МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

на тему Дослідження та розробка мікромеханічної системи орієтації у просторі

Виконав: студент II курсу, групи 8.1764
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Мікроелектронні інформаційні системи
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

_____ А. К. Косяк
(ініціали та прізвище)

Керівник доцент кафедри ЕІСПЗ, доцент, к.ф.-м.н., Світанько М.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент завідувач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, професор, д.т.н., Коваленко В.Л.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Факультет _____
Кафедра *електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення*
Рівень вищої освіти *другий (магістерський)*
Спеціальність *176 «Мікро- та наносистемна техніка»*
(код і назва)
Освітня програма *Мікроелектронні інформаційні системи*
(код і назва)
Спеціалізація _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *ЕІСПЗ*
Критська Т.В.
"____" _____20___року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Косяку Антону Костянтиновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) *Дослідження та розробка мікромеханічної системи орієтації у просторі*

керівник роботи *Світанько Микола Вікторович, к.ф.-м.н., доцент*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "*27*" *лютого 2025 року №* *313-с*

2 Строк подання студентом роботи *01 грудня 2025 року*

3 Вихідні дані до роботи *3кГц – 50 кГц, U=±15 В, U=±5 В, RASPBERRY PI, Multisim*

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)*1. Пристрої та системи для просторової орієнтації 2. Розробка мікромеханічної системи орієтації у просторі 3. Техніко – економічне обґрунтування 4. Охорона праці та техногенна безпека при розробці системи*

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
1. Системи просторової орієнтації 2. Структурна схема мікромеханічної системи орієтації у просторі 3. П'єзоелектричний сеснсор 4. Частотний фільтр мікромеханічної системи орієтації у просторі 5. Моделювання роботи фільтра мікромеханічної системи орієтації у просторі 6. Підсилювач сигналу мікромеханічної системи орієтації у просторі 7.

Мікропроцесорний блок керування мікромеханічної системи орієтації у просторі 8. Електрична схема мікромеханічної системи орієтації у просторі

.

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I	*Світанько М.В., доцент*	*28.02.2025*	*28.02.2025*
II	*Світанько М.В., доцент*	*28.02.2025*	*28.02.2025*
III	*Світанько М.В., доцент*	*28.02.2025*	*28.02.2025*
IV	*Світанько М.В., доцент*	*28.02.2025*	*28.02.2025*

7 Дата видачі завдання _____*28 лютого 2025 року*_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Літературний огляд*	*23.04.2025*	
2	*Розрахункова частина*	*20.10.2025*	
3	*Техніко-економічне обґрунтування розробки*	*20.11.2025*	
4	*Розробка заходів із охорони праці та техногенної безпеки*	*20.11.2025*	
5	*Розробка графічної частини роботи*	*25.11.2025*	
6	*Оформлення пояснювальної записки*	*01.12.2025*	
7	*Нормоконтроль*	*01.12.2025*	
8	*Попередній захист роботи*	*05.12.2025*	

Студент _____ _____*Косяк А.К.*_____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) _____ ____*Світанько М.В.*_____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ _____*Верьовкін Л.Л.*_____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Реферат

Дипломна робота містить 78 сторінок, 36 рисунків, 13 таблиць, 48 джерел літератури.

Об’єкт дослідження – навігаційні інформаційні системи.

Мета роботи – дослідження та розробка мікромеханічної системи орієнтації у просторі.

Завдання роботи – розробити ефективну систему орієнтації у просторі та їїструктурну схему; провести моделювання роботи основнихфункціональних складових за допомогою сучасних САПР електронних схем.

Методика досліджень – моделювання пристрою за допомогою програм САПР електронної техніки.

Короткий виклад результатів досліджень – розроблено систему орієнтації га основі балкового вібраційного гіроскопу LL- типу на довгому стрижні. Результати впроваджень – макет електронного приладу пройшов випробовування на кафедрі ЕІСПЗ.

Прогнозні пропозиції – пропонується застосувати систему для багатовісьових гіроскопів на базі плати Raspberry Pi Pico.

ГІРОСКОП, МІКРОКОНТРОЛЕР, П’ЄЗОДАТЧИК, ОПЕРАЦІЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ, RASPBERRY PI

Дипломну роботу виконано на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення з 28.02.2025 р. по 01.12.2025 р.

ЗМІСТ

Стор.

Вступ ……. 6

1. Пристрої та системи для просторової орієнтації ……. 8

1.1 Електро-механічні гіроскопи…… 8

1.1.1 Вібраційні гіроскопи…….. 8

1.1.2 Балкові та стрижневі гіроскопи ……... 11

1.1.3 TF-гіроскопи…… 13

1.2 Інерціальні вимірювальні модулі……. 20

1.3 Оптичні гіроскопи…….. 23

1.3.1 Лазерний гіроскоп……... 23

1.3.2 Волоконно-оптичний гіроскоп……... 25

2. Розробка мікромеханічної системи орієтації у просторі …… 26

2.1 Структурна схема мікромеханічної системи орієтації у простор……. 26

2.2 П’єзоелектричний сеснсор…….. 28

2.3 Фільтр високих частот (ВЧ) мікромеханічної системи орієтації у просторі …… 30

2.4 Підсилювач сигналу мікромеханічної системи орієтації у просторі…… 39

2.5 Мікропроцесорний блок керування мікромеханічної системи орієтації у просторі…….. 43

3. Техніко-економічне обґрунтування розробки мікромеханічної системи орієтації у просторі …….. 50

3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення схем мікромеханічної системи орієтації у просторі…….. 50

3.3.2 Розрахунок витрат на виробництво схем мікромеханічної системи орієтації у просторі……. 55

4 Охорона праці та техногенна безпека при розробці мікромеханічної

системи орієтації у просторі ……. 57
4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів…….. 57
4.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів…… 60
4.3 Виробнича санітарія……... 62
4.4 Електробезпека……... 63
4.5 Пожежна та техногенна безпека об’єкту …….. 54
4.6 Розрахунок освітлення робочого місця …….. 65
Висновки та рекомендації……... 68
Перелік посилань…….…… 70
Додаток 1……. 75

Вступ

Навігаційна система (навігаційний комплекс) — це сукупність приладів, алгоритмів і програмного забезпечення, що забезпечують орієнтування об'єкта в просторі (навігацію). До навігаційного комплексу можуть входити як складні навігаційні системи (наприклад, супутникова навігаційна система), так і окремі прилади, що дозволяють визначити географічні координати об'єкта або його розташування відносно інших об'єктів.

Навігаційні системи забезпечують орієнтацію за допомогою:

- карт, що мають відео, графічний або текстовий формати;
- визначення місця розташування за допомогою датчиків або інших зовнішніх джерел (наприклад, навігаційних супутників);
- інформації від інших об'єктів [1].

Сучасні тенденції розвитку навігаційних комплексів вказують на триваючий розвиток систем глобального позиціонування і особливу роль, яка їм приділяється з боку розвинених держав і союзів. При цьому, кожна з країн, розуміючи ризики і загрози безпеці, пов'язані з порушенням роботи аналогічних систем інших країн, послугами яких доводиться користуватися, намагаються розвивати власні навігаційні системи, стійкі до активних дій [2].

Крім того, інженери шукають нові технічні рішення. Наприклад, зовсім нещодавно, після серії зломів і збоїв в системі GPS, військові сили США і кілька американських лабораторій, заявили про проведення робіт над створенням нового квантового навігатора, який може повністю змінити глобальні пошукові системи, позбавивши їх потреби в супутниках. А компанія Volkswagen навіть оголосила, про плани протестувати в реальних умовах навігатор, що працює за допомогою квантових обчислень. Як стверджує концерн, це перший в світі подібний експеримент по оптимізації дорожнього руху [2].

Тому, актуальним є питання розвитку, як нових навігаційних систем, так і систем орієнтації у просторі, незалежних від супутникових мереж. Основою таких комплексів мають стати прилади, створені на базі сучасних електронних і інформаційних технологій.

1. Пристрої та системи для просторової орієнтації

Типовим класичним приладом для визначення орієнтації у просторі є гіроскоп. Зазвичай гіроскопом називають навігаційний прилад, основним елементом якого є швидкообертовий ротор, поміщений в підвіс – у карданний підвіс. Головною властивістю кардонового підвісу є те, що закріплений в ньому обертовий ротор буде завжди зберігати напрямок осі обертання незалежно від орієнтації самого підвісу. Саме ця властивість гіроскопа - здатність зберігати в просторі незмінно напрямок осі обертання за відсутністю впливу на нього моментів зовнішніх сил і визначило його використання в системах орієнтації рухомих об’єктів. Зокрема авіаційні гіроскопічні прила-ди призначені для вимірювання кутового положення та кутових швидкостей літального апарата [3].

1.1. Електро-механічні гіроскопи

1.1.1 Вібраційні гіроскопи

Водночас поряд з гіроскопічними датчиками кутової швидкості, основним елементом яких є обертовий механічний ротор, відомі пристрої, які виконують функції вимірювання кутової швидкості, але не мають ротора. Зокрема, до таких датчиків належать вібраційні гіроскопи, які містять вібрувальні деталі, що реагують на обертання об’єкта [5].

Принцип роботи таких гіроскопів ґрунтується на тому, що під час обертання вібруючого в одній площині тіла, наприклад, стрижня (рис. 1.1) в ортогональній цим вібраціям площині з’являються знакозмінні сили

Коріоліса $F_к$, які вигинають стрижень в площині дії цієї сили, тобто в цій площині викликаються вторинні вібраційні коливання [3-8].

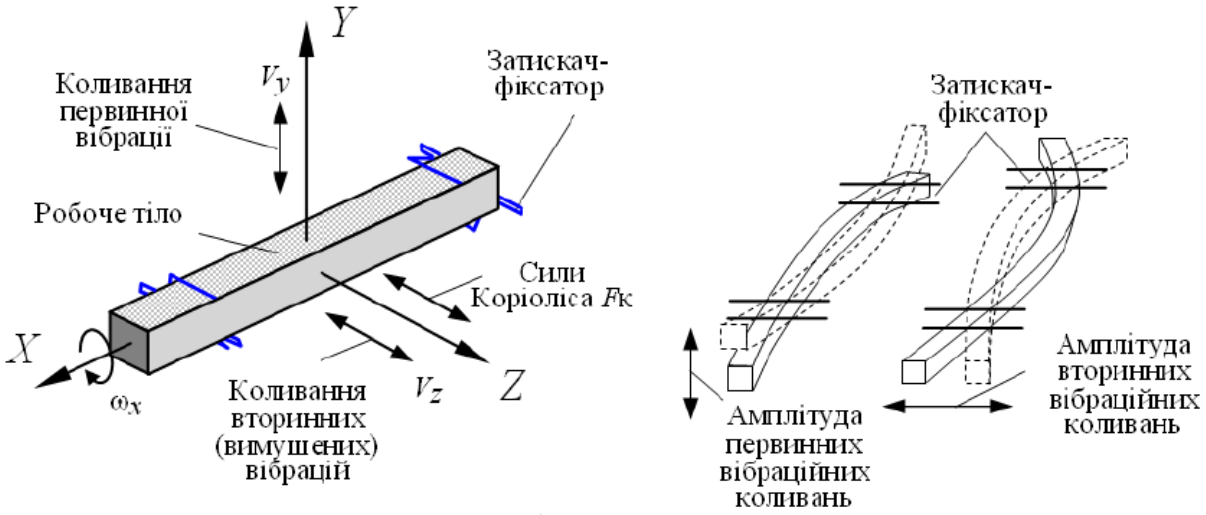


Рисунок 1.1 – Вібраційний гіроскоп

У загальному випадку сила Коріоліса, що діє на тіло, визначається як [3-8]:

$$F_К=2m[\Omega \times V], \qquad (1.1)$$

де Ω - вектор кутової швидкості (тут кутова швидкість V_x); V - вектор лінійної швидкості тіла відносно обертової основи (тут лінійна швидкість центра мас стрижня V_y відносно затискачів-фіксаторів); m - маса тіла.

Модуль $F_К=2m\Omega V\sin\varphi$, де φ - кут між векторами лінійної та кутової швидкості. Сила Коріоліса напрямлена перпендикулярно до напрямку коливань (див. рис. 1.1) та осі обертання. У разі протилежних напрямків руху сила Коріоліса також діє в протилежних напрямках. На цьому і заснований принцип дії вібраційного гіроскопа, який дозволяє вимірювати величину кутової швидкості тіла під час обертання його навколо осі вимірювання (яка у розгляданому випадку збігається з поздовжньою віссю стрижня).

Визначивши силу Коріоліса та знаючи лінійну швидкість тіла, нескладно визначити кутову швидкість та її зміну (кутове прискорення).

Завдання спрощується, якщо лінійна швидкість коливань V змінюється за синусоїдальним законом $V = V_0 \sin(\omega t)$.

Тоді визначення сили Коріоліса зводиться до детектування сигналу Ω, модульованого несучою частотою ω [3-8]:

$$F_K = 2V_0\Omega \sin(\omega t). \quad (1.2)$$

Детектування параметрів вторинної вібрації дозволяє визначати кутову швидкість обертання основи.

Розглянутий принцип роботи вібраційного гіроскопа стрижневого типу був втілений в датчик кутової швидкості, що отримав назву гіротрон. Гіротрон не був доведений до прецизійного приладу через низку непереборних на той час здебільшого технічних причин, але на новому витку розвитку мікротехнологій ідея гіротрона була втілена в мініатюрні МЕМС-датчики кутової швидкості або у вібраційні мікромеханічні гіроскопи (ММГ).

За виглядом руху вимірювальної маси (ВМ) у режимах первинних і вторинних вібрацій розрізняють ММГ LL-типу, RR-типу і LR-типу. У датчиках LL-типу ВМ здійснює поступальні переміщення, у гіроскопах RR-типу - обертальні переміщення, а в мікромеханічних гіроскопах LR-типу - різні комбінації поступальних і обертальних переміщень. Кожний тип ММГ характеризується набором класифікаційних ознак, найважливіші з яких такі:

1) кількість вимірювальних осей (одно-, дво- і тривісні);
2) тип підвісу (механічні і неконтактні підвіси. У свою чергу, механічні підвіси можуть бути зовнішніми або внутрішніми, а неконтактні підвіси - електростатичними, магнітними та ін.);
3) тип приведення ВМ у режим вібрації та тип датчика знімання сигналу (магнітоелектричні, електростатичні, п’єзоелектричні);
4) режим вимірювання (пряме або компенсаційне вимірювання з від’ємним зворотним зв’язком).

Усі конструкції ММГ, попри широку їх різноманітність, можна звести до декількох типів. Одними з найперших були балкові ММГ [3-8].

1.1.2. Балкові та стрижневі гіроскопи

Принцип дії *балкових* гіроскопів LL-типу повторює розглянутий вище принцип роботи вібраційного гіроскопа на основі довгого стрижня: консольну балку змушують коливатися за допомогою п’єзоелементів у напрямку осі *Y* (рис. 1.2, *а*). Під час обертання балки відносно осі *Z* під дією сили Коріоліса збуджуються коливання уздовж осі *X*. Вони реєструються іншими п’єзоелементами. Конструкції балок можуть бути різними. Наприклад, у *стрижневих* гіроскопах компанії «*Елпа*» використовується триполюсний вібра-тор - сталевий стрижень у пружному двосторонньому підвісі з поперечним перерізом у вигляді рівностороннього трикутника (рис. 1.2, *б*) [3-8].

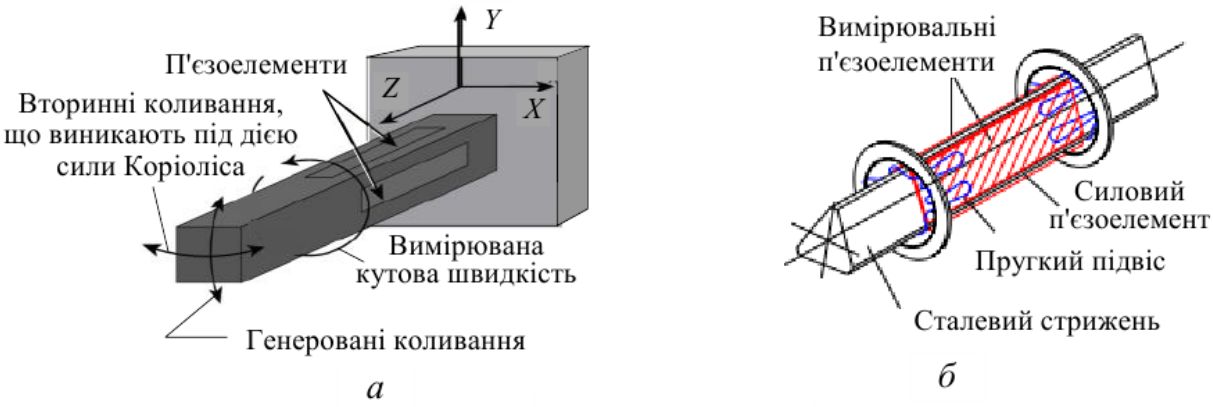


Рисунок 1.2 - Балкові та стрижневі гіроскопи

Відзначимо, що конструкція резонатора може бути набагато складніше описаної. Так, один з лідерів промислового освоєння вібраційних п’єзоелектричних гіроскопів - компанія *Murata* запатентувала структуру, в якій резонатор являє собою пару коливних у протифазі пластин (біморфних, або наклеєних на металеву основу - уніморфних).

Кожна з пластин (рис. 1.3) складається з трьох частин з протилежними напрямками поляризації, в яких електродами генерації збуджуються первинні коливання [3-8].

