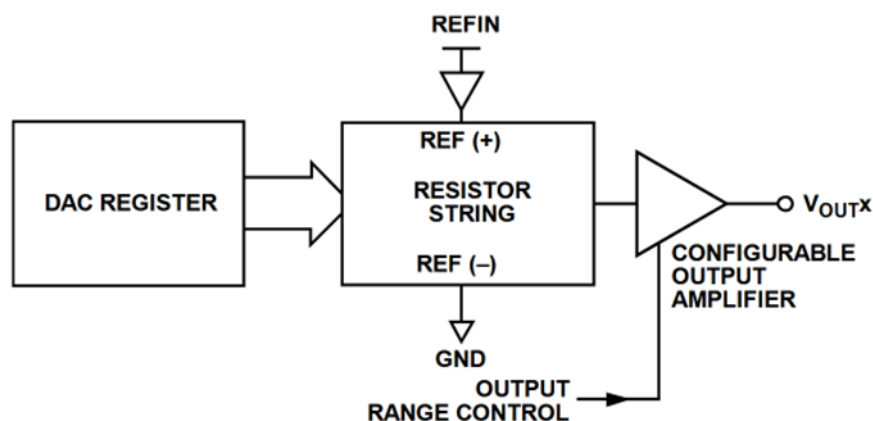


Рисунок 2.10 — Приклад структурної схеми ЦАП

Далі цей сигнал надходить на підсилювач, який можна налаштувати, щоб змінити діапазон вихідної напруги. Налаштування підсилювача відбувається через окремий вхід, що дозволяє підлаштувати масштаб сигналу. На виході отримуємо аналогову напругу, яку можна використовувати в різних пристроях. Така схема часто застосовується в електроніці, наприклад, для створення звуку в аудіотехніці або для керування в промислових системах.

Також можна розглянути принцип роботи самокалібрування в даному пристрої, що забезпечує його точність та надійність (рис. 2.11).

Даний ЦАП має додаткові методи керування та зв'язку. Цифровий сигнал спочатку надходить до блоку логіки, який приймає дані, тактовий сигнал і синхронізаційний сигнал. Цей блок обробляє сигнали і передає їх у вхідний регістр для тимчасового зберігання. Далі дані переходять до регістру перетворювача, який обробляє сигнали з точністю від 12 до 16 біт. Тут цифровий сигнал перетворюється на аналоговий за допомогою опорної напруги. На виході аналоговий сигнал надходить на підсилювач. Вихідний сигнал для зворотного зв'язку дозволяє контролювати роботу схеми, забезпечуючи точність перетворення.

На основі даних схем було створено власну структурну схему (рис. 2.12).

2.3 Вибір технологій для реалізації проєкту

Для створення високоточного низькочастотного генератора сигналів, важливо вибрати компоненти, які забезпечать високу точність, стабільність та

надійність. Розглянемо кілька варіантів технологій осциляторів, низькочастотних генераторів та ЦАП.

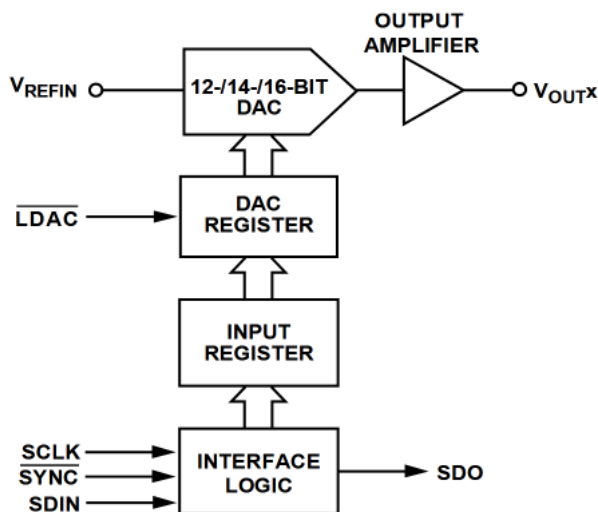


Рисунок 2.11 — Приклад структурної схеми самокалібрування

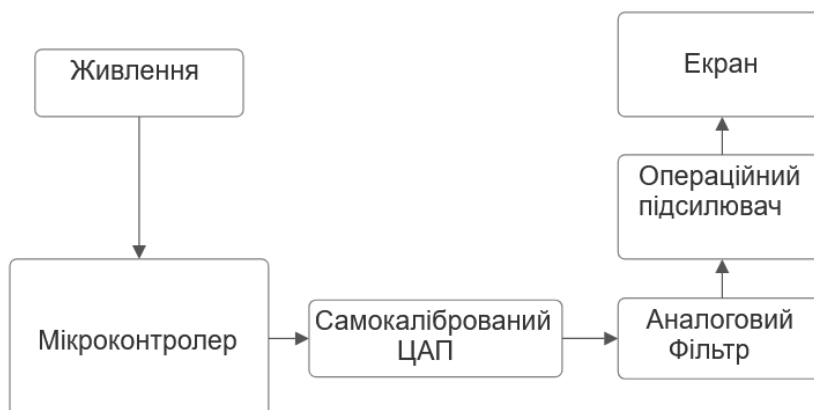


Рисунок 2.12 — Структурна схема пристрою

Фазове автопідлаштування частоти (PLL) — це система, яка забезпечує стабільну частоту вихідного сигналу, використовуючи відбірку фази між вхідним та вихідним сигналами. Ця технологія забезпечує високу стабільність та точність частоти, але вимагає більш складну схему та може бути дорожчою. Для даного генератора PLL є чудовим вибором через свою точність та надійність.

DDS (Direct Digital Synthesis) — це метод генерації сигналів, який використовує цифрові методи для створення аналогових сигналів. Ця технологія забезпечує високу точність, стабільність та гнучкість, оскільки можна програмно

керувати параметрами сигналу, такими як частота, амплітуда та фаза. DDS може генерувати складні сигнали, що робить його відмінним вибором для високоточного генератора. Благодаря своїй цифровій природі, DDS може швидко та точно налаштовуватися на різні частоти, що дозволяє його використовувати в різних застосуваннях, таких як радіоінженерія, телекомунікації та вимірювальні системи.

Прямий аналоговий синтез використовує аналогові компоненти для створення сигналів. Ця технологія має просту схему та низьку вартість, але вона менш точна та стабільна порівняно з цифровими методами. Для високоточного генератора ця технологія може бути менш підходящою, оскільки вона більш чутлива до зовнішніх збурень та змін умов роботи. Це обмежує її використання в суворих умовах, де потрібна висока точність та надійність [14].

Міст Віна — це тип осцилятора, який використовує комбінацію резисторів та конденсаторів для генерації стабільного синусоїдального сигналу (рис. 2.13). Ця технологія забезпечує високу стабільність та точність, має просту схему та низьку вартість. Однак, вона має обмежену гнучкість для генерації різних форм сигналів та може бути чутливим до змін температури.

Подвійний Т-подібний генератор використовує комбінацію резисторів та конденсаторів для генерації стабільного синусоїдального сигналу. Вони мають високу стабільність та точність. Однак, вона має більш складну схему порівняно з мостом Віна та також може бути чутливим до змін температури (рис. 2.14).

Сигма-дельта ЦАП використовують перекодування цифрового сигналу в потік бітів з високою частотою дискретизації, що забезпечує високу точність та динамічний діапазон. Ця технологія забезпечує високу точність та стабільність, але вимагає складні фільтри [15].

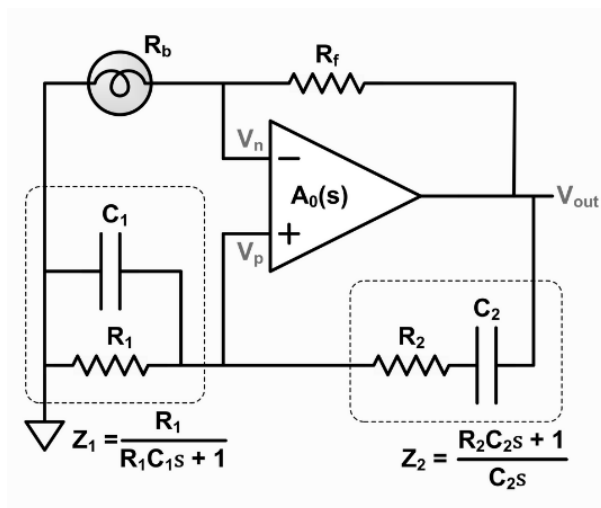


Рисунок 2.13 — Осцилятор з мостом Віна

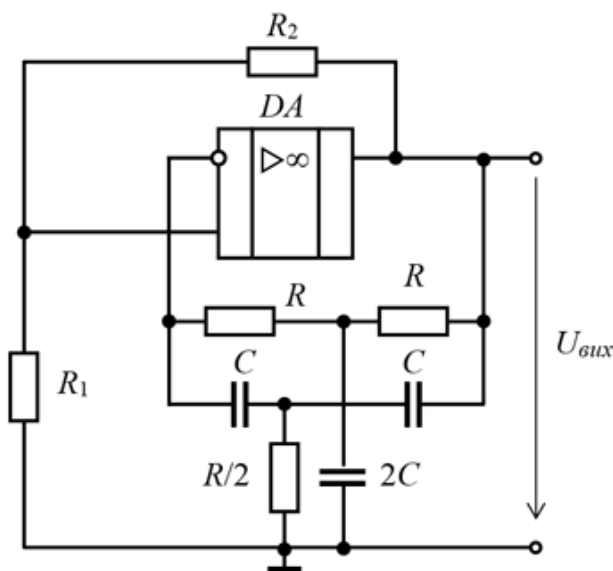


Рисунок 2.14 — RC генератор з подвійним Т-подібним мостом

Дельта-сігма ЦАП використовують спеціальні методи для досягнення високих динамічних характеристик, що перевершують можливості R-2-R перетворювачів. Шум квантування вхідної смуги модулюється дельта-сігма модулятором в високочастотну область, а передискретизація вхідного спектру відбувається з набагато більшою частотою, ніж для R-2-R ЦАП. Процес «шум-формування» визначається порядком модулятора та кратністю передискретизації, що впливають на динамічні можливості дельта-сігма ЦАП.

Типовий спектр дельта-сігма модулятора характеризується перенесенням шуму квантування в високочастотну область, тоді як вихідний сигнал залишається

в нижній частотній смузі. Це дозволяє ефективно подавляти шум за допомогою простих аналогових фільтрів низьких частот.

Дельта-сігма ЦАП зазвичай інтегровані з цифровим фільтром, формуючи монолітну структуру (рис. 2.15). Вихідний спектр таких ЦАП є результатом взаємодії цифрового фільтра та дельта-сігма модулятора. Повний вихідний спектр характеризується значним послабленням шуму квантування в нижній частотній смузі та його концентрацією в високочастотній області, що забезпечує високу якість відтворення сигналу.

Повторювальні ЦАП використовують каскад порівнювачів та ЦАП для послідовного перетворення, забезпечуючи високу швидкість та точність. Ця технологія забезпечує високу надійність, але має більш складну схему та вимагає більше компонентів. Для високоточного генератора ця технологія може бути підходящою, але дорожчою.

Порівнявши надані технології ми можемо скласти таблицю для порівняння та обрати найкращий варіант для проєкту (табл. 1).

