

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Сумський державний університет**

Класичний фаховий коледж

(повна назва інституту/факультету)

Циклова комісія інженерних спеціальностей

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

\_\_\_\_\_

(підпис)

\_\_\_\_\_

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

\_\_\_\_\_

2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 171Електроніка

(код та назва)

освітньо-професійної програми Електронні інформаційні системи

(освітньо-професійної / освітньо-наукової)

(назва програми)

на тему: Система керування на основі секторального сенсора

Здобувача групи EI-01б

(шифр групи)

Шкуліпи Олександра Віталійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Олександр Шкуліпа

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Керівник викладач, к.ф.-м.н., доцент, Бібик В.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Консультант<sup>1)</sup>

\_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

\_\_\_\_\_

(підпис)

## АНОТАЦІЯ

Обґрунтуванням актуальності теми є огляд сучасних тенденцій у розробці систем автоматичного керування польотом на основі секторального сенсора.

Мета роботи полягає у розробці автоматичної системи керування польотом на основі секторального сенсора.

Відповідно до мети, вирішувалися такі завдання:

- огляд сучасних тенденцій у розробці систем керування;
- вибір електронно-технічної частини приладу;
- проведення розрахунків нормуючого пристрою;
- розробка електричної принципної схеми;
- написання програми керування системою на основі секторального сенсора.

Ми розробили схему системи на основі секторального сенсора та спеціальну програму для мікроконтролера, що дозволяє нам точно наводити літальний засіб на ціль, використовуючи дані, отримані від секторального сенсора. Основне призначення цієї системи - військове застосування, оскільки ми досягли високої енергоефективності, точності, ефективності та надійності.

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є компоненти системи та програма для мікроконтролера.

Предмет дослідження - система керування польотом на основі фотогальванічного секторального сенсора.

Робота викладена на 60 сторінках, у тому числі включає 17 рисунків, список цитованої літератури із 43 джерел.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** Система керування, схеми включення операційних підсилювачів, розрахунок операційних підсилювачів, види датчиків, AVR мікроконтролер, керування двигунами за допомогою мікроконтролера, секторальний сенсор, застосування секторального датчика, обробка даних за допомогою мікроконтролера, нормуючий пристрій, секторальний фотогальванічний сенсор.

**ЗМІСТ**

	С.
<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>РОЗДІЛ 1 СЕНСОРИ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	5
1.1. Поняття систем керування .....	5
1.2. Роль сенсорів у системах керування.....	6
1.3. Види сенсорів та їх застосування.....	7
1.4. Огляд сучасних тенденцій у розробці систем керування.....	19
<b>РОЗДІЛ 2 ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ СЕКТОРАЛЬНОГО СЕНСОРА</b> .....	20
2.1. Опис секторального сенсора.....	20
2.2. Будова та принцип роботи секторального фотогальванічного сенсора.....	21
2.3. Загальні відомості про операційні підсилювачі для сенсорики.....	25
2.4. Схеми включення операційних підсилювачів.....	30
<b>РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ СЕКТОРАЛЬНОГО СЕНСОРА</b> .....	43
3.1. Розрахунок нормуючого пристрою для сенсора.....	43
3.2. Розробка схеми електричної принципової .....	50
3.3. Розробка програми керування.....	52
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	55
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	57

## ВСТУП

Зв'язок між людством та технологією ніколи не був таким близьким. У моїй роботі я зосереджуватимусь на вивченні та розробці системи керування на основі секторального сенсора для літаючих пристроїв. Мета - створити технологічно продуману схему, яка допоможе таким пристроям орієнтуватися в просторі з високою точністю та ефективністю.

У моїй роботі я розглядатиму теоретичні аспекти керування на основі секторального сенсора, включаючи математичні моделі та алгоритми, які лежать в основі цієї технології. Крім того, будуть проведені практичні експерименти для перевірки ефективності розробленої системи у реальних умовах.

У роботі також буде надано огляд актуальних електронних компонентів, які можна використовувати для побудови таких пристроїв. Це включатиме в себе сенсори руху, GPS-модулі, мікроконтролери та інші компоненти, які є ключовими для успішної реалізації проекту.

Моя робота націлена на створення практичного та ефективного рішення, яке може знайти застосування у безлічі сфер, таких як дрони з автоматичним керуванням. Відчуйте співучасть з цією технологією, як я відчуваю її потенціал.

У роботі буде звернена увага на використання операційних підсилювачів для покращення точності та стабільності сигналів, що надходять від секторального сенсора. Нормуючі прилади будуть використовуватися для корекції сигналів та забезпечення їхньої відповідності вимогам системи керування.

Крім того, для обробки та аналізу даних, зібраних сенсорами, у роботі буде використаний мікроконтролер AVR, який забезпечить швидку та ефективну реакцію системи на зміни в навколишньому середовищі. Його висока продуктивність та надійність зроблять його ідеальним вибором для цього проекту, дозволяючи забезпечити оптимальну роботу системи керування в реальному часі.

## РОЗДІЛ 1

### СЕНСОРИ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

#### 1.1 Поняття систем керування

Система керування - це складна мережа компонентів та процесів, спрямованих на керування та контроль різними аспектами діяльності системи. Основні компоненти системи керування включають в себе сенсори для збору даних, актуатори для виконання конкретних дій та алгоритми обробки і аналізу цих даних.[22-24]

Ця система широко застосовується в різних галузях, включаючи виробництво, транспорт, медицину, енергетику та багато інших. Вони дозволяють автоматизувати процеси, підвищуючи ефективність та точність, зменшуючи людський вплив та ризики помилок.

Одним із ключових аспектів систем керування є їх адаптивність та здатність до самоналаштування. Це означає, що вони можуть адаптуватися до змін у вхідних даних або умовах навколишнього середовища, щоб забезпечити оптимальну роботу системи в будь-який момент часу.[25]

Основна роль систем керування полягає в тому, щоб забезпечити досягнення поставлених цілей та вимог, оптимізуючи використання ресурсів та мінімізуючи втрати. Вони дозволяють системам працювати більш ефективно та надійно, забезпечуючи їхню стабільність та високу продуктивність.

Системи керування відіграють важливу роль у технологічному прогресі, дозволяючи системам та пристроям працювати більш ефективно, надійно та автономно. Їхнє поєднання з передовими технологіями та інноваціями сприяє розвитку сучасних технологій та прискорює шлях до створення інтелектуальних систем майбутнього.[26-27]

## 1.2. Роль сенсорів у системах керування

Сенсори відіграють надзвичайно важливу роль у системах керування, які стежать за навколишнім середовищем або самою системою. Вони забезпечують важливу інформацію, перетворюючи різноманітні параметри, такі як температура, тиск, відстань, швидкість, рівень освітленості та інші, у зрозумілі електричні сигнали. Ці дані є критичними для алгоритмів керування, які аналізують їх, щоб приймати відповідні рішення.

Однією з основних функцій сенсорів є збір даних про навколишнє середовище або саму систему. Ця інформація допомагає у виборі оптимальних стратегій керування. Наприклад, у сучасних автомобілях сенсори вимірюють відстань до інших транспортних засобів, їхню швидкість, що дозволяє автоматично регулювати швидкість та відстань до них.[24]

Крім того, сенсори допомагають системам керування реагувати на зміни у середовищі або умовах роботи. Наприклад, сенсори кліматичного контролю можуть виявляти зміни в температурі або вологості та автоматично налаштовувати опалення чи кондиціонування повітря для створення комфортного середовища.

Також важливою функцією сенсорів є здатність систем керування до самоналаштування та адаптації до змін. Вони дозволяють системам реагувати на нові умови або невідомі ситуації, а також компенсувати можливі помилки чи відхилення від стандартних умов роботи.

Сенсори відіграють критичну роль у системах керування, забезпечуючи необхідну інформацію для прийняття рішень та забезпечуючи точність, надійність та адаптивність у різних умовах роботи. Вони стали невід'ємною частиною сучасних автоматизованих систем і відіграють ключову роль у технологічному прогресі та розвитку інтелектуальних систем.[26]

### 1.3 Види сенсорів та їх застосування

Сенсори, або датчики, є пристроями, які виявляють і реагують на певні фізичні, хімічні або біологічні зміни в навколишньому середовищі. Вони конвертують ці зміни в електричні сигнали, які можуть бути виміряні та аналізовані. Існує багато видів сенсорів, кожен з яких має своє застосування. Ось деякі основні види сенсорів та їх застосування:

#### 1.3.1 Температурні сенсори

Температурні сенсори є одними з найпоширеніших і найбільш важливих у різних галузях науки та техніки. Вони використовуються для вимірювання та контролю температури в різноманітних середовищах, від побутових приладів до складних промислових процесів. У цьому підрозділі ми розглянемо основні типи температурних сенсорів, їх принципи роботи та області застосування, щоб вибрати оптимальний сенсор для нашої системи.

Типи температурних сенсорів:

##### 1.3.1.1 Термопари

Принцип роботи: Термопари складаються з двох різних металів, з'єднаних на одному кінці. Коли цей з'єднаний кінець нагрівається або охолоджується, виникає термоелектричний ефект, який створює напругу, пропорційну температурі.

Застосування: Використовуються для вимірювання дуже високих або дуже низьких температур, зокрема в промислових печах, холодильниках, а також у двигунах.

##### 1.3.1.2 Терморезистори (RTD і термістори)

Принцип роботи: RTD (Resistive Temperature Detectors) змінюють свій опір пропорційно зміні температури. Вони виготовлені з чистих матеріалів, таких як платина. Термістори працюють на основі зміни опору напівпровідникових матеріалів із температурою.

Застосування: Використовуються в побутовій техніці, системах HVAC, автомобілях, де потрібне точне вимірювання температури.

### 1.3.1.2 Інфрачервоні (ІЧ) сенсори

Принцип роботи: Інфрачервоні сенсори вимірюють температуру за допомогою інфрачервоного випромінювання, яке виходить від об'єкта. Ці сенсори не потребують прямого контакту з об'єктом вимірювання.

Застосування: Використовуються для безконтактного вимірювання температури, зокрема в медичних термометрах, термографічних камерах і у виробництві.

### 1.3.1.3 Біметалеві сенсори

Принцип роботи: Біметалеві сенсори складаються з двох металів з різним коефіцієнтом теплового розширення, з'єднаних разом. При зміні температури один метал розширюється більше за інший, що призводить до вигину біметалевої смужки.

Застосування: Використовуються в термостатах, електричних обігрівачах та інших пристроях, де необхідний простий та надійний контроль температури.

## 1.3.2 Сенсори тиску

Сенсори тиску є важливими компонентами у багатьох системах та галузях, де необхідно вимірювати та контролювати тиск газів або рідин. Вони перетворюють фізичний тиск у електричний сигнал, який можна легко виміряти та проаналізувати. У цьому підрозділі ми розглянемо основні типи сенсорів тиску, їх принципи роботи та області застосування, щоб вибрати оптимальний сенсор для нашої системи.

Типи сенсорів тиску:

### 1.3.2.1 П'єзорезистивні сенсори

Принцип роботи: П'єзорезистивні сенсори використовують матеріали, які змінюють свій електричний опір при деформації під дією тиску. Ця зміна опору вимірюється і конвертується в електричний сигнал.

Застосування: Широко використовуються в автомобільній промисловості для вимірювання тиску в шинах, системах подачі палива, а також в медичних пристроях для моніторингу артеріального тиску та в авіаційних системах для вимірювання барометричного тиску.



### 1.3.2.2 Капаситивні сенсори

Принцип роботи: Капаситивні сенсори тиску працюють на основі зміни ємності між двома електродами при деформації діелектричного матеріалу під дією тиску. Ця зміна ємності перетворюється в електричний сигнал.

Застосування: Використовуються в мікроелектромеханічних системах (MEMS), приладах для моніторингу навколишнього середовища, а також в точних вимірювальних приладах.

### 1.3.2.3 Індуктивні сенсори

Принцип роботи: Індуктивні сенсори тиску використовують принцип зміни індуктивності котушки при деформації магнітного сердечника під дією тиску. Ця зміна індуктивності перетворюється в електричний сигнал.

Застосування: Використовуються в важких промислових умовах, де потрібна висока надійність і стійкість до впливу навколишнього середовища.

### 1.3.2.4 Оптичні сенсори

Принцип роботи: Оптичні сенсори тиску використовують зміну світлового потоку через оптичне волокно або інший оптичний елемент при деформації під дією тиску. Зміна інтенсивності світла перетворюється в електричний сигнал.

Застосування: Використовуються в умовах високих температур, в агресивних середовищах, а також в медичних і наукових приладах, де потрібна висока точність і надійність.

## 1.3.3 Оптичні сенсори

Оптичні сенсори використовують світлові сигнали для вимірювання різних параметрів у навколишньому середовищі. Ці сенсори можуть бути вкрай чутливими та точними, а також стійкими до різних впливів, таких як температура, вологість та електромагнітні поля. У цьому підрозділі ми розглянемо основні типи оптичних сенсорів, їх принципи роботи та різноманітність застосувань.

Типи оптичних сенсорів:

### 1.3.3.1 Фотодіоди та фототранзистори

Принцип роботи: Фотодіоди та фототранзистори перетворюють світлову енергію в електричний сигнал. Фотодіоди здатні генерувати електричні струми

при попаданні фотонів світла, тоді як фототранзистори мають підсилювальний ефект.

Застосування: Використовуються в оптичних датчиках, електроніці, освітленні, фотографії та інших сферах.

#### 1.3.3.2 Лазерні сенсори

Принцип роботи: Лазерні сенсори використовують принцип розсіяння або відбиття лазерного променя для вимірювання відстані, руху або інших параметрів.