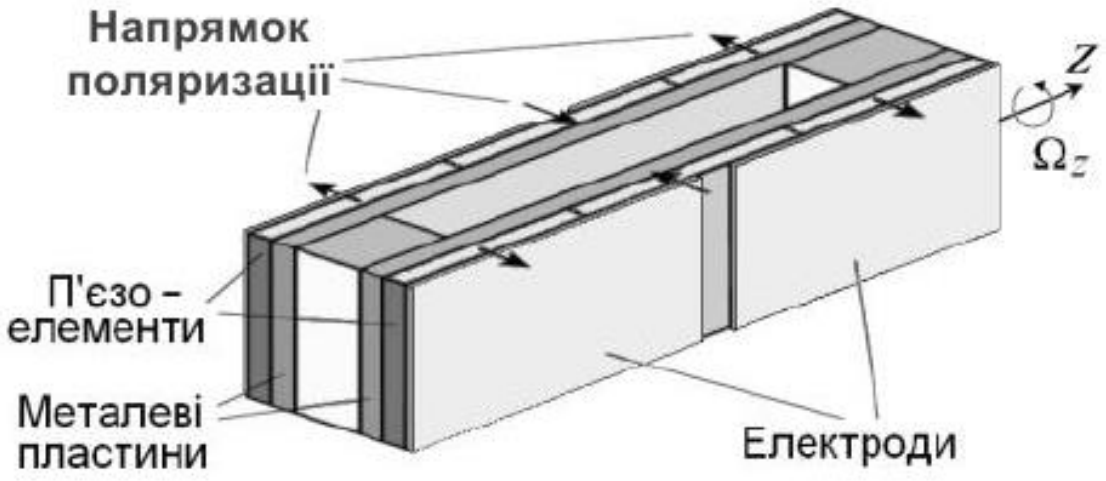


Рисунок 1.3 - Вібраційний пластинчатий п’єзоелектричний гіроскоп

Під час обертання відносно осі Z виникають вторинні коливання пластин. Хоча первинні коливання пластин відбуваються в протифазі, сигнали їх генерації синфазні. Вторинні ж коливання, що зумовлені силою Коріоліса, викликають додаткові протифазні сигнали на електродах, різниця яких пропорційна кутовій швидкості обертання. Таким чином, за допомогою диференціальної схеми можна виділяти ці сигнали. При цьому використовуються ті самі електроди, що і для генерації первинних коливань. Компанія Murata презентувала гіроскоп ENC-03RC масою 0,2 мг і в мініатюрному корпусі (8×4×2 мм) П’єзоелектричний сенсор змонтований на кристалі за унікальною технологією, розробленою фірмою Murata, завдяки чому досягається поліпшена точність датчика, яка в 100 разів перевищує точність подібних виробів інших виробників. Схему підключення пристрою показано на риунку.1.4 [3-8].

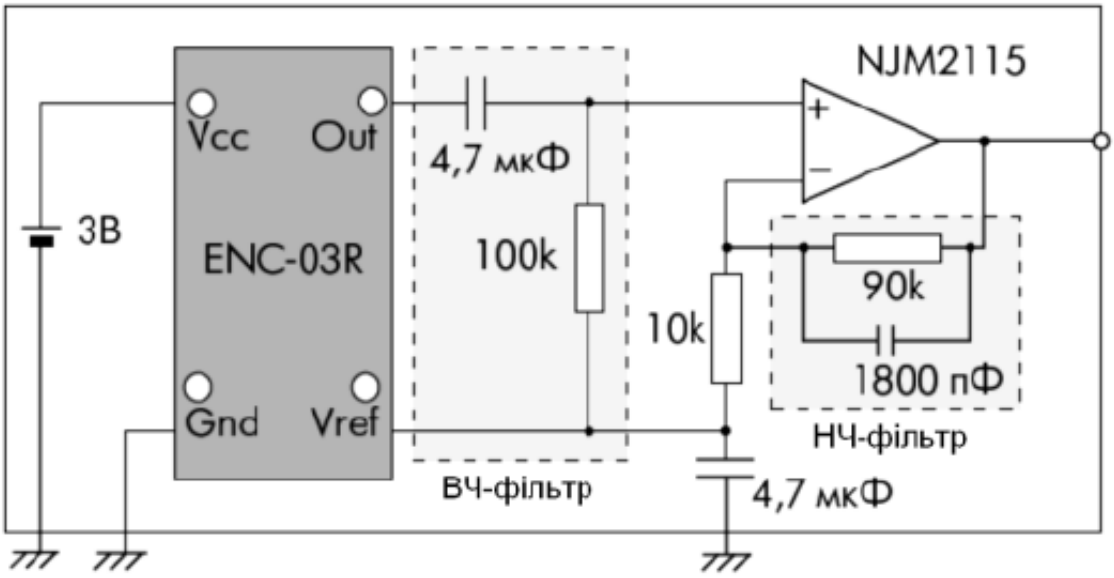


Рисунок 1.4 - Схема підключення п’єзоелектричного сенсора

Основний недолік п’єзокерамічних вібраційних гіроскопів - температурна нестабільність параметрів, спричинена властивостями п’єзокераміки. Компенсувати його спробували, і не без успіху, фахівці компанії *Epson*, які створили разом з компанією *NGK Insulators* новий п’єзоелектричний гіроскоп XV-3500CB. Його відрізняє, крім оригінальної конструкції, використання кварцу як п’єзоелемента. У результаті в діапазоні вимірювань ± 100 °/С вдалося досягти прийнятної температурної стабільності - 5% [3-8].

1.1.3 TF-гіроскопи

Однією з конструкцій резонатора гіроскопа є форма камертона tuning fork (TF). Принцип роботи вібраційного гіроскопа, чутливим елементом якого є мініатюрний камертон, ілюструє рис. 1.5 [3-8].

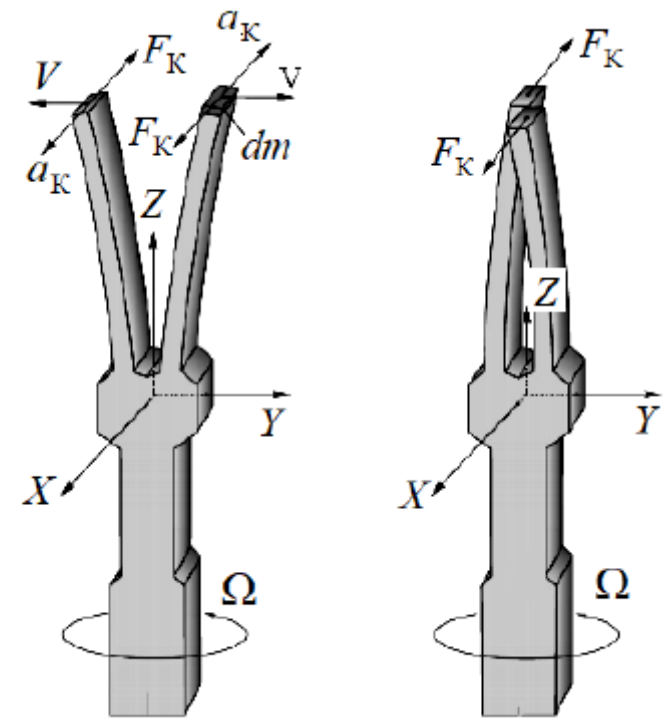


Рисунок 1.5 - TF-гіроскоп

Обидві пластини (гілки) чутливого елемента приводяться в протифазний коливальний рух у площині ZY. Це збудження здійснюється внутрішнім генератором. Кожен елемент гілки масою dm переміщується з лінійною швидкістю V. Якщо тепер основа, на якій закріплений камертон, буде обертатися з кутовою швидкістю Ω навколо осі Z (цю швидкість потрібно виміряти), то для кожного елемента маси виникає сила Коріоліса $F_К$= 2m[Ω×V] та відповідне прискорення $a_К$. Сили Коріоліса підсумовуються за кожною з гілок і спричиняють їх вигин у площині XZ. Обертання основи в інший бік змінює напрямок вигину гілок. Таким чином, коливання гілок у площині XZ містять інформацію про кутову швидкість обертання основи Ω. Однак лінійні прискорення та вібрації, що діють на корпус приладу, спотворюють корисний сигнал. Крім того, зняття інформації з таких датчиків є дуже складним. Тому для TF-гіроскопів було розроблено конструкцію, представлену на рисунку 1.6 [3-8].

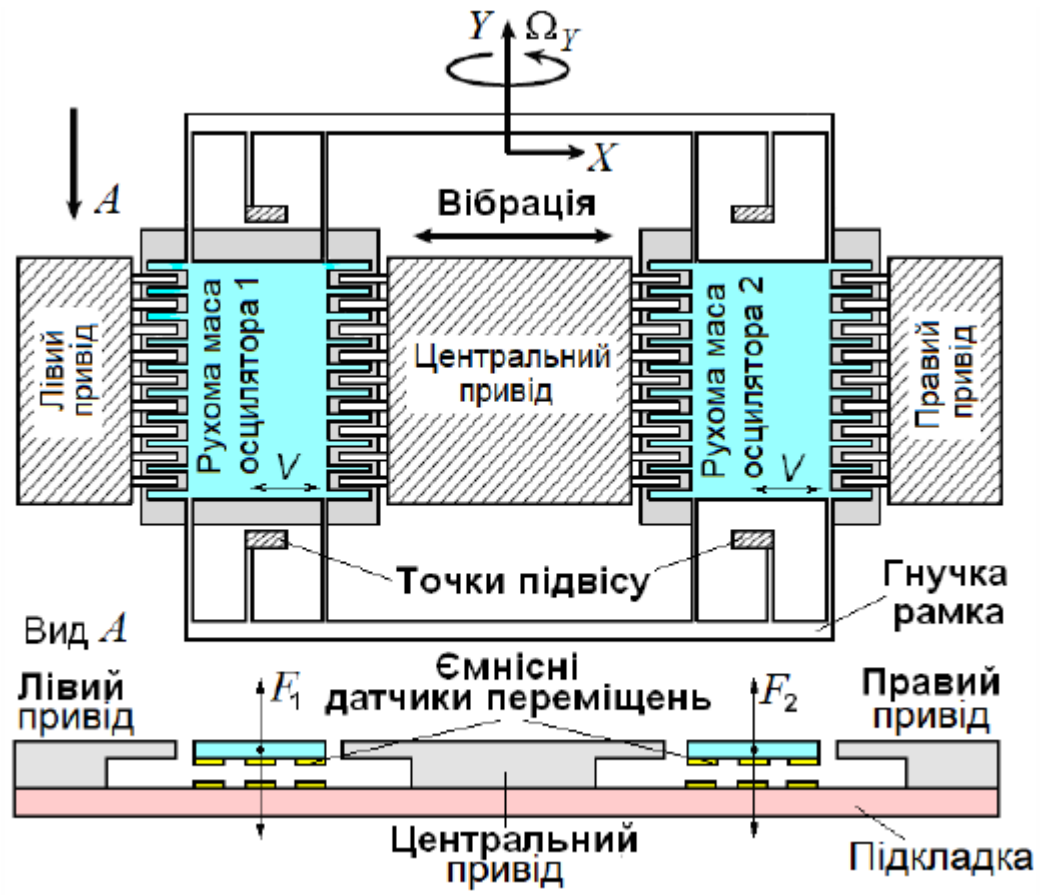


Рисунок 1.6 - TF-гіроскопи з ємнісними датчиками

Базова конструкція TF-гіроскопа, належить до двомасових гіроскопів LR-типу, являє собою рамку з двома осциляторами, які коливаються у протифазі (зустрічно) уздовж осі X. Рухомі маси осциляторів підвішені на гнучких рамках відносно підкладки. Маси за допомогою електростатичних приводів гребінчастої структури здійснюють вібраційний рух (двигуни зближують робочі тіла осциляторів, а мікропружини повертають їх назад). Вектори швидкостей вібрацій V паралельні площині підкладки і перебувають у протифазі один до одного. Із появою кутової швидкості ΩY навколо вимірювальної осі рухомі маси осциляторів під дією сил Коріоліса F1 і F2 почнуть здійснювати разом з рамкою кутові коливання (тому такий гіроскоп вважається гіроскопом LR-типу). Зміни положень осциляторів (один осцилятор буде підніматися, другий - опускатися і навпаки) вимірюються ємнісними датчиками переміщень. Обкладинки ємнісних датчиків переміщення, розташовані на

рухомих масах (знизу) і на підкладці зафіксують переміщення, які можна детектувати і визначити кутову швидкість обертання ΩY. Одним з перших ММГ такої конструкції став гіроскоп, створений з використанням поверхневого мікрооброблення в лабораторії Ч. Дрейпера Масачусетського технологічного інституту. Технологія виготовлення такого гіроскопа ґрунтується на травленні кремнієвої пластини. Для отримання кінцевої структури застосовується реактивне іонне травлення та дифузія бору. Потім структура анодним зварюванням прикріплюється до підкладки зі скла марки Pyrex, на якій розміщуються електроди [3-8].

Описаний принцип реалізований також компанією Fujitsu в серії МЕМС-гіроскопів S1BG. TF-резонатор цих гіроскопів виконаний з ніобату літію (LiNbO3) - добре відомого п’єзоелектрика.

Одна з найвідоміших європейських мікроелектронних компаній - компанія STMicroelectronics презентувала новий оригінальний тривісний гіроскоп L3G4200D (рис. 17.) [3-8].

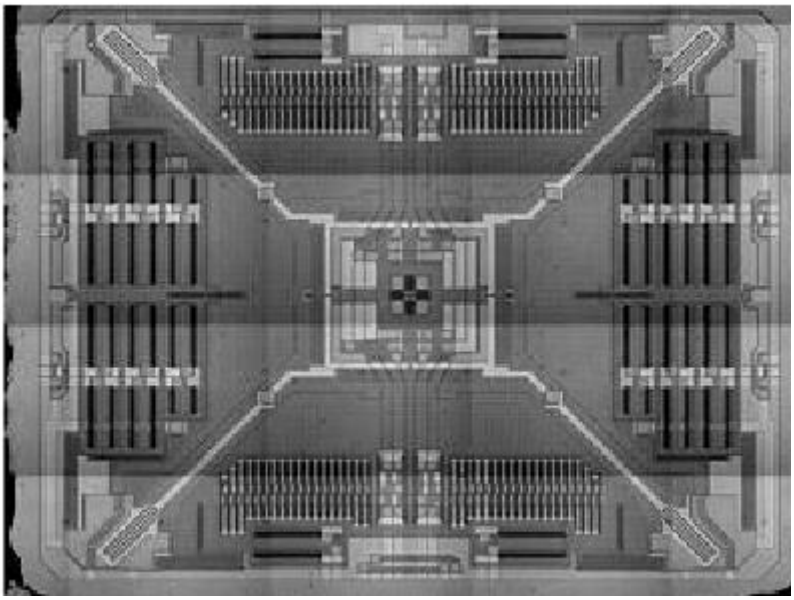


Рисунок 1.7 - Тривісний гіроскоп L3G4200D

На рис. 1.8, представлена фотографія того ж L3G4200D, але зі значним збільшенням.

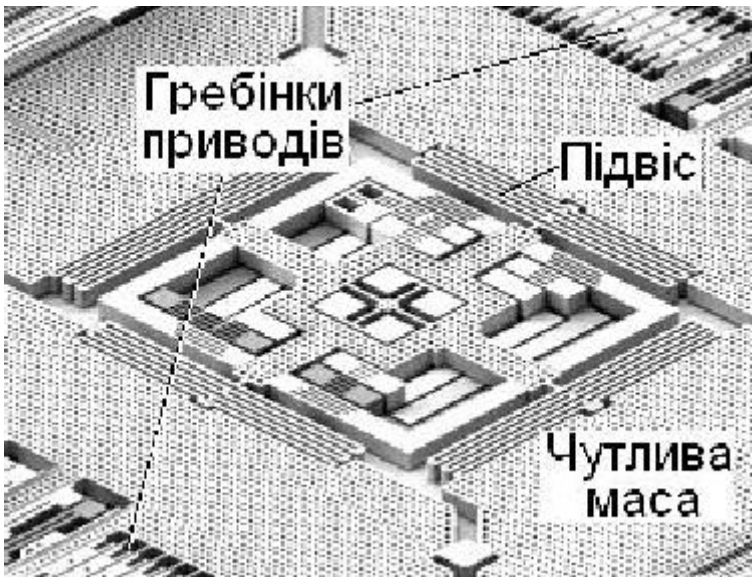


Рисунок 1.8 – Збільшене зображення тривісного гіроскопа L3G4200D[3-8]

Тривісний L3G4200D істотно відрізняється від попередніх розробок у бік поліпшення робочих характеристик за рахунок розширення діапазону контрольованих кутових швидкостей. Домогтися такого істотного відриву у робочих характеристиках вдалося завдяки використанню єдиної вимірювальної структури для контролю руху в трьох ортогональних осях. Застосування єдиної вимірю-вальної структури усуває проблему взаємовпливу, що позитивно позначається на точності вимірювань.

Принцип дії гіроскопів відомої мікроелектронної компанії Analog Devices аналогічний принципу побудови TF-гіроскопів. Основний елемент гіроскопа серії ADXRS - це закріплена на гнучких підвісках відносно анкерів, скріплених з підкладкою, рамка, усередині якої вздовж осі X здійснює поступальні коливальні рухи чутлива маса (рис. 1.9, а). Коливання чутливої маси збуджуються, як і в базовій патентованій конструкції TF-гіроскопа (рис. 1.7), за допомогою електростатичних приводів гребінчастої структури (рис. 1.9, б) [9].