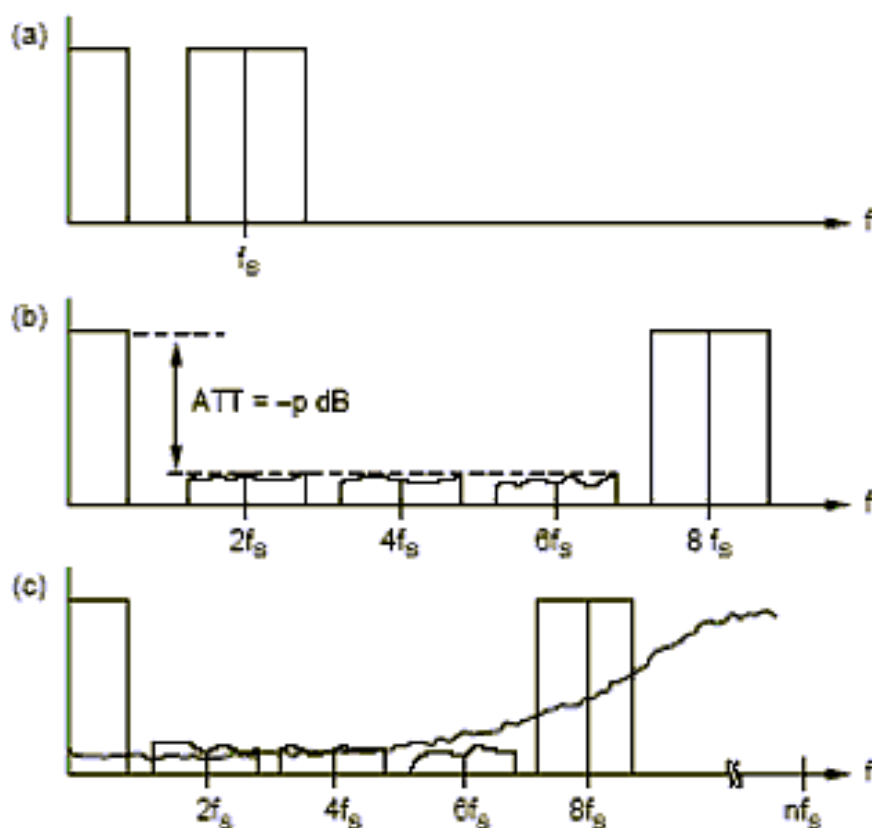


Рисунок 2.15 — Спектр ДС ЦАП з цифровим фільтром

Таблиця – 1 Порівняння технологій

Технологія	Ціна	Гнучкість	Простота	Сума балів	Коефіцієнт	Підсумок
Технології генерації сигналів						
Фазовий Підлаштування Частоти (PLL)	8	9	6	23	0.9	20.70
Прямий Цифровий Синтез (DDS)	8	9	6	23	0.9	20.70
Прямий Аналоговий Синтез	3	4	8	15	0.7	10.50
Технології генерації низькочастотних сигналів						
Міст Віна	4	5	9	18	0.8	14.40
Подвійний Т-Подібний Генератор	6	8	7	21	0.8	16.80
Технології ЦАП						
Сигма-дельта ЦАП	6	8	7	21	0.8	16.80
Повторювальні ЦАП	8	8	5	21	0.7	14.70

3 РОЗРОБКА ВИСОКОТОЧНОГО ГЕНЕРАТОРА НИЗЬКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ЦАП

3.1 Побудова генератора сигналів з фазовим підлаштуванням частоти

При виборі генераторів сигналів з фазовим підлаштуванням частоти (PLL) важливо враховувати кілька ключових факторів, таких як точність, стабільність, швидкість налаштування, енергоспоживання та вартість.

Структура PLL генератора сигналів (рис. 3.1) включає кілька основних компонентів, кожен з яких виконує важливу роль в процесі формування сигналу. Фазовий детектор (Phase Detector) порівнює фазу вихідного сигналу з фазою відсунутого сигналу, генеруючи сигнал помилки, який пропорційний різниці фаз між цими сигналами. Далі цей сигнал помилки передається через фільтр низьких частот (Low-Pass Filter), який фільтрує високочастотні компоненти, що допомагає згладити коливання і стабілізувати систему. Вихід фільтру низьких частот керує вхідним напруго-контрольованим генератором (Voltage-Controlled Oscillator, VCO), який змінює свою частоту відповідно до отриманого сигналу. Ця зміна частоти VCO дозволяє синхронізувати фазу вихідного сигналу з фазою відсунутого сигналу. Таким чином, PLL генератор сигналів може підтримувати стабільну і точну частоту вихідного сигналу, незалежно від зовнішніх збурень або змін ухильних параметрів.

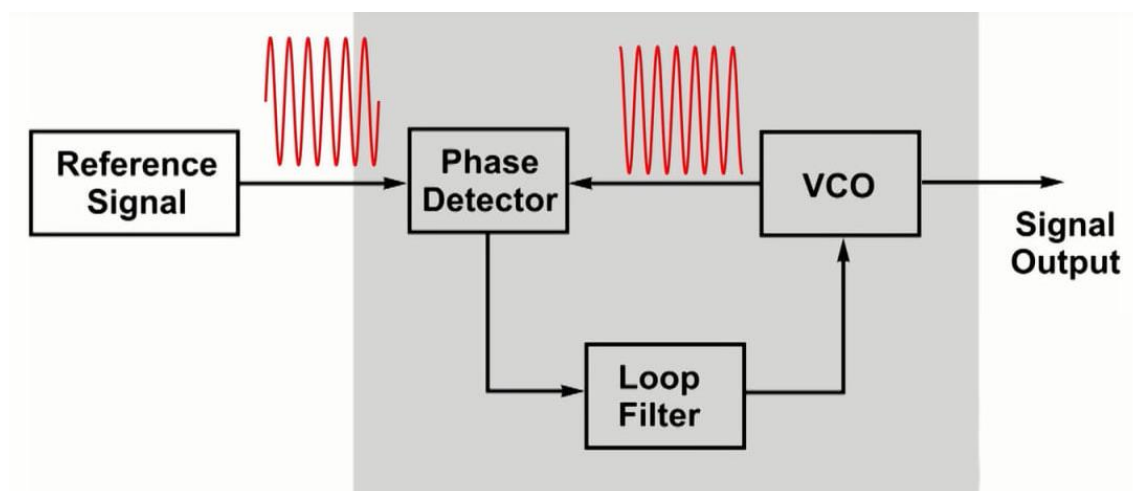


Рисунок 3.1 — Блок-схема PLL генератора сигналів

Прикладом детектора чутливого до фази та частоти подано на рисунку 3.2.

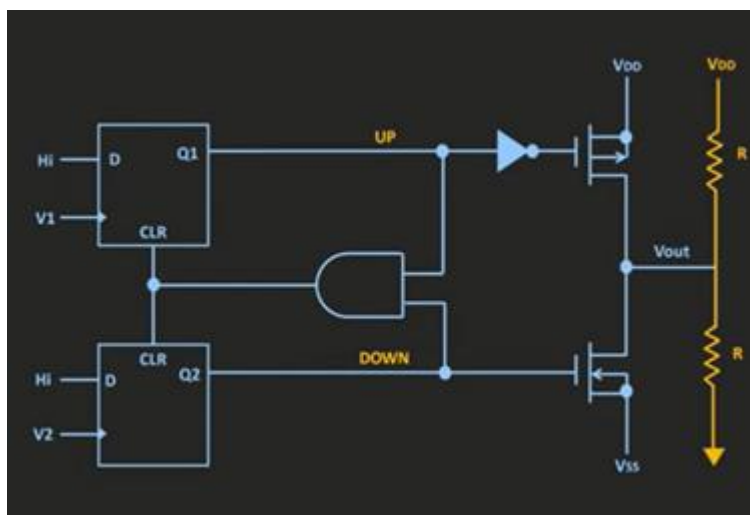


Рисунок 3.2 — Приклад схеми детектора чутливого до фази та частоти

Детектор, чутливий до фази та частоти (Phase-Frequency Detector, PFD), є ключовим компонентом в фазовій зв'язці (PLL, Phase-Locked Loop). Він не лише визначає різницю фаз між двома сигналами, але й реагує на різницю їх частот, що дозволяє ефективно синхронізувати та стабілізувати частоту вихідного сигналу.

PFD приймає два вхідних сигнали: відсунутий сигнал (V_{ref}) з відомою стабільною частотою та відгуківий сигнал (V_{fb}) з вихідного генератора (VCO), який потрібно синхронізувати. Детектор визначає, чи співпадають фази цих сигналів, і відповідає на різницю їх частот, генеруючи відповідний сигнал помилки.

Коли фази V_{ref} та V_{fb} співпадають, PFD генерує нульовий сигнал помилки, що означає, що фази та частоти сигналів збігаються. Якщо фази не співпадають, PFD генерує сигнал помилки, який відображає різницю фаз. Якщо частоти V_{ref} та V_{fb} відрізняються, фазова різниця між ними буде змінюватися з часом, що призводить до зміни сигналу помилки. Цей сигнал використовується для корекції частоти VCO, щоб вона співпала з частотою V_{ref} .

Вихідний сигнал PFD включає два компоненти: UP (вихідний підйом) та DOWN (вихідний спад). Якщо фаза V_{fb} запізає відносно V_{ref} , UP імпульси будуть довгими, ніж DOWN імпульси. Навпаки, якщо фаза V_{fb} опережає V_{ref} , DOWN імпульси будуть довгими, ніж UP імпульси. Ширина імпульсів на виходах UP та DOWN відображає різницю фаз та частот.

Один з поширених способів реалізації PFD полягає у використанні двох D-

тригерів та логічних воріт. Перший D-тригер (D1) приймає V_{ref} на вхід D і V_{fb} на вхід CLK, а другий D-тригер (D2) приймає V_{fb} на вхід D і V_{ref} на вхід CLK. Логічні ворота, такі як AND, використовуються для обробки вихідних сигналів тригерів і генерації імпульсів UP та DOWN.

Прикладом PLL генератора сигналів можна взяти CD4096, вказаний на рисунку 3.3.

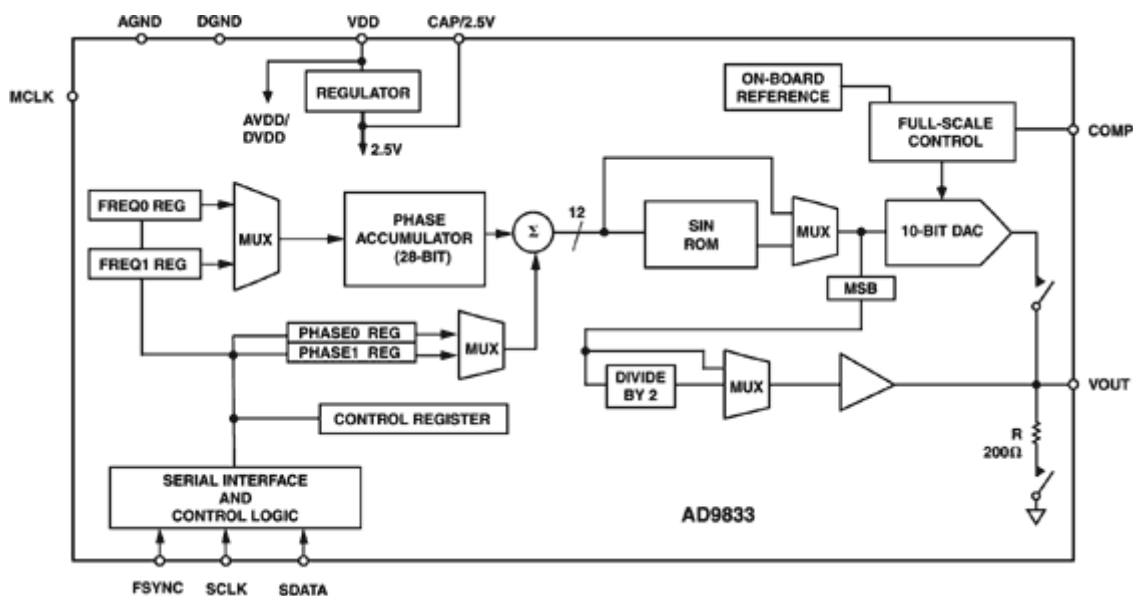


Рисунок 3.3 — Будова мікросхеми CD4096

CD4096 містить в собі кілька ключових компонентів, кожен з яких виконує важливу роль в процесі генерування та синхронізації сигналів. Фазовий детектор (Phase Detector) порівнює фазу вхідного тактового сигналу (V_{ref}) з фазою вихідного сигналу, який було зменшено за допомогою програмованого дільника частоти. Якщо фази не співпадають, фазовий детектор генерує сигнал помилки, який пропорційний різниці фаз. Цей сигнал помилки потім проходить через фільтр низьких частот (Low-Pass Filter, LPF), який згладжує коливання та вибіркові шуми, забезпечуючи плавне керування VCO.

Вихід фільтру низьких частот керує напруго-контрольованим осцилятором (VCO). VCO генерує вихідний сигнал з заданою частотою, яка залежить від вхідного сигналу помилки. Вихідний сигнал VCO може бути поділений на певний коефіцієнт за допомогою програмованого дільника частоти. Цей дільник дозволяє точно налаштувати вихідну частоту, забезпечуючи гнучкість керування.

Вихідний сигнал дільника частоти повертається до фазового детектора для подальшої синхронізації, створюючи замкнутий цикл фазової зв'язки.

CD4096 підключається до мікроконтролера або процесора через серійний інтерфейс, зазвичай реалізований за допомогою SPI (Serial Peripheral Interface) або паралельного інтерфейсу. Програмування відбувається за допомогою регістрів, де можна задавати значення для коефіцієнта дільника частоти, налаштувань фільтру та інших параметрів. Ця простота програмування робить CD4096 надзвичайно зручним для використання в різних проєктах.

CD4096 широко використовується в телекомунікаціях для генерування стабільних частотних сигналів, необхідних для модуляції та демодуляції. У радіосистемах він забезпечує точне керування частотою переносного сигналу, що важливо для стабільної та надійної передачі даних. У промислових контролерах CD4096 використовується для точного керування частотою сигналів, необхідних для автоматизації процесів. У наукових дослідженнях CD4096 використовується для генерування точних частотних сигналів, необхідних для експериментів та вимірювань.

Розглянемо дві популярні моделі: DAC161S997 та MC145106.