Застосування: Використовуються в системах відстеження руху, 3D-сканерах, автомобільних радарах, медичних пристроях тощо.

#### 1.3.3.3 Оптичні волокна

Принцип роботи: Оптичні волокна використовуються для передачі світлових сигналів з одного кінця волокна до іншого. Зміна світлового сигналу або його втрата може вказувати на різні параметри у середовищі.

Застосування: Використовуються в телекомунікаціях, медицині, датчиках тиску та температури, а також в промисловості.

#### 1.3.3.4 Фіброоптичні сенсори

Принцип роботи: Фіброоптичні сенсори використовуються для вимірювання різних параметрів, таких як тиск, температура або хімічний склад, за допомогою зміни властивостей світла, що проходить через оптичний волоконний зонд.

Застосування: Використовуються в медицині, наукових дослідженнях, контролі за якістю виробництва та інших галузях.

### 1.3.4 Хімічні сенсори

Хімічні сенсори є ключовими компонентами у багатьох сучасних системах, де потрібно виявляти та аналізувати хімічні сполуки у навколишньому середовищі. Ці сенсори використовуються для виявлення газів, рідин, розчинів та інших хімічних речовин. У цьому розділі ми розглянемо різні типи хімічних сенсорів, їх принципи роботи та застосування.

Типи хімічних сенсорів:

#### 1.3.4.1 Електрохімічні сенсори

Принцип роботи: Електрохімічні сенсори вимірюють зміну струму або напруги, що виникає при хімічній реакції між аналізованою речовиною та електродом.

Застосування: Використовуються у вимірюванні рівня кисню, рН-рівня, концентрації різних іонів у розчині, наприклад, у медицині, електрохімічному синтезі та електрохімічних аналізах.

#### 1.3.4.2 Оптичні хімічні сенсори

Принцип роботи: Оптичні хімічні сенсори використовують зміни в оптичних властивостях матеріалу при взаємодії з аналізованою речовиною. Зміни можуть включати абсорбцію світла, флуоресценцію або розсіяння.

Застосування: Використовуються для виявлення газів, розчинів, біомолекул тощо. Застосовуються в екологічних моніторингових системах, медичних діагностичних пристроях та харчовій промисловості.

#### 1.3.4.3 П'єзоелектричні сенсори

Принцип роботи: П'єзоелектричні сенсори вимірюють зміну механічних властивостей матеріалу при взаємодії з аналізованою хімічною речовиною. Ця зміна вимірюється як зміна електричної потужності.

Застосування: Використовуються для виявлення тиску, ваги, густини та інших фізичних параметрів, а також для вимірювання масових концентрацій газів.

#### 1.3.4.4 Мас-спектрометричні сенсори

Принцип роботи: Мас-спектрометричні сенсори аналізують хімічні сполуки за їх масою та зарядом. При взаємодії з аналізованою речовиною вони генерують мас-спектри, які дозволяють ідентифікувати компоненти зразка.

Застосування: Використовуються для аналізу складу газів, рідин, речовин у промислових та наукових дослідженнях, в медицині та біології.

#### 1.3.5 Біологічні сенсори

Біологічні сенсори - це системи, які використовують живі організми або їхні біологічні компоненти для виявлення певних речовин або параметрів у навколишньому середовищі. Ці сенсори можуть бути вкрай чутливими та специфічними

до певних біомолекул або інших біологічних об'єктів. У цьому розділі ми розглянемо основні типи біологічних сенсорів, їх принципи роботи та застосування.

Типи біологічних сенсорів:

#### 1.3.5.1 Біохімічні сенсори

Принцип роботи: Біохімічні сенсори використовують біологічні компоненти, такі як ферменти, антитіла або нуклеїнові кислоти, які взаємодіють з молекулами аналізованої речовини та викликають зміни в сигналі, який може бути виміряний.

Застосування: Використовуються в медичних тест-системах для виявлення хвороб, в молекулярних біологічних дослідженнях, в агропромисловості для виявлення забруднень тощо.

#### 1.3.5.2 Організми як сенсори

Принцип роботи: Деякі живі організми, такі як бактерії, гриби або клітини, можуть бути модифіковані генетично для реагування на певні речовини або умови. Їхня реакція може бути виміряна та використовуватися як сигнал для виявлення.

Застосування: Використовуються в біосенсорних системах для виявлення токсинів, забруднень середовища, патогенів тощо.

#### 1.3.5.3 Біолюмінесцентні сенсори

Принцип роботи: Деякі організми або біологічні реакції можуть виділяти світло при взаємодії з певними речовинами. Це світло може бути виміряно і використовуватися для виявлення цих речовин.

Застосування: Використовуються для виявлення мікроорганізмів, патогенних бактерій, токсинів у харчових продуктах та воді.

#### 1.3.5.4 Електрофізіологічні сенсори

Принцип роботи: Деякі біологічні системи, такі як нейронні мережі, можуть генерувати електричні сигнали відповідно до змін у своїй діяльності. Ці сигнали можуть бути виміряні та використовуватися для діагностики або моніторингу.

Застосування: Використовуються в нейробіологічних дослідженнях, медичних діагностичних пристроях, для контролю за станом нервової системи тощо.

### 1.3.6 Акустичні сенсори

Акустичні сенсори виявляють, аналізують та інтерпретують звукові сигнали у навколишньому середовищі. Вони грають ключову роль у багатьох сферах, від комунікацій та безпеки до медицини та промисловості. У цьому розділі ми розглянемо різні типи акустичних сенсорів, їхні принципи роботи та застосування.

Типи акустичних сенсорів:

#### 1.3.6.1 Мікрофонні сенсори

Принцип роботи: Мікрофонні сенсори перетворюють звукові хвилі у варіації тиску на електричний сигнал. Вони вимірюють коливання повітря та конвертують їх у аналоговий або цифровий сигнал.

Застосування: Використовуються у звукозапису, комунікаційних системах, медичних приладах, системах безпеки тощо.

#### 1.3.6.2 Гідрофони

Принцип роботи: Гідрофони призначені для виявлення звукових сигналів у воді. Вони сприймають звукові коливання, що поширюються у воді, і перетворюють їх у електричний сигнал.[36-37]

Застосування: Використовуються в морському дослідженні, нафтовій промисловості, морському транспорті, виявленні та моніторингу підводних об'єктів тощо.

#### 1.3.6.2 Сейсмічні сенсори

Принцип роботи: Сейсмічні сенсори (сейсмометри) вимірюють землетруси, коливання ґрунту або вібрації об'єктів. Вони реагують на механічні коливання у землі та перетворюють їх у вимірювальний сигнал.

Застосування: Використовуються у сейсмологічних дослідженнях, геологічних дослідженнях, нафтовій та газовій промисловості, моніторингу транспорту та інженерних споруд. [14]

#### 1.3.6.3 Акустичні датчики тиску

Принцип роботи: Ці датчики вимірюють звуковий тиск у середовищі, який зазвичай визначається звуковими хвилями. Вони можуть бути використані для вимірювання звукового рівня або для виявлення подій, що створюють звук.

Застосування: Використовуються у системах контролю звукового середовища, вимірювання рівня шуму, моніторингу звукових подій та дослідженнях акустичної екології.

### 1.3.7 Магнітні сенсори

Магнітні сенсори виявляють та вимірюють магнітні поля, які можуть походити від магнітів або електричних пристроїв. Ці сенсори знаходять широке застосування у багатьох галузях, від промисловості та транспорту до медицини та наукових досліджень. У цьому розділі ми розглянемо основні типи магнітних сенсорів, їхні принципи роботи та застосування.

Типи магнітних сенсорів:

#### 1.3.7.1 Холлові сенсори

Принцип роботи: Холлові сенсори використовують ефект Холла для вимірювання магнітного поля. Коли магнітне поле впливає на провідник, що проходить через нього струм, у ньому виникає бічний електричний струм, який може бути виміряний.[35]

Застосування: Використовуються в автомобільній промисловості для вимірювання обертань двигуна, в електроніці для визначення положення рухомих частин, в системах безпеки та контролю доступу.

#### 1.3.7.2 Магнітні датчики руху

Принцип роботи: Ці сенсори виявляють рух або зміни положення за допомогою магнітного поля. Вони можуть використовувати магнітні датчики Холла або інші технології для визначення зміни магнітного поля, яка виникає при русі об'єкта.

Застосування: Використовуються в системах навігації, контролю руху та стабілізації, в системах безпеки та моніторингу, таких як системи виявлення руху.

#### 1.3.7.3 Магнітні датчики положення

Принцип роботи: Ці датчики визначають положення об'єкта відносно магнітного поля. Вони можуть використовувати різні методи, такі як вимірювання зміни індукції, ефект Холла або магнітну реакцію матеріалів.

Застосування: Використовуються в автомобільній промисловості для визначення положення керма, педалей та інших рухомих частин, в промислових роботах та автоматизованих системах.

#### 1.3.7.4 Магнітно-резистивні сенсори

Принцип роботи: Ці сенсори використовують зміну опору матеріалів у відповідь на зміну магнітного поля. Зміна опору може бути виміряна та використовуватися для визначення магнітного поля.

Застосування: Використовуються в магнітних дискретних датчиках, в сенсорах відкриття та закриття дверей, в реверсних датчиках, в електронних компасах тощо.[28]

#### 1.3.8 Сенсори руху та позиції

Сенсори руху та позиції виявляють рух об'єктів або визначають їхню точну позицію у просторі. Ці сенсори використовуються в різних пристроях та системах, від мобільних пристроїв до робототехніки та автономних автомобілів. У цьому розділі ми розглянемо основні типи сенсорів руху та позиції, їхні принципи роботи та застосування.

Типи сенсорів руху та позиції:

##### 1.3.8.1 Акселерометри

Принцип роботи: Акселерометри вимірюють прискорення об'єкта відносно вісей простору. Вони можуть використовувати різні технології, такі як п'єзоелектричні, конденсаторні або мемс-технології, для вимірювання зміни швидкості.[29]

Застосування: Використовуються у смартфонах для автоповороту екрана, у фітнес-трекерах для вимірювання активності, у системах стабілізації камер та дронів тощо.

##### 1.3.8.2 Гіроскопи

Принцип роботи: Гіроскопи вимірюють кутову швидкість обертання об'єкта навколо трьох осей. Вони можуть бути механічними, оптичними або мемс-гіроскопами.

Застосування: Використовуються в навігаційних системах, віртуальній реальності, стабілізації камер та приладів, у військовій техніці тощо.

### 1.3.8.3 Магнітні датчики

Принцип роботи: Магнітні датчики вимірюють магнітне поле, що оточує об'єкт. Вони можуть бути використані для визначення орієнтації та магнітного напрямку.[30-34]

Застосування: Використовуються в компасах, навігаційних системах, віртуальній реальності, магнітних картках та електронних дверних замках.

### 1.3.8.4 GPS-датчики

Принцип роботи: GPS-датчики визначають географічне положення об'єкта за допомогою сигналів від супутників. Вони отримують інформацію про час та положення від кількох супутників та визначають координати об'єкта.

Застосування: Використовуються в навігаційних системах автомобілів, смартфонах, аеропортових транспортних системах, мореплавстві та авіації.

### 1.3.8.5 Інерціальні вимірювальні пристрої (IMU)

Принцип роботи: IMU об'єднує в собі акселерометри, гіроскопи та іноді магнітні датчики для вимірювання лінійного та кутового руху об'єкта.

Застосування: Використовуються в системах навігації, віртуальній реальності, дронах, роботах та ігрових приставках.

## 1.3.9 Вологості сенсори

Сенсори вологості вимірюють кількість вологи або вологість у повітрі. Вони грають важливу роль у контролі мікроклімату в різних приміщеннях та у виробництві, де точний рівень вологості може впливати на якість продукції, здоров'я та комфорт людей. Давайте розглянемо різні типи сенсорів вологості та їхнє застосування.

Типи сенсорів вологості:

### 1.3.9.1 Резистивні сенсори

Принцип роботи: Ці сенсори вимірюють вологість шляхом вимірювання зміни опору електричного провідника, який змінюється залежно від вологості повітря.



Застосування: Використовуються в побутових та промислових системах кондиціонування повітря, в системах контролю якості повітря, в сільському господарстві для моніторингу ґрунту та рослин тощо.

#### 1.3.9.2 Капацитивні сенсори

Принцип роботи: Ці сенсори вимірюють вологість шляхом вимірювання зміни капацитивності конденсатора, що змінюється в залежності від кількості водяних молекул у повітрі.

Застосування: Використовуються у вимірювальних приладах для контролю вологості, в пристроях для автоматичного поливу рослин, в системах контролю клімату в теплицях тощо.

#### 1.3.9.3 Оптичні сенсори

Принцип роботи: Оптичні сенсори використовують зміни в оптичних властивостях матеріалів, таких як світлопропускання або відбиття, для вимірювання вологості.

Застосування: Використовуються в промислових процесах, де вологість може впливати на якість виробів, у медичних пристроях для вимірювання вологості шкіри, в упаковці для контролю вологості товарів тощо.

#### 1.3.9.4 П'єзоелектричні сенсори

Принцип роботи: П'єзоелектричні сенсори вимірюють вологість шляхом вимірювання зміни механічного напруження, що виникає в п'єзоелектричному матеріалі при зміні вологості.

Застосування: Використовуються в наукових дослідженнях, вимірювальних приладах для визначення вологості ґрунту, в метеорологічних станціях для моніторингу погоди тощо.

#### 1.3.10 Проксиміті сенсори

Проксиміті сенсори, часто називані сенсорами наближення, виявляють наявність об'єктів у непрямому контакті або наближенні до себе. Ці сенсори використовуються у багатьох галузях, від смартфонів та планшетів до автомобілів та промислових машин. Давайте розглянемо основні типи проксиміті сенсорів та їх застосування.