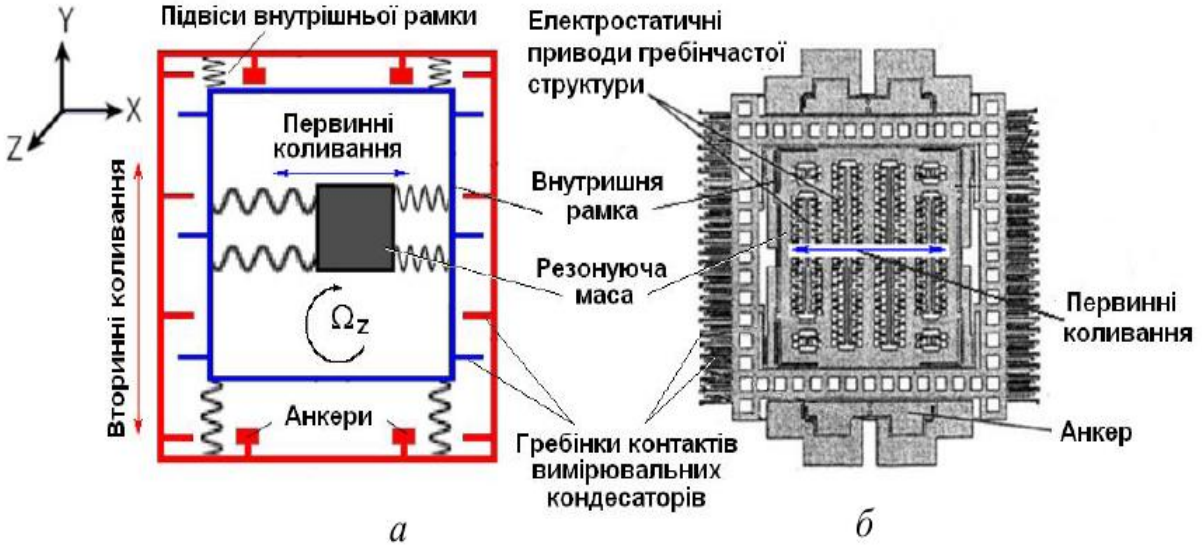


Рисунок 1.9 - TF-гіроскоп компанії Analog Devices

Коли підкладка нерухома (або рухається прямолінійно та рівномірно), внутрішня рамка не коливається. Якщо ж почати обертати таку структуру навколо осі Z з кутовою швидкістю Ωz, (див. 1.9, а), то під дією сили Коріоліса виникнуть вимушені коливання рамки уздовж осі Y. На зовнішній поверхні рамки та на підкладці розташовані гребінки контактів, які утворюють систему вимірювальних конденсаторів. Під час коливань рамки відносно підкладки відстані між зубцями гребінки змінюються, відповідно змінюється й ємність [3-9].

Для збудження коливань чутливих елементів використовують або зовнішнє джерело (генератор) високочастотних сигналів, або резонансний ефект. Сигнали з формувачів високочастотних сигналів надходять на керування електростатичними приводами.

Вочевидь, що для оброблення сигналів з вимірювальних ємностей, потрібні прецизійні підсилювачі, кореляційні методи оброблення і т. ін. Технологія IMEMS (Integrated Micro Electro Mechanical System), що застосовується при виробництві гіроскопів серії ADXRS фірми Analog Devices, поєднує на одному кристалі всі електронні компоненти, які необхідні для формування вихідного сигналу, з двома структурами

чутливих елементів гіроскопа. Характерний приклад - гіроскоп ADIS16256. Крім датчика кутової швидкості він оснащений основним АЦП для оцифровування сигналу датчика, допоміжними ЦАП і АЦП, датчиком температури, вбудованою системою автотестування та калібрування, SPI-інтерфейсом тощо. (рис. 1.10) [3-9].

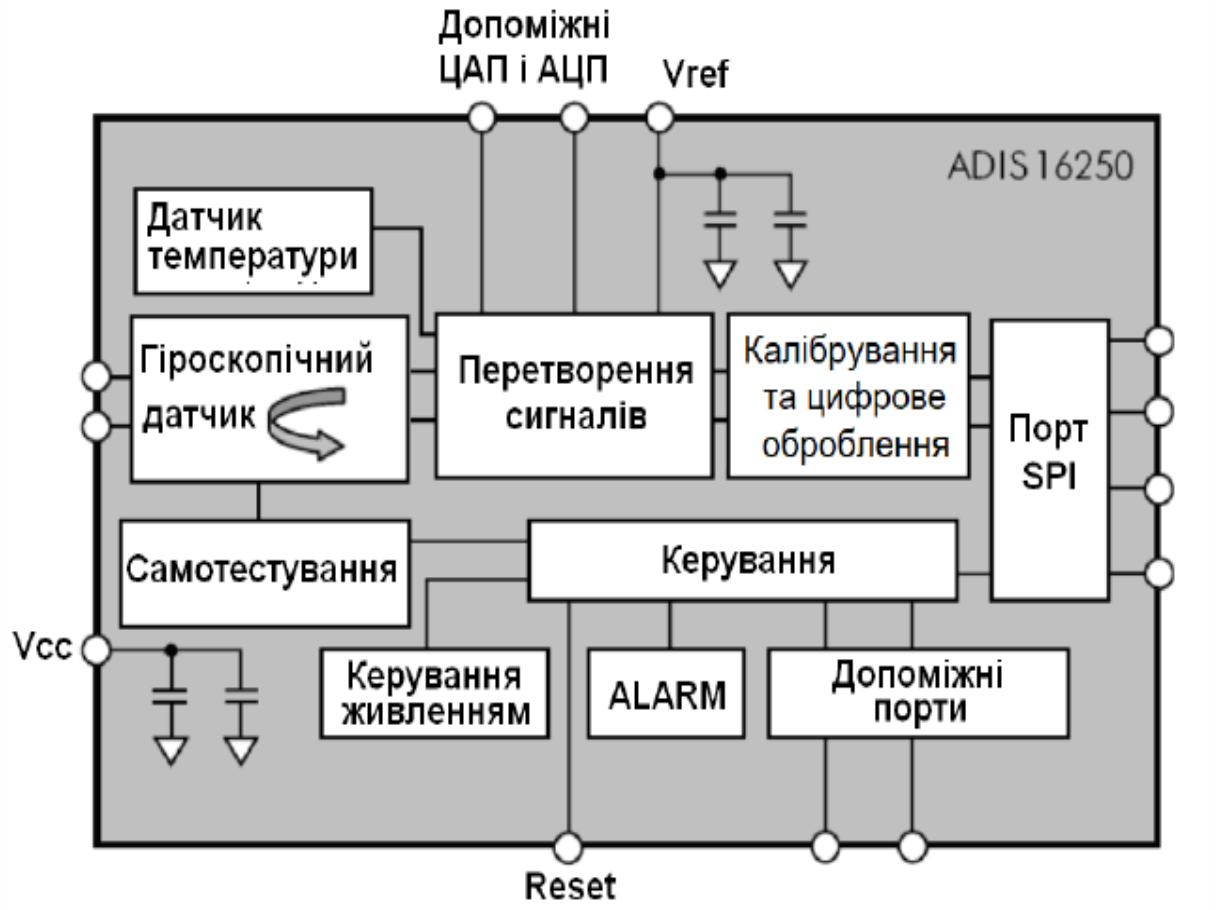


Рисунок 1.10 - Гіроскоп ADIS16256

Фірма Boeing освоїла випуск таких гіроскопів і успішно застосувала їх в автомобільній промисловості. Подібні гіроскопи були також використані в системах управління та наведення реактивних снарядів ВМФ США [3-9].

1.2 Інерціальні вимірювальні модулі

Успіхи в розвитку технологій МЕМС привели до мініатюризації і радикального здешевлення інерціальних датчиків, які вимі-рюють прискорення об’єкта та його кутові швидкості з метою подальшого розв’язання завдань інерціальної навігації. А це, у свою чергу, викликало лавиноподібне зростання попиту на них у багатьох галузях - від промисловості, транспорту та військової техніки до побутових приладів та індустрії розваг. Виробники, виходячи з потреб ринку, почали пропонувати комплексні рішення - інерціальні вимірювальні модулі, які містять три осі гіроскопа, три осі акселерометра, а також мають можливість інтеграції в цей же блок електронного компаса - магнітометра, барометра та навіть приймача супутникової системи навігації. Проте у переважній більшості додатків замовнику достатньо інформації про лінійну та кутову швидкості в тривимірному просторі [3-9].

Компанія *Analog Devices* також анонсувала інтегрований модуль ADIS16350 (рис. 1.11), до складу якого, крім тривісного гіро-скопа, входить і тривісний акселерометр. Деталі конструкції не оголошуються, але судячи з розмірів модуля (22,7×23,2×23 мм), він являє собою мікроскладання [9].

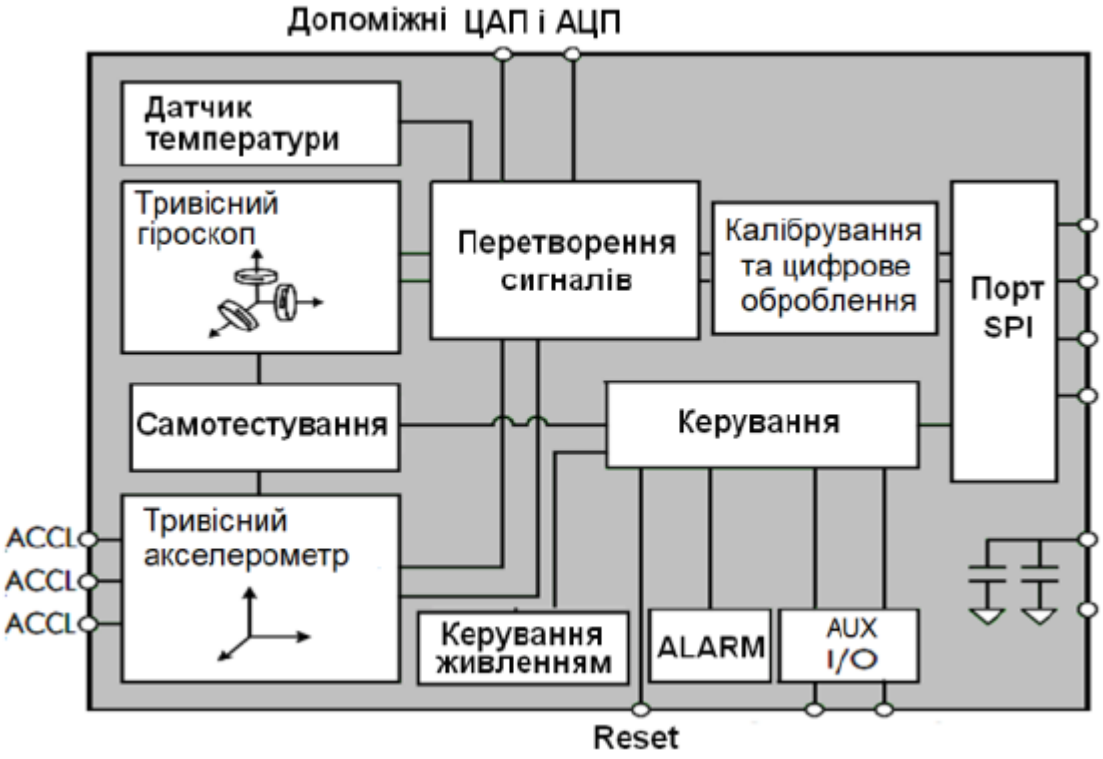
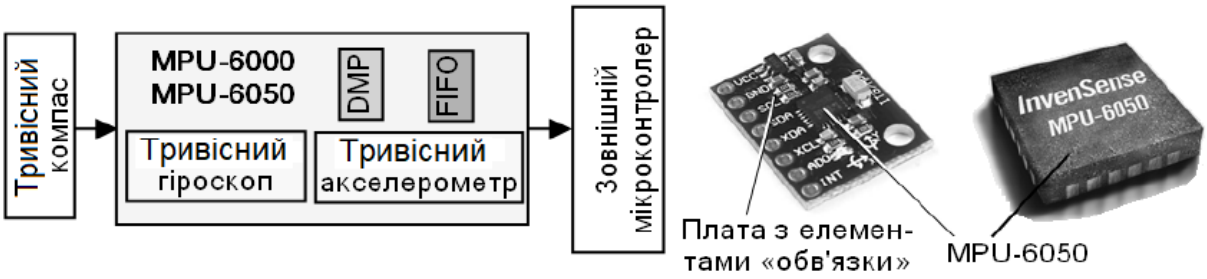


Рисунок 1.11 - Інтегрований модуль ADIS16350

Піонером у галузі багатовісного інерціального детектування можна назвати компанію *InvenSense*, оскільки саме вона вперше представила компонент IMU-3000 - процесор оброблення сигналів,викликаних рухом - **D**igital **M**otion **P**rocessor (DMP) [10].

Наступними рішеннями від *InvenSense* став блок оброблення руху MPU (**M**otion **P**rocessing **U**nit), що застосовується в модулях MPU-6000, MPU-6050, які являють собою апаратно-програмну реалізацію дев’ятивісного сенсорного рішення без центрального процесора в корпусі типу QFN розмірами 4 × 4 × 0,9 мм [10]. Модуль MPU-6050 (GY-521) (рис. 1.12) об’єднує на одному кремнієвому кристалі процесор DMP, тривісний осьовий акселерометр, тривісний гіроскоп, а також датчик температури з цифровим виходом для реалізації схеми температурної компенсації.



Рискнок 1.12 – Модуль MPU-6050

Сьогодні найбільш досконалим продуктом компанії InvenSense є перший у світі дев’ятивісний датчик MPU-9255, що включає в себе тривісний гіроскоп, тривісний акселерометр, тривісний компас і цифровий процесор (DMP) (рисунок 1.13). Під час виробництва MPU-9255 використано гібридну технологію (кілька кристалів розміщуються на одній підкладці і з’єднуються за допомогою мікрозварювання). Модуль MPU9255 включає два кристала. На одному з них реалізовані МЕМС- гіроскоп і МЕМС-акселерометр. Другий кристал - це тривісний магнітометр виробництва компанії Asahi Kasei Microdevices Corporation [10-11].

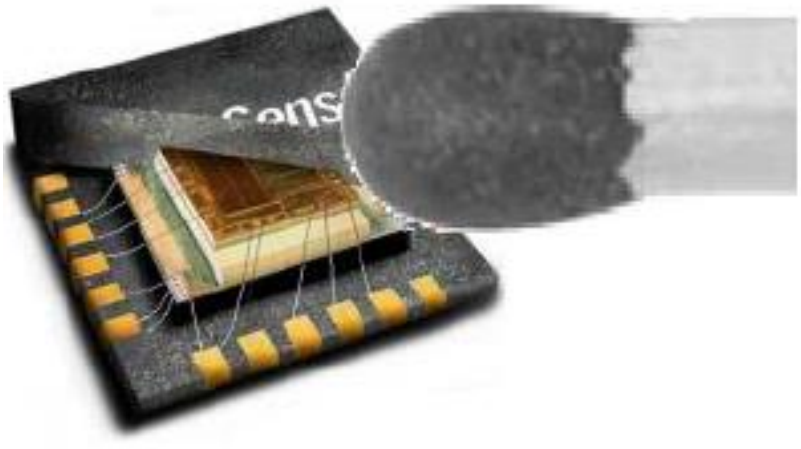


Рисунок 1.13 - Дев’ятивісний датчик MPU-9255

1.3 Оптичні гіроскопи

Оптичні гіроскопи - кільцеві лазерні і волоконно-оптичні гіроскопи використовують ефект Саньяка для вимірювання кута швидкості відносно інерциального простору. Ефект Саньяка полягає в тому, що виникає релятивістська різниця у відстані довжини оптичних хвиль, що розповсюджуються за годинниковою стрілкою (ГС) та проти годинникової стрілки (ПГС) напрямках уздовж замкнутого контуру, обумовленого обертанням цього контуру навколо осі, перпендикулярної до площини контуру [12-14].

1.3.1 Лазерний гіроскоп

Лазерний (кільцевий) гіроскоп – прилад, який виявляє обертання тіл і визначає їх кутову швидкість на основі вимірювання параметрів лазерного випромінювання, що є складовою цього приладу. Перевагою лазерного гіроскопа є його чутливість, яка багаторазово перевищує чутливість механічного гіроскопа [15-18].

Лазерний гіроскоп створює лазер з кільцевим резонатором в системі з трьох і більше дзеркал, утворюючи замкнутий контур (рис. 1.4). У такій системі стимульоване випромінювання поширюється в обох напрямках, і хвильові перешкоди створюють систему стоячих хвиль, і потоки обох пучків можуть виходити через дільник цього резонатора [15-18].

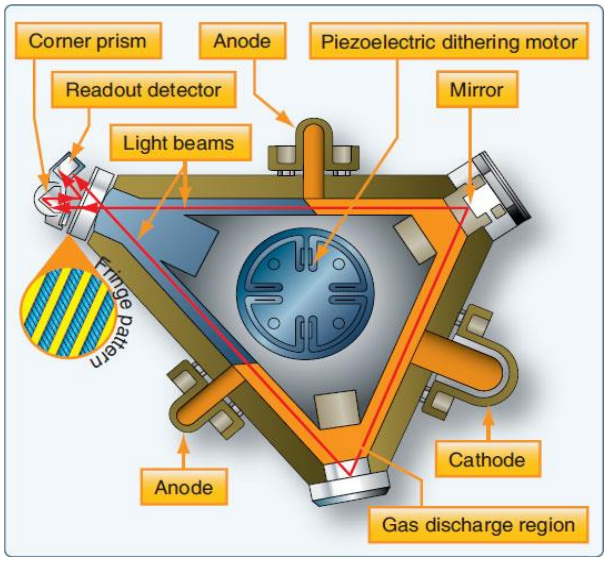


Рисунок 1.14 - Лазерний гіроскоп

Якщо система не рухається, частота обох вихідних променів однакова. Коли система обертається в площині трикутника (у випадку тридзеркального резонатора), рух одного з пучків лазерного випромінювання буде прискореним, а інший затримається (рис. 1.15) [15-18].