DAC161S997 є одним з найкращих варіантів для високоточних застосувань. Він має високу точність до 16 біт, що забезпечує надзвичайно точні сигнали. Завдяки самокаліброваному ЦАП, генератор характеризується високою стабільністю, що критично важливо для систем, де висока точність є основним фактором. Швидкість налаштування DAC161S997 також достатньо швидка для багатьох застосувань, що дозволяє швидку адаптацію до змін у системі. Енергоспоживання відносно низьке, що сприяє ефективному використанню в різних пристроях. Однак, висока вартість DAC161S997 може бути обмежувальним фактором для деяких проєктів, особливо для тих, де бюджет обмежений.

MC145106 є більш економічним варіантом, який відмінно підходить для проєктів, де важлива швидка адаптація та енергоефективність. Точність MC145106 досягає 10 біт, що є задовільною точністю для багатьох застосувань, окрім найвимагучіших. Стабільність генератора достатньо висока, але не така висока, як

у DAC161S997. Швидкість налаштування MC145106 також досить швидка, що дозволяє швидку адаптацію до змін у системі. Енергоспоживання відносно низьке, що сприяє ефективному використанню в мобільних та енергоефективних пристроях. Нижча вартість MC145106 робить його більш доступним для широкого кола застосувань, особливо для індустріальних контролерів, де висока точність не є критичним фактором, але важлива надійність та ефективність.

В результаті аналізу можна зробити висновок, що DAC161S997 є оптимальним вибором для високоточних застосувань, де важлива якість сигналів та стабільність. Однак, у нашому випадку для прикладу ми виберемо MC145106, оскільки він є більш доступним та ефективним варіантом для широкого кола застосувань, особливо для індустріальних контролерів та енергоефективних пристроїв [16].

Схема кола, показана на рисунку 3.4, є досить простою, оскільки фазовий детектор та дільник вбудовані в одному інтегрованому схемі MC145106. Єдина необхідна зовнішня частина — це VCO (вібраційний осцилятор). Кварцевий кристал має частоту 4608 кГц для європейського стандарту трансляції та 5120 кГц для американського. Тестова точка TP, розташована на пін 5, показує центральну частоту кварцевого кристалу і може бути використана для калібрування системи.

Основним елементом мікросхеми є високочастотний генератор, який використовується для створення точних сигнальних форм. Цей генератор має високу стабільність та точність, що дозволяє йому надавати надійні сигнали для подальшої обробки. Він реалізований за допомогою осцилятора, який може працювати в широкому діапазоні частот.

Крім генератора, мікросхема містить набір фільтрів, які забезпечують очистку сигнальних ліній від шуму та інших збурень. Ці фільтри можуть бути активними або пасивними, в залежності від специфічних вимог до системи. Активні фільтри включають операційні підсилювачі, які додають додаткову функціональність, таку як підсилення та інвертування сигналу.

3.2 Побудова сигма-дельта ЦАП

Будову сигма-дельта ЦАП зображено на рисунку 3.5

Дельта-сигма ЦАП кодує високорозрізнений цифровий вхідний сигнал у сигнал з нижчим розрізненням, але з вищою частотою дискретизації. Цей сигнал потім може бути перетворений у напругу і згладжений за допомогою аналогового фільтра для демодуляції.

Сігма модуляція використовує цикл від'ємного зворотнього зв'язку для створення високої точності цифрового виводу. На кожному тактовому циклі зворотний зв'язок генерує новий результат, який потім використовується для обчислення наступного. Цей процес дозволяє ефективно знизити кількість бітів, мінімізуючи вплив на якість сигналу, та одночасно збільшити роздільну здатність системи.

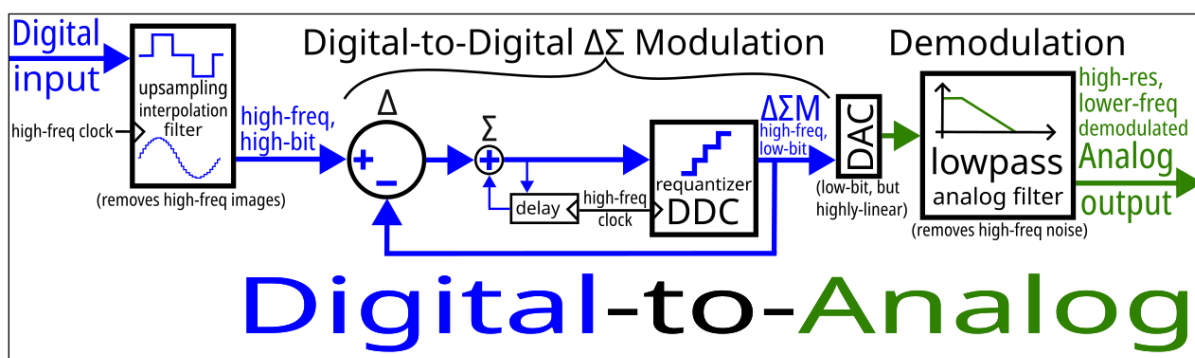


Рисунок 3.5 — Схема роботи сигма-дельта ЦАП

На рисунку 3.6 ми можемо переглянути центральний елемент схеми — ЦАП DAC161S997, який перетворює цифрові сигнали, отримані від мікроконтролера, на аналогові сигнали.

DAC161S997 має вхідний цифровий інтерфейс, який підтримує SPI (Serial Peripheral Interface). Цей інтерфейс дозволяє мікроконтролерам та іншим цифровим пристроям передавати цифрові дані до ЦАП. SPI використовує кілька ліній: SCLK (тактовий сигнал), SDI (дані), CS (відмінка чипа) та LDAC (синхронізація перетворення).

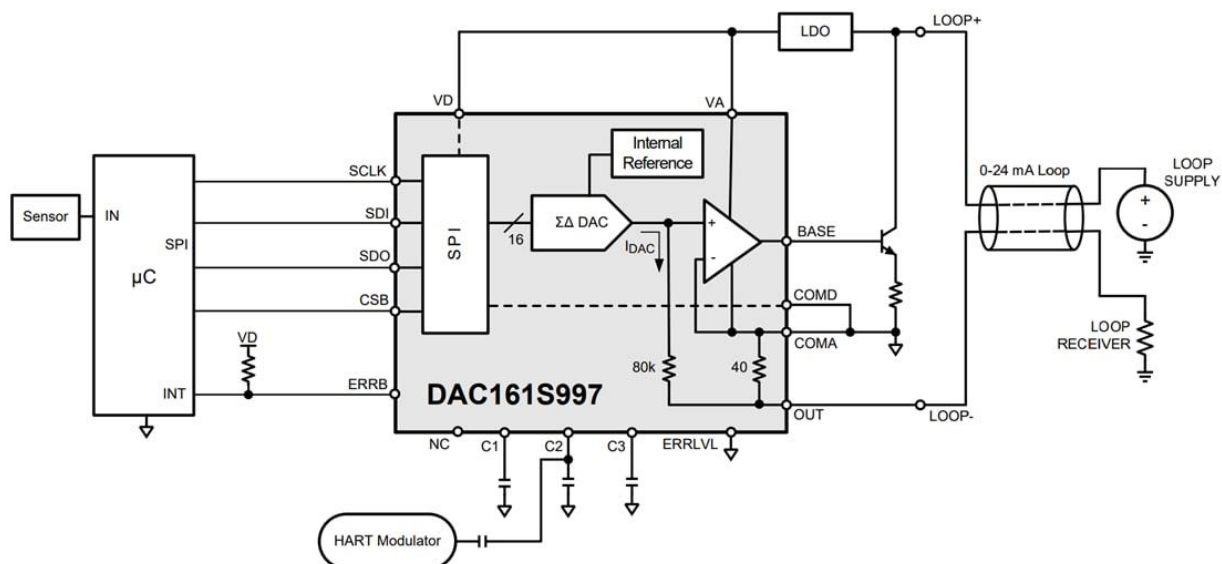


Рисунок 3.6 — Сигма-Дельта ЦАП

Після отримання цифрових даних через SPI, вони обробляються цифровою схемою ЦАП. Ця схема включає реєстри для зберігання вхідних даних та логіку для управління перетворенням. Цифрова схема також може включати функції керування, такі як автоматичне відновлення (auto-calibration) для підтримки точності перетворення.

Основний блок ЦАП — це цифроаналоговий перетворювач, який перетворює цифрові дані в аналоговий сигнал. ЦАП використовує R-2R лінійний перетворювач, який забезпечує високу точність та лінійність. R-2R лінійний перетворювач складається з резисторів, які формують бінарну схему, де кількість резисторів відповідає кількості бітів розрізнення (16 біт для DAC161S997).

Вихідний буфер ЦАП забезпечує п'ятиточковий вихідний струм (5 mA), що дозволяє підключати широкий спектр навантажень. Вихідний буфер може бути налаштований на різні режими роботи, включаючи буферовані та небуферовані вихідні сигнали. Цей буфер також забезпечує стабілізацію вихідного сигналу, що зменшує вплив навантаження на якість сигналу.

Процес перетворення цифрового сигналу в аналоговий в DAC161S997 включає наступні етапи: цифрові дані передаються в ЦАП через SPI інтерфейс і зберігаються у реєстрах цифрової схеми. Цифрові дані обробляються цифровою схемою, яка може включати автоматичне відновлення для підтримки точності

перетворення. Цифрові дані передаються до R-2R лінійного перетворювача, який перетворює їх в аналоговий сигнал. Вихідний буфер стабілізує аналоговий сигнал, забезпечуючи його стабільність та точність. Стабілізований аналоговий сигнал виводиться з ЦАП для подальшого використання в системі [17].

Також можна розглянути схему однобітного ЦАП CS4390 на рисунку 3.7.

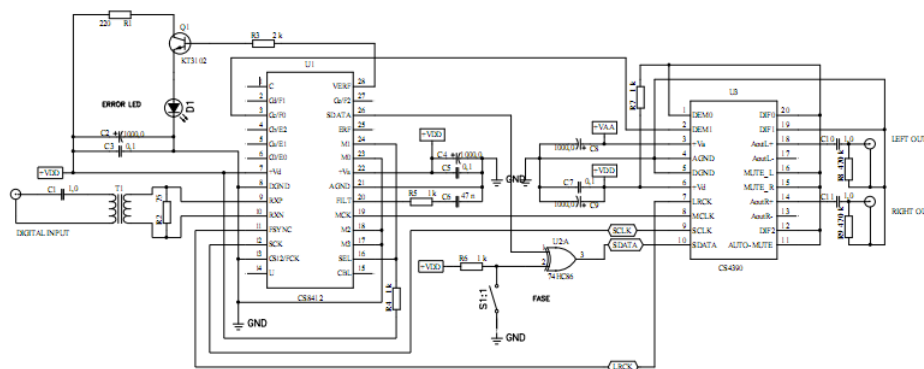


Рисунок 3.7 — Схема CS4390

Конфігурація схеми включає резистори, електролітичні та керамічні конденсатори, а також трансформатор для цифрового сигналу. Для забезпечення оптимальної роботи всі з'єднання загального провідника (GND) повинні здійснюватися в одній точці, наприклад, на виході мікросхеми U2. Потрібно використовувати максимально короткі сполучення, особливо для елементів, що пов'язані з вхідним цифровим сигналом та виходами мікросхем. Електролітичні конденсатори разом з керамічними повинні розташовуватися близько до виходів живлення мікросхем, з мінімальними проводами. Додаткові конденсатори повинні підключатися безпосередньо до виходів живлення мікросхеми U2, а її виходи повинні бути з'єднані між собою. Велика ємність електролітичних конденсаторів та їх кількість забезпечують формування фронту цифрового сигналу з високою крутизною, що є важливим для зменшення джиттера. Керамічні конденсатори, в свою чергу, очищають живлення від цифрових завад.

Основні переваги схеми полягають в її простоті та зрозумілості. Потрібно використовувати окремі стабілізатори для цифрової та аналогової частин схеми, які розділені фільтром, складеним з елементів C1, L1, C2, C3. Найкращі результати досягаються за допомогою стабілізаторів серії LM317 з відповідними резисторами,

оскільки вони мають ширший частотний діапазон, менші внутрішні шуми та більш стабільну реакцію на імпульсне навантаження, порівняно з 7805.

При наявності імпульсних завад на живленні, схеми з глибоким зворотним зв'язком можуть викликати затухаючі коливання, що негативно впливає на роботу. Тому для цифрових схем кращим варіантом є використання схем на дискретних елементах без зворотних зв'язків. Високий вихідний опір таких схем перекладає відповідальність за боротьбу з імпульсними завадами на шунтуючі конденсатори.