Типи проксиміті сенсорів:

#### 1.3.10.1 Інфрачервоні (IR) сенсори

Принцип роботи: Ці сенсори виявляють наявність об'єктів за допомогою інфрачервоного випромінювання. Вони вимірюють інтенсивність випромінювання та виявляють зміни, що виникають при наближенні об'єкта.

Застосування: Використовуються в смартфонах для вимкнення дисплея під час розмови, в системах безпеки автомобілів для виявлення перешкод на шляху, в автоматизованих системах для визначення положення об'єктів тощо.

#### 1.3.10.2 Ємнісні сенсори

Принцип роботи: Ці сенсори виявляють наявність об'єктів шляхом вимірювання зміни ємності конденсатора, яка виникає при наближенні об'єкта.

Застосування: Використовуються в сенсорних кнопках на смартфонах та планшетах для автоматичної реакції на дотик, в системах безпеки для відкриття дверей або виклику сигналу тривоги, в промислових машинах для вимірювання відстані до об'єктів тощо.

#### 1.3.10.3 Ультразвукові сенсори

Принцип роботи: Ці сенсори вимірюють час, що потрібен для відбитого ультразвукового сигналу, щоб повернутися до сенсора, та використовують цю інформацію для визначення відстані до об'єкта.

Застосування: Використовуються в смартфонах для автоматичної реакції на наближення обличчя до телефону, в системах паркування автомобілів для виявлення перешкод, в промислових системах для контролю за відстанню між об'єктами тощо.

## 1.4 Огляд сучасних тенденцій у розробці систем керування

Сучасні тенденції у розробці систем керування включають в себе використання передових технологій для забезпечення ефективності, надійності та зручності управління різноманітними процесами та системами. Деякі з ключових тенденцій включають таке:

1. Інтеграція штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML): Системи керування все частіше використовують технології штучного інтелекту та машинного навчання для автоматизації процесів, прогнозування витрат, оптимізації роботи та виявлення аномалій.

2. Інтернет речей (IoT): Використання IoT дозволяє збирати дані в реальному часі зі сенсорів та пристроїв, що дозволяє ефективно взаємодіяти з навколишнім середовищем та здійснювати дистанційне керування системами.

3. Комп'ютерне зорове та розпізнавання образів: Використання технологій комп'ютерного зору та розпізнавання образів дозволяє системам керування автоматично аналізувати відеопотоки, розпізнавати об'єкти та події, що сприяє безпеці та ефективності в різних галузях, таких як виробництво, транспорт, медицина тощо.

4. Гнучкі та адаптивні системи: Системи керування стають все більш гнучкими та адаптивними до змінних умов роботи. Це означає, що вони можуть швидко реагувати на нові умови, оптимізувати свою роботу та адаптуватися до змін в навколишньому середовищі.

5. Безпека та кіберзахист: У зв'язку зі зростанням кількості підключених пристроїв та даних, безпека стає однією з найважливіших аспектів розробки систем керування. Тому вони все частіше включають заходи з кіберзахисту та використовують шифрування для захисту конфіденційної інформації.

6. Енергоефективність та сталий розвиток: Розробники систем керування все більше звертають увагу на енергоефективність своїх продуктів та їх вплив на довкілля. Вони шукають способи оптимізації використання енергії, використовуючи розумні алгоритми та технології.

## РОЗДІЛ 2

# ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ СЕКТОРАЛЬНОГО СЕНСОРА

### 2.1 Опис секторального сенсора

Секторальний сенсор - це тип сенсора, який здатен сприймати сигнали з різних напрямків або з різних секторів навколишнього середовища. Він має спеціальну конструкцію, яка дозволяє обмежити область сприймання сигналів і виявляти їх у певних напрямках або секторах.[21]

Основні характеристики секторального сенсора включають:

1. Напрявленість: Цей тип сенсора може бути налаштований на сприймання сигналів з певного напрямку або сектора, що робить його корисним для виявлення об'єктів або подій у конкретному напрямку.

2. Чутливість: Секторальні сенсори можуть мати високу чутливість до сигналів у своєму області сприймання, що дозволяє їм ефективно реагувати на зміни у середовищі.

3. Відмінна роздільна здатність: Вони можуть розрізняти сигнали з різних напрямків або секторів, що дозволяє точно визначати положення об'єктів або подій.

4. Можливість виявлення руху: Деякі секторальні сенсори мають можливість виявлення руху, що робить їх корисними для систем безпеки та відеоспостереження.

5. Широкий спектр застосувань: Вони можуть бути використані в різних галузях, таких як автомобільна промисловість (для систем допомоги водію), безпека, медицина, робототехніка та багато інших.

6. Секторальні сенсори можуть бути реалізовані за допомогою різних технологій, включаючи ультразвукові, інфрачервоні, радіочастотні, оптичні тощо. Вони є важливою складовою для багатьох систем керування, де необхідно спостерігати та реагувати на події у певних напрямках або секторах.

## 2.2. Будова та принцип роботи секторального фотогальванічного сенсора

Секторні фотогальванічні елементи, або сонячні батареї, складаються з декількох ключових компонентів, які працюють разом для перетворення сонячного світла на електричну енергію. Основна будова таких елементів включає наступні шари та елементи:

### 1. Прозорий провідний шар (TCO):

Цей шар розташовується на верхній поверхні фотогальванічного елемента і служить для пропускання світла до активного шару. Він також виконує функцію електрода, через який знімається вироблена електрична енергія. Матеріалами для цього шару найчастіше є оксид олова з додаванням індію (ITO) або оксид цинку (ZnO).[15,16]

### 2. Антирефлексне покриття:

Цей шар зменшує відбиття світла від поверхні елемента, тим самим збільшуючи кількість світла, яке проникає до активного шару. Він складається з матеріалів, які знижують втрати світла на відбиття.

### 3. Активний шар:

Це найважливіша частина фотогальванічного елемента. Саме в цьому шарі відбувається перетворення світлової енергії на електричну. Активний шар зазвичай складається з кремнію (моно- або полікристалічного) або з інших напівпровідникових матеріалів, таких як кадмій-телурид (CdTe) чи мідь-індій-галлій-селенід (CIGS).

### 4. Переходи p-n:

Активний шар містить зони з різною концентрацією домішок - n-типу (з надлишком електронів) та p-типу (з надлишком дірок). На межі цих зон утворюється p-n перехід, який створює електричне поле. Це поле сприяє розділенню носіїв заряду, генерованих при поглинанні світла, на електрони та дірки.

### 5. Задній електрод:

Цей електрод розташований на протилежній стороні від прозорого провідного шару і слугує для збору електричного струму з активного шару. Він зазвичай виготовляється з металу, такого як алюміній або срібло.

### 6. Захисне покриття:

Для захисту від механічних пошкоджень та впливу навколишнього середовища фотогальванічні елементи покривають захисним шаром. Це може бути скло або прозорий полімер, який також повинен мати хорошу пропускну здатність для світла.

Кожен з цих компонентів виконує важливу функцію для забезпечення ефективної роботи фотогальванічного елемента. Взаємодія між шарами дозволяє оптимально використовувати сонячну енергію та перетворювати її на електричну з мінімальними втратами. Завдяки постійному вдосконаленню матеріалів та технологій, ефективність фотогальванічних елементів постійно зростає, роблячи їх дедалі привабливішими для широкого використання в енергетиці.[16-20]

Принцип роботи секторних фотогальванічних елементів базується на фотоефекті, явищі, при якому поглинання світла напівпровідником призводить до генерації електричної енергії. Розглянемо основні етапи цього процесу детальніше:

#### 1. Поглинання світла:

Сонячне світло, потрапляючи на поверхню фотогальванічного елемента, проходить через прозорий провідний шар (TCO) і антирефлексне покриття, яке знижує втрати світла на відбиття. Світлові фотони досягають активного шару, який складається з напівпровідникових матеріалів, таких як кремній, CdTe або CIGS. У цьому шарі фотони поглинаються і їхня енергія передається електронам.

#### 2. Генерація носіїв заряду:

Поглинання фотонів в активному шарі призводить до збудження електронів з валентної зони у зону провідності, залишаючи за собою "дірки" (позитивно заряджені частинки) у валентній зоні. Таким чином, світлова енергія

перетворюється на енергію електронів та дірок.

### 3. Розділення носіїв заряду:

У зоні р-п переходу, що існує на межі між р-типом і n-типом напівпровідника, утворюється електричне поле. Це поле сприяє розділенню збуджених носіїв заряду: електрони переміщуються до зони n-типу, а дірки — до зони р-типу. Це розділення є критичним для створення електричної різниці потенціалів, яка дозволяє отримувати електричний струм.

### 4. Збір електричної енергії:

Електрони, які переміщуються до n-типу напівпровідника, і дірки, що переміщуються до р-типу, збираються відповідними електродами. Прозорий провідний шар (TCO) на поверхні служить для збору електронів, а задній електрод — для збору дірок. Зібрані носії заряду створюють електричний струм, який може бути спрямований у зовнішній електричний ланцюг.

### 5. Електричний ланцюг:

Підключення зовнішнього електричного ланцюга до фотогальванічного елемента дозволяє використовувати згенеровану електричну енергію для живлення різних пристроїв або для заряджання акумуляторів. Таким чином, сонячна енергія перетворюється на корисну електричну енергію.[35]

У підсумку, принцип роботи секторних фотогальванічних елементів базується на здатності напівпровідників поглинати сонячне світло і перетворювати його на електричну енергію за допомогою р-п переходу. Цей процес включає поглинання фотонів, генерацію та розділення носіїв заряду, а також збір і передачу електричної енергії у зовнішній ланцюг. Завдяки цьому фотогальванічні елементи здатні ефективно використовувати сонячну енергію для різноманітних потреб, від живлення побутових пристроїв до забезпечення електроенергією великих інфраструктурних об'єктів.

Формули для розрахунків:

Ефективність фотогальванічного елемента ( $\eta$ ):

$$\eta = P_{\text{вх}}/P_{\text{вих}} \times 100\% \quad (2.1)$$

де  $P_{\text{вих}}$  - потужність, що видається фотогальванічним елементом, а  $P_{\text{вх}}$  - потужність сонячного випромінювання, що падає на нього.

Потужність сонячного випромінювання  $P_{\text{вх}}$  :

$$P_{\text{вх}} = A \times G \times \eta PV \quad (2.2)$$

де  $A$  - площа фотогальванічного елемента,  $G$  - інтенсивність сонячного випромінювання, а  $\eta PV$  - коефіцієнт ефективності фотогальванічного елемента.

Коефіцієнт ефективності фотогальванічного елемента ( $\eta PV$ ):

$$\eta PV = \frac{V_{\text{oc}} \times I_{\text{sc}}}{A} \quad (2.3)$$

де  $V_{\text{oc}}$  - напруга холостого ходу,  $I_{\text{sc}}$  - короткозамкнений струм, а  $A$  - площа фотогальванічного елемента.

Потужність, що видається фотогальванічним елементом ( $P_{\text{out}}$ ):

$$P_{\text{out}} = V_{\text{mp}} \times I_{\text{mp}} \quad (2.4)$$

де  $V_{\text{mp}}$  - напруга на точці максимальної потужності,  $I_{\text{mp}}$  - струм на точці максимальної потужності.

Коефіцієнт заповнення (FF - Fill Factor)

$$FF = \frac{P_{\text{max}}}{V_{\text{oc}} \cdot I_{\text{sc}}} \quad (2.5)$$



де  $P_{max}$  — максимальна потужність,  $V_{oc}$  — напруга холостого ходу,  $I_{sc}$  — струм короткого замикання.

Струм короткого замикання  $I_{sc}$ :

$$I_{sc} = q \cdot G \cdot A \cdot (1 - R) \cdot \alpha \quad (2.6)$$

де  $q$  — заряд електрона,  $G$  — інтенсивність світла,  $A$  — площа елемента,  $R$  — коефіцієнт відбивання,  $\alpha$  — коефіцієнт поглинання.

Напруга холостого ходу ( $V_{oc}$ ):

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad (2.7)$$

де  $k$  — стала Больцмана,  $T$  — температура в Кельвінах,  $I_0$  — зворотний насичений струм.

### 2.3 Загальні відомості про операційні підсилювачі для сенсорики

Операційний підсилювач (ОП) — це мікросхема, що являє собою багатокаскадний транзисторний підсилювач з високим коефіцієнтом посилення напруги. Він виконує посилення сигналів, зміну їх форми, перетворення, диференціювання та інтегрування, створення стабільної напруги і генерацію коливальних різної форми. Завдяки своїм перевагам над дискретними транзисторами, ОП стали основою багатьох аналогових електронних пристроїв.

Основні каскади ОП включають:

- Вхідний балансний каскад, який виконується у вигляді диференційного підсилювача.
- Каскад додаткового підсилення.
- Вихідний каскад підсилення потужності.

Для підвищення підсилення та стабільності (частотної, температурної) в реальних ОП додаються схеми частотної корекції, температурної стабілізації та можливі проміжні підсилювальні каскади.