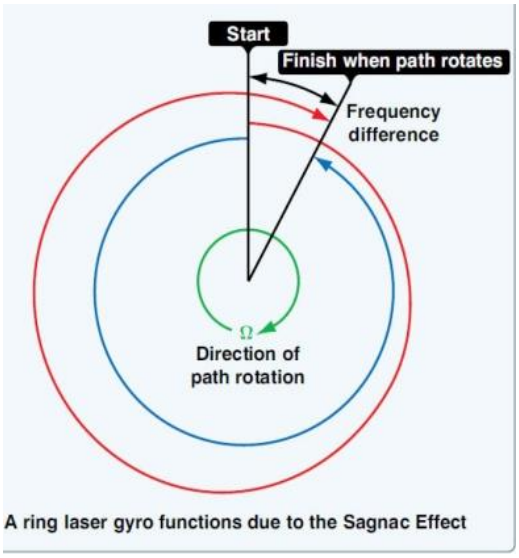


Рисунок 1.15 - Ефект Саньяка для вимірювання кута швидкості

В результаті ефекту Доплера за роздільником променя з’являться дві частоти, і диференціальна частота може бути отримана на нелінійному детекторному елементі, значення якого пропорційне швидкості обертання кільцевого лазера. Саме це явище дозволило створити лазерний гіроскоп[15-18].

1.3.2 Волоконно-оптичний гіроскоп

Волоконно-оптичний гіроскоп (ВОГ) — це оптико-електронний прилад, що вимірює абсолютну кутову швидкість[15-18].

Промінь світла у волоконно-оптичному гіроскопі проходить через котушку оптоволокна, звідси і назва. Для підвищення чутливості гіроскопа використовують світловод великої довжини (близько 1000 метрів) укладений витками (рисунок 1.16) [19, 20].

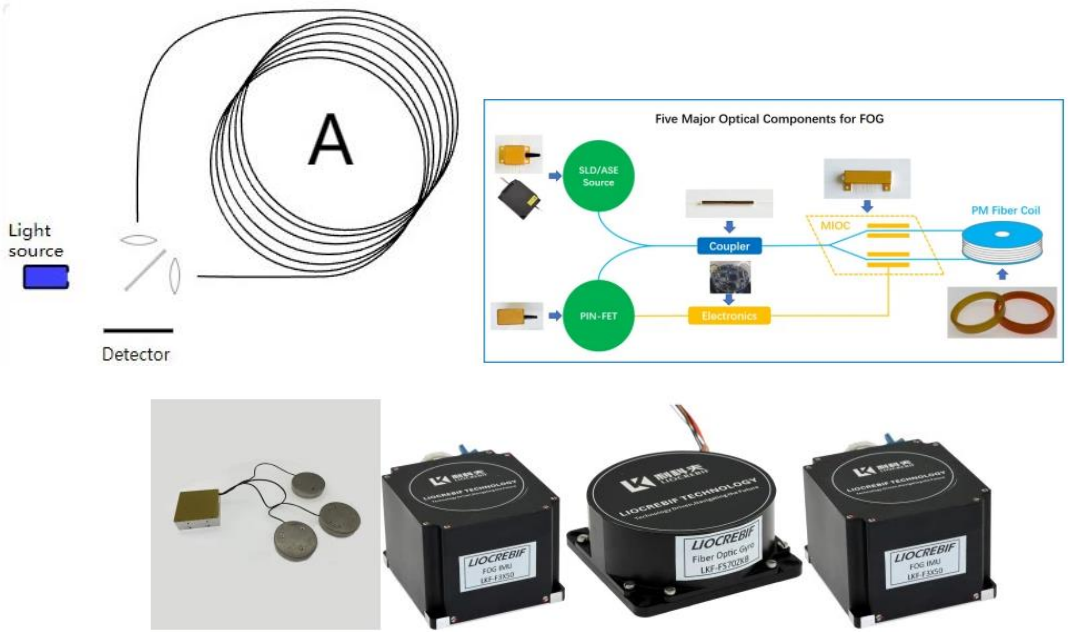


Рисунок 1.16 - Волоконно-оптичний гіроскоп (ВОГ)

На відміну від кільцевого лазерного гіроскопа, у волоконно-оптичних гіроскопах зазвичай використовується світло з дуже малою довжиною когерентності, що необхідно для збільшення точності гіроскопа до задовільного рівня. Як джерело світла може використовуватися навіть як лазерний випромінювач так і світлодіод [19, 20].

Отже, за матеріалами розділу можна зробити насткпні висновки:

1) існують досить точні гіроскопічні системи, що задовольняють велике коло споживачів. Наприклад, мікроелектромеханічні системи (МЕМС) гіроскопів;

2) системи GPS виявляються нездатними точно визначати положення в міських умовах, при поганій видимості супутників. Подібні проблеми виявляються і в лісовій місцевості [15-20].

3) у сучасних навігаційних системах оптимальним рішенням є комбінація GPS, МЕМС та оптичних гіроскопічних систем.

Тому, метою дипломної роботи є дослідження та розробка мікромеханічної системи орієтації у просторі.

Для досягнення мети у роботі потрібно виконати такі завдавння:

1) на підставі аналізу існуючих систем обрати ефективну систему орієнтації із урахуванням останніх тенденцій у галузі навігації;

2) розробити структурну схему пристрою;

3) провести моделювання основних функціональних блоків пристрою за допомогою САПР електронних схем;

4) провести техніко-економічний розрахунок системи, що розробляється;

5) розробити заходи із норм дотримання умов безпеки праці та техногенної безпеки.

2. Розробка мікромеханічної системи орієтації у просторі

2.1 Структурна схема мікромеханічної системи орієтації у просторі

Отже, розглянуті новітні схеми та системи орієнтації, вказують на необхідність створення пристрою, який би відповідав наступним вимогам:

1) універсальність; 2) доступна компонента база; 3) стандартна технологія виготолення основних функціональних блоків; 4) можливість неруйнівної заміни елементів, що вийшли із ладу; 5) доступність до контролю основних електро-фізичних параметрів; 6) можливість інтеграції системи із пристроями різних поколінь електроніки (мікро-, нано-).

У результаті за основу дослідження і розробки було використано концепцію балкових вібраційних гіроскопів LL-типу на основі довгого стрижня [3, 21].

Пропонується наступна структурна схема мікромеханічної системи орієтації у просторі (рисунок 2.1)

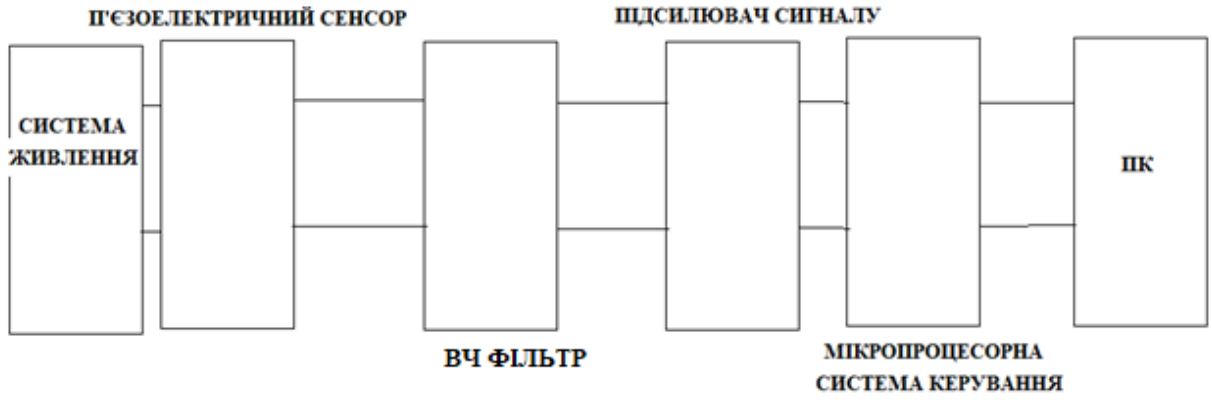


Рисунок 2.1 - Структурна схема мікромеханічної системи орієтації у просторі [3, 21].

Система живлення пристрою, в залежності від режиму роботи, може бути реалізована як окремими джерелами напруги в діапазоні від 3 В до 30 В, так і за

рахунок джерел напруги, вбудованих у систему керування (живлення від ПК по каналу USB для логіки – 3 – 5 В).

У якості п’єзоелектричного сеснсора використано балковий вібраційний гіроскоп LL-типу на основі довгого стрижня.

ВЧ фільтр призначений для пкращення якості сигналу, що реєструється.

Підсилення сигналу після обробки ВЧ фільтром здійснюється за допомогою операційного підсилювача.

Мікропроцесорна система здійснює осаточну обробку сигналу реєстрації, передачу сигналу на пристрій реєстрації (ПК – персональний комп’ютер), корекцію за рахунок результатів обробки, а також, за потреби, може виконувати функцію низьковольтного джерела живлення 0 – 5 В.

2.2 П’єзоелектричний сеснсор

У якості п’єзоелектричного сенсора було використано елемент одновісьового гіроскопа, змонтованого на кристалі за унікальною технологією, розробленою фірмою Murata [3, 21]. На рисунку 2.2 представлена можлива структурна топологія біморфного п’єзоелектричного сенсора ENC-3R та його коструктивне виконання [3, 21, 22].

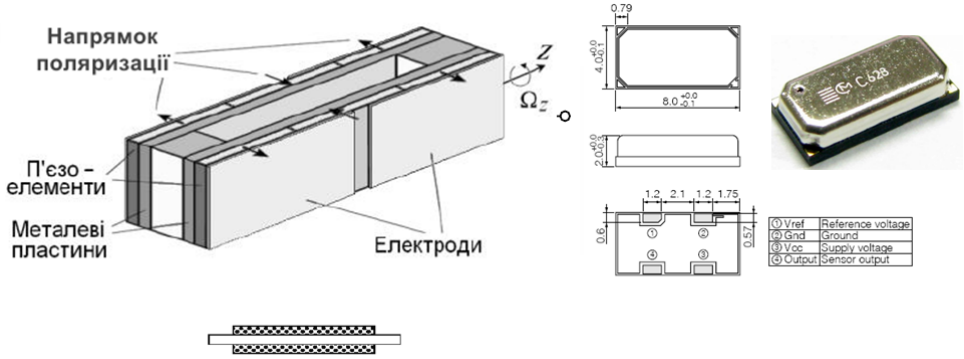


Рисунок 2.2. - П’єзоелектричний сенсор ENC-3R [3, 21, 22]

Стандартна схема з’єднання сенсора ENC-3R представлена на рисунку 2.3[3, 21, 22].

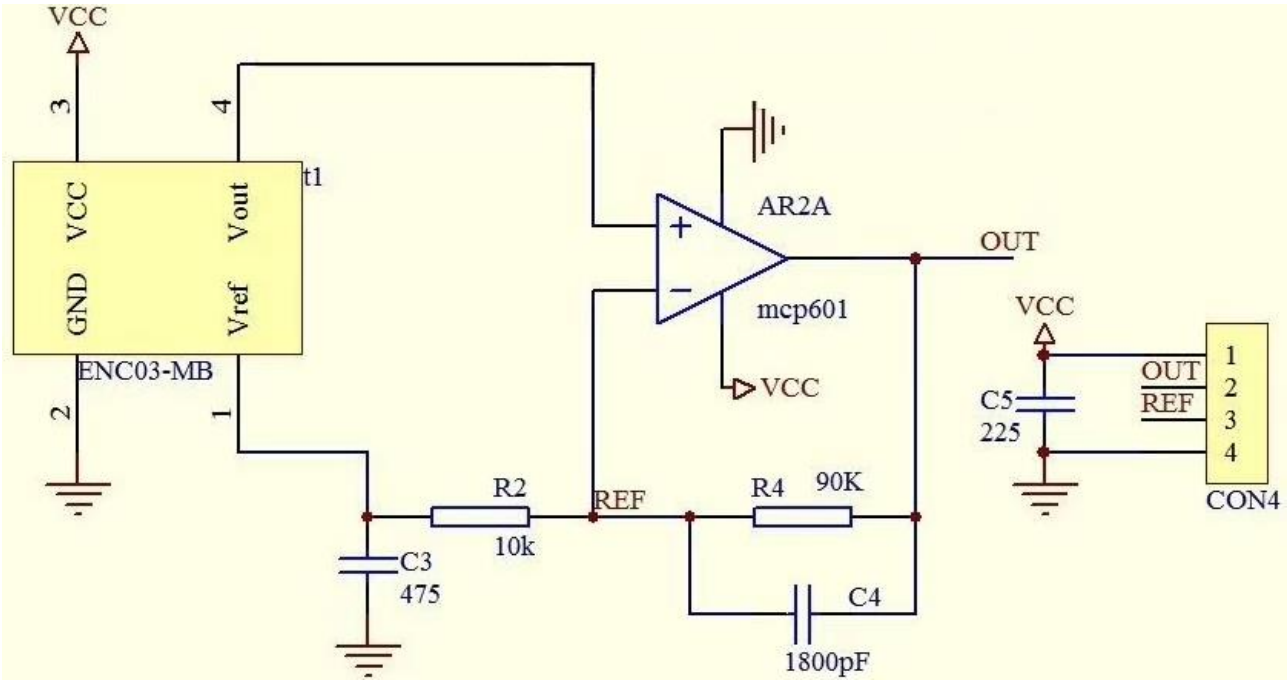


Рисунок 2.3 – Стандартна схема з’єднання сенсора ENC-3

Але, за технічними характеристиками сенсор ENC-3R генерує коливання з частотою не менше 35 кГц (30 – 33 кГц – резонансна частота п’єзоелемента), тому, інформаційний сигнал, що буде надходити із п’єзоелектричного сенсора, для усунення небажаних паразитних сигналів необхідно спрямувати через ВЧ фільтр. У подальшому відфільтрований сигнал необхідно подати на ділянку підсилення [3, 21, 22].

2.3 Фільтр високих частот (ВЧ) мікроелектромеханічної системи орієтації у просторі

У роботах [23,24] було продемонстровано, що найбільш ефективними для орієнтаційних пристроїв є використання у якості покращення параметрів інформаційних сигналів активних фільтрів на операційних підсилювачах.

Відомо багато схем активних фільтрів, які використовуються для отримання необхідної характеристики фільтра, але всі вони повинні відповідати таким вимогам:

– мати малу кількість елементів, як активних, так і пасивних;

– забезпечувати легкість регулювання;

– забезпечувати малий вплив розкиду параметрів елементів, особливо конденсаторів;

– забезпечувати відсутність жорстких вимог до операційного підсилювача, особливо по вимогах швидкості зростання, ширини смуги і вихідному опору;

– забезпечувати можливість створення високодобротних фільтрів;

– забезпечувати нечутливість характеристик фільтрів до коефіцієнта підсилення ОП.

Фільтр, який вимагає використання високоточних елементів, важко наладнати, і по мірі старіння елементів настроювання губиться. Так звана схема фільтра на основі джерела напруги, що керується напругою ДНКН дуже поширена, в основному завдяки своїй простоті і малій кількості елементів, але ця схема є дуже чутливою до зміни параметрів елементів. Для порівняння, зацікавленість, що виникла до складних гіраторних схем, зумовлена їх нечутливістю до малих змін параметрів елементів.

На рисунку 2.4 наведено приклад простого фільтра, відомого також як фільтр Саллена і Кі, по прізвищах його винахідників. У якості підсилювача застосовується ОП, що включений в режимі повторювача [25,26].

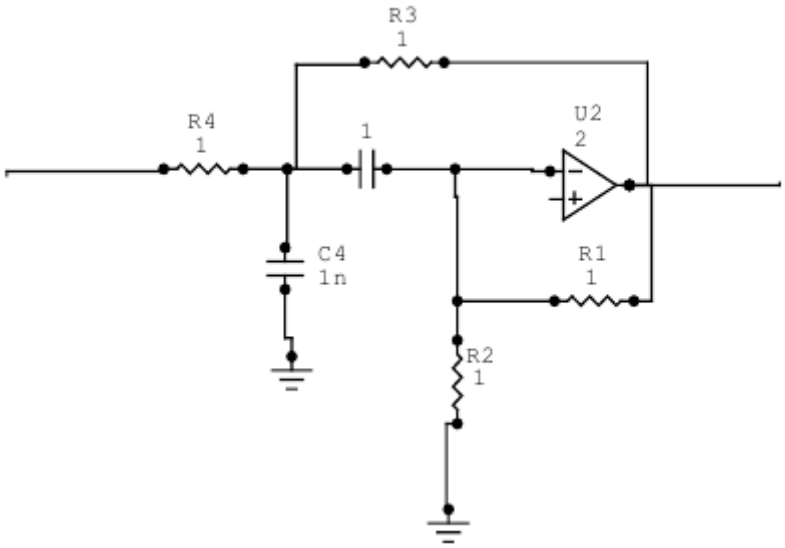


Рисунок 2.4 - Фільтр Саллена і Кі [25,26]

Цей фільтр є двополюсним фільтром ВЧ. Слід відзначити, що такий фільтр міг бути простим двокаскадним фільтром, якщо б перший резистор не був би з'єднаний з виходом. Легко показати, що на дуже низьких частотах нахил АЧХ такий самий, як *RC* фільтра, оскільки вихідний сигнал практично дорівнює нулю. Зростання вихідного сигналу при збільшені його частоти призводить до зменшення послаблення в результаті дії цього стежного зв’язку, і за рахунок цього злам АЧХ стає більш різким.

Фільтри цього типу ще відносять до фільтрів на джерелах напруги, що керується напругою (ДНКН).

У фільтрах на ДНКН використовується мінімальна кількість елементів (один ОП на два полюси характеристики), при цьому вони дають додатковий виграш у вигляді неінвертувального коефіцієнта підсилення, низького вихідного опору, малого розкиду параметрів, зручності зміни коефіцієнта підсилення і спроможності роботи при великому коефіцієнті підсилення або малому згасанні. Їх недолік – велика чутливість до зміни параметрів елементів і коефіцієнта підсилення ОП, окрім цього вони не можуть бути застосовані для побудови фільтрів, що перестроюються [27-30]. Але, за рахунок оптимізації схеми зворотнього зв’язку вдається розширити можливості. Таким прикладом є

схема Рауха (рисунок 2.5) [25, 26, 30]. Як і схема Саллена і Кі, схема Рауха є різновидом фільтру Баттерворта високого порядку [25 - 30].