Кожному виходу живлення цифрових мікросхем слід використовувати окремий стабілізатор з елементами розділення по живленню. Наприклад, у ЦАП серії «MARKAN» для кожного виходу живлення використовуються окремі стабілізатори, випрямляч з додатковою фільтрацією та окрема обмотка мережевого трансформатора. Для живлення цифрової та аналогової частин схеми використовуються окремі мережеві трансформатори. У нашому випадку використовується схема, зображена на рисунку 3.8, де в випрямлячі краще використовувати діоди Шоттки.

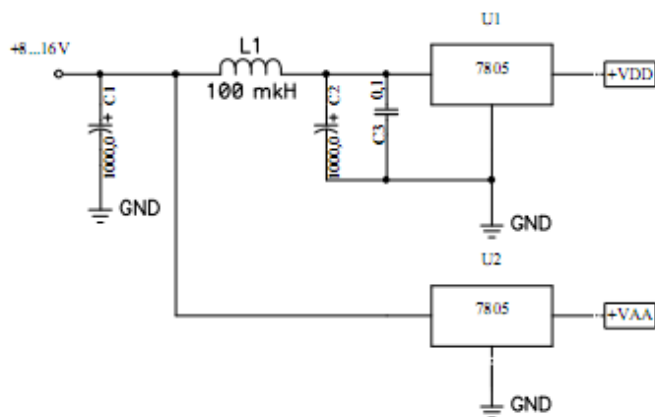


Рисунок 3.8 — Стабілізатор живлення

На ній ми можемо бачити наступні елементи

—8-розрядний LSB Array відповідає за мінімальні значні біти (LSB) вихідного сигналу. Цей масив дозволяє точно вимірювати та калібрувати мінімальні зміни вихідного сигналу, що забезпечує високу точність перетворення. Важливість цього елемента полягає в тому, що він дозволяє системі відстежувати незначні відхилення, що є критичним для стабілізації напруги.

—6-розрядний MSB Array відповідає за максимальні значні біти (MSB) вихідного сигналу. Цей масив дозволяє точно вимірювати та калібрувати значні зміни вихідного сигналу, що забезпечує стабільність та точність перетворення. Важливість цього елемента полягає в тому, що він дозволяє системі відстежувати значні зміни напруги, що є важливим для надійної роботи системи.

—16-розрядний компаратор (CALADC) використовується для порівняння вхідного сигналу з опорною напругою. Цей компаратор відіграє ключову роль в процесі калібрування, забезпечуючи точні вимірювання для корекції помилок. Важливість цього елемента полягає в тому, що він дозволяє точно визначати відхилення вихідного сигналу від опорної напруги, що є основою для калібрування.

—Контролер калібрування управляє процесом калібрування, використовуючи дані, отримані від компаратора. Контролер зберігає калібрувальні дані в пам'яті (RAM) для подальшого використання. Важливість цього елемента полягає в тому, що він забезпечує постійну точність та стабільність системи, використовуючи збережені калібрувальні дані для корекції помилок.

—Опорна напруга (VREF) — це стабільна опорна напруга, яка використовується для калібрування та перетворення сигналів. Ця опорна напруга дозволяє здійснювати точні вимірювання та порівняння вхідного сигналу. Важливість цього елемента полягає в тому, що стабільна опорна напруга є ключовим елементом для точності всіх вимірювань та перетворень.

—Земля (GND) забезпечує посилення на нульову напругу для всіх компонентів схеми, що забезпечує стабільність роботи системи, виключаючи можливість впливу зовнішніх шумів та збурень

Компаратор порівнює вихідний сигнал ЦАП з опорною напругою, а контролер калібрування використовує ці дані для корекції вихідного сигналу, забезпечуючи високу точність перетворення. [18]

4 ТЕСТУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ

4.1 Моделювання підсилювача струму

Для систем вимірювання низькочастотних трактів критично важливою є наявність підсилювача струму. На основі проведених досліджень було вибрано його оптимальну з точки зору лінійності структуру (ДППС). Особливістю цього підходу є використання відбивачів струму (ВС), які ефективно виділяють приріст струму, протікаючого через вхідний каскад [19]. Структура включає в себе роботу Азарова О.Д. та Богомоллова С.В. “Перетворювачі струм-напруга та напруга-напруга на базі двотактних підсилювачів струму” [20].

Функціональна схема організації вхідних каскадів підсилювача представлена на рисунку 4.1.

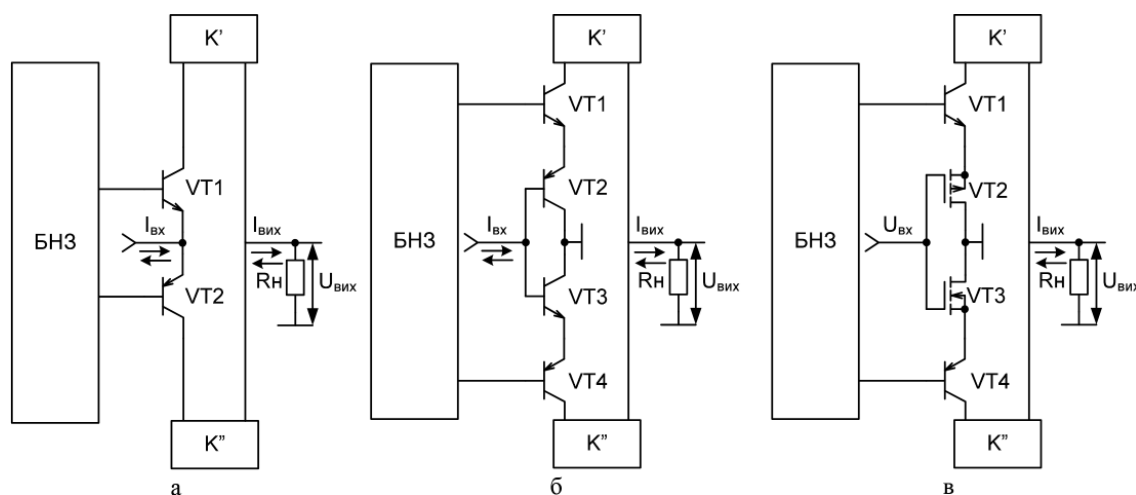


Рисунок 4.1 — Структурно-функціональна організація вхідних каскадів ДППС: а) з низьким; б) з середнім; в) з високим вхідними опорами

Дані структури ДППС базуються на вхідних каскадах, які можуть бути реалізовані як самодоповнювальні схеми з загальною базою, двотактні підсилювачі-фазорозщеплювачі вхідного струму на біполярних транзисторах, або двотактні підсилювачі-фазорозщеплювачі вхідної напруги на комплементарних полівих транзисторах. Для підтримки режиму постійного струму в цих системах використовується блок напруги зміщення (БНЗ). K' і K'' позначають коефіцієнти передачі верхнього та нижнього каналів підсилення [21].

Схема підсилювача струму складається з кількох ключових елементів. Для

задання струму робочої точки (Q-точки) використовується резисторне ділення напруги (рис. 4.2), яке забезпечує стабільний струм бази для біполярного транзистора (БПТ) або відповідний напругу ворота для полевого транзистора (МПТ). Це ділення може бути доповнене діодами або стабілізаторами напруги для подальшої стабілізації.

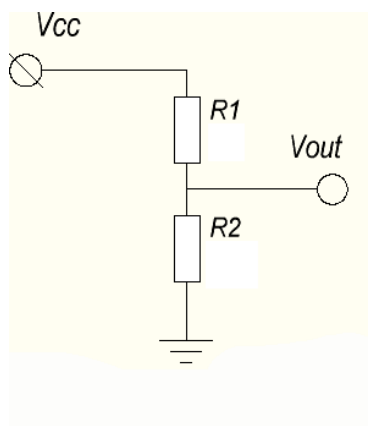


Рисунок 4.2 — Подільник напруги

Наступним етапом розробки був аналіз роботи схеми в програмному середовищі MicroCap 9.0 та визначення ключових статичних і динамічних характеристик, які є важливими для використання підсилювача як операційного підсилювача (ОП) для генератора аналогових сигналів. Для цього було обрано схему інвертуючого підсилювача з коефіцієнтом передачі 1.

Після запуску програми MicroCap було створено новий проєкт, і побудовано схему інвертуючого підсилювача з резисторами на вході та відгуківій ланцюзі, що забезпечують коефіцієнт передачі 1. Після побудови схеми було обрано опцію "AC Analysis" (АЧХ аналіз) в вкладці "Analysis" (Аналіз) для проведення амплітудно-частотного та фазочастотного аналізу (рис. 4.3).

У вікні налаштувань (рис. 4.4) були задані параметри для аналізу, включаючи діапазон частот та точки вимірювання. Після заповнення всіх необхідних даних було запущено аналіз, і програма автоматично провела обчислення та вивела результати на графіки.

На графіку АЧХ було визначено, як коефіцієнт підсилення змінюється відносно частоти входного сигналу. На графіку ФЧХ було визначено, як фазове

зміщення вихідного сигналу змінюється відносно частоти входного сигналу. Ці графіки дозволили визначити ключові характеристики підсилювача, такі як гранична частота, коефіцієнт підсилення на різних частотах, фазове зміщення та смуга пропускання.

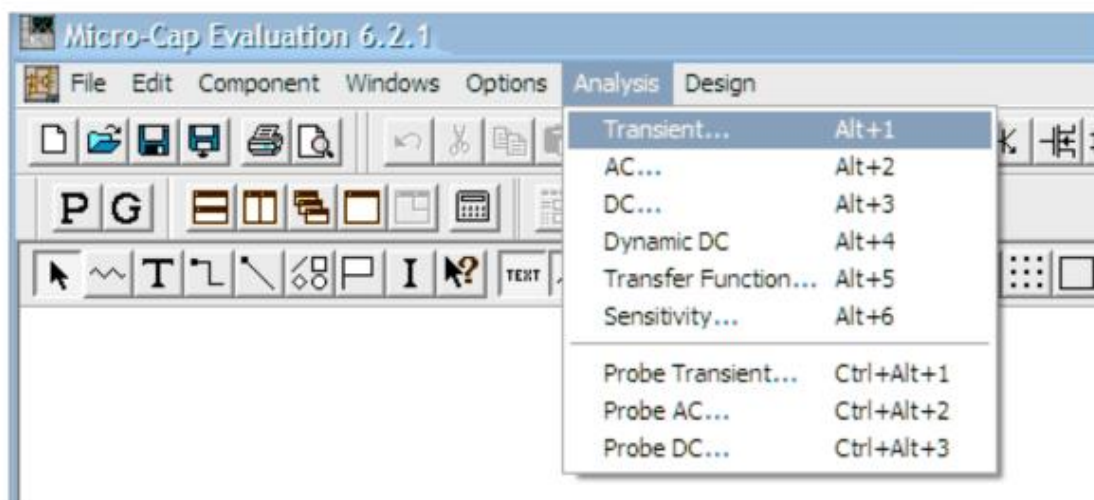


Рисунок 4.3 — Моделювання схеми вбудованими засобами Micro-Cap

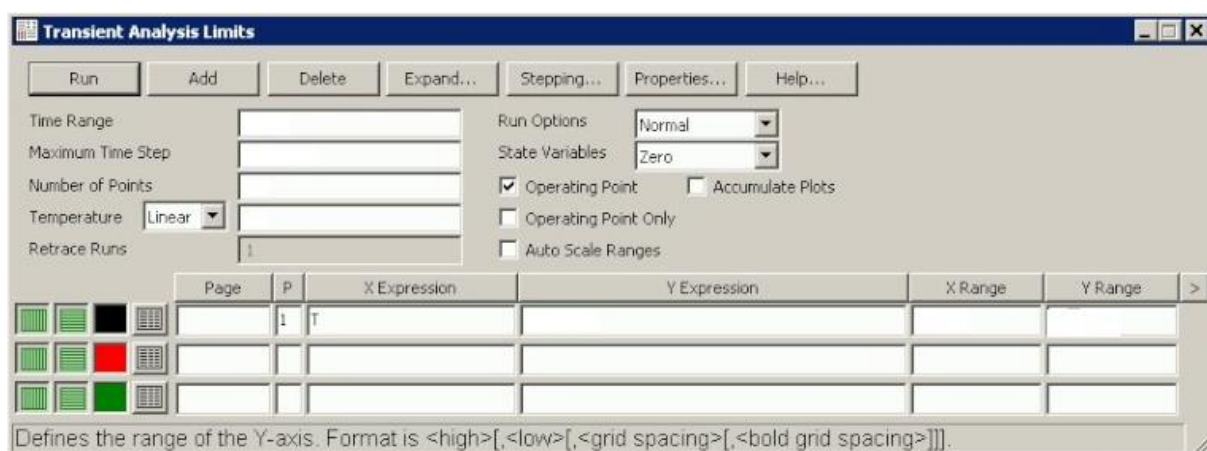


Рисунок 4.4 — Вікно введення даних для АЧХ характеристики

Згідно запропонованої функціональної схеми підсилювача було запропоновано його принципову схему, що наведено на рисунку 4.5.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) демонструє, як коефіцієнт підсилення підсилювача змінюється відносно частоти входного сигналу. При зменшенні опору навантаження від 10 кОм до 1 кОм, а потім до 100 Ом, можна спостерігати, що коефіцієнт підсилення зберігається стабільним на низьких

частотах, але швидше спадає на високих частотах. Це означає, що підсилювач стає більш швидким, оскільки він може ефективно працювати на вищих частотах.