В літературі використовують такі позначення ОП (рис. 2.1)

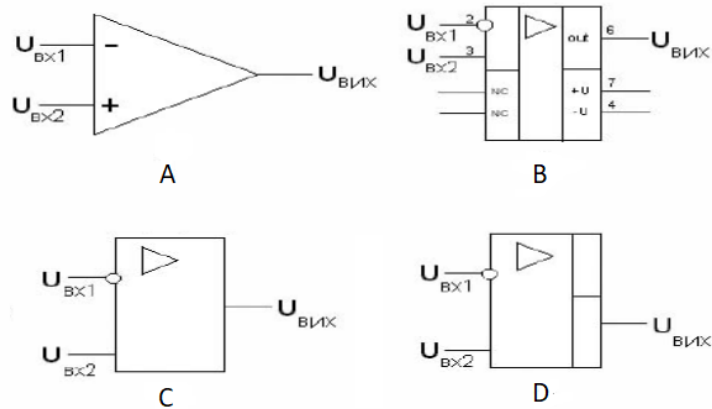


Рисунок 2.1 – Позначення ОП на схемах

Оскільки ідеальних операційних підсилювачів (ОП) не існує, вибір ОП для конкретної схеми вимагає аналізу його технічних характеристик. Ключовими параметрами є:

1. Напруга живлення: Більшість ОП працює з напругою  $\pm 12 \dots 15$  В, хоча є моделі з меншою напругою живлення або однополярні ОП.

2. Диференціальний коефіцієнт підсилення  $K_u$ : цей параметр відображає підсилення напруги ОП без зворотного зв'язку і може бути в діапазоні  $10^3 \dots 10^4$  для реальних ОП. Для низьких та середніх частот записується як  $K_{u0}$ .

3. Напруга зміщення нуля ( $U_{зм}$ ) та температурна чутливість ( $dU_{зм} / dT$ ): Напруга, необхідна для отримання на виході нульової напруги, а також чутливість цього параметра до зміни температури ОП.

4. Коефіцієнт послаблення синфазного сигналу (КПСС): Показник придушення вхідної синфазної напруги, яка може виникати через потрапляння завад на обидва входи ОП. Цей коефіцієнт розраховується як відношення  $K_u / K_c$ , де  $K_c$  – коефіцієнт підсилення синфазної складової, зазвичай виражається в децибелах напруги. Типові значення –  $10^3 \dots 10^4$ .

5. Вхідний і вихідний опір ( $R_{вх}$ ,  $R_{вих}$ ): Відрізняють вхідний опір для диференціального та синфазного сигналів. У ОП з біполярними транзисторами вхідний опір для диференціального сигналу  $R_{вхд}$  становить кілька МОм, а для синфазного сигналу  $R_{вхс}$  – декілька ГОм. Вхідні струми, визначені цими опором, дуже малі і становлять декілька нА. Якщо на вході ОП використовуються польові транзистори, то вхідний опір може досягати значення. [2]

6. Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ): Залежність коефіцієнта підсилення напруги (або потужності) від частоти. Для оцінки частотних параметрів ОП використовують нормовану АЧХ:

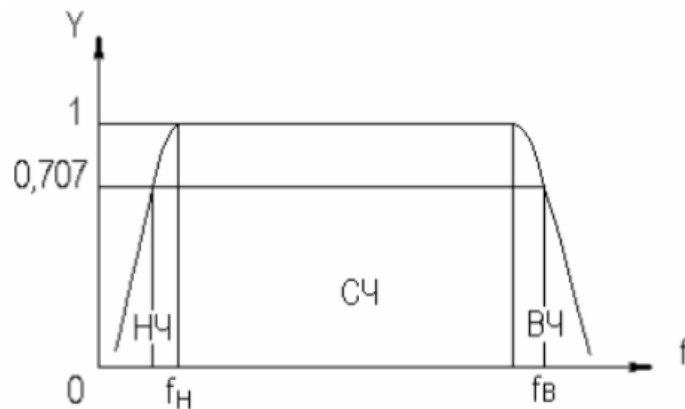


Рисунок 2.2 – Нормована АЧХ ОП

При цьому  $Y$  – нормований коефіцієнт підсилення, визначений як відношення абсолютного значення підсилення до значення на середніх частотах робочого діапазону, позначене як  $K_0$ . За допомогою амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) та допустимого рівня частотних спотворень встановлюються нижня та верхня граничні частоти, позначені як  $f_H$  та  $f_B$ , та ширина смуги робочих частот  $\Delta f = f_B - f_H$ . [3]

Також важлива фазо-частотна характеристика (ФЧХ), що відображає залежність зсуву фази вихідного сигналу від частоти. Дослідження стійкості підсилювачів зазвичай виконується за допомогою діаграм Боде. У цих діаграмах амплітудно-частотна та фазо-частотна характеристики відображаються асимптотично в логарифмічному масштабі, відомому як ЛАЧХ та ЛФЧХ відповідно. Такий підхід спрощує експериментальне визначення цих

характеристик та дозволяє легко оцінити стійкість конкретного ОП та визначити необхідні корекційні заходи.

Типові асимптотичні ЛАЧХ та ЛФЧХ ОП без частотної корекції зображені на рис. 2.3 (для ОП К140УД10).[2]

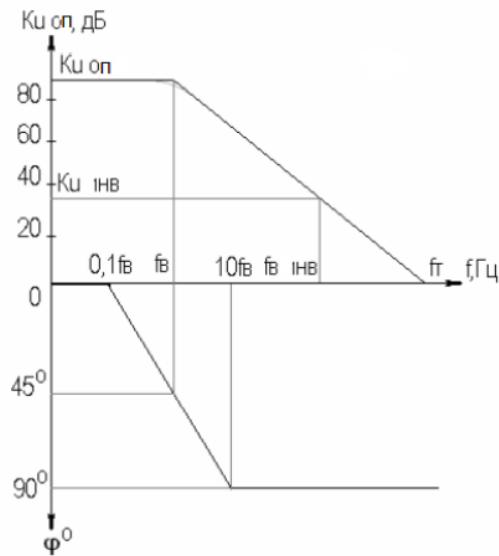


Рисунок 2.3 – ЛАЧХ та ЛФЧХ ОП

На низьких та середніх частотах амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ) ОП представляє собою пряму лінію, паралельну вісі частот. У високочастотній області спад коефіцієнта підсилення відбувається із швидкістю 20 дБ на декаду. Частота, при якій фаза досягає  $-180^\circ$ , відома як критична  $f_{кр}$ ; ОП переходить у режим самозбудження. Частота  $f_v$ , де розпочинається спад коефіцієнта підсилення, визначається каскадами підсилення напруги.

Також важливі шумові характеристики ОП, особливо при роботі з малими сигналами, коли їх величина порівняна з шумом. Основними видами шумів у ОП є:

1. Фіккер-шум або  $1/f$  -шум, який внесе значний вклад на низьких частотах. Порівняння його внеску щодо теплового шуму зображено на рис. 2.4. [4] Залежність потужності шуму від частоти, яка зворотно пропорційна.

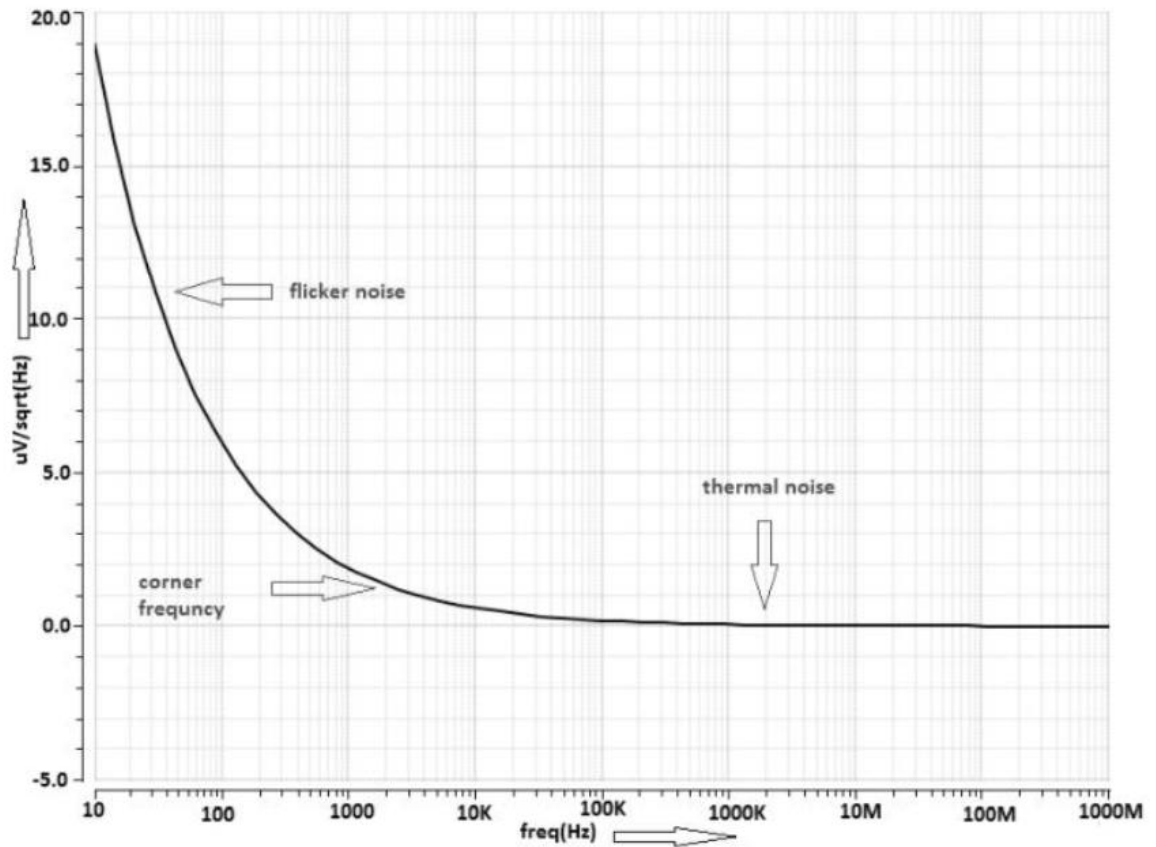


Рисунок 2.4 – Спектральний розподіл фліккер шуму у порівнянні з тепловим

Цей шум є характерним для напівпровідників і композитних матеріалів, з яких виготовляють резистори, і тому присутній у схемах підсилювачів.

2. Тепловий шум пояснюється хаотичним тепловим рухом електронів. Цей шум виявляється в резистивних компонентах, і його спектральна густина потужності не залежить від частоти сигналу і є постійною в усьому спектрі, виражена формулою

$$S_u = 4kT \quad (2.8)$$

де  $k$  – стала Больцмана, а  $T$  – температура резисторного компонента.

3. Дробовий шум, який присутній у всіх напівпровідникових компонентах, пов'язаний з дискретною природою електричного струму. Перенесення заряду відбувається квантами, а струм, що вимірюється, є статистичною

характеристикою цього процесу. Для компонентів з p-n переходом, де носії заряду, що створюють струм, діють незалежно один від одного, справедлива формула:

$$Su = 2 \cdot q \cdot I \cdot R \quad (2.9)$$

де  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  – заряд електрона,  $I$  – діюче значення струму, що тече через p-n перехід,  $R$  – опір p-n переходу.

## 2.4 Схеми включення операційних підсилювачів

В основі аналізу схем на операційних підсилювачах лежать два ключові припущення. По-перше, входи операційного підсилювача не споживають струм і мають дуже великий опір. По-друге, напруга між неінвертуючим та інвертуючим входами операційного підсилювача, завдяки негативному зворотному зв'язку, стає рівною нулю.

З використанням операційних підсилювачів та зовнішніх кіл зворотного зв'язку (в тому числі частотно-залежних) створюється велика кількість електронних пристроїв, які ефективно перетворюють електричні сигнали. Ці пристрої широко застосовуються у вимірювальній техніці. Для оцінки похибок вимірювальних пристроїв необхідно враховувати вплив реальних параметрів операційного підсилювача. Точність вимірювальних пристроїв значною мірою залежить від класу точності елементів, які використовуються в колі негативного зворотного зв'язку (НЗЗ) операційного підсилювача.

### Інвертуючий масштабний підсилювач

Схема інвертуючого масштабного підсилювача зображена на рис. 2.5. Резистор  $R_3$  встановлений для покращення температурної стабільності режиму (зменшення похибок зсуву і дрейфу нульового рівня) і може бути відсутнім. Операційний підсилювач охоплений паралельним НЗЗ з напруги.

Застосування резистора  $R_3$  допомагає зменшити температурні залежності та покращує стабільність роботи підсилювача, але в деяких випадках його можна не використовувати. Основний принцип роботи інвертуючого підсилювача полягає

в тому, що вихідна напруга є обернено пропорційною до вхідної, що дозволяє масштабувати вхідний сигнал відповідно до потреб конкретної схеми.

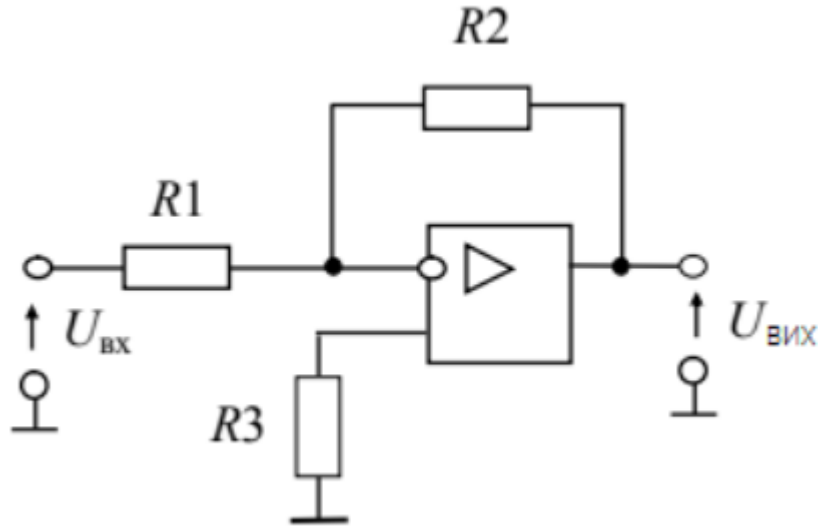


Рисунок 2.5 – Інвертуючий масштабний підсилювач

Для такої схеми коефіцієнт підсилення визначається за формулою:

$$K_U = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2.10)$$

Резистори  $R_1$  і  $R_2$  утворюють коло паралельного негативного зворотного зв'язку. Відповідно до принципу віртуального замикання, різниця потенціалів між входами операційного підсилювача стає дуже малою. Оскільки неінвертуючий вхід заземлений, то на інвертуючому вході потенціал також близький до нуля. Вхідний струм  $I_1$ , що протікає через резистор  $R_1$ , визначається як  $I_1 = U_{\text{ВХ}} / R_1$ . Таким чином, вхідний опір підсилювача дорівнює  $R_1$ . Вихідний опір є малим і розраховується як  $R_{\text{ВИХ}} = R_{\text{ВИХОП}} / F$ . Підбором значень резисторів можна встановити коефіцієнт підсилення менший за 1. Для підвищення точності масштабного підсилювача в колі негативного зворотного зв'язку використовуються прецизійні резистори з однаковими температурними коефіцієнтами опору.