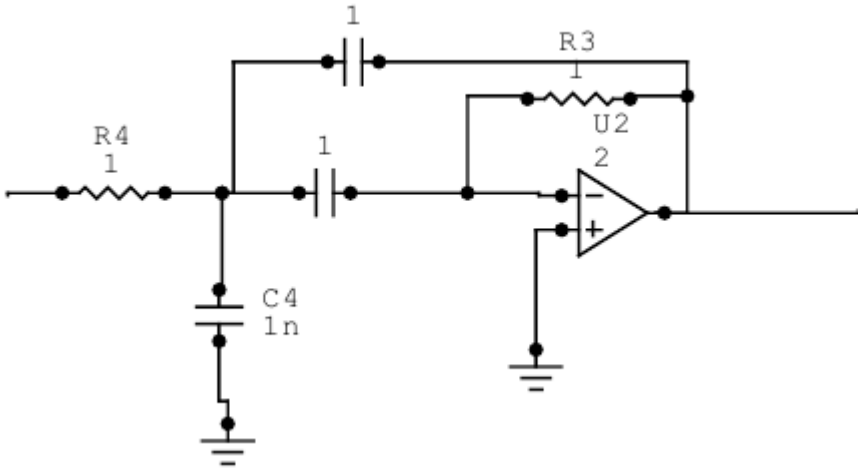


Рисунок 2.5 – Схема Рауха для фільтру ВЧ другого порядку [25 – 30]

Для проектування *n*–полюсних фільтрів (при парному *n*) необхідно з'єднати $\frac{n}{2}$ секцій на ДНКН. Тому розрахунки ведуться тільки для фільтрів парного порядку. В кожній секції $R1 = R2 = R$ і $C1 = C2 = C$. Як і звичайно в схемах на ОП, значення *R* вибираються в діапазоні від 10 до 100 кОм. Резисторів з малим номіналом краще уникати оскільки вихідний опір ОП додається до опору резистора, вносячи помилку у розрахунки. Розрахунки ведуться з використанням даних табл. 2.1 [25 – 30].

Розраховуючи фільтр Баттерворта, необхідно мати на увазі, що усі секції мають однакові значення *R* і *C*, які визначаються відношенням $RC = \frac{1}{2\pi f_C}$, де f_C – частота зрізу фільтра (–3дБ). Щоб побудувати, наприклад, 6–полюсний фільтр Баттерворта НЧ, необхідно з'єднати три наведені вище секції з коефіцієнтами підсилення, рівними відповідно 1.068, 1.586, 2.483 (бажано у вказаному порядку, щоб запобігти проблем з динамічним діапазоном) і підбираючи ідентичні для усіх секцій значення *R* і *C* встановлюємо точку, що відповідає частоті f_C. Наприклад, $f_C = 88.4$ *Гц*, $R = 180$ *кОм*, $C = 0.01$ *мкФ*.

Дещо складніше побудувати фільтр Бесселя і Чебишева. Як і в попередньому випадку з'єднується необхідна кількість секцій 2–х полюсних фільтрів з вказаним для кожної секції коефіцієнтом підсилення (див.табл.2.1). В кожній секції попередньо забезпечується рівність $R1 = R2 = R$ і $C1 = C2 = C$. Але далі для кожної секції необхідно забезпечити свій добуток *RC*, який обчислюється за допомогою множників нормування f_H (див. табл.2.1) за виразом $RC = \frac{1}{2\pi f_C f_H}$. Для фільтра Чебишева f_C – частота, на якій АЧХ падає нижче діапазону нерівномірності при переході до смуги затримки. У випадку збільшення нерівномірності АЧХ в смузі для фільтрів Чебишева вдається отримати більшу крутість АЧХ в перехідній області [25 – 30].

Таблиця 2.1 – Параметри *n*–полюсних активних фільтрів [25 – 30]

n	Фільтр Батерворта	ФільтрБесселя		Фільтр Чебишева (0.5дБ)		Фільтр Чебишева (2дБ)	
	K	f_H	K	f_H	K	f_H	K
2	1.586	1.274	1.268	1.231	1.842	0.907	2.114
4	1.152	1.432	1.084	0.597	1.582	0.471	1.924
	2.235	1.606	1.759	1.031	2.660	0.964	2.782
6	1.068	1.607	1.040	0.396	1.537	0.316	1.891
	1.586	1.692	1.364	0.768	2.448	0.730	2.648
	2.483	1.908	2.023	1.011	2.846	0.983	2.904
8	1.038	1.781	1.024	0.297	1.522	0.238	1.879
	1.337	1.835	1.213	0.599	2.379	0.572	2.605
	1.889	1.956	1.593	0.861	2.711	0.842	2.821
	2.610	2.192	2.184	1.006	2.913	0.990	2.946

Для побудови фільтрів низької частоти (НЧ) використовуються дзеркальні до схеми фільтрів ВЧ схеми, тобто схеми де *R* і *C* поміняні місцями. При цьому для фільтра Баттерворта значення R, C і K_0 лишаються без змін.

Для фільтрів Бесселя і Чебишева значення K_0 лишаються без змін, а нормуючий множник f_H змінюється на зворотній, тобто $f_H^{'} = 1/f_H$.

Одним із методів покращення роботи фільтра пропонується використати принцип біквадратного фільтра (рисунок 2.6) [25 – 30].

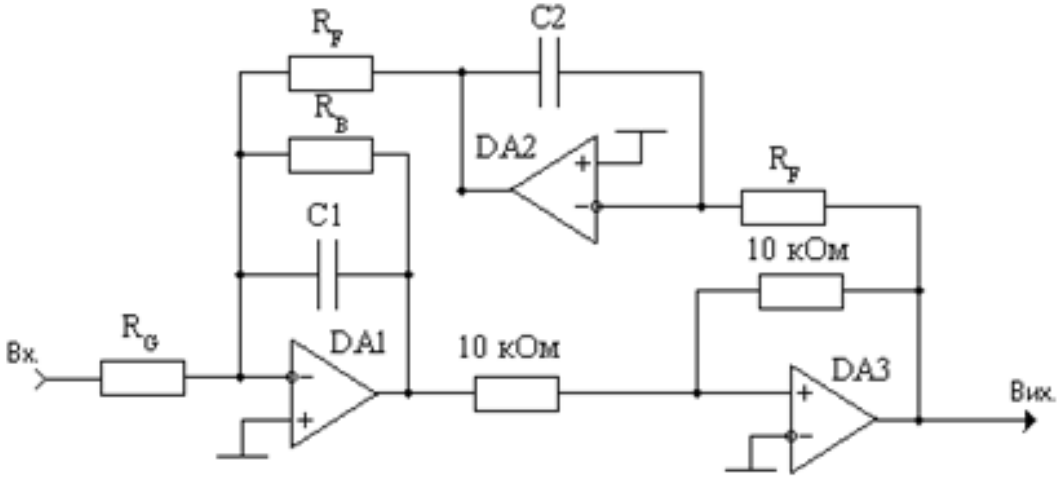


Рисунок 2.6 - Біквадратний фільтр

У випадку проектування біквадратного фільтра необхідно виконати таку послідовність дій) [25 – 30]:

1. Вибрати ОП з шириною смуги, яка у 10 – 20 разів перевищує добуток $K_0 f_0$.

2. Підібрати заокруглений номінал конденсатора, ближчий до такого значення $C = \dfrac{10}{f_0}$ *мкФ*.

3. Використати перше наведене вище рівняння для розрахунку опору R_F і відповідно друге для обчислення за заданим значенням ширини смуги Δf номінала опору R_B.

4. Згідно з третім рівнянням отримати значення опору R_G.

Слід відзначити, що кожний з опорів R_F, R_B і R_G є навантаженням для ОП, і тому їх номінали не повинні бути менші за 5 кОм.

Припустимо, що необхідно розрахувати смуговий фільтр з параметрами $f_0 = 1$ *кГц*, $Q = 50$, $K_0 = 10$. Задамося $C = 0.01$ *мкФ*, потім визначимо

$R_F = 15.9\ кОм$ $(f_0 = 1\ кГц)$ і $R_B = 796\ кОм$ $(Q = 50;\ \ \Delta f = 20\ Гц)$ і зрештою $R_G = 79.6\ кОм$ $(K_0 = 10)$.

Якщо розрахункові значення резисторів виходять дуже великі або малі, то необхідно підібрати інший номінал конденсатора) [25 – 30].

Для отримання смугових фільтрів високого порядку необхідно зробити каскадне з'єднання кількох фільтрів низького порядку, комбінуючи їх таким чином, щоб забезпечити характеристику фільтра, що вимагається. У такому випадку, як і раніше, фільтр Баттерворта має «максимально плоску» АЧХ, у той час як фільтр Чебишева задовольняє вимоги крутого зламу АЧХ в перехідній області. Збільшення крутості АЧХ шляхом підключення додаткових секцій призводить, як правило, до погіршення перехідної і фазової характеристик) [25 – 30].

У якості базової схеми для складання ВЧ фільтра у роботі використовуємо фільтр на основі мікросхеми MC3403(рисунок 2.7) [31].

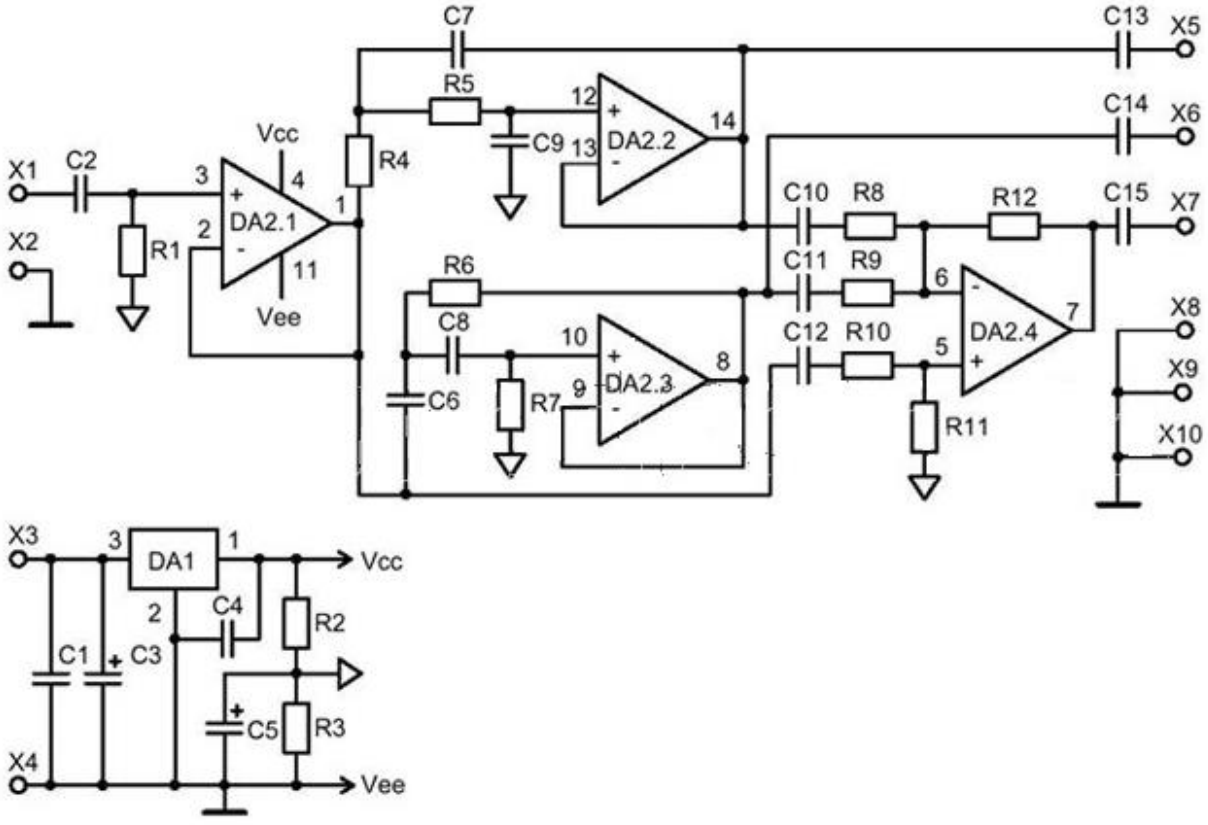


Рисунок 2.7 Частотний фільтр на мікросхемі MC3403[31].

Запропонована схема дозволить зібрати простий і надійний активний 3-х смуговий фільтр, що володіє малим рівнем власного шуму, малими габаритами та енергоспоживанням, широким діапазоном напруги живлення. Використання активного фільтра не потребує встановлення громіздких пасивних роздільних фільтрів на виході підсилювача потужності, що зменшують ступінь демпфування звукового випромінювача, що мають низький ККД, простоту виготовлення та налаштування. Фільтр встановлюється між лінійним виходом джерела сигналу та входами підсилювачів потужності кожного частотного каналу 3-х смугової системи. Використання активного фільтра дозволить передати відтворюване акустичне оформлення з мінімально можливими спотвореннями та отримати високу якість [31].

Технічні характеристики [31]:

Напруга живлення: 12 ... 30 В.

Струм споживання: 10 мА.

НЧ-фільтр:

Посилення смуги пропускання: 0 дБ.

Згасання поза смугою пропускання: 12 дБ/окт.

Частота зрізу: 300 Гц.

ВЧ-фільтр:

Посилення смуги пропускання: 0 дБ.

Згасання поза смугою пропускання: 12 дБ/окт.

Частота зрізу: 3 кГц.

СЧ фільтр (смуговий):

Посилення смуги пропускання: 0 дБ.

Згасання поза смугою пропускання: 6 дБ/окт.

Нижня частота зрізу 300 Гц.

Верхня частота зрізу: 3 кГц.

Фільтр виконано на чотирьох операційних підсилювачах (ОП). ОП об'єднані в одному корпусі IMC MC3403 (DA2). На DA1 (LM78L05) зібраний стабілізатор напруги живлення з відповідними фільтруючими ємностями: C1, C3 по входу і C4 по виходу. На резистивному дільнику R2, R3 та конденсаторі C5 виконана штучна середня точка [31].

На ОП DA2.1 виконаний буферний каскад сполучення вихідного та вхідних опорів джерела корисного сигналу та наступних фільтрів НЧ, ВЧ та СЧ [31].

На ОП DA2.2 виконано фільтр НЧ (2-го порядку, Баттерворт) [31].

На ОП DA2.3 виконано фільтр ВЧ (2-го порядку, Баттерворт) [31].

На ОП DA2.4 виконано фільтр СЧ. Фільтр СЧ являє собою сумируюче-віднімний пристрій, що працює за алгоритмом Uсч = Uвх-Uнч-Uвч.

На контакти X3 ("плюс" напруги живлення), X4 ("мінус" напруги живлення) подається напруга живлення. На контакти X1, X2 подається вхідний сигнал джерела.

З контактів X5 X9 знімається відфільтрований вихідний сигнал для тракту НЧ; X6, X8 – ВЧ та X7, X10 – СЧ трактів, відповідно.

На рисунку 2.8 представлена схема підключення MC3403[31].

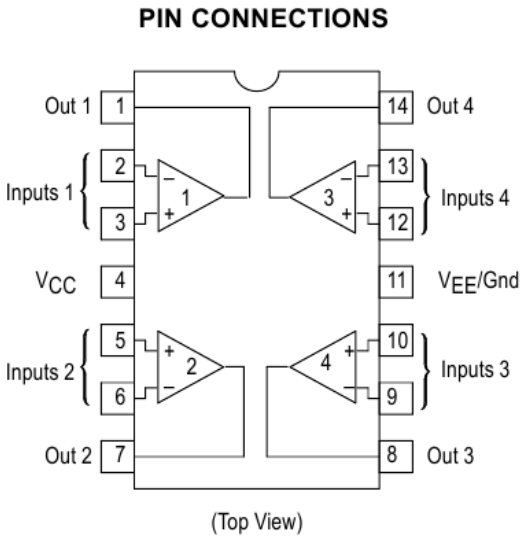
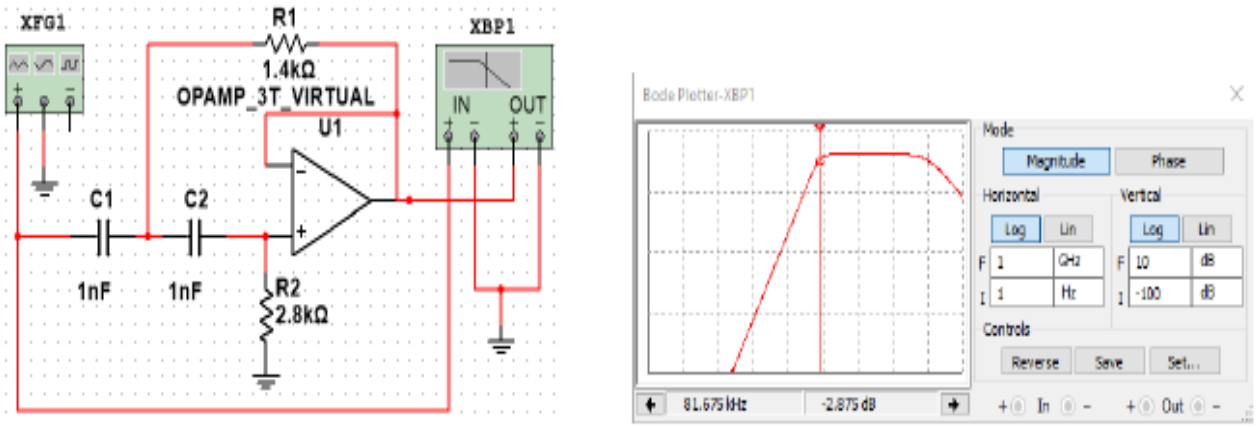
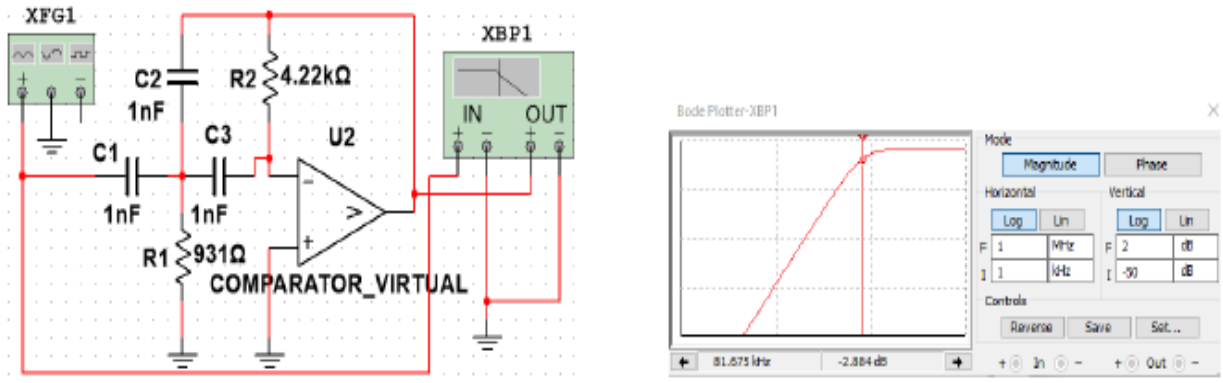


Рисунок 2.8 - Схема підключення MC3403[31].