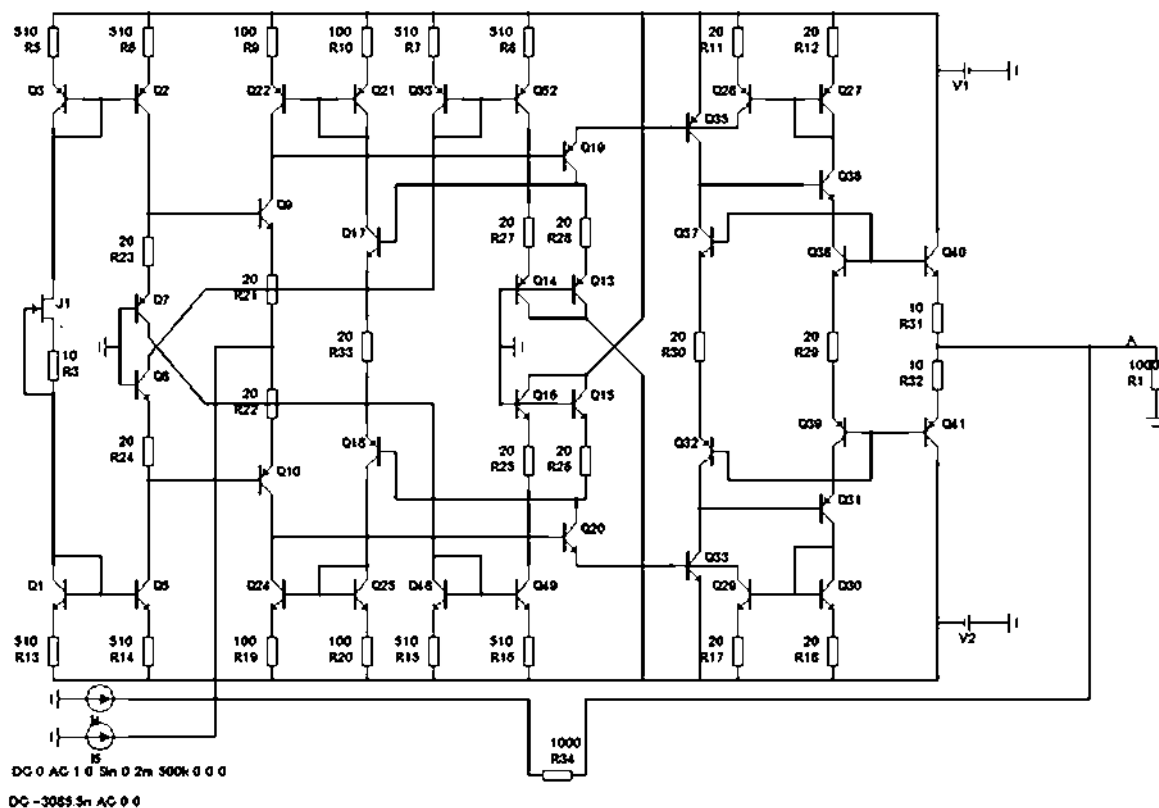


Рисунок 4.5 — Принципова схема підсилювача струму за патентом Азарова О. Д., та Генеральницького Є. С. “Буферний каскад” МПК H03F 3/26. № 202000203 [22]

Причина цього полягає в тому, що паразитні ємності та індуктивності, які присутні в схемі, значно впливають на частотну характеристику. Зі збільшенням опору навантаження, ці паразитні елементи стають більш відчутними, що призводить до зниження швидкодії підсилювача. Паразитні ємності можуть збільшувати час постійності схеми, що зменшує її здатність швидко реагувати на зміни входного сигналу. Аналогічно, паразитні індуктивності можуть створювати додаткові впливи, які затримують передачу сигналу, особливо на високих частотах. Це призводить до того, що коефіцієнт підсилення швидше спадає зі зростанням частоти.

Фазочастотна характеристика (ФЧХ) (рис. 4.6) показує залежність фазового зміщення вихідного сигналу від частоти входного сигналу. З графіку видно, що

фаза змінюється з частотою, і при певних умовах може досягати критичного значення -180° . Підсилювач буде стабільно працювати, поки фаза не перевищить цей поріг. Графік ФЧХ показує, що гранична частота, при якій фаза досягає -180° , дорівнює приблизно 5 МГц. Коефіцієнт підсилення в цій точці варіюється від 25 до 45 дБ, залежно від опору навантаження. Це означає, що при цій частоті підсилювач все ще може підсилювати сигнал, але фаза вже досягає критичного значення, що може призвести до нестійкості, якщо фаза продовжуватиме змінюватися.

Для визначення смуги пропускання підсилювача потрібно проаналізувати його амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) і знайти частоту, при якій коефіцієнт підсилення знизиться на 3 дБ. Ця частота визначається як гранична частота, при якій підсилювач все ще ефективно працює. На рисунку 4.7 ця частота може бути визначена як точка, де коефіцієнт підсилення спадає на 3 дБ від максимального значення. Це дозволяє точно визначити смугу пропускання підсилювача, що є важливим параметром для оцінки його ефективності та стабільності на різних частотах.

Реакція схеми на амплітудні імпульси є важливим аспектом для оцінки її динамічних характеристик. Для аналізу реакції схеми на амплітудні імпульси було додано до схеми джерело амплітудних імпульсів, таке як пульсовий генератор. Задані параметри імпульсу, такі як амплітуда, частота повторення та тривалість імпульсу.

Після побудови схеми було обрано опцію “Transient” у вкладці "Analysis" (Аналіз). У вікні налаштувань були задані параметри аналізу, такі як час симуляції та кількість точок.

На графіку транзитного аналізу було видно, як схема реагує на амплітудні імпульси. Особлива увага була звернена на час постійності, перерегулювання та форму вихідного сигналу. Час постійності визначав, скільки часу потрібно схемі, щоб досягти стабільного стану після входного імпульсу. Перерегулювання вказувало на надмірне підсилення вихідного сигналу, що могло бути від'ємним фактором для стабільності схеми.

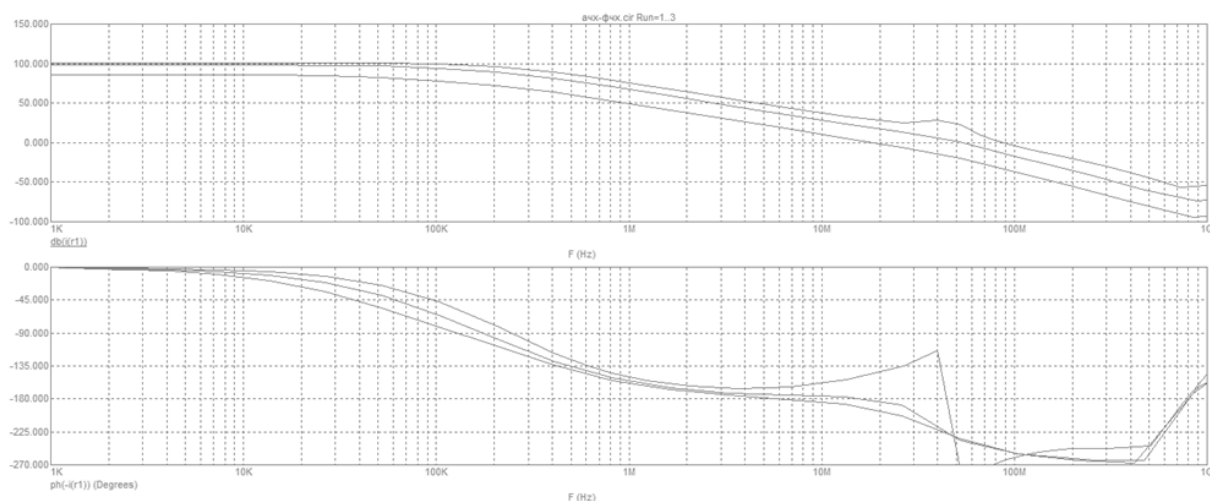


Рисунок 4.6 — АЧХ та ФЧХ підсилювача при навантаженнях 10, 100 та 1000 Ом

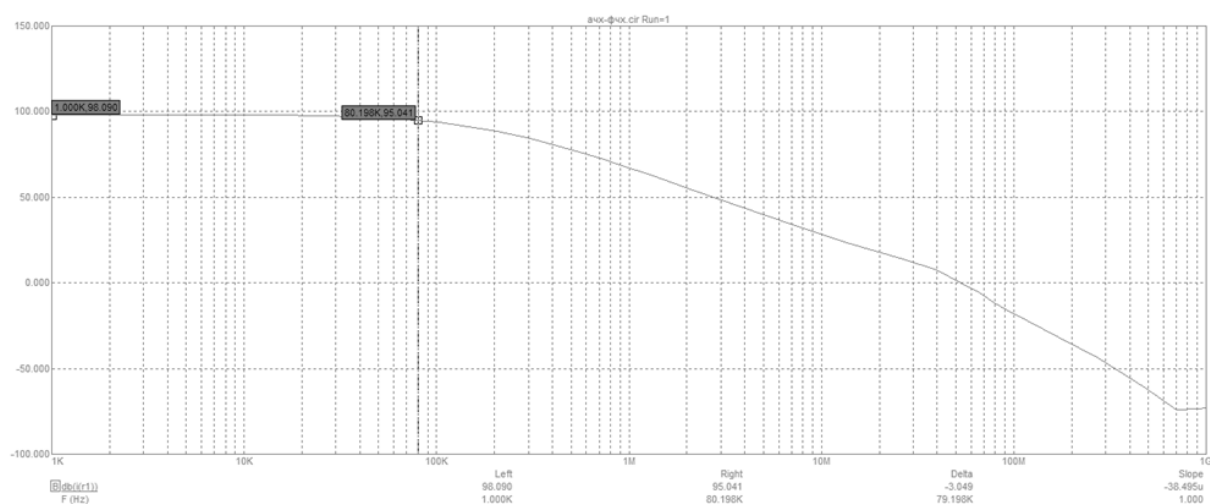


Рисунок 4.7 — АЧХ підсилювача, визначення смуги пропускання

Проаналізуємо реакцію схеми на прямокутні імпульси. Результати моделювання представлені на рисунку 4.8.

Результати показують, що перерегулювання майже відсутнє, а передній і задній фронти сигналу практично збігаються, що свідчить про високу збалансованість схеми. Швидкість наростання вихідного сигналу досягає 875 В/мкс, що є значною величиною.

4.2 Розрахунок передатної характеристики

На рисунку 4.9 представлена передатна характеристика підсилювача при великих сигналах. Ця характеристика ілюструє ступінь спотворення сигналу при значному підсиленні вхідного сигналу.

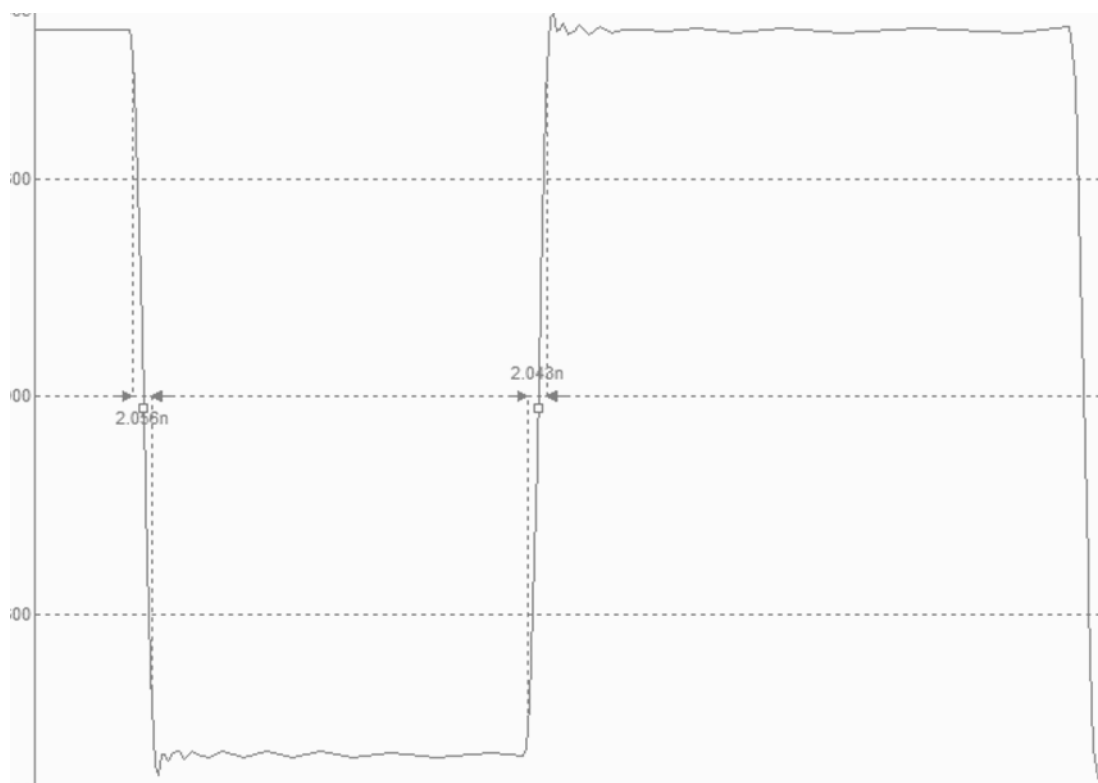


Рисунок 4.8 — Реакція схеми на прямокутні імпульси з визначеними фронтами

Характеристика паралельна нарисованій лінії, що свідчить про рівне підсилення верхнього і нижнього каналів. Це вказує на високу симетрію та стабільність схеми, що є важливим фактором для забезпечення точності та надійності підсилювача.