У реальному операційному підсилювачі на виході при  $U_{\text{вх}} = 0$  завжди буде присутня напруга похибки  $U_{\text{п}}$ , викликана напругою зміщення ( $U_{\text{зм}}$ ) і вхідними струмами ( $\Delta I_{\text{вх}}$ ). Для зниження  $U_{\text{п}}$  прагнуть вирівняти еквівалентні резистори, підключені до входів ОП, тобто встановити  $R_3 = R_1 \parallel R_2$ .

#### Неінвертуючий масштабний підсилювач

Схема неінвертуючого масштабного підсилювача зображена на рис. 2.6. Подібно до інвертуючого масштабного підсилювача, резистор  $R_3$  встановлюється для покращення температурної стабільності режиму, але може бути відсутнім.

Така конфігурація дозволяє збільшувати вхідний опір підсилювача, що може бути корисним для певних застосувань.

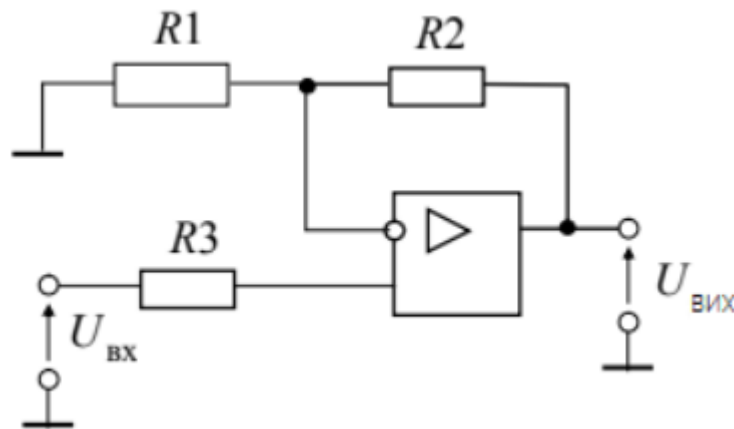


Рисунок 1.8 – Неінвертуючий масштабний підсилювач

Резистори  $R_1$  і  $R_2$  утворюють коло послідовного негативного зворотного зв'язку з напруги. Завдяки принципу віртуального замикання, різниця потенціалів між двома входами операційного підсилювача (ОП) стає дуже малою, тобто напруга на інвертуючому вході практично дорівнює напрузі на неінвертуючому вході. Отже, через резистор  $R_1$  протікає струм  $I_1 = U_1/R_1$ . Оскільки ОП має високий вхідний опір, цей струм також протікає через резистор  $R_2$ , що спричиняє падіння напруги на ньому, рівне  $U_2 = U_1(R_2 / R_1)$ . Вихідна напруга дорівнює сумі напруги на інвертуючому вході і падіння напруги на резисторі  $R_2$ , тобто  $U_2 = U_1 (1 + R_2 / R_1)$ . Коефіцієнт підсилення такої схеми визначається як:



$$K_U = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.11)$$

У граничному випадку, якщо вихід ОП з'єднаний з інвертуючим входом без елементів НЗЗ, цей коефіцієнт дорівнює одиниці. Такі схеми називають повторювачами напруги, і їх виготовляють серійно у вигляді окремих інтегральних мікросхем (ІМС) з кількома підсилювачами в одному корпусі.

Вхідний опір такого підсилювача можна визначити як

$$R_{\text{вх}} = (r_{\text{сф}} \parallel r_{\text{вхОП}}) + R_3 \quad (2.12)$$

, де  $r_{\text{сф}}$  - опір ОП для синфазної складової. Вихідний опір підсилювача малий і визначається як

$$R_{\text{вих}} = \frac{R_{\text{вихОП}}}{F} \quad (2.13)$$

Перевага неінвертуючого підсилювача полягає у великому вхідному опорі. Однак, порівняно з інвертуючим підсилювачем, неінвертуючий підсилювач має додаткову похибку зсуву нуля через синфазний сигнал на вході ОП.

Для зниження напруги похибки на виході в неінвертуючому підсилювачі, аналогічно інвертуючому, слід виконати умову

$$R_3 = R_1 \parallel R_2 \quad (2.14)$$

Диференціальний підсилювач

Схема диференціального підсилювача показана на рис. 2.7. Вона використовується для підсилення різниці напруг між двома входами, мінімізуючи вплив синфазних сигналів (завал, присутніх на обох входах одночасно).

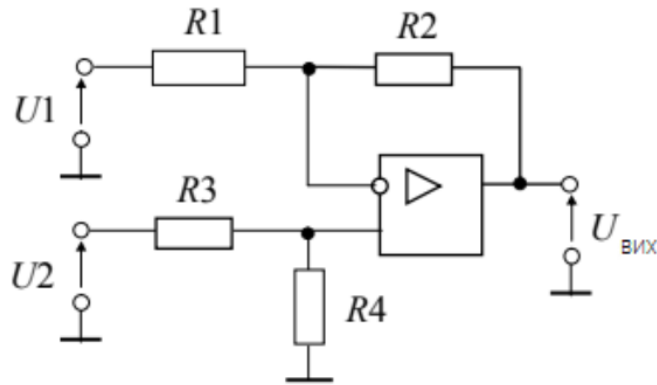


Рисунок 2.7 – Диференціальний підсилювач

Вихідна напруга диференціального підсилювача розраховується за формулою:[7]

$$U_{\text{вих}} = U_2(R_4 + R_3R_4(1 + R_1R_2)) - U_1(R_1R_2) \quad (2.15)$$

Для однакових значень відношень опорів  $R_3||R_4 = R_1||R_2$ , вихідна напруга розраховується як:

$$U_{\text{вих}} = (U_2 - U_1)R_1R_2 \quad (2.16)$$

Таким чином, напруга на виході пропорційна різниці вхідних напруг, і підсилювач функціонує як диференціальний.[8]

Напруга зміщення і вхідні струми реального ОП спричиняють зміну вихідної напруги на величину:

$$U_{\text{пох}} = U_{\text{зс}}(1 + R_1R_2) + I + R_1(1 + R_1R_2) + I - R_2 \quad (2.17)$$

Недоліками простої схеми диференціального підсилювача є малий вхідний опір і труднощі регулювання коефіцієнта підсилення.

Інструментальний підсилювач

Для покращення характеристик, таких як напруга зміщення, температурний дрейф, КПСС і вхідний опір, використовують інструментальний підсилювач на двох або трьох ОП. Схема інструментального підсилювача на трьох ОП показана на рис. 2.8.

Вхідний каскад включає два повторювачі напруги ( $D_1, D_2$ ), а на виході знаходиться диференціальний каскад ( $D_3$ ), коефіцієнт підсилення якого визначається як:

$$K_y = 1 + \frac{2R}{R_1} \quad (2.18)$$

Вхідний опір визначається повторювачами  $D_1$  та  $D_2$ , тому є дуже високим для обох входів, що виключає вплив вихідного опору джерела сигналу. КПСС визначається лише вихідним каскадом і не залежить від вхідного. Коефіцієнт підсилення розраховується за формулою:

$$K_y = K_D(1 + 2\alpha) \quad (2.19)$$

де  $K_D$  – коефіцієнт підсилення диференціального каскаду,  $K_D = R_3 R_2$

$\alpha$  – параметр регулюючого резистора.

Регулюючи значення

$\alpha$ , можна досягти стабільних коефіцієнтів підсилення по напрузі до 10000 для нових моделей ОП .

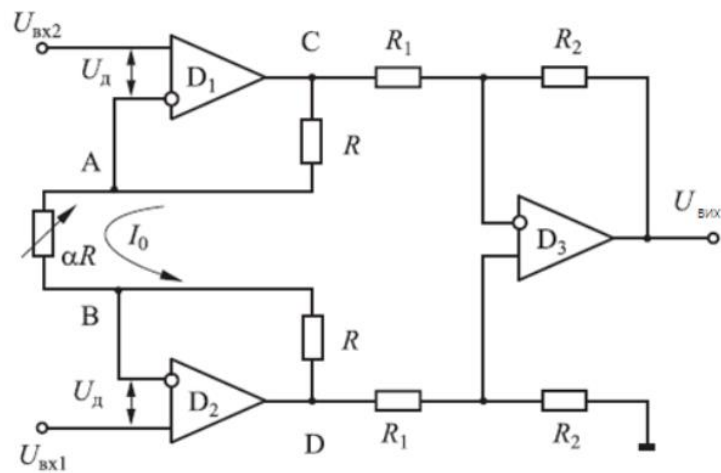


Рисунок 2.8 – Інструментальний підсилювач

З використанням різних компонентів, таких як конденсатори та діоди, можна створювати різноманітні схеми підсилювальних пристроїв. Зокрема, можливо побудувати підсилювачі змінного струму на базі неінвертуючих та інвертуючих підсилювачів.

В інвертуючому підсилювачі низьких частот (ПНЧ) на операційному підсилювачі (рис. 2.9), операційний підсилювач охоплений негативним зворотним зв'язком по постійному струму, що мінімізує похибку вихідної напруги. Завдяки цьому немає потреби в балансуванні нуля, і навантаження можна підключати без використання розділового конденсатора. [3]

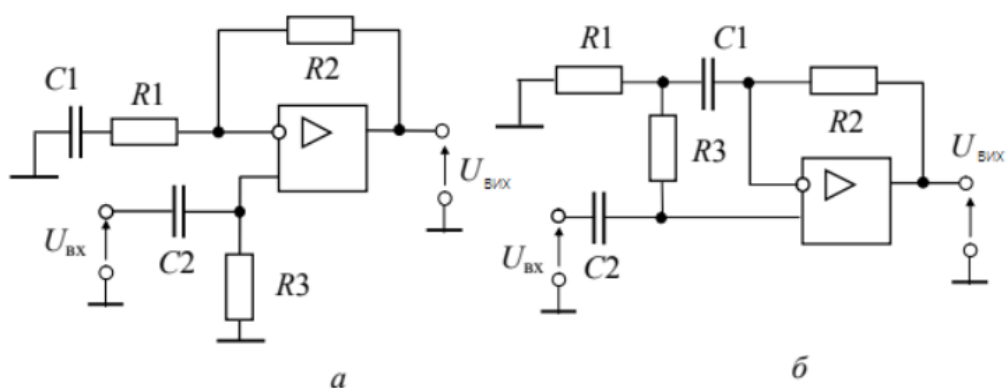


Рисунок 2.9 – Варіанти схем неінвертуючих підсилювачів НЧ

#### Логарифмічний підсилювач

На основі операційного підсилювача (ОП) можна створити логарифмічний підсилювач.

Варіанти таких схем представлені на рис. 2.10.

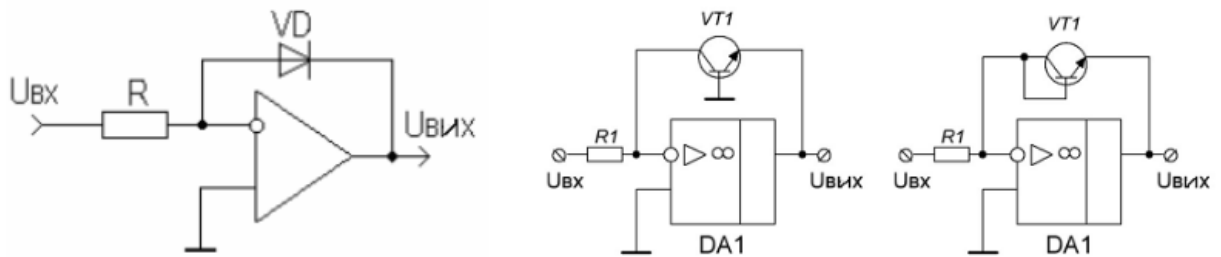


Рисунок 2.10 – Логарифмічний підсилювач

### Логарифмічний підсилювач

Для діодного включення (рис. 2.10, а), струм, що протікає через діод VD, дорівнює вхідному струму схеми, але має протилежний знак. Напруга на діоді  $U_{VD}$  дорівнює вихідній напрузі  $U_{вих}$ . Для визначення вихідної напруги використовується вольт-амперна характеристика (ВАХ) діода:

$$I = I_0(e^{\frac{U}{\varphi_t}} - 1) \quad (2.20)$$

де  $I_0$  — зворотній струм насичення,  $\varphi_t$  — тепловий потенціал. Тоді вихідна напруга визначається як:

$$U_{вих} = -\varphi_t \ln\left(\frac{U_{вих}}{RI_0} - 1\right) \quad (2.21)$$

Щоб зберігалася логарифмічна залежність, вхідний струм повинен значно перевищувати  $I_0$ , тобто  $RI_0/U_{вих} \gg 1$ , тому одиницею в цьому виразі можна знехтувати.