У роботі проведено моделювання роботи фільтра ВЧ сигналу в демо-версії редктора Multisim [32,33] за схемою Саллена і Кі та за схемою Рауха. Результати моделювання представлені на рисунку 2.9.



а)



б)

Рисунок 2.9 - Моделювання роботи фільтра ВЧ частот: а - схема Саллена і Кі, б - схема Рауха

Отже, результати моделювання, показали, що схема Рауха є більш ефективною, так як дає можливість ерувати парметрами вхідного сигналу за рахунок більш динамічної схеми зворотного зв’язку.

2.4 Підсилювач сигналу мікромеханічної системи орієтації у просторі

У базовій схемі з’єднання п’єзоелемента, представленій на рисунку 2.3, у якості підсилювача відфільтрованого сигналу пропонується застосувати ОП NJM2115V-TE1 [3, 21, 22]. На рисунку 2.10 представлена структура схеми NJM2115V-TE1 [22].

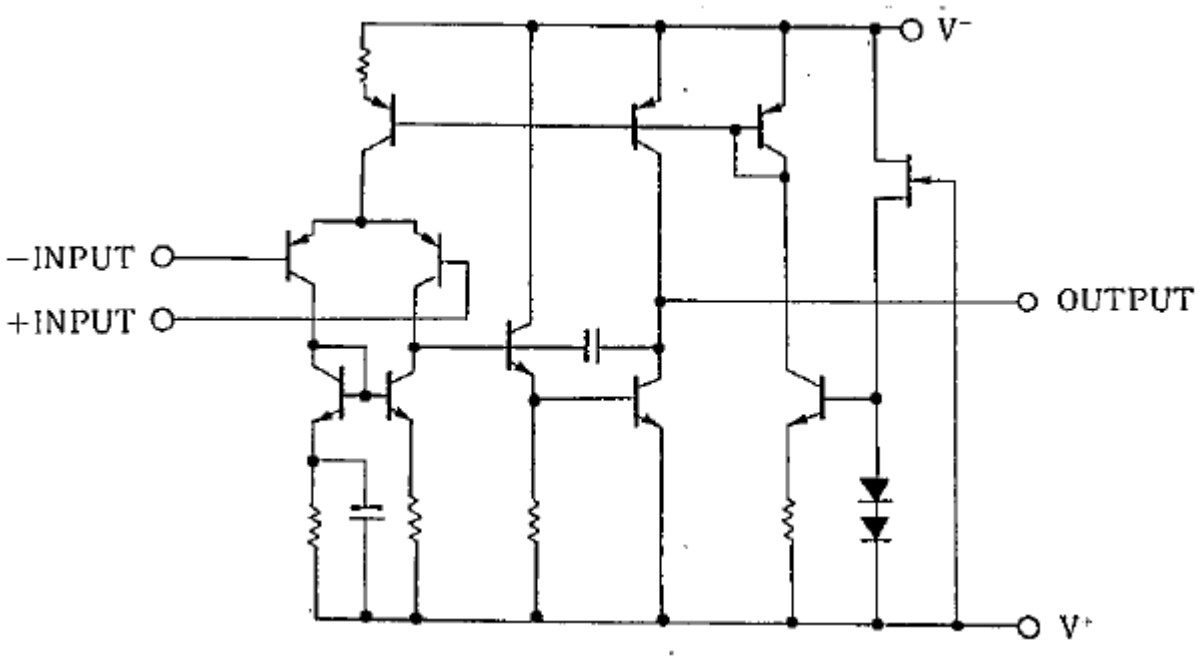


Рисунок 2.10 - Структура схеми NJM2115V-TE1[22]

Як слідує із структури IMC NJM2115V-TE1 має дещо спрощену функціональну складову, тому в роботі було проведено пошук аналогів, представленому підсилювачу. Із можливих застосувань пропонується використати IMC підсилювачів сигналів, виготовлених компанією Nisshinbo Micro Devices [34]. За основу структури підсилювача використовуємо функціонаьний принцип підсилювача, представлений на рисунку 2.1 [34].

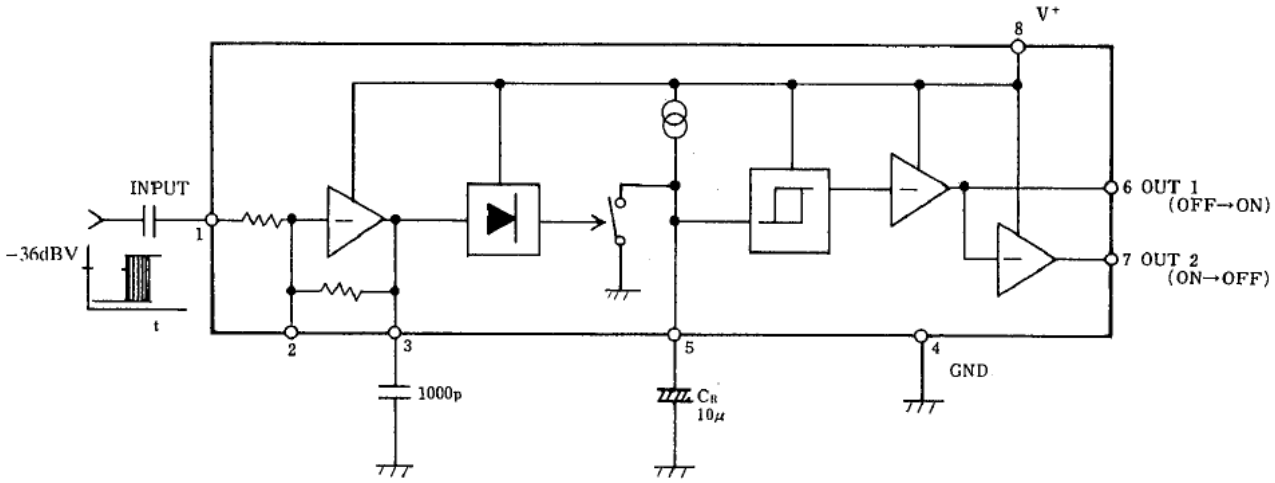


Рисунок 2.11 – Функціональна схема підсилювача Nisshinbo Micro Devices [34]

Як видно із схеми, підсилювач має значно більші можливості по детектуванню слабких сигналів за рахунок використання розширених можливостей ланок зворотнього зв’язку основних опреційних підсилювачів, та використання стабілізованого джерела живлення. Враховуючи вимоги до стабільності частотного діапазону сигналу, що реєструється, для підсилювача було обрано мікросхему NJM8830 [34]. На рисунку 2.12 представлена топологія комутації схеми.

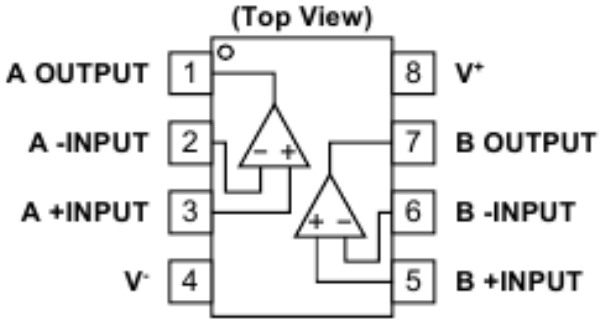


Рисунок 2.12 –Топологія комутації схеми NJM8830

NJM8830 — це подвійний операційний підсилювач з наднизьким рівнем спотворень та наднизьким рівнем шуму, що працює від лінії до лінії.

NJM8830 має наднизькі спотворення, наднизький рівень шуму, широку смугу пропускання, високу швидкість наростання напруги, високий вихідний

струм та компактний корпус. Він найкраще підходить для передпідсилювачів, активних фільтрів, лінійних підсилювачів [34].

Технічні характеристики [34]:

Спотворення- 0,000012% при f=1 кГц

Рівень шуму - 2,5 нВ/√Гц при f=1 кГц

Смуга пропускання коефіцієнта посилення - 90 МГц

Швидкість наростання напруги - 30 В/мкс

Вихідний струм - 100 мА

Напруга живлення - від ±2,0 В до ±5,25 В

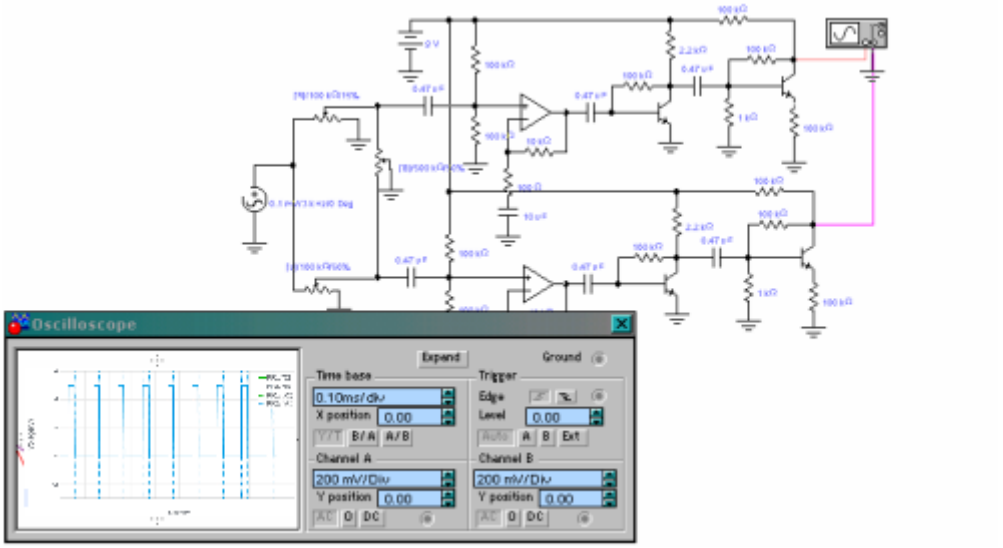
Струм живлення - 6,5 мА (подвійний)

Вихід - типу "рейка-рейка"

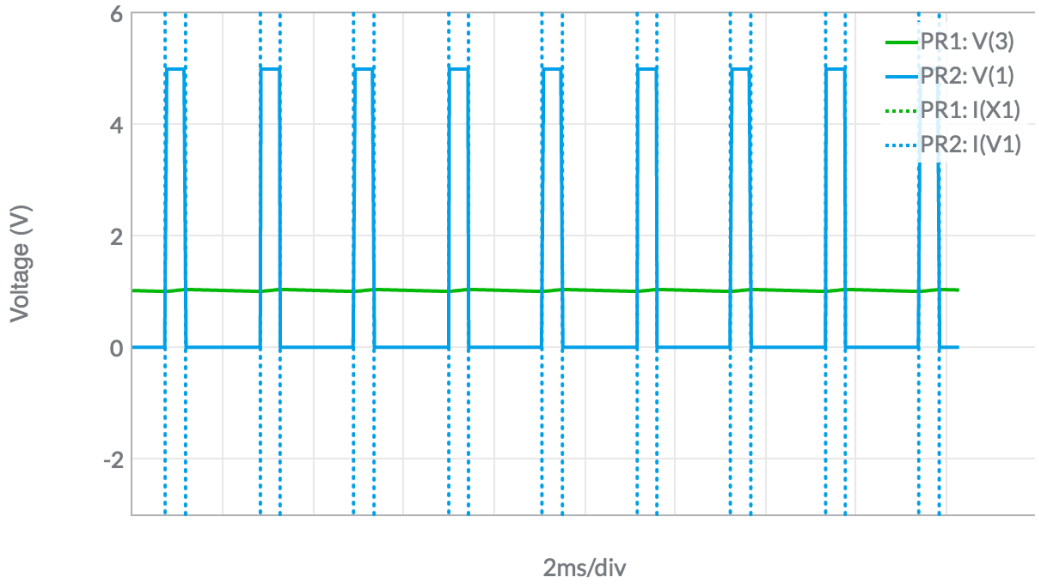
Біполярний вхід

Корпус - HSOP8-M1

У роботі проведено моделювання функціональних властивостей блоку підсилення у демо-версії редктора Multisim [32]. Результати моделювання представлені на рисунку 2.13.



а)



б)

Рисунок 2.13 – Моделювання блоку підсилення мікроелектромеханічної системи орієтації у просторі: а – схема в редакторі Multisim; б- сигнал на виході підсилювача.

Як видно із результатів, схема підсилення забезпечує необхідну функціонвльність пристрою.

2.5 Мікропроцесорний блок керування мікромеханічної системи орієтації у просторі

Для розробки модуля обробки сигналів системи та подальшого сполучення із персональним комп'ютером (ПК) необхідно врахуваати те, що інформаційна складова може потребувати точних фіксацій параметрів, значну швидкодію, протидію завадовим факторам. Також потрібно врахувати можливість оперативного паралельного втручання для корекції параметрів. Слід також передбачити подальше розширення можливостей системи до багатовісної, а також можливість паралельної роботи із інформаційними перефирійними модулями. Врахувати усі перелічені фактори можна за рахунок використання мікропроцесорної системи. Після аналізу існуючих на сьогодні мікропроцесорних систем, та із врахуванням вимог до розроблюваної схеми, для подальшої роботи було обрано систему на мікроконтролері Raspberry Pi Pico [35-41].

На рисунку 2.14 представлено загальний вид плати Raspberry Pi Pico з мікроконтролером RP2040 [42, 43].



Рисунок 2.14 - Загальний вид плати Raspberry Pi Pico з мікроконтролером RP2040 [42, 43].

Мікроконтролер RP2040

Мікроконтролер RP2040 містить двоядерний процесор на архітектурі ARM Cortex M0+ із тактовою частотою до 133 МГц. RP2040 має оперативну пам'ять на 264 КБ, годинник реального часу, АЦП, датчик температури, SPI, I2C, UART, PIO, PWM та інші периферійні блоки [42, 43].

Зовнішня Flash-пам'ять

Зовнішня Flash-пам'ять має об'єм 2 МБ та знаходиться на окремій мікросхемі W25Q16JVUXIQ. Ця пам'ять керується по інтерфейсу QSPI. Процесор ARM Cortex M0+ виконує інструкції користувацької програми, яка знаходиться в цій пам'яті [42, 43].

Порт micro-USB

Роз'єм USB Micro призначений для прошивки та живлення плати. Для підключення до ПК знадобиться USB-кабель (A — Micro USB) [42, 43].

Перетворювач напруги

На платі Pi Pico розташований універсальний перетворювач живлення SMPS (Switch Mode Power Supply) на чіпі RT6150-33GQW, що забезпечує живлення мікроконтролера RP2040 та іншої логіки плати.

Діапазон вхідної напруги – від 1,8 до 5,5 В: при низькій вхідній напрузі регулятор підніме живлення до 3,3 В, а при високій – знизить до 3,3 В. Максимальний вихідний струм 800 мА. Вихідну напругу з регулятора можна зняти з ніжки 3V3(OUT) [42, 43].

На рисунку 2.15 представлена схема мікроконтролера RP2040 [42, 43].