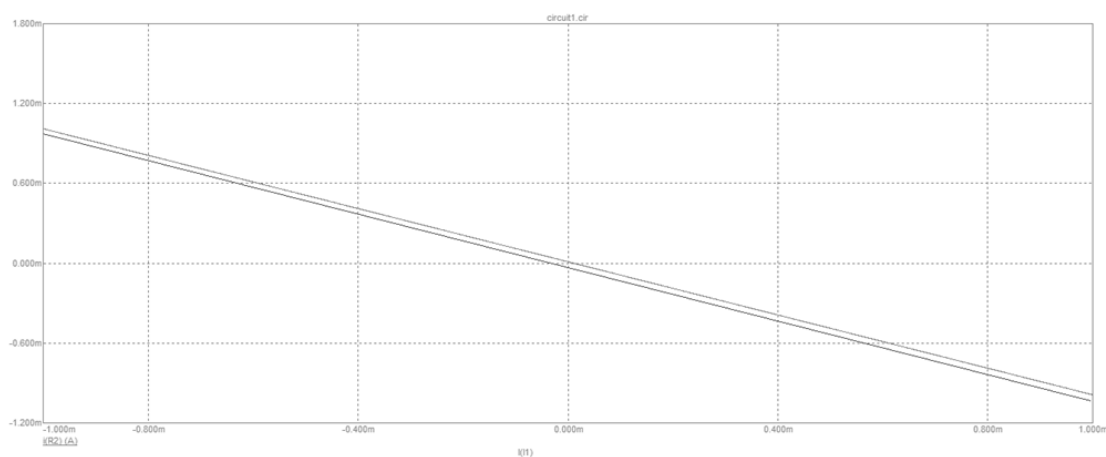


Рисунок 4.9 — Передатна характеристика підсилювача в зоні великого сигналу

При виготовленні друкованої плати макету підсилювача важливо використовувати якісні матеріали, такі як FR-4, для забезпечення надійності та стабільності експлуатації. FR-4 є одним з найпоширеніших матеріалів для

друкованих плат через його високу відпорність до тепла, хімічну стійкість та здатність робити точні та надійні електричні з'єднання. Цей матеріал забезпечує стабільність експлуатації і продовжує термін служби схеми.

Розділення полігонів для різних земель і живлень допомагає уникнути взаємних засмічувань і забезпечує чистоту сигналів. Аналогові та цифрові землі повинні бути розділені і з'єднані лише в одній точці, що зазвичай розташовується близько до живлення. Це мінімізує вплив цифрових шумів на аналогові сигнали.

Потрібно враховувати частотні обмеження пасивних компонентів і провідників, оскільки вони можуть значно вплинути на характеристики схеми, особливо в високочастотному діапазоні. Паразитні ємності та індуктивності, які з'являються в провідниках і компонентах, можуть призвести до нестійкості та змін коефіцієнту підсилення. Вибір компонентів з низькими паразитними характеристиками та оптимізація розміщення елементів на платі допоможуть мінімізувати ці впливи.

У високошвидкісних схемах слід уникати вертикального розміщення пасивних елементів, оскільки це може призвести до виникнення паразитних ефектів. Вертикальні провідники та елементи можуть створювати додаткові паразитні індуктивності, що знижує якість передаваного сигналу. Для мінімізації цих ефектів рекомендується використовувати компоненти для поверхневого монтажу, які мають менші розміри та зменшують паразитні ефекти.

Провідники повинні бути короткими, щоб мінімізувати вплив паразитних елементів. Короткі провідники зменшують паразитні ємності та індуктивності, що позитивно впливає на стабільність і якість сигналів. Якщо потрібна велика довжина провідника, слід зменшити його ширину, щоб уникнути зайвих індуктивностей. Вузькі провідники мають менші індуктивності, що зменшує вплив паразитних ефектів.

Невикористовувані виводи активних компонентів повинні бути правильно підключеними, щоб уникнути небажаних ефектів, таких як паразитне підсилення або шум. Непідключений вивід може створювати непередбачені ефекти, такі як відкрите коло, що призводить до збільшення шуму або нестійкості. Для мінімізації

цих проблем невикористовувані виводи слід під'єднувати до землі або до відповідного живлення.

Аналогова частина схеми повинна розміщуватися близько до роз'єму живлення, щоб мінімізувати вплив живлення на сигнальні ланцюги. Це допомагає зменшити вплив живлення на чутливі аналогові сигнали, що позитивно впливає на якість передаваного сигналу. Розміщення аналогової частини близько до живлення забезпечує стабільність живлення та мінімізує вплив шуму.

Провідники, передаючі логічні сигнали, не повинні перетинатися з аналоговою областю, оскільки це може призвести до засмічування сигналів. Логічні сигнали часто мають високу частоту і амплітуду, що може створювати шум, який впливає на аналогові сигнали. Розміщення логічних провідників подалі від аналогових ланцюгів мінімізує ці проблеми.

Провідники, що підходять до інвертуючого входу операційного підсилювача (ОП), повинні бути короткими, щоб зменшити паразитні ємності та індуктивності. Короткі провідники мінімізують вплив паразитних елементів, що позитивно впливає на стабільність і точність підсилювача. Довгі провідники можуть створювати додаткові паразитні ємності та індуктивності, що призводить до зниження якості сигналу.

Провідники інвертуючого і неінвертуючого входів ОП не повинні розташовуватися паралельно на великій відстані, щоб уникнути взаємного засмічування. Паралельне розташування провідників може створювати взаємну ємність, що призводить до засмічування сигналів. Розташування провідників під кутом або вдала від один одного мінімізує цей вплив. Застосування зайвих перехідних отворів варто уникати через їх власну індуктивність, яка може призвести до виникнення додаткових проблем. Провідники не повинні розводитися під прямими кутами, їх кути слід згладжувати, щоб уникнути виникнення електромагнітних емісій та паразитних ефектів.

У окремих випадках можна додати послідовно включені резистори малого опору або індуктивності, щоб ще більше знизити шум і перешкоди. Послідовні резистори малого опору можуть бути використані для стабілізації живлення та

зменшення впливу шумів, що передаються по лінії живлення. Ці резистори додають створюють додатковий опір, що зменшує швидкість зміни потоку струму, що, в свою чергу, мінімізує вплив шумів. Вони також допомагають згладити пульсації живлення, що веде до більш стабільної роботи активних компонентів, таких як операційні підсилювачі та інтегральні схеми.

Послідовні індуктивності можуть бути використані для подавлення високочастотних шумів, особливо в схемах, де потрібна додаткова фільтрація. Індуктивності створюють опір для високочастотних сигналів, що дозволяє ефективно фільтрувати високочастотні шуми та перешкоди. Це особливо важливо для схем, де високочастотні шуми можуть значно впливати на якість сигналу, особливо на високих частотах. Індуктивності також можуть використовуватися для стабілізації живлення, забезпечуючи більш чисте живлення для елементів схеми [23].

ВИСНОВКИ

У процесі виконання дипломної роботи на тему "Високоточний генератор низькочастотних сигналів на основі самокаліброваного ЦАП" було проведено комплексне дослідження актуальності цього напрямку. Було встановлено, що високоточні генератори низькочастотних сигналів є ключовим елементом для сучасних систем, таких як медичне обладнання, індустриальні контролери та телекомунікаційні системи. Це дозволило зрозуміти, як важливі вони для підвищення якості та надійності таких систем.

Було розглянуто складність та багатоетапність процесу розробки високоточних генераторів низькочастотних сигналів. Аналіз показав, що використання сучасних технологій та алгоритмів, особливо таких як самокалібрований ЦАП, є важливим кроком для підвищення якості та надійності генерованих сигналів. Це не лише сприяє оптимізації процесу розробки, але й забезпечує значний приріст в точності та стабільності сигналів, що критично важливо для різних застосувань.

Було проведено аналіз існуючих підходів до генерації низькочастотних сигналів та виконано огляд вже існуючих програмних засобів та технологій. Також було обрано та обґрунтовано технології для розробки генератора. В результаті було розроблено та протестовано модель пристрою.

Отже, всі завдання, зазначені в роботі, виконано, а мету роботи, що полягає в створенні високоточного генератора низькочастотних сигналів на основі самокаліброваного ЦАП — досліджено.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Азаров О. Д. Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення: монографія. Вінниця : ВНТУ, 2004. 257 с.
2. Крупельницький Л. В., Азаров О. Д. Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів : монографія; під заг. ред. О. Д. Азарова. Вінниця : УНІВЕР-СУМ-Вінниця, 2005. 167 с. ISBN 966-641-126-1.
3. Азаров О. Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення з ваговою надлишковістю : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2010. 232 с. ISBN 978-966-641-354-6.
4. Азаров О. Д., Богомолів С. В. Основи теорії високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних підсилювальних схем: монографія. Вінниця : ВНТУ, 2013. 142 с.
5. Galani Z., Campbell R. A. An overview of frequency synthesizers for radars. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1991. Т. 39, № 5. С. 782–790.
6. Прямий цифровий синтез (DDS). URL: <https://uk.fmuser.net/content/?12519.html> (дата перегляду: 02.05.2025).
7. High-Resolution Optical Frequency Synthesis Using an Integrated Electro-Optical Phase-Locked Loop / F. Ashtiani, P. Sanjari, M.H. Idjadi, F. Aflatouni. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2018. Т. 66, № 12. С. 5922–5932.
8. Вимірювальні генератори. Класифікація, схеми, принцип дії генераторів синусоїдальних коливань. Принцип дії та область застосування тахогенераторів. URL: <https://vseosvita.ua/lesson/vymiriuvalni-heneratory-klasyfikatsiia-skhemy-pryntsyp-dii-henerativ-synusoidalnykh-kolyvan-pryntsyp-dii-ta-oblast-zastosuvannia-takhoheneratoriv-783224.html> (дата перегляду: 22.03.2025).
9. Азаров О. Д., Кадук О. В. Багаторозрядні АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, стійкі до параметричних відмов : монографія. Вінниця, 2010. 150 с., ISBN 978-966-641-369-0.
10. Understanding and Calibrating the Offset and Gain for ADC Systems. URL:

<https://www.ti.com/content/dam/videos/external-videos/en-us/2/3816841626001/5466249277001.mp4/subassets/adcs-understanding-and-calibrating-the-offset-and-gain-for-adc-systems-presentation-quiz.pdf> (дата перегляду: 25.03.2025).

11. Sigma-delta ADCs and DACs. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/292524291525717245054923680458171AN283.pdf> (дата перегляду: 15.04.2025).

12. Білінський К.К. Електронні системи. URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/firen/6bilynskij_elektronni_systemy/44.htm (дата перегляду: 10.04.2025).

13. Аналогові та аналого-цифрові пристрої системних перетворювачів форми інформації : підручник / О. Д. Азаров, С. В. Богомолів, Л. В. Крупельницький, М. Р. Обертюх. – Вінниця : ВНТУ, 2024. –316 с.

14. DAC8811 16-Біт. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac8811.pdf> (дата перегляду: 05.04.2025).

15. Дизайн високоточного багатоканального цифрового генератора сигналів. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10716647> (дата перегляду: 15.04.2025).

16. Вимірювальні генератори сигналів низької частоти. URL: https://stud.com.ua/175364/tehnika/vimiryuvalni_generatori_signaliv_nizkoyi_chastoti (дата перегляду: 07.03.2025).