Простий логарифмічний підсилювач має кілька суттєвих недоліків, тому його рідко використовують. Більш поширеним є логарифмічний підсилювач зі зворотним зв'язком, де використовується біполярний транзистор. Основний недолік діодних підсилювачів полягає в тому, що їх провідність визначається як електронами, так і дірками. У той же час, провідність транзистора визначається

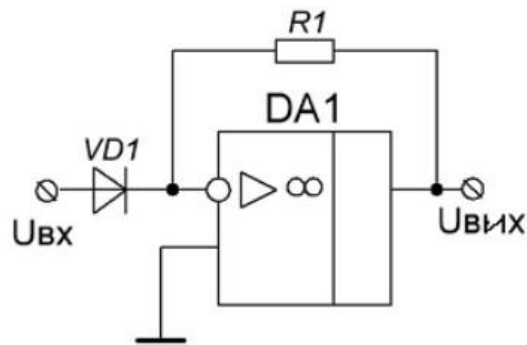
або електронами, або дірками, залежно від типу транзистора (n-p-n або p-n-p). Тому температурна залежність транзистора менша, ніж у діода. Залежність колекторного струму від напруги між базою і емітером транзистора визначається як:

$$I_c = I_0 (e^{\frac{U_{\text{бе}}}{\phi T}} - 1) \quad (2.22)$$

де  $I_c$  — струм колектора,  $U_{\text{бе}}$  — напруга між базою та емітером.

Транзистор для отримання логарифмічної вихідної характеристики включають двома основними способами: з заземленою базою або у діодному включенні, об'єднуючи базовий і колекторний електроди транзистора. Ці схеми зображені на рис. 2.10 (б, в) відповідно.

При заміні резистора та діода у схемі (рис. 2.10, а) можна отримати анти логарифмічний підсилювач або експоненціальний підсилювач. Також можна отримати експоненціальний підсилювач з використанням біполярного транзистора, включеного за схемою з заземленою базою (рис. 2.11).[10]



$$U_{\text{ВІХ}} = -I_0 * R1 * e^{\frac{qU_{\text{ВХ}}}{kT}}$$

Рисунок 2.11 – Антилогарифмічний підсилювач; його передавальна характеристика

Схема, зображена на рис. 2.12, дозволяє підсумувати три аналогові вхідні напруги  $U_1$ ,  $U_2$  і  $U_3$ . Оскільки інвертуючий вхід операційного підсилювача (ОП)

є точкою "віртуальної" землі (тобто  $U \approx 0$ , можна знайти струми у вхідних ланцюгах:  $I_1 = R_1 U_1, I_2 = R_2 U_2, I_3 = R_3 U_3$

Враховуючи високий вхідний опір ОП, сумарний струм протікає через резистор

$R$ , тому напруга на цьому резисторі буде:

$$U_{\text{вих}} = -IR = -(I_1 + I_2 + I_3)R = -(R_1 U_1 + R_2 U_2 + R_3 U_3)R \quad (2.23)$$

Тобто, вихідна напруга пропорційна сумі вхідних напруг з відповідними коефіцієнтами.

Для зменшення впливу вхідних струмів ОП між неінвертуючим входом і землею бажано поставити опір  $R_4$ , де  $R_4 = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_4 = R_1$  (паралельне з'єднання всіх резисторів).[3]

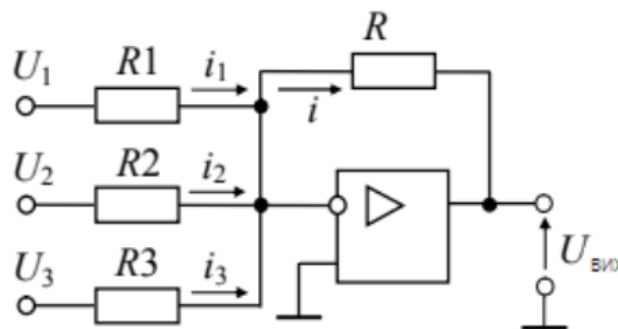


Рисунок 2.12 – Аналоговий суматор

Інвертуючий суматор будується на операційному підсилювачі (ОП), але також можна створити і неінвертуючий суматор, якщо подати сигнали на неінвертуючий вхід ОП. За аналогічним принципом можна побудувати аналоговий суматор для більшої кількості вхідних сигналів.

Аналоговий інтегратор

Інтегратор реалізує схему, в якій зміна вихідної напруги пропорційна вхідному сигналу. Найпростіша схема інтегратора на основі операційного підсилювача зображена нижче. [3]

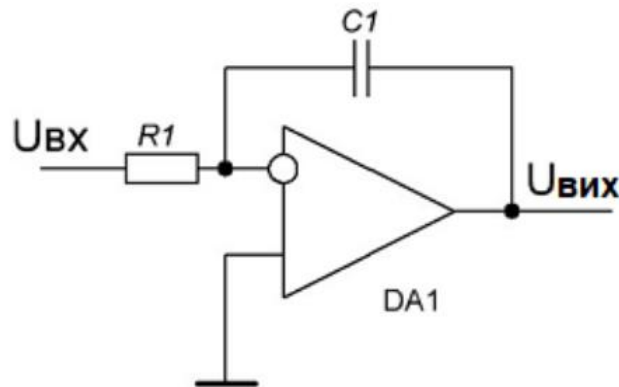


Рисунок 2.13 - Аналоговий інтегратор

Вихідна напруга інтегратора визначається як:

$$U_{\text{вих}} = \frac{1}{R_1 C_1} \int_0^t U_{\text{вх}} dt \quad (2.24)$$

Смуга робочих частот реального інтегратора відрізняється від ідеального інтегратора. В ідеальному випадку його логарифмічна амплітудно-частотна характеристика (ЛАЧХ) має нахил -20 дБ/дек на всіх частотах. Однак у реальних інтеграторах на низьких частотах відхилення зумовлені кінцевим коефіцієнтом підсилення операційного підсилювача (К), а на високих частотах – кінцевою частотою одиничного підсилення реального ОП [3].

#### Аналоговий диференціатор

Диференціатор виконує функцію, протилежну інтегратору: вихідний сигнал пропорційний швидкості зміни вхідного сигналу. Схема найпростішого диференціатора наведена нижче.



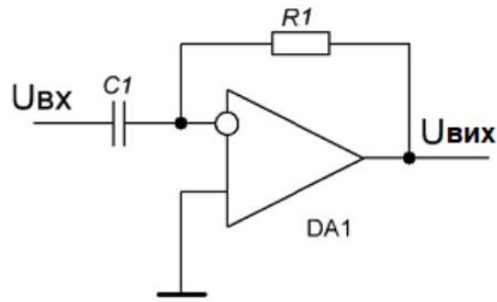


Рисунок 2.14 – Аналоговий диференціатор

Використовуючи RL та RC кола, можливо побудувати вибіркового підсилювач, тобто такий, що підсилює на вузькій смузі частот. Проте виконання таких схем є складним з точки зору інтегральних технологій, через використання реактивних елементів. Можна виділити окремий клас вибіркового підсилювачів, через їх високе застосування та можливе інтегрування в ІМС – це активні фільтри НЧ та ВЧ. Для послаблення сигналів в діапазоні частот вище деякої частоти  $f_0$  використовуються фільтри нижніх частот (ФНЧ), а нижче граничної частоти  $f_0$  – фільтри верхніх частот (ФВЧ), приклади практичної реалізації яких показані на рис.2.15 [3].

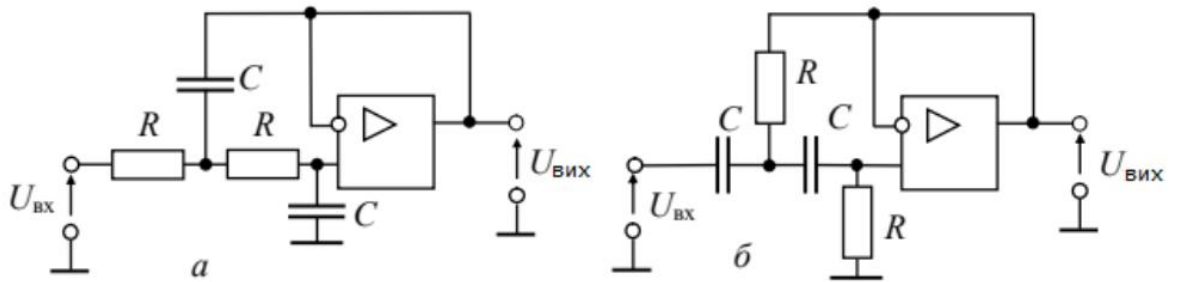


Рисунок 2.15 – Схеми активних фільтрів нижніх(а) та верхніх (б) частот

Гранична частота визначається за формулою:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.25)$$

Коефіцієнт підсилення в смузі пропускання розглянутих фільтрів дорівнює одиниці, оскільки операційний підсилювач (ОП) використовується як повторювач напруги. Крутизна логарифмічної амплітудно-частотної характеристики фільтрів другого порядку за межами смуги пропускання становить -40 дБ/дек. Смуговий фільтр можна побудувати шляхом послідовного з'єднання низькочастотного фільтра (ФНЧ) та високочастотного фільтра (ФВЧ), налаштованих на відповідні граничні частоти.

#### Внутрішня схемотехніка операційних підсилювачів

Як зазначено в розділі 2.3, кожен операційний підсилювач складається з трьох основних каскадів. Для створення конкретного ОП необхідно розглянути ці каскади. При побудові ОП не можна використовувати розділові конденсатори та трансформатори у колі зв'язку між каскадами, тому застосовується безпосередній (гальванічний) зв'язок каскадів.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ СЕКТОРАЛЬНОГО СЕНСОРА

#### 3.1 Розрахунок нормуючого пристрою для сенсора

У сучасних літальних засобах застосовуються різноманітні системи для забезпечення високоточного управління та стабілізації польоту. Однією з ключових складових таких систем є системи на секторальних сенсорах, які дозволяють отримувати точні дані про положення та динаміку літального апарата. У цій роботі ми використовуємо вже наявний секторальний датчик, що надає необхідні вимірювання для подальшої обробки.

Однак для ефективного використання інформації, отриманої від секторального сенсора, необхідно виконати її нормування. Це забезпечується спеціалізованими нормуючими пристроями, які перетворюють сигнали від сенсорів у стандартні форми, придатні для подальшої обробки та аналізу. Таке нормування дозволяє значно підвищити точність та надійність роботи системи управління літальним засобом.

У цьому підрозділі розглядаються метод розрахунку, необхідні для інтеграції в систему на основі секторального сенсора. Будуть проаналізовані основні параметри, що впливають на продуктивність нормуючого пристрою, та наведені приклади розрахунків для конкретних застосувань.

Параметри наданого нам секторального сенсора:

$$U_{\text{Свих}} = 0,25 - 0,5 \text{ В.}$$

Параметри нормуючого пристрою які ми хочемо отримати:

$$U_{\text{вх}} = 0,25 - 0,5 \text{ В.}$$

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{н}} = 3 - 6 \text{ В.}$$

$$U_{\text{жив}} = 12 \text{ В.}$$

Кількість каналів – 4

Для розуміння роботи нормуючого пристрою та його впливу на загальну систему управління літальним засобом, необхідно розглянути детальний розрахунок основних параметрів. Одним з таких параметрів є струм навантаження  $I_H$ , який розраховується за формулою:

$$I_H = \frac{U_H}{R_H} \quad (3.1)$$

де:  $U_H$  — напруга навантаження, В  $R_H$  — опір навантаження, Ом

У нашому випадку, напруга навантаження  $U_H$  становить 6 В, а опір навантаження  $R_H$  дорівнює 2000 Ом. Підставимо ці значення у формулу для обчислення струму навантаження:

$$I_H = \frac{6}{2000} = 0,003 \text{ А (3 мА)}$$

Цей розрахунок показує, що нормуючий пристрій повинен бути здатний стабільно працювати при даних умовах струму та напруги. Це важливо для забезпечення правильного функціонування всієї системи управління літальним засобом, оскільки будь-які відхилення можуть призвести до збоїв або неточностей у керуванні.

Крім того, розрахунок струму навантаження є критичним для визначення вимог до інших компонентів системи, таких як джерела живлення та підсилювачі сигналу. Важливо, щоб всі елементи системи були належним чином узгоджені між собою, що забезпечить їх ефективну взаємодію та надійну роботу.

При проектуванні нормуючого пристрою для системи управління літальним засобом, важливо враховувати не лише струм навантаження, але й струм вхідного кола. Струм вхідного кола визначається на основі струму навантаження і залежить від характеристик нормуючого пристрою.

Для розрахунку струму вхідного кола  $I_1$  використовується коефіцієнт, який характеризує співвідношення між вхідним струмом і струмом навантаження. У нашому випадку цей коефіцієнт становить 0,04. Формула для розрахунку струму вхідного кола виглядає наступним чином:

$$I_1 = 0,04 \times I_H \quad (3.2)$$

Виконаємо обчислення:

$$I_1 = 0,04 \times 0,003 = 0,00012 \text{ А (0,12 мА)}$$

Коефіцієнт підсилення:

При проектуванні нормуючого пристрою для системи управління літальним засобом, важливо розрахувати коефіцієнт підсилення, який визначає відношення вихідної напруги до вхідної. Коефіцієнт підсилення ( $K$ ) для даного випадку обчислюється за формулою:

$$K = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} \quad (3.3)$$

де:  $U_{\text{вих}}$  — вихідна напруга, В  $U_{\text{вх}}$  — вхідна напруга, В

$$K = \frac{6}{0,5} = 12$$

Вибір схеми інвертуючого підсилювача для мого проекту є розумним кроком. Ця схема надає можливість контролювати та регулювати напругу або сигнал, що передається, з високою точністю та стабільністю.