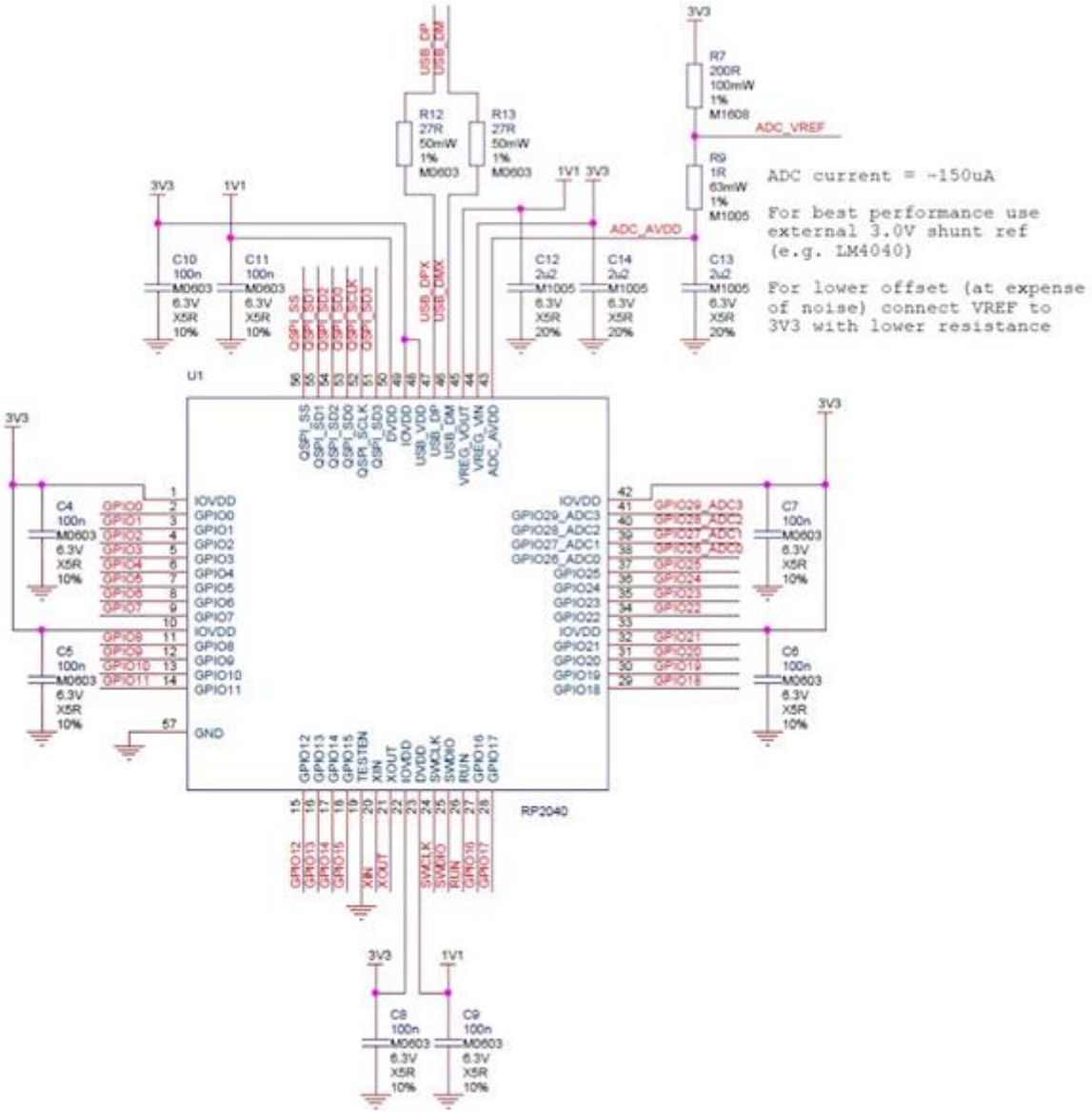


Рисунок 2.15 - Схема мікроконтролера RP2040 [42, 43].

Для забезпечення живлення плати Raspberry Pi Pico може бути використане як сигнал, який подається від комп'ютера по каналу USB (5В), так і за рахунок універсального перетворювача живлення SMPS (Switch Mode Power Supply) на чіпі RT6150-33GQW, що забезпечує живлення мікроконтролера RP2040 та іншої логіки плати.

Діапазон вхідної напруги – від 1,8 до 5,5 В: при низькій вхідній напрузі регулятор підніме живлення до 3,3 В, а при високій – знизить до 3,3 В. Максимальний вихідний струм 800 мА. Вихідну напругу з регулятора можна

зняти з ніжки 3V3(OUT). Схема живлення плати Raspberry Pi Pico представлена на рисунку 2.16 [42, 43].

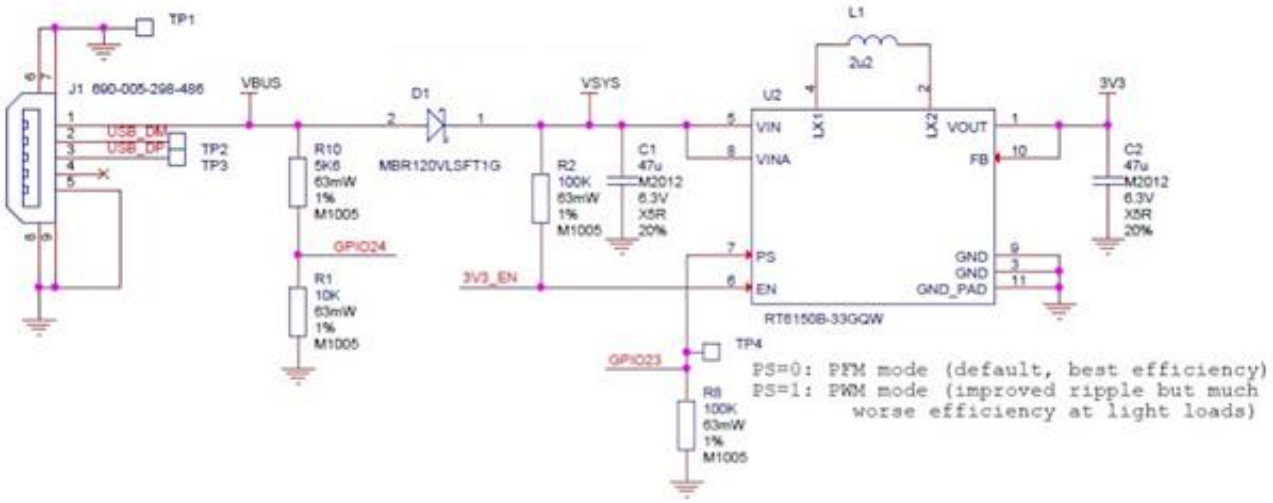


Рисунок 2.16 – Схема живлення плати Raspberry Pi Pico[42, 43]

На рисунку 2.17 представлена монтажна схема плати Raspberry Pi Pico [42, 43].

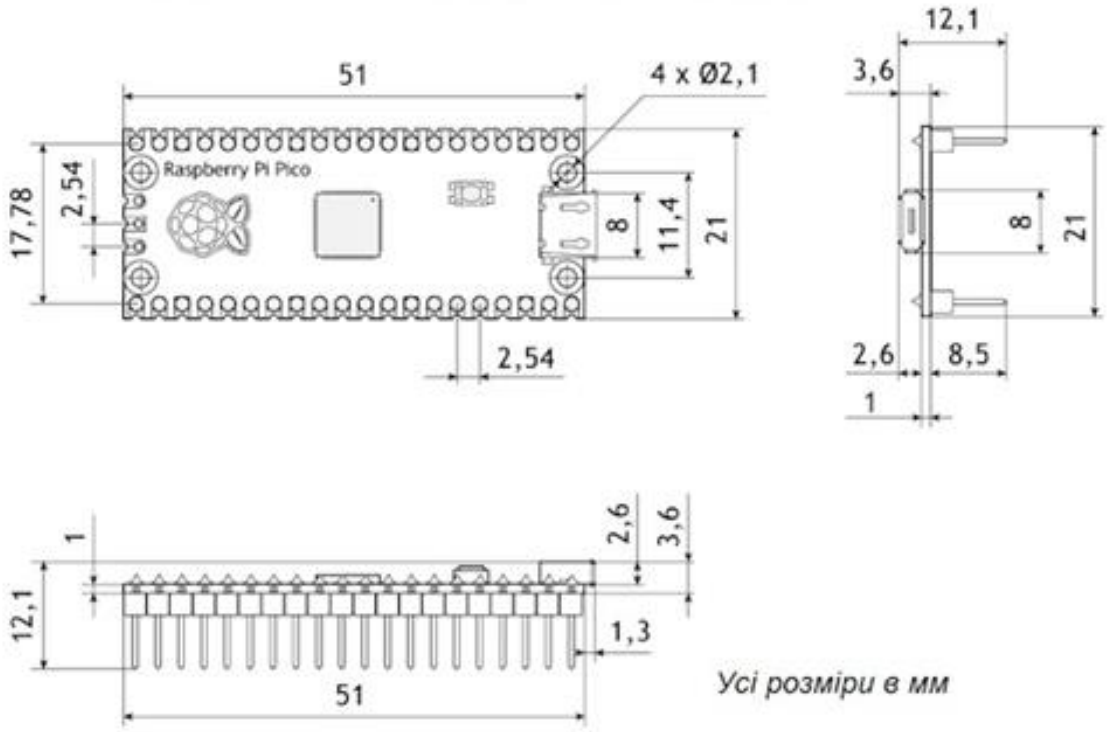


Рисунок 2.17 - Монтажна схема плати Raspberry Pi Pico [42, 43].

Мікроконтролер програмується мовою MicroPython, CircuitPython або C++ [44,45].

Остаточна електрична схема мікроелектромеханічної системи орієтації у просторі представлена на рисунку 2.18

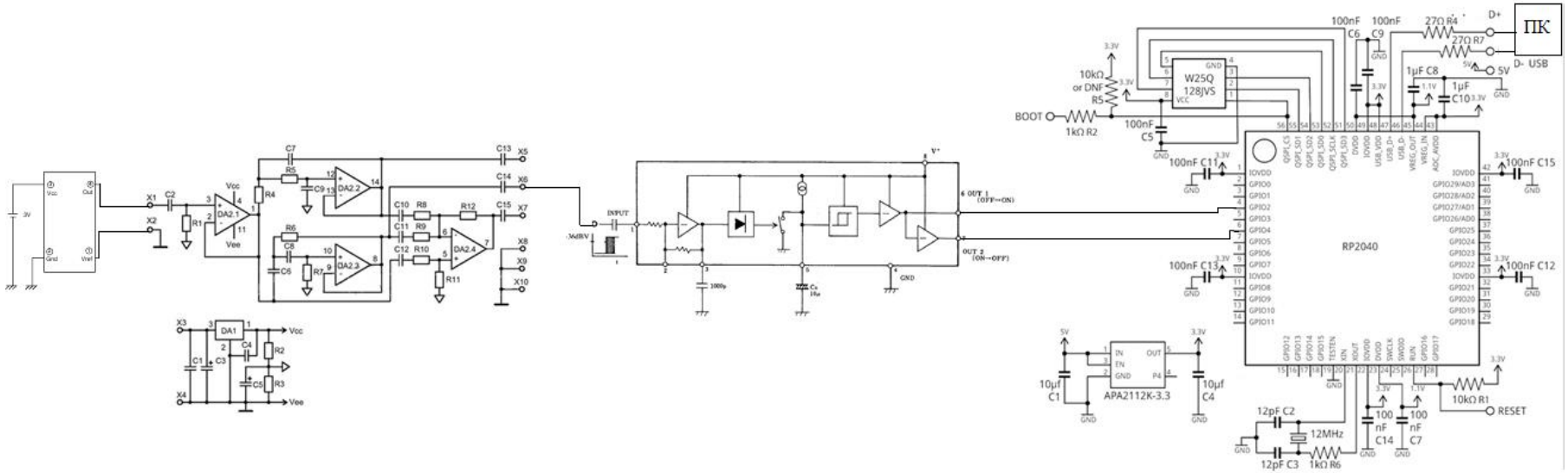


Рисунок 2.18 - Електрична схема мікроелектромеханічної системи орієтації у просторі

Отже, за результатами розділу можна зробити наступні висновки:

1) за основу дослідження і розробки було використано концепцію балкових вібраційних гіроскопів LL-типу на основі довгого стрижня;

2) у якості п'єзоелектричного сенсора було використано елемент одновісьового гіроскопа, змонтованого на мікросхемі ENC-3R;

3) у якості базової схеми для складання ВЧ фільтра у роботі використовуємо фільтр на основі мікросхеми MC3403;

4) у роботі проведено моделювання роботи фільтра ВЧ сигналу в демо-версії редктора Multisim за схемою Саллена і Кі та за схемою Рауха. Результати моделювання, показали, що схема Рауха є більш ефективною, так як дає можливість керувати парметрами вхідного сигналу за рахунок більш динамічної схеми зворотного зв'язку;

5) для підсилювача синалу було обрано мікросхему NJM8830 - має наднизькі спотворення, наднизький рівень шуму, широку смугу пропускання, високу швидкість наростання напруги, високий вихідний струм та компактний корпус;

6) у роботі проведено моделювання функціональних властивостей блоку підсилення. Результати моделювання добре узгоджуються із розрахунками;

7) із урахуванням вимог до розроблюваної схеми, для розробки було обрано плату на мікроконтролері Raspberry Pi Pico. Схема на мікроконтролері Raspberry Pi Pico дасть можливість оперативного паралельного втручання в роботу схеми для корекції параметрів. Вона також передбачає подальше розширення можливостей системи до багатовісної, а також можливість паралельної роботи із інформаційними перефирійними модулями.

3 Техніко-економічне обґрунтування розробки мікромеханічної системи орієтації у просторі

3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення схем мікромеханічної системи орієтації у просторі

Топологічний аналіз показує, що пристрій може бути реалізований у вигляді малогабаритного модуля і виконаний за сучасною маловитратною технологією тонкоплівкових гібридних мікрозборок, або за технологією печатних плат на фольгованому текстоліті. Обидві технології передбачають, що всі елементи будуть навісними, а напиленням на підкладці, або травленням поверхні виконується лише струмопровідний шар.

Для вибору технології виготовлення схем мікромеханічної системи орієтації у просторі проаналізуємо ієрархії чотирьох варіантів (табл. 3.1), враховуючи шкалу відносної важливості (табл. 3.2) [46].

Таблиця 3.1 - Можливі варіанти технологій виробництва пристрою

Технологія		Короткий опис
A	Технологія печатних плат на фольгованому текстоліті	Активні та пасивні елементи схеми навісні, а струмопровідний шар виконано травленням фольгованого текстоліту.
B	Толстоплівкових гібридних інтегральних схем	Всі елементи та між елементні з’єднання виконані у вигляді товстих композитних плівок.
C	Тонкоплівкових гібридних інтегральних схем	Всі елементи та між елементні з’єднання виконані у вигляді тонкіх плівок провідних та резистивних матеріалів.
D	Тонкоплівкових гібридних мікрозборок	Активні та пасивні елементи схеми навісні, а струмопровідний шар виконано у вигляді тонких плівок.

Таблиця 3.2 - Шкала відносної важливості

Інтенсивність відносної важливості	Визначення
1	рівна важливість
3	помірна перевага
5	сильна перевага
7	значна перевага
9	дуже сильна перевага
2,4,6,8	проміжні судження

Вибір робимо за критеріями, наведеними в таблиці 3.3.

Встановлюємо відносну вагу кожного критерію на основі матриці попарних порівнянь для обраних критеріїв (табл. 3.3) [46].

У матриці прийняті наступні позначення: *i* – номер критерію; при порівнянні 6-ох критеріїв (табл. 3.3) *i* = 1, 2, 3, 4, 5, 6; X_i - локальний пріоритет, тобто відносна вага і-го критерію в глобальному критерії:

Таблиця 3.3 – Попарне порівняння критеріїв

Критерій	1	2	3	4	5	6	$\sqrt[6]{\prod_{i=1}^{6}\omega_i}$	X_i
1. Швидкодія	1	1/3	3	1/7	1/5	3	0,664	0,073
2. Завадостійкість	3	1	3	1/3	1/7	3	1,042	0,116
3. Споживання	1/3	1/3	1	1/5	1/7	3	0,460	0,051
4. Площа	7	3	5	1	1/5	7	2,297	0,254
5. Сумісність	5	7	7	5	1	5	4,277	0,473
6. Вартість	1/3	1/5	1/3	1/7	1/5	1	0,293	0,033
∑							9,033	1,00

Далі аналогічно складаємо 6 матриць попарних порівнянь альтернатив стосовно кожного критерію (табл. 3.4 - 3.9). Оскільки тепер порівнюються 4 технології по одному критерію , то і = 1, 2, 3, 4.

$$X_i = \frac{\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}}{\sum_{i=1}^{4}\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}},$$

де $\sum$ - сума по стовпці $\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$.

Таблиця 3.4 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «швидкодія»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	3	1/5	1	3	1,16	0,19
B	5	1	7	7	3,96	0,65
C	1/3	1/7	1	1/2	0,39	0,07
D	1/3	1/7	2	1	0,56	0,09
∑					6,07	1,00

Таблиця 3.5 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «завадостійкість»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	5	1	1/3	1,14	0,21
B	1/5	1	1/5	1/7	0,48	0,09
C	1	5	1	1/3	1,56	0,29
D	3	7	3	1	2,20	0,41
∑					5,37	1,00

Таблиця 3.6 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «споживання»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	5	1/5	1/7	0,61	0,09
B	1/5	1	1/7	1/9	0,24	0,04
C	5	7	1	1/3	1,85	0,29
D	7	9	3	1	3,71	0,58
∑					6,41	1,00

Таблиця 3.7 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «площа»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	5	3	5	0,99	0,21
B	1/5	1	1/3	1/2	0,24	0,05
C	1/3	3	1	3	2,03	0,43
D	1/5	2	1/3	1	1,47	0,31
∑					4,73	1,00

Таблиця 3.8 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «сумісність»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	5	1/3	1/5	0,76	0,13
B	1/5	1	1/7	1/9	0,24	0,04
C	5	7	1	1/2	2,41	0,41
D	3	9	2	1	2,47	0,42
∑					5,88	1,00

Таблиця 3.9 - Порівняння альтернатив стосовно критерію «вартість»

Технологія	A	B	C	D	$\sqrt[4]{\prod_{i=1}^{4}\omega_i}$	X_i
A	1	3	5	6	3,08	0,56
B	1/3	1	3	4	1,41	0,26
C	1/5	1/3	1	2	0,60	0,11
D	1/6	1/4	1/2	1	0,38	0,07
∑					5,47	1,00

Глобальний пріоритет для кожної альтернативи обчислюється як сума добутків кожного локального пріоритету на його ваговий коефіцієнт (табл. 3.10) [46].

З порівняння глобальних пріоритетів різних технологій видно, що найбільшим є пріоритет у варіанта реалізації схем мікромеханічної системи орієтації у просторі, з використанням технології печатних плат на фольгованому текстоліті.