17. DAC161S997. URL: <https://www.ti.com/product/DAC161S997> (дата перегляду: 09.04.2025).

18. Азаров О. Д., Богомолів С. В. Перетворювачі струм-напруга та напруга-напруга на базі двотактних підсилювачів струму. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2011. № 2(21). С. 4–11

19. The Data Conversion Handbook, Edited by Walt Kester, Newnes, 2005, 953с., ISBN 0-7506-7841-0.

20. Азаров О. Д., Богомолів С. В. Перетворювачі струм-напруга та напруга-напруга на базі двотактних підсилювачів струму. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2011. № 2(21). С. 4–11

21. Азаров О. Д., Гарнага В. А. Двотактні підсилювачі постійного струму

для багаторозрядних перетворювачів форми інформації, що самокалібруються : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2011. 156 с. ISBN 978-966-641-435-2

22. Азаров О. Д., Генеральницький Є. С. Буферний каскад : пат. 142768 Україна : МПК H03F 3/26. № 202000203; заявл. 13.01.2020 ; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12. 7 с.

23. Теоретичні основи комп'ютерних напівпровідникових електронних компонентів : навчальний посібник / Азаров О. Д., Гарнага В. А., Сапсай Т. Г., Тарасенко В. П. Вінниця : ВНТУ, 2015. 135 с.

ДОДАТОК А**Технічне завдання**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії
Кафедра обчислювальної техніки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ОТ

д.т.н., проф. Азаров О. Д.

_____ 2025 року

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської дипломної роботи

«Високоточний генератор низькочастотних сигналів на основі
самокаліброваного ЦАП»

08-54.БКР.038.00.000 ТЗ

Науковий керівник: доцент д.т.н.

_____ Крупельницький Л.В.

Студент групи 2СП-216

_____ Шульга Д.С.

1 Підстава для виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)

1.1 Зростання вимог до точності та стабільності генераторів

низькочастотних сигналів робить актуальним розробку високоточних рішень на основі самокаліброваного ЦАП. Використання сучасних мікропроцесорних систем дозволяє створювати більш точні та надійні генератори, що відповідають вимогам сучасних наукових та промислових застосувань. Це створює потребу в дослідженні та розробці ефективних методів і алгоритмів для генерації низькочастотних сигналів з високою точністю та стабільністю.

1.2 Наказ про затвердження теми БДР.

2 Мета БКР і призначення розробки

2.1 Мета роботи — розробка високоточного генератора низькочастотних сигналів на основі самокаліброваного ЦАП. Розроблений генератор має на меті забезпечувати стабільну та точну генерацію синусоїдальних, трикутних та прямокутних сигналів в широкому діапазоні частот, що відповідає сучасним вимогам до точності та надійності.

2.2 Призначення розробки — даний високоточний генератор низькочастотних сигналів призначений для розробників та спеціалістів у сфері електроніки, які прагнуть інтегрувати надійні та точні генератори у свої проекти. Результати дослідження та розробки можуть бути використані для покращення точності та стабільності в різних застосуваннях, включаючи тестування електронних систем, калібрування приладів, наукові дослідження та промислові контролю.

3 Вихідні дані для виконання БДР

3.1 Аналіз існуючих технологій та підходів до динамічної генерації низькочастотних сигналів з використанням самокаліброваних ЦАП.

3.2 Порівняльний аналіз аналогів у розробці високоточних генераторів низькочастотних сигналів і обґрунтування вибору технологій та методів.

3.3 Розробка структурної схеми для високоточного генератора низькочастотних сигналів на основі самокаліброваного ЦАП.

3.4 На основі структурної схеми було побудовано модель високоточного генератора низькочастотних сигналів.

3.5 Тестування розробленого пристрою.

4 Вимоги до виконання БДР

Головна вимога — програмний засіб повинен забезпечувати максимальну точність генерації низькочастотних сигналів, мінімізуючи помилки та відхилення від заданих параметрів. Важливо, щоб система швидко реагувала на зміни параметрів сигналу, забезпечуючи миттєву корекцію для підтримання високої точності та стабільності.

5 Етапи БКР та очікувані результати

Етапи роботи та очікувані результати наведено у Таблиці А.1.

Таблиця А.1 — Етапи БКР

№	Назва та зміст етапу	Строк виконання етапів роботи	Очікувані результати
1.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	01.02.2025 – 14.02.2025	Аналітичний огляд літературних джерел, розділ 1 ПЗ
2.	Розробка технічного завдання	15.02.2025 – 29.02.2025	розділ 2
3.	Аналіз вирішення поставленої задачі на даному етапі	01.03.2025 – 14.03.2025	розділ 2
5.	Апробація та впровадження результатів дослідження	15.03.2025 – 31.03.2025	Тези доповіді
5.	Реалізація високоточного низькочастотного генератора сигналів	01.04.2025 – 30.04.2025	розділ 3
6.	Тестування розробленого пристрою	01.05.2025 – 15.05.2025	розділ 4
7.	Оформлення пояснювальної записки, графічного матеріалу і презентації	16.05.2025 – 19.05.2025	ПЗ, графіч. матеріал і презентація
8.	Підготовка супроводжуючих документів, їх підписування, проходження нормоконтролю та тесту на плагіат	20.05.2025-03.06.2025	Оформлені документи

6 Матеріали, що подаються до захисту БДР

До захисту подаються: пояснювальна записка БДР, ілюстративні матеріали, протокол попереднього захисту БДР на кафедрі, відгук наукового керівника, анотації до БДР українською та іноземною мовами, довідка про відповідність оформлення БДР діючим вимогам.

7 Порядок контролю виконання та захисту БДР

Виконання етапів графічної та розрахункової документації БДР контролюється науковим керівником згідно зі встановленими термінами. Захист БДР відбувається на засіданні Екзаменаційної комісії, затвердженої наказом ректора.

8 Вимоги до оформлювання та порядок виконання БДР

8.1 При оформлювання БДР використовуються:

ДСТУ 3008: 2015 «Звіти в сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання»;

ДСТУ 8302: 2015 «Бібліографічні посилання. Загальні положення та правила складання»;

міждержавний ГОСТ 2.104-2006 «Єдина система конструкторської документації. Основні написи»;

методичні вказівки до виконання бакалаврських кваліфікаційних робіт зі спеціальності 123 – «Комп'ютерна інженерія» (освітня програма «Комп'ютерна інженерія»). Кафедра обчислювальної техніки ВНТУ 2023;

документами на які посилаються у вище вказаних.

8.2 Порядок виконання БДР викладено в «Положення про кваліфікаційні роботи на першому (бакалаврському) рівні вищої освіти СУЯ ВНТУ-03.02.02-П.001.01:21

ДОДАТОК Б

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи

Назва роботи: Високоточний генератор низькочастотних сигналів на основі самокаліброваного ЦАП

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра обчислювальної техніки
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 8 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

✓ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Азаров О.Д., зав. каф. ОТ
(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Тарновський М.Г., доц. каф ОТ
(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку _____
(підпис)

Захарченко С.М.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник Крупельницький Л.В.
(підпис) (прізвище, ініціали, посада)

Здобувач Шульга Д.С.