Інвертуючий підсилювач базується на принципі зворотного зв'язку, де вихідний сигнал подається на вхід через зворотний контур. Це дозволяє контролювати та стабілізувати вихідний сигнал відповідно до вхідного.

Розрахунок схеми інвертуючого нормуючого підсилювача, розрахунок  $R_1$  та  $R_2$  за законом Ома.

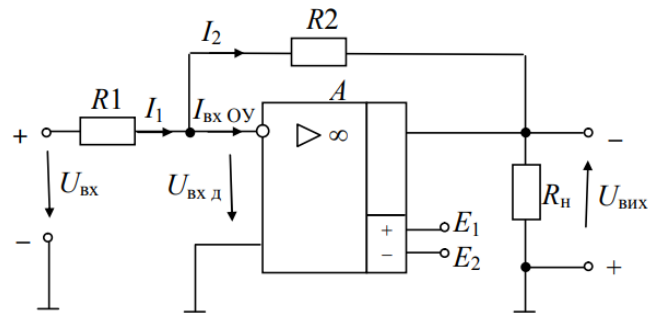


Рис.3.1 – Інвертуючий підсилювач напруги

Схема інвертує напругу, тому що вхідний сигнал подано на інвертуючий вхід. Отже, напруги  $U_{вх}$  і  $U_{вих}$  зміщені по фазі на  $\pi$ . Зворотний зв'язок подається на вхід підсилювача за допомогою резистора  $R_2$ , коло зворотного зв'язку в утворене зовнішніми елементами  $R_2$  і  $R_1$ . Тому що напруги вхідного  $U_{вх}$  та зворотного зв'язку  $U_{зв}$  зміщені на  $\pi$ , то зв'язок негативний. За способом уведення – зв'язок паралельний, за способом зняття – за напругою. Паралельний негативний ЗЗ призводить до збільшення вхідного струму схеми  $I_{вх} = I_1$ , і, як наслідок, до зменшення вхідного опору інвертуючого підсилювача порівняно з вхідним опором операційного підсилювача. Негативний ЗЗ за напругою призводить до зменшення вихідного опору інвертуючого підсилювача, тобто  $R_{вих} < R_{вих\ ОП}$ , яке й без зворотного зв'язку мале. Для спрощення аналізу будемо вважати, що у розглядуваній смузі частот операційний підсилювач близький до ідеального:  $K\ ОП \rightarrow \infty$ ,  $R_{вх}\ ОП \rightarrow \infty$ ,  $R_{вих}\ ОП \rightarrow 0$ . Це припущення можна вважати справедливим, тому що вхідна напруга ОП  $U_{вх\ д}$  тах дорівнює дуже маленькому значенню. У цьому випадку вважаємо, що  $U_{вх\ д} \approx 0$ , а вхідний струм ОП  $I_{вх\ ОП} \approx 0$ , тому що вхідний опір  $R_{вх}\ ОП \rightarrow \infty$ . Тоді для схеми рис. 3.1 справедлива рівність  $I_1 = I_2$ ,

Опір  $R_1$  вхідного кола вибираємо, виходячи, із заданого значення сили струму  $I_1$

$$R_1 = \frac{U_{\text{вх}}}{I_1} = \frac{0,5}{0,00012} = 4166 \text{ Ом} \approx 4.17 \text{ кОм}$$

$$R_2 = K \cdot R_1 = 12 \cdot 4100 \text{ Ом} = 49200 \text{ Ом} = 49.2 \text{ кОм}$$

Завдяки використанню нейромережі statGPT ми вибрали операційний підсилювач TL072 - двоканальний зображений на рис. 3.2. Це малошумний операційний підсилювач з вхідним каскадом на полевих транзисторах.

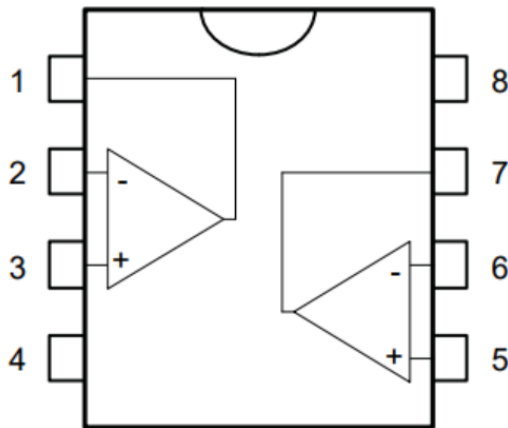


Рис. 3.2 – TL072 з розташуванням виводів для корпусу SO-8, вигляд зверху.

Значення виводів у мікросхеми:

1. Вихід 1: Цей вивід служить для передачі сигналу з першого каналу мікросхеми.
2. Інвертуючий вхід 1: До цього виводу підключається сигнал, який потрібно інвертувати на першому каналі.
3. Неінвертуючий вхід 1: Цей вивід приймає сигнал, який не потребує інверсії на першому каналі.
4. VCC — (Мінус живлення): Підключення негативного полюса джерела живлення.

5. Неінвертуючий вхід 2: Вхід для сигналу без інверсії на другому каналі.
6. Інвертуючий вхід 2: Вхід для сигналу, який потребує інверсії на другому каналі.
7. Вихід 2: Цей вивід використовується для передачі сигналу з другого каналу мікросхеми.
8. VCC + (Плюс живлення): Підключення позитивного полюса джерела живлення.

#### Характеристики:

- Напруга живлення (вхідна напруга) (min): Мінімальна допустима напруга живлення становить 7 В.
- Напруга живлення (вхідна напруга) (max): Максимальна допустима напруга живлення досягає 36 В.
- Струм споживання (на канал): Кожен канал мікросхеми споживає струм у 2.5 мА.
- Вхідна напруга усунення: Напруга усунення становить 10 мВ.
- Вхідний струм зміщення: Вхідний струм зміщення складає 200 пА.
- Швидкість наростання вихідної напруги: Швидкість зміни вихідної напруги складає 13 В/мкс.
- Гранична частота посилення: Максимальна частота, на якій мікросхема може посилювати сигнал, становить 3 МГц.
- Коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу: Синфазний сигнал ослаблюється на 70 дБ.
- Мінімальна робоча температура: Мікросхема функціонує при температурі від -40 °С.
- Максимальна робоча температура: Максимальна робоча температура складає 85 °С.

#### Особливості:

- Широкий діапазон синфазної та диференціальної напруги, який доходить до VCC.
- Низький струм зміщення на вході та нульовий струм зміщення.
- Низький рівень шуму: типове значення шуму становить  $15 \text{ нВ}/\sqrt{\Gamma \text{ ц}}$ .



- Захист від короткого замикання на виході, що підвищує надійність мікросхеми.
- Вхідний каскад на польових транзисторах, що забезпечує високий вхідний опір.

Під час проектування нашої електронної схеми ми провели детальні розрахунки для одного каскаду операційного підсилювача. Обраний нами підсилювач TL072 є малошумним двоканальним підсилювачем з вхідним каскадом на польових транзисторах, що зображено на рис. 3.2. Цей підсилювач забезпечує високоякісне підсилення сигналу завдяки своїм характеристикам.

Оскільки наша схема вимагає використання чотирьох каскадів, а кожен TL072 має лише два каскади, ми вирішили застосувати два таких підсилювачі, щоб досягти потрібної кількості каскадів. Для полегшення розрахунків і оптимізації проекту ми виконали всі необхідні розрахунки для одного каскаду. Всі параметри та характеристики, які були отримані в процесі цих розрахунків, є актуальними та застосовними для кожного з чотирьох каскадів нашої схеми.

Розрахунки для одного каскаду включали визначення таких параметрів, як посилення, частотна характеристика, вхідний та вихідний опір, рівень шуму та стабільність. Ми ретельно проаналізували ці параметри для одного каскаду, щоб гарантувати, що всі чотири каскади працюватимуть стабільно і надійно, забезпечуючи потрібну якість сигналу.

Завдяки тому, що всі каскади ідентичні, нам не потрібно повторювати розрахунки для кожного з них окремо. Це значно спрощує процес проектування і зменшує кількість можливих помилок. Кожен з каскадів буде мати ті ж самі характеристики і параметри, що й перший, що забезпечує узгодженість і передбачуваність роботи всієї схеми.

Таким чином, використання двох операційних підсилювачів TL072 дозволяє нам досягти потрібної кількості каскадів, зберігаючи при цьому високі стандарти якості і надійності сигналу. Це рішення є оптимальним для нашого проекту, оскільки воно спрощує розрахунки і забезпечує стабільність роботи всієї системи.

### 3.2 Розробка схеми електричної принципової

У цьому підрозділі буде розглянуто процес розробки електричної принципової схеми пристрою керування літаючим засобом на основі секторального сенсору. Основна увага буде зосереджена на структурних елементах схеми, їх функціональному призначенні та взаємодії між собою. Це дозволить отримати комплексне уявлення про роботу системи в цілому і забезпечить базу для подальшого вдосконалення та адаптації до різних типів літальних апаратів.

Розробка схеми включатиме аналіз необхідних компонентів, визначення їх характеристик та оптимальну компоновку з урахуванням вимог до надійності, швидкодії та енергоефективності системи. В результаті буде створено модель, яка дозволить забезпечити стабільну роботу літаючого засобу у різноманітних умовах експлуатації.

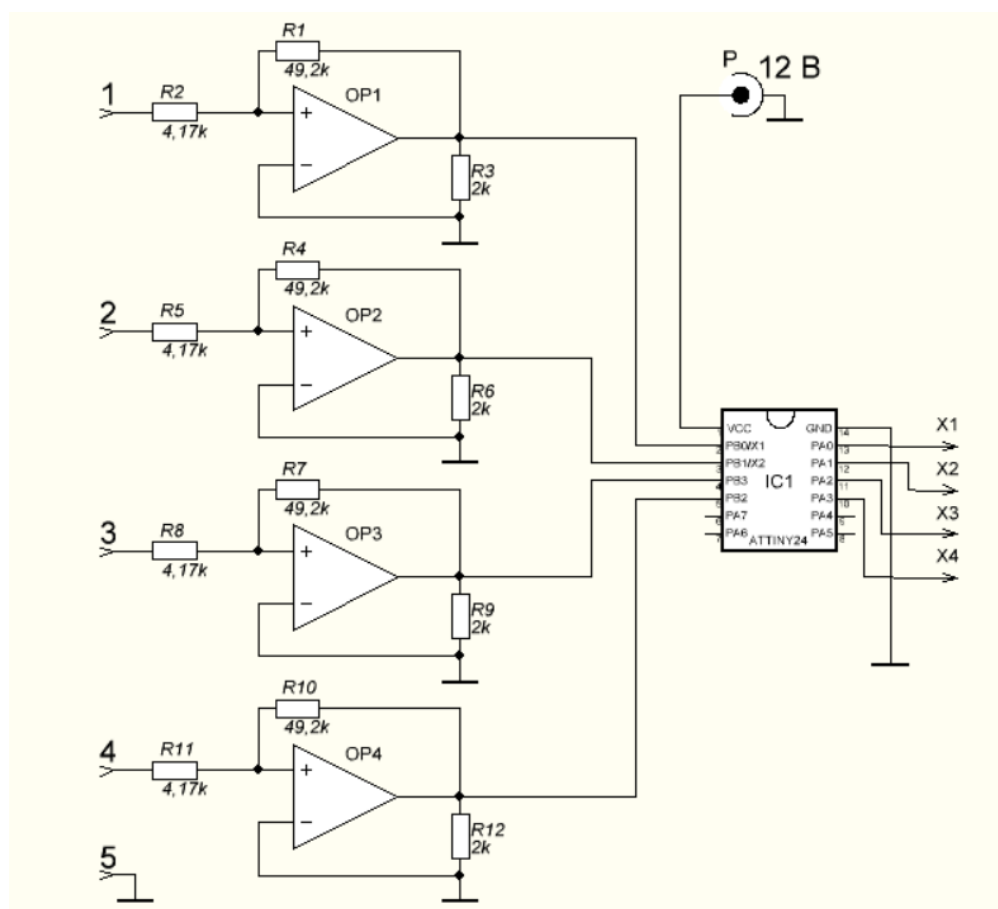


Рис. 3.2 Схема електрична принципова проекту.

На рисунку 3.2 ми бачимо схему принципової електричної системи керування польотом, що базується на секторальному датчику. Ця система складається з чотирьох основних компонентів, кожен з яких відіграє важливу роль у забезпеченні правильної роботи літального апарату.

Перший компонент - блок з чотирьох операційних підсилювачів, які відповідають за підсилення та нормування сигналів, отриманих від датчика. Ці операційні підсилювачі грають ключову роль у забезпеченні правильної обробки вхідних даних та їх передачі для подальшої обробки.

Другий компонент - п'ять входів з пезогальванічного секторального датчика, що збирають інформацію про навколишнє середовище і передають її на операційні підсилювачі для подальшої обробки. Ці вхідні дані допомагають системі отримати повну картину про оточуючу обстановку та вжити необхідні заходи для подальшого керування польотом.

Третій компонент - мікроконтролер ATtiny24, який відповідає за аналіз отриманих даних та прийняття рішень щодо керування приводами літального апарату. Мікроконтролер ATtiny24 обробляє інформацію від операційних підсилювачів та входів з датчика і визначає оптимальні керуючі сигнали для забезпечення правильної траєкторії польоту.

Останній компонент - приводи літального апарату, які отримують сигнали від мікроконтролера і відповідають за рухи та маневри літального засобу. Ці приводи виконують команди, отримані від керуючої системи, і забезпечують польот згідно з заданими параметрами.

Таким чином, ця система керування польотом на основі секторального датчика інтегрує різні компоненти для забезпечення точного та надійного керування літальним апаратом. Вона дозволяє здійснювати ефективний контроль над польотом і забезпечує точний і надійний автопілот літального засобу.

### 3.3 Розробка програми керування

У сучасному світі автоматизація та контроль систем стали важливими компонентами в багатьох сферах, від промисловості до побутових пристроїв.[43] Однією з ключових технологій, що дозволяє забезпечити ефективну роботу таких систем, є використання мікроконтролерів. Дані мікроконтролери дозволяють розробникам створювати програмне забезпечення для керування і контролю різноманітними пристроями та процесами.[38-42]

Метою є розробка програмного забезпечення для керування системою, що використовує мікроконтролер ATtiny 24. Система складається з секторального датчика та двигунів, які керують процесом польоту. Основною задачею цієї системи є автоматичне регулювання роботи двигунів на основі показів секторального фотопізоелектричного датчика для автоматичного польоту літаючого засобу.[40-42]

Код програми:

```
#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>

#define THRESHOLD 10 // Поріг відхилення для визначення необхідності
корекції

int main(void) {
    // Ініціалізація входів і виходів
    DDRA = 0b00000111; // PA0-PA2 як виходи (для керування двигунами)
    DDRB = 0b00000000; // PB0-PB3 як входи (для секторального датчика)

    while (1) {
        // Очікування сигналу на PA3
        while (!(PINA & (1 << PA3))) {}
    }
}
```

```
// Отримання значень з датчика
uint8_t sensorValues[4];
for (int i = 0; i < 4; i++) {
    // Читання значення з входу PB0-PB3
    sensorValues[i] = PINB & (1 << i);
}

// Розрахунок суми пар значень датчика
uint8_t sum1 = sensorValues[0] + sensorValues[1];
uint8_t sum2 = sensorValues[2] + sensorValues[3];

// Перевірка різниці між сумами і керування двигунами
if (sum1 > sum2) {
    PORTA = (1 << PA0); // PA0 - напрямок 1
} else {
    PORTA = (1 << PA1); // PA1 - напрямок 2
}

if (sensorValues[1] + sensorValues[3] > sensorValues[0] + sensorValues[2]) {
    PORTA |= (1 << PA2); // PA2 - напрямок 3
} else {
    PORTA |= (1 << PA1); // Зворотній сигнал на PA1
}

// Затримка, щоб уникнути надмірного опитування датчика
_delay_ms(100);
}
return 0;
}
```

Давайте розглянемо кроки роботи програми:

Ініціалізація вхідних та вихідних портів:

Ми вказуємо мікроконтролеру, які піни використовувати для керування двигунами та для отримання даних від секторального датчика.

Очікування сигналу на початок роботи:

Програма очікує сигналу на вході РА3. Цей сигнал вказує на початок роботи системи.

Отримання значень з датчика:

Після отримання сигналу на початок роботи, програма зчитує значення з чотирьох вхідних портів, підключених до секторального датчика.

Обробка значень датчика та керування двигунами:

Програма обробляє значення з датчика, розраховуючи суми значень з двох пар портів. Потім вона порівнює ці суми, щоб визначити оптимальний напрямок роботи двигунів. Залежно від порівняння, вона встановлює певні вихідні сигнали для керування двигунами.

Затримка:

Програма встановлює невелику затримку між кожною ітерацією головного циклу, щоб уникнути надмірного опитування датчика та збільшити ефективність програми.

Ці кроки дозволяють програмі автоматично керувати роботою двигунів на основі показів секторального датчика з метою забезпечення оптимального функціонування системи.

## ВИСНОВКИ

У першому розділі нашої роботи ми провели докладний аналіз концепцій систем керування, щоб визначити найефективніші та найпридатніші для впровадження в нашу систему автоматичного керування польотом. Зосередившись на аналізі різних типів сенсорів, ми провели порівняльну оцінку їх ефективності та придатності. В результаті комплексного огляду було виявлено, що секторальний датчик проявляє найвищу сумісність з вимогами нашого проекту.

Більше того, ми провели аналітичну оцінку ролі сенсорів у взаємодії з системами керування, виявивши їх важливість та вплив на загальну ефективність функціонування. Наш аналіз також охопив тенденції розвитку сучасних електронних систем, включаючи можливі шляхи удосконалення функціоналу та параметрів сенсорів у майбутніх проектах. Це допомагає нам не лише зрозуміти сучасний стан розвитку технологій, а й поглибити наші знання для подальшого вдосконалення системи керування польотом.

У другому розділі ми зосередили увагу на технічному забезпеченні нашої системи. Ми детально розглянули принципи роботи та функціональні характеристики п'єзогальванічного секторального датчика, розкривши його призначення та потенційні застосування в контексті нашого проекту.

Також, ми проаналізували принцип роботи операційних підсилювачів, розглянули різні схеми їх включення та обрали оптимальний варіант для нашої системи. Це дозволить забезпечити стабільну та ефективну роботу нашої системи автоматичного керування польотом, зменшуючи можливі технічні ризики та забезпечуючи високу точність та надійність її функціонування.

У третьому розділі нашого дослідження ми зосередилися на розробці та розрахунку нормуючого пристрою. За допомогою сучасних підходів та рекомендацій штучної нейромережі ChatGPT ми вибрали операційний підсилювач TL072 для створення цього пристрою. Результатом нашої роботи стала електронна принципова схема системи, яка включає в себе кілька ключових

компонентів: секторальний фотогальванічний сенсор, нормуючий пристрій, мікроконтролер ATtiny24 та силову частину.

Ми розробили спеціальну програму для мікроконтролера, що дозволяє нам точно наводити літальний засіб на ціль, використовуючи дані, отримані від секторального сенсора. Основне призначення цієї системи - військове застосування, оскільки ми досягли високої точності, ефективності та надійності. Секторальний фотогальванічний сенсор є генеруючим елементом, який не потребує заряджання, оскільки здатний самостійно підзаряджати систему невеликим струмом у періоди неактивності.

Цей сенсор чутливий до інфрачервоного спектру, що дозволяє нам наводити літальний засіб на теплові цілі, такі як транспортні засоби та люди. Система також може знайти застосування у сфері доставки їжі для точної посадки дронів за допомогою спеціальної системи. Крім того, у космічній галузі вона може бути використана для керування супутниками.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Йеджер, Хеллоурт. Динамический способ компенсации напряжения сдвига нулевого уровня в операционных усилителях. - «Электроника», 1972, № 25.
2. Петин, Г.П. Транзисторные усилители, генераторы и стабилизаторы - М.:Энергия, 1978.-11с.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Том 1.Пер.с нем.-М.: Мир, 1982.-512с.
4. Maruf, Md Hasan & Korishe, Abdulah & Roy, Sajib. Analysis of analog receiver front end sections for body-coupled communication // IEEE paper (Receiver front End) - 2024. – Режим доступа до ресурсу: [https://www.researchgate.net/publication/308693542\\_IEEE\\_paper\\_Receiver\\_front\\_End](https://www.researchgate.net/publication/308693542_IEEE_paper_Receiver_front_End).
5. Хоровиц, П. Искусство схемотехники – Изд. 6-е. / П. Хоровиц, У. Хилл. – М.: Мир, 2003. – 704 с.
6. Джексон, Р. Г. Новейшие датчики / Р. Г. Джексон. – М. : Техносфера, 2007. – 384 с.
7. Ленк, Дж. Справочник по современным твердотельным усилителям: Пер. с англ. - М.:Мир, 1977.-500с.: ил.
8. Шарапов, А. В. Аналоговая схемотехника: Учебное пособие [Электронный ресурс] / А. В. Шарапов. — Томск: ТУСУР, 2006. — 193 с.
9. Топильский, В. Б. Микроэлектронные измерительные преобразователи [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. Б. Топильский. – 2-е изд. (эл.).— М. : БИНОМ.Лаборатория знаний, 2013. – 493 с.
- 10.Мамонкин, И.Г. Усилительные устройства Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, доп. и перераб. — М.: Связь, 1977. — 360 с.
- 11.Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника — Изд. 6-е. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. — 703 с

12. Behzad Razavi. Design of analog CMOS integrated circuits / Behzad Razavi. p.cm.
13. Гулай В.А., Гулай А.В., Колешко В.М. "Сенсорная микросистема на кристалле": моделирование сенсорного интерфейса // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2010. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л.Стемпковского. М.:ИППМ РАН, 2010. С. 605-610.
14. Газові сенсори та застосування наноматеріалів у сенсоріці: навч. Посібник / Л.П. Олексенко, Н.П. Максимович, І.П. Матушко, Г.В. Федоренко. – К.: ВПЦ "Київський університет", 2019. – 143 с.
15. American Chemical Society. A General Photonic Crystal Sensing Motif: Creatinine in Bodily Fluids / Sharma A.C, Jana T, Kesavamoorthy R, Shi L, Virji M.A, Finegold D.N // Journal of the American Chemical Society. – 2004 Vol. 126, №9. – P.2971–2977.
16. American Chemical Society. High ionic strength glucosesensing photonic crystal / Vladimir L. Alexeev, Anjal C. Sharma, Alexander V. Goponenko // Analytical Chemistry. – 2003. – Vol. 75, №10. P. 2316–2323.
17. Koschinsky T, Heinemann L. Sensors for glucose monitoring: technical and clinical aspects / Koschinsky T, Heinemann L. //Diabetes Metab Res Rev. – 2001. Vol.17, №2. P.113- 123.
18. Николаев К.Г. Повышение стабильности аналитического сигнала и миниатюризация вольтамперометрических сенсоров для определения глюкозы и 54 пероксида водорода: дис. ... канд. хим. наук: 02.01.02 Николаев Константин Геннадьевич. – К., 2017. – 138 с. – Библиогр.: с. 120-137.
19. Capetanopoulos C. D. Gas sensors and method of using same // Book Gas sensors and method of using same / Editor Google Patents, 1998.
20. Pratt K. F. E., Chapples J., Jones M., Costea S. D., Gologanu M. Methods of operation of electrochemical gas sensors // Book Methods of operation of electrochemical gas sensors / Editor Google Patents, 2012.

21. Chen S., Yuan R., Chai Y., Hu F. Electrochemical sensing of hydrogen peroxide using metal nanoparticles: a review // *Microchimica Acta*. – 2013. – Vol. 180, № 1-2. – P. 15.
22. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования учебник / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб.: Профессия, 2003.–752 с.
23. Соколов, А.Ю. Проектирование систем управления на ЭВМ (MATLAB/Simulink/Control Systems) / А.Ю. Соколов, Ю.Н. Соколов, В.М. Илюшко. – Х.: “ХАИ”, 2005. -590 с.
24. Долгин, В.П. Автоматическое управление техническими и технологическими объектами и системами. Методы анализа систем и объектов учебн. пос. для вузов / В.П. Долгин; – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. – 404 с.
25. Бабаков, Н.А. Теория автоматического управления в 2-х частях: ч1 Теория линейных систем автоматического управления, 2-е изд. перераб. и доп. Н.А. Бабаков, А.А. Воронов, А.А. Воронова и др.; под. ред. А.А. Воронова. – М: Высш. школа, 1986. – 367с.
26. Лазарева, Т. Я. Основы теории автоматического управления уч. пос. 2-е изд., перераб. и доп. / Т. Я. Лазарева, Ю. Ф. Мартемьянов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 352 с.
27. Михайлов, В.С. Теория управления/ – К.: Вища шк.,1988. – 312с
28. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: підручник / Є.С. Поліщук [та ін.] Львів: Вид-во "Бескид Біт", 2008. – 618 с.
29. Датчики измерительных систем: В 2-х кн.: пер. с франц. / Ж. Аш и др. М.: Мир, 1992. – 480 с.
30. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: В 3-ох т. / В. Вуйцік, З. Готра, О. Готра та інш.; Львів: Ліга-Прес, 2003. – 595 с.
31. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
32. Эггинс Б. Химические и биологические сенсоры – М.: Техносфера, 2005. – 336 с.

33. Пасынков В.В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы: учебн.пособие. – СПб.: Лань, 2002. – 480 с.
34. Дж. Фрайден Современные датчики. - М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
35. Борисов О. В. Основи твердотільної електроніки: навч. посіб. / О. В. Борисов; за ред. Ю. І. Якименка. – К.: Освіта України, 2011. – 462 с.
36. Борисов, О. В. Мікроелектронні сенсори на основі кремнієвих р-ппереходів: навч. посібник / О.В. Борисов, П.О. Яганов: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. –151 с.
37. Сенсорні прилади на основі поверхневого плазмонного резонансу: монографія / Г.В. Дорожинський, В.П. Маслов, Ю.В. Ушенін. – К.: НТУУ "КПІ", 2016. – 264 с.
38. Мікропроцесорна техніка: Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / К. П. Вонсевич, М. О. Безуглий ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 3,53 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 94 с.
39. Мікроконтролери: Архітектура, програмування та застосування в електромеханіці : навч. посіб. / Ю. С. Грищук. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – 384 с.
41. Програмування мікроконтролерів AVR : [навчальний посібник] / С. М. Цирульник, О. Д. Азаров, Л. В. Крупельницький, Т. І. Трояновська. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 111 с.
42. Мікропроцесорна техніка [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів усіх форм навчання та студентів-іноземців напряму підготовки 6.050701 “Електротехніка та електротехнології” / НТУУ «КПІ» ; уклад. В. В. Кирик. – Київ : Політехніка, 2014. – 184 с.
43. Мікропроцесорна техніка [Текст]: навч. посібник / В.В. Ткачов, Г. Грулер, Н. Нойбергер та ін. – Д.: Національний гірничий університет, 2012. – 188 с.