ДОДАТОК В

Графічна частина

**ВИСОКОТОЧНИЙ ГЕНЕРАТОР НИЗЬКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ НА
ОСНОВІ САМОКАЛІБРОВАНОГО ЦАП**

ДОДАТОК Г

Ілюстративна частина

ВИСОКОТОЧНИЙ ГЕНЕРАТОР НИЗЬКОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ НА
ОСНОВІ САМОКАЛІБРОВАНОГО ЦАП

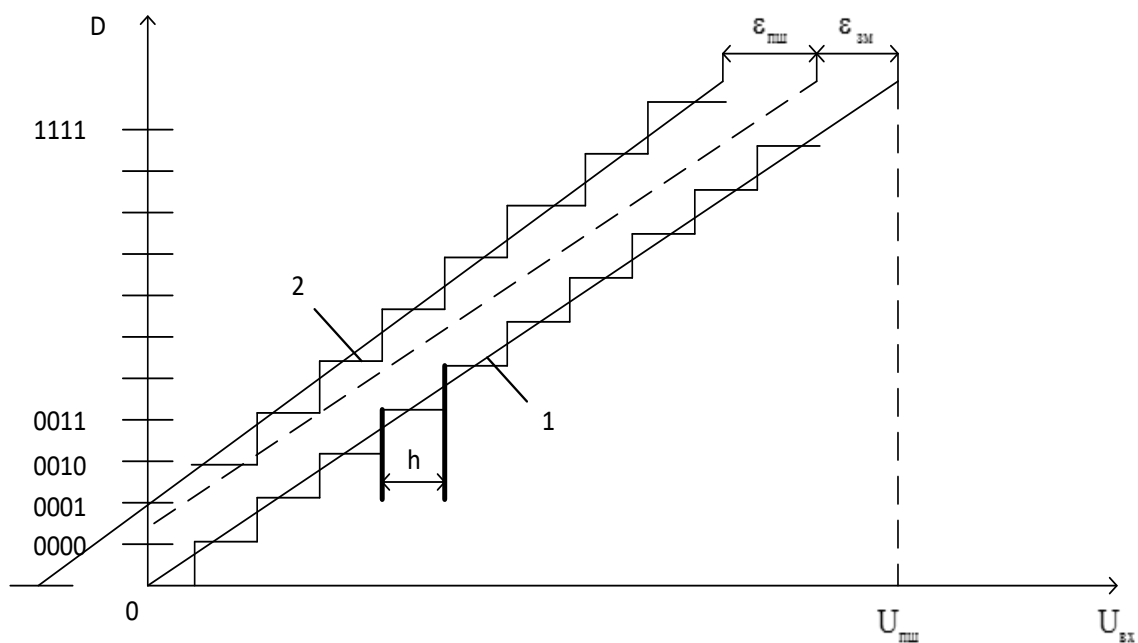


Рисунок Г.1 — Характеристика конвертації ЦАП

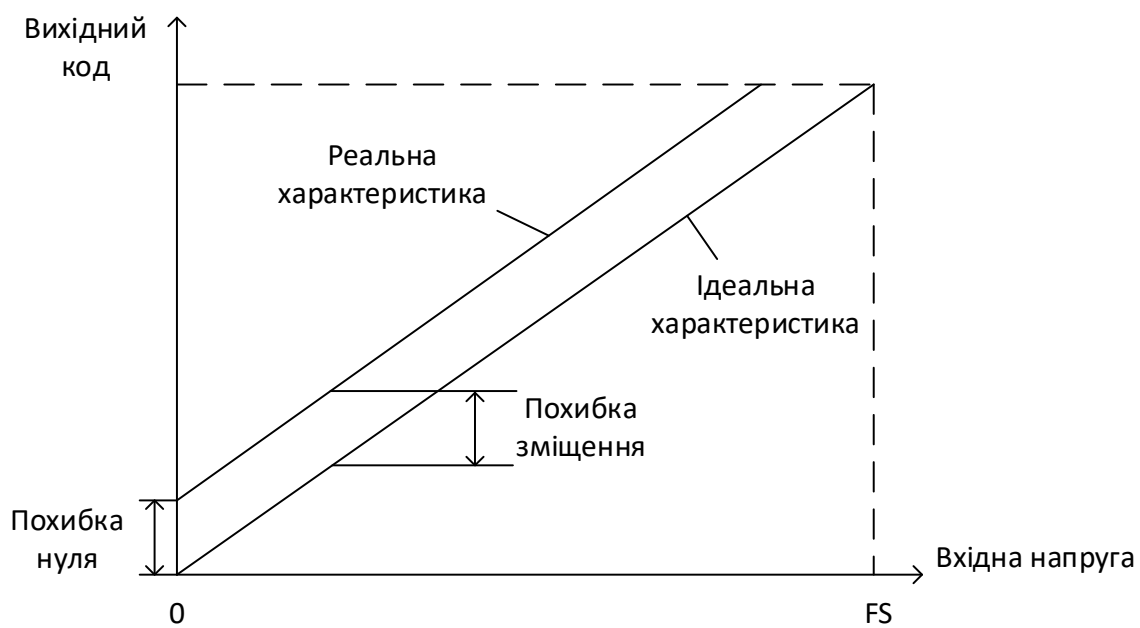


Рисунок Г.2 — Співвідношення молодших розрядів

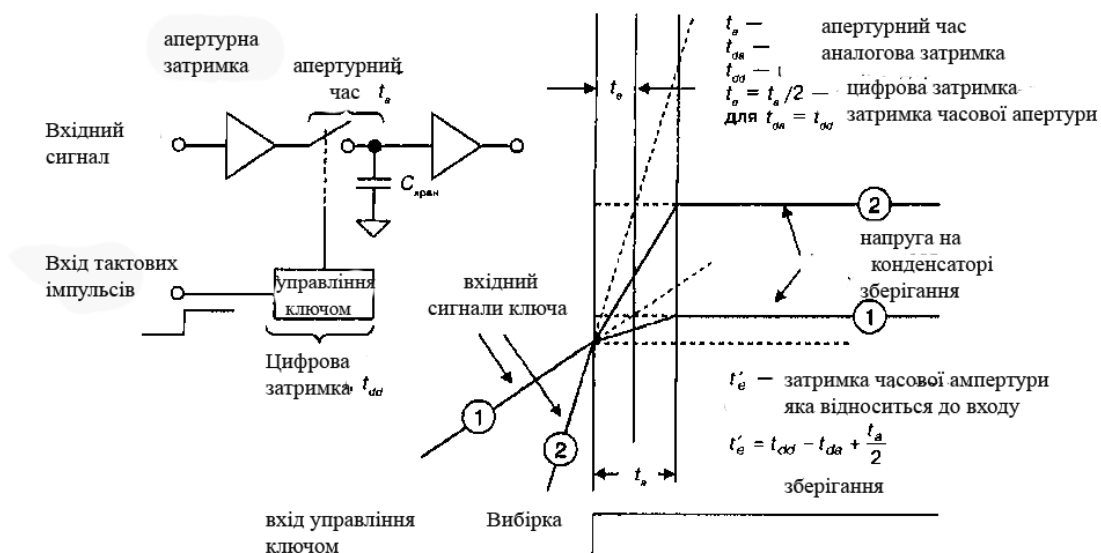


Рисунок Г.3 — Перехідний процес ПВЗ

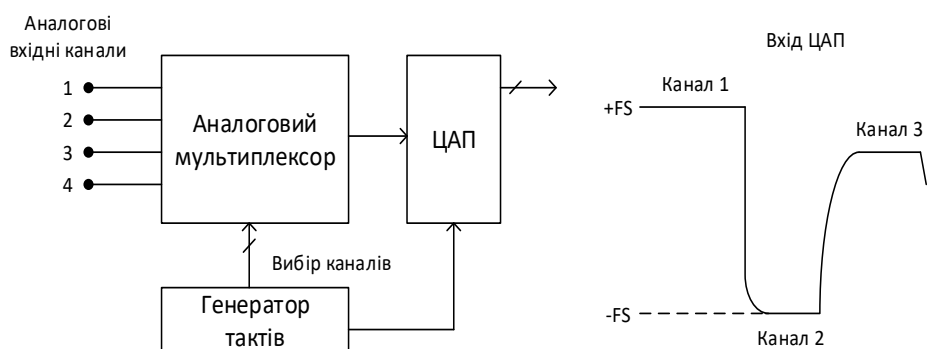
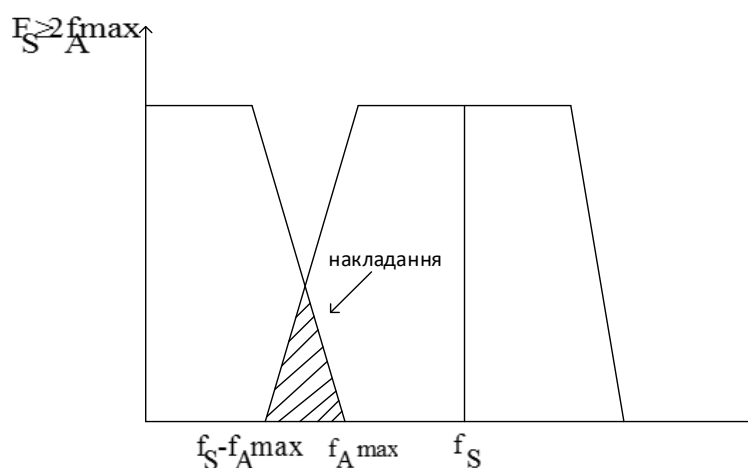


Рисунок Г.4 — Блок схема ЦАП та графік затримки апертури



б)

Рисунок Г.5 — Накладання спектрів при дискретизації

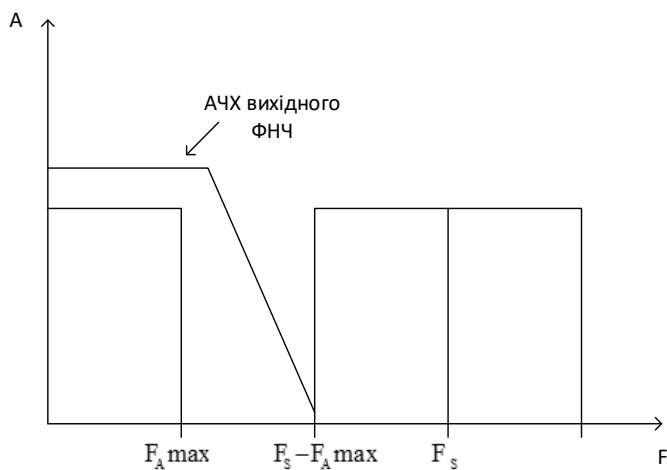


Рисунок Г.6 — Обмеження смуги сигналу фільтром низьких частот

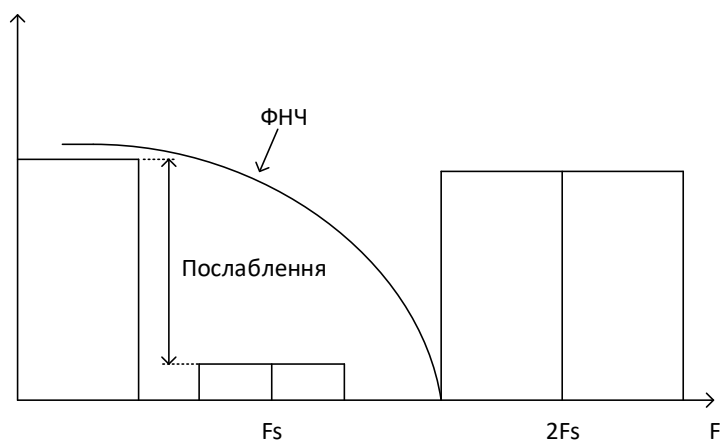


Рисунок Г.7 — Схема роботи інтерполюючого фільтру

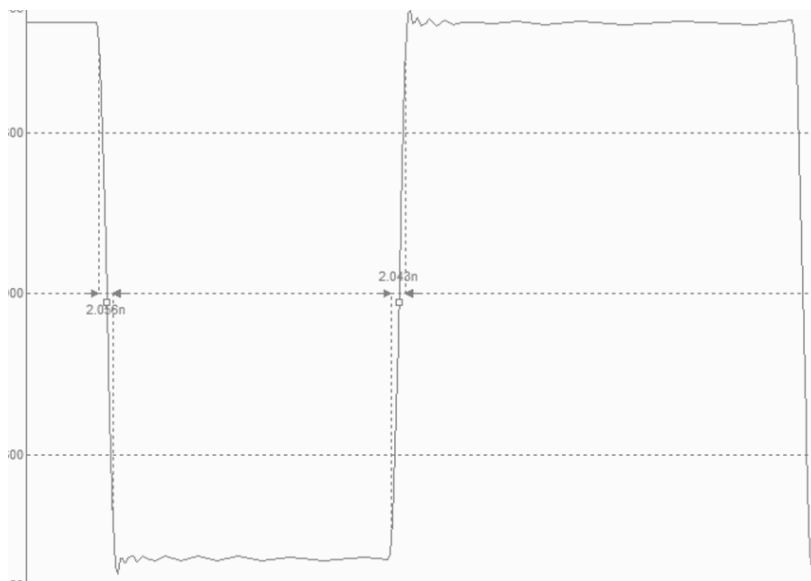


Рисунок Г.8 — Реакція схеми на прямокутні імпульси з визначеними фронтами

ДОДАТОК Д

Тестування

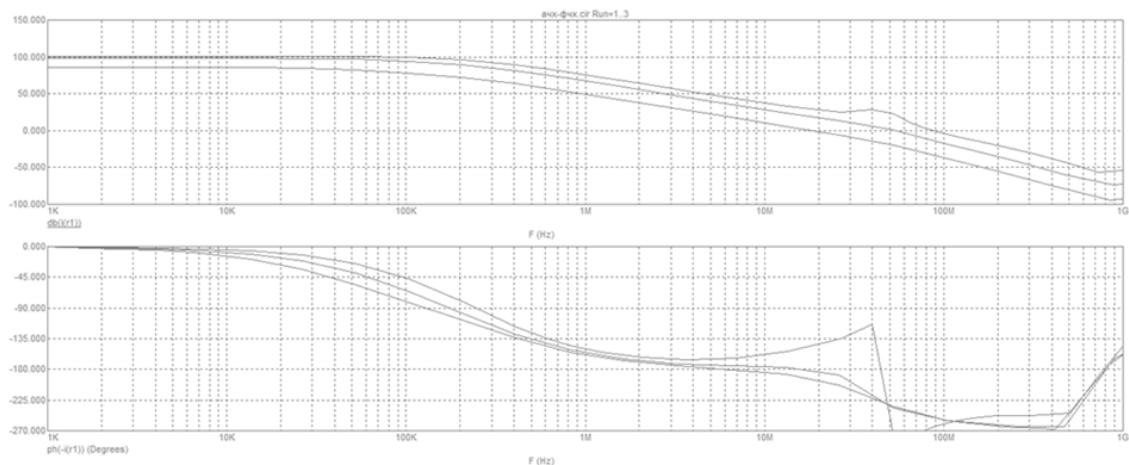


Рисунок Д.1 — АЧХ та ФЧХ підсилювача при навантаженнях 10, 100 та 1000Ом

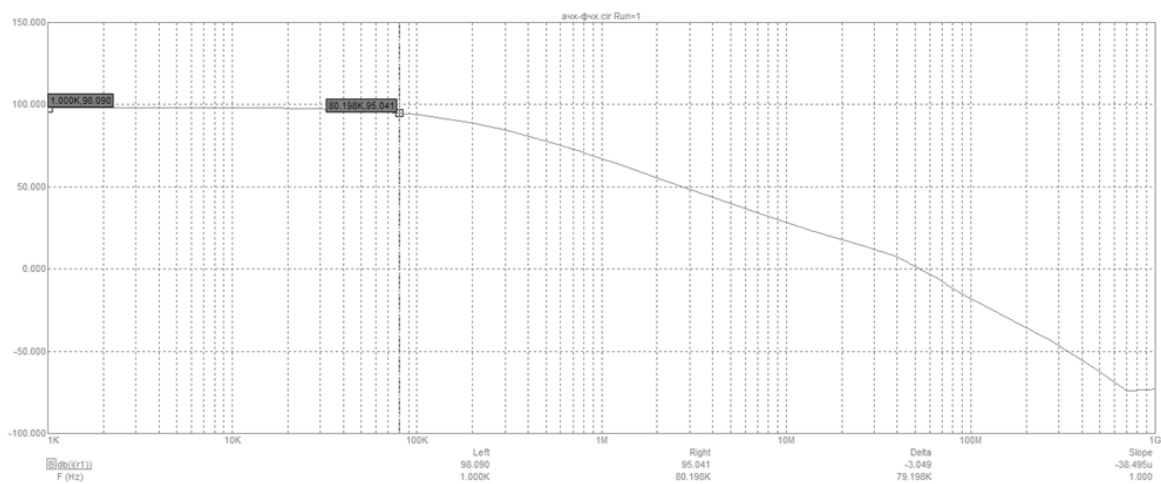


Рисунок Д.2 — АЧХ підсилювача, визначення смуги пропускання

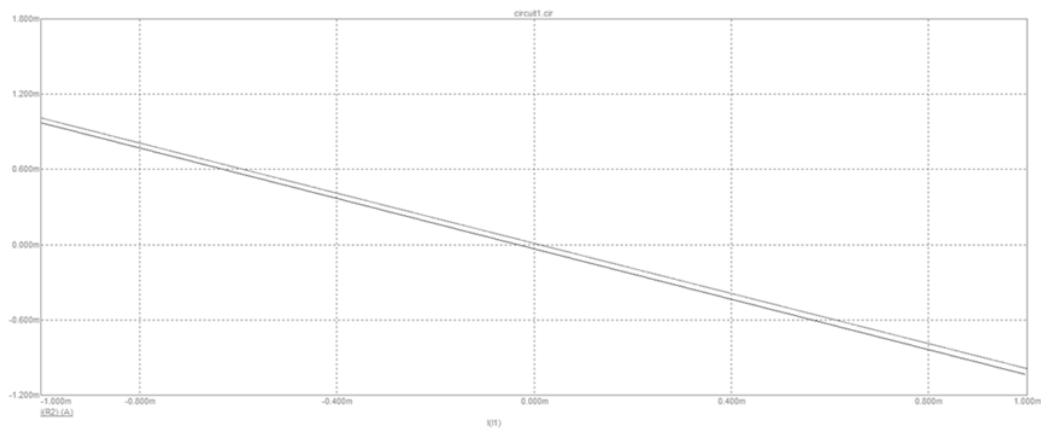


Рисунок Д.3 — Передатна характеристика підсилювача в зоні великого сигналу