Таблиця 3.10 - Глобальний пріоритет для кожної альтернативи

Пріоритети	№1	№2	№3	№4	№5	№6	Глобальний
Вага	0,073	0,116	0,051	0,254	0,473	0,033	
Печатних плат на фольгованому текстоліті	0,07	0,29	0,29	0,43	0,41	0,11	0,360
Толстоплівкових гібридних інтегральних схем	0,65	0,09	0,04	0,05	0,04	0,26	0,100
Тонкоплівкових гібридних інтегральних схем	0,19	0,21	0,09	0,21	0,13	0,56	0,176
Тонкоплівкових гібридних мікрозборок	0,09	0,41	0,58	0,31	0,42	0,07	0,364

За допомогою методу аналізу ієрархій проведене порівняння чотирьох типів технологій реалізації схем мікромеханічної системи орієтації у просторі за наступними критеріями: 1) швидкодія; 2) завадостійкість; 3) споживана потужність; 4) площа, займана на кристалі; 5) сумісність; 6) вартість. Найбільший локальний пріоритет у критерію «сумісність» (табл. 3.3). За даними таблиці 3.9 локальний пріоритет за критерієм «вартість» є найвищим для технології печатних плат на фольгованому текстоліті. Проте найбільший глобальний пріоритет мають технологія тонкоплівкових гібридних мікрозборок та печатних плат на фольгованому текстоліті. Саме технологія печатних плат на фольгованому текстоліті й буде використовуватися для виготовлення схем мікромеханічної системи орієтації у просторі.

3.2 Розрахунок витрат на виробництво схем мікромеханічної системи орієтації у просторі

Витрати на матеріали і напівфабрикати вказані в таблицях 3.11, 3.12. Витрати на матеріали і напівфабрикати склали 2560,00 грн.

Таблиця 3.11 – Розрахунок вартості матеріалів на виробництво мікромеханічної системи орієтації у просторі

Матеріали	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Усього витрат грн.
Мікросхема ENC-3R	шт.	1	139,00	139,00
Мікросхема MC3403	шт.	1	11,00	11,00
Мікросхема NJM8830	шт.	1	1310,00	1310,00
Мікросхема LM78L05	шт.	1	30,00	30,00
Мікросхема RT6150-33GQW	шт.	1	125,00	125,00
Плата Raspberry Pi Pico з мікроконтролером RP2040	шт.	1	270,00	270,00
Всього				1885,00

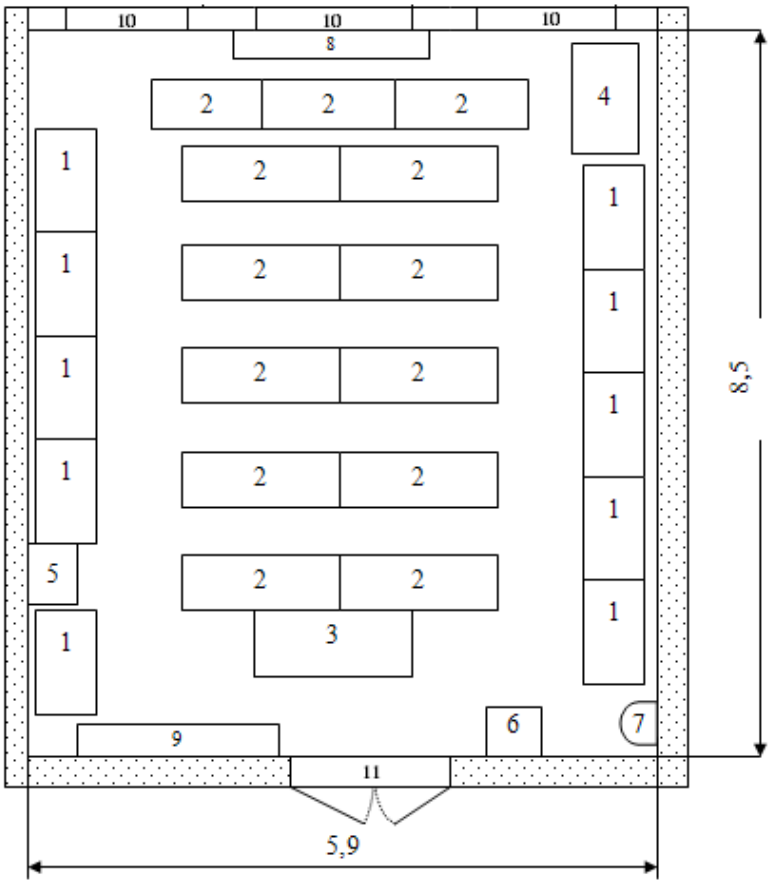
Таблиця 3.12 – Розрахунок вартості напівфабрикатів

Матеріали	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Усього витрат грн.
Фольгований текстоліт 100 × 100	шт.	1	38,00	38,00
Припій паяльний	шт.	1	75,00	75,00
Флюс паяльний	шт.	1	70,00	70,00
Травильник	уп. (100 г)	1	55,00	55,00
Трафарет	шт.	2	63,00	126,00
Очищувач плат	шт.	1	70,00	70,00
Лак електроізоляційний	шт.	1	93,00	93,00
Вода дистильована	шт. (1 л)	1	28,00	28,00
Папір А4 для оформлення технічної документації	уп.	1	120,00	120,00
Всього				675,00

4. Охорона праці та техногенна безпека при розробці мікромеханічної системи орієтації у просторі

4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

В даному розділі як об’єкт дослідження розглянуто приміщення в якому проводяться лабораторні роботи та роботи з відео термінальними пристроями . План приміщення наведено на рисунку 4.1.



1 - стіл комп’ютерний, 2 - стіл аудиторний, 3 - стіл викладача, 4 - установка Холла, 5 - шафа силова, 6 - сейф, 7 - умивальник, 8 - спліт система, 9 - дошка аудиторна, 10 - вікно, 11 - двері

Рисунок 4.1 – План розташування робочих місць

Приміщення, в якому знаходяться відео термінальні пристрої, має такі характеристики:

- довжина приміщення 8,5 м;
- ширина приміщення 5,9 м;
- висота 4 м;
- число вікон 3;
- кількість робочих місць 28;
- забарвлення інтер'єру: біла стеля, блідо-бежеві стіни, підлога бетонна, обтягнута лінолеумом коричневого кольору.

Аналіз шкідливих і небезпечних факторів та карта умов праці для робочого місця працівника представлені в таблиці 4.1 [47,48].

Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого та трудового процесу працівника телекомунікаційної лабораторії

№ п/п	Фактори виробничого середовища та трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	III клас: шкідливі та небезпечні умови, характер праці			Час дії фактора, %
				I ступінь	II ступінь	III ступінь	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м^3: I клас небезпеки _____ II клас небезпеки _____ III-IV клас небезпеки _____						
2	Пил переважно фіброгенної дії,						

	мг/м^3						
3	Вібрація (загальна і локальна), дБ						
4	Шум, дБА						
5	Інфразвук, дБ						
6	Ультразвук, дБ						
7	Неіонізуючі випромінювання: - радіочастотний діапазон, В/м - діапазон промислової частоти, кВ/м - оптичний діапазон (лазерне випромінювання), Вт/м^2						
8	Мікроклімат в приміщенні: - температура повітря, ^{0}С - швидкість руху повітря, м/с - відносна вологість повітря, % - інфрачервоне випромінювання, Вт/м^2	21 – 25 не більше 0,2 не більше 75 100	22 0,1 60				100 100 100
9	Важкість і напруженість праці	категорія важкості праці - легка, категорія напруженості праці - мало напружена					

Таким чином, аналіз шкідливих і небезпечних факторів дозволяє зробити висновок, що умови праці в лабораторії характеризуються наявністю нешкідливих виробничих чинників, які не призводять до зростання захворюваності з втратою працездатності та проявом початкових ознак професійної патології.

4.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Основними заходами запобігання ураження електричним струмом в лабораторії є захист від дотику до частин електрообладнання, що знаходяться під напругою, застосування малих напруг, захисного заземлення і відключення, а також організаційні заходи.

Захист від дотику до струмоведучих частин електричної установки досягається ізоляцією, огорожею, недоступним розташуванням струмоведучих частин, використанням дистанційного управління, блокування і попереджувальної сигналізації.

Основними організаційними заходами запобігання ураження електричним струмом є інструктаж і навчання безпечним методам праці, перевірка знань правил безпеки та інструкцій відповідно до виконуваної роботи [47,48].

У зв'язку з тим, що природне освітлення лабораторії здійснюється через віконні отвори і є недостатнім в осінній та зимовий період, на робочому місці має застосовуватися також штучне освітлення. Штучне освітлення створюють електричним джерелом світла, яке включають в міру необхідності, регулюють інтенсивність світлового потоку і його спрямованість.

При організації робочих місць лабораторії потрібно також враховувати колірне оформлення. Малонасичені (основні) кольори застосовуються для забарвлення великих полів (стеля, стіни, робочі поверхні і тому подібне), середньо насичені (допоміжні) – для невеликих поверхонь або ділянок, які рідко потрапляють у поле зору працівників, а також для створення контрастів; насичені (акцентні) – для маленьких за площею поверхонь як функціональне забарвлення [47,48].

Використовують також гармонійні колірні поєднання в колірній композиції інтер'єру приміщення. При цьому кольори для обробних матеріалів і виробів слід обрати з врахуванням їх фактури; поверхні в приміщенні повин-

ні мати матову і напівматову фактуру для виключення попадання відбитих відблисків в очі працівника.

У приміщеннях повинні забезпечуватися наступні величини коефіцієнтів віддзеркалення: для стелі 60-70%; для стін 40-50%; для підлоги – 30%; для інших відзеркалювальних поверхонь робочих меблів 30-40% [47,48].

Працівники лабораторії повинні строго дотримуватися визначеного нормативними документами режиму праці і відпочинку з чітко регламентованими перервами. Основною перервою є перерва на обід. Для працівників, що виконують операторські функції, вводяться додаткові перерви: 2 перерви по 10 хвилин кожен при 8 годинному робочому дні, через 3 години роботи і за 2 години до її закінчення.

Режим праці і відпочинку залежить від характеру виконуваної роботи: при введенні даних, редагуванні програм, читанні інформації з екрану безперервна тривалість роботи не повинна перевищувати 4 годин, а кількість оброблюваних символів 30000 при 8 годинному робочому дні. Також рекомендується через кожну годину роботи за комп'ютером робити 5-10 хвилинних перерв, а через 2 години – 15 хвилинна перерва. Для зниження напруженості праці необхідно рівномірно розподіляти навантаження і раціонально чергувати характер діяльності прийом – видачу результатів з роботою на клавіатурі комп'ютера. Вночі не повинні виконаються роботи або завдання, що вимагають складних рішень або відповідальних дій [47,48].

Для устаткування робочого місця краще використовувати спеціальні столи і стільці, що дають можливість регулювати положення всіх вузлів, - висоти столу, полички для клавіатури, крісла користувача;

- висоту клавіатури слід відрегулювати так, щоб кисть розташовувалася прямо;

- спина має бути пряма, кут між стегнами і хребтом теж прямий, для чого слід підібрати таке крісло, спинка якого здатна підтримувати спину користувача.

- монітор слід розташувати так, щоб нижній рівень екрану знаходився на 20…25 см нижче за рівень очей, а рівень верхньої кромки розташовувався на висоті лоба, від екрану монітора до очей має бути не менше 75…120 см.

- відстань між столами з комп'ютерами - не менше 1,5 метрів, між моніторами - не менше 2,2 метрів.

- екран комп'ютера краще розташувати під прямим кутом по відношенню до вікон, які необхідно завісити або закрити жалюзі.

4.3 Виробнича санітарія

Мікроклімат характеризується наступними параметрами: температура, вологість, швидкість повітря, атмосферний тиск, шум [247,48].

Для нашого приміщення температура підтримується завдяки вентиляції (природної і штучної) в теплу пору року, та за допомогою опалення та герметизації приміщення в холодну пору року. Оптимальні норми температури для холодної пори року 21-23°С, для теплої складає 22-24°С.

Наше приміщення відповідає цим температурним нормам.

В даному приміщенні є два види вентиляції:

– природна (аерація через вікна і двері);

– примусова (приточно-витяжна).

Функціонально близьким, але відмінним від вентиляції за способом повітрообміну є кондиціонування. В даному приміщені є наявність кондиціонера, який підтримує в приміщенні комфортні умови незалежно від зовнішніх умов (визначеної температури, вологості, чистоти повітря і швидкості повітряних потоків).

Вологість повітря в даному приміщенні не 40-60%, що відповідає оптимальним нормам. Це реалізується за допомогою вентиляції і кондиціонування приміщення, а також за рахунок проведення вологих збирань.

У приміщенні є наявність відео термінальних пристроїв та учбових стендів для проведення лабораторних робіт. Всі ці устаткування мають низь-

кий рівень шуму, що в свою чергу не перевищує допустиму норму рівня шуму в 65 дБ.

В нашому приміщенні, де знаходяться відео термінальні пристрої, використовується змішане освітлення, тобто поєднання природного і штучного освітлення.

В якості природного - бокове освітлення через вікна. В даному приміщенні використовується загальне штучне освітлення.

Розрахунок його здійснюється за методом світлового потоку з урахуванням потоку, відбитого від стін і стелі [47,48].

Нормами для даних робіт в даному приміщенні встановлена необхідна освітленість робочого місця Ен = 300лк (середня точність роботи по розрізненню деталей розміром від 1 до 10 мм).

4.4 Електробезпека

Приміщення за ступенем небезпеки ураження людей електричним струмом відповідно до ПУЕ і ГОСТу 12.1.013-78 являється приміщенням без підвищеної небезпеки [27].

Приміщення сухе, добре опалюване з струмонепровідною підлогою, з температурою 18-24 °С, з вологістю 40-50%. З електроустаткувань в ньому знаходяться відео термінальні пристрої та учбові стенди, які знаходяться під напругою.

Причини ураження електричним струмом [47,48].

1. Пошкодження устаткування.
2. Пошкодження ізоляції.
3. Коротке замикання на землю або на корпус.
4. Порушення правил техніки безпеки и роботи с електроустаткуванням.

Для забезпечення електробезпеки в даному приміщенні використовуються такі технічні засоби:

- захисне заземлення;
- мала напруга;
- захисне відімкнення;
- ізоляція струмопроводів;
- знаки безпеки.

Захисне заземлення — навмисне електричне з'єднання з землею або її еквівалентом металевих струмопровідних частин, що можуть опинитися під напругою.

Учбові стенди, які знаходяться в приміщенні, працюють на мінімально можливих напругах, що забезпечує додаткову безпеку.

Усі електроустаткування можна у разі потреби вимкнути через електронний щит управління, який миттєво знеструмлює усі стенди та відео термінальні пристрої. Скрізь, де встановлені розетки є попереджувальні знаки.

4.5 Пожежна та техногенна безпека об’єкту

Приміщення відноситься за вибухопожежною небезпекою до категорії “Б” [5-7].

Основними причинами пожеж в даному приміщенні є:

- необережне поводження з вогнем;

- незадовільний стан електротехнічних пристроїв, порушення правил їх

- монтажу та експлуатації;

- невиконання вимог нормативних документів з питань пожежної безпеки.

Приміщення за класом пожеж відноситься до категорії “Е” [47,48]. Це горіння обладнання та установок, які знаходяться під електричною напругою. Серед необхідних засобів гасіння пожежі в даному приміщені є два вуглекислих вогнегасники типу ОУ-2. Для мінімізації виникнення пожежі в даному приміщені вчасно проводиться профілактичний огляд та ремонт електроуста-

ткування. В приміщенні є план евакуації згідно якого люди повинні залишити приміщення у разі виникнення пожежі. Ширина шляхів евакуації в світлі повинна бути не менше 1 м, дверей - не менше 0.8 м. При дверях, що відкриваються з приміщень в загальні коридори, за ширину евакуаційного шляху коридором слід приймати ширину коридору, зменшену:

- на половину ширини дверного полотна - при однобічному розташуванні дверей,

- на ширину дверного полотна - при двосторонньому розташуванні дверей.

Висота проходу на шляхах евакуації повинна бути не менше 2 м. У підлозі на шляхах евакуації не допускаються перепади висот менше 45 см і виступи, винятком порогів в дверних отворах. Висота дверей у просвіті на шляхах евакуації повинна бути не менше 2 м.

4.6 Розрахунок освітлення робочого місця

Загальний світловий потік визначається за формулою [47,48]:

$$F_{зсп} = \frac{E_н \cdot S \cdot z1 \cdot z2}{V} \qquad (4.1)$$

де $E_н$ - нормована освітленість ($E_н$ = 300лк), S - площа приміщення; z1 - коефіцієнт, що враховує старіння ламп і забруднення світильників (z1=1,5); z2 - коефіцієнт, що враховує нерівномірність освітлення приміщення (z2 = 1,1); V - коефіцієнт використання світлового потоку, визначається в залежності від коефіцієнтів відбиття від стін, стелі, робочих поверхонь, типів світильників і геометрії приміщення.

Площа приміщення:

$$S = A \cdot B = 8{,}5 \cdot 5{,}9 = 50{,}12 см^2 \qquad (4.2)$$

Виберемо з таблиці коефіцієнт використання світлового потоку за наступними даними:

- коефіцієнт відбиття білої стелі Rп=70%;
- коефіцієнт відбиття від стін, забарвлених в світлу фарбу Rст=50%;
- коефіцієнт відбиття від підлоги, покритої лінолеумом темного кольору Rр=10%;
- індекс приміщення

$$I = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{8{,}5 \cdot 5{,}9}{4 \cdot (8{,}5 + 5{,}9)} = 0{,}87 \qquad (4.3)$$

Знайдений коефіцієнт [3]: V = 0,62.

За формулою (1.1) визначаємо загальний світловий потік:

$$F_{зсп} = \frac{300 \cdot 50{,}15 \cdot 1{,}1 \cdot 1{,}5}{0{,}62} = 40039 \text{ лк.}$$

Для організації загального штучного освітлення виберемо лампи типу ЛБ65.

Люмінесцентні лампи мають ряд переваг перед лампами розжарювання: їх спектр ближче до природного; вони мають велику економічність (більше світловіддача) і термін служби у 10-12 раз більше. Поряд з цим є й недоліки: їх робота супроводжується іноді шумом; гірше працюють при низьких температурах; їх не можна застосовувати у вибухонебезпечних приміщеннях; мають малу інерційність. Для нашого приміщення люмінесцентні лампи підходять.

Світловий потік однієї лампи ЛБ65 становить не менш $F_л$ = 4600 лм. Число N ламп, необхідних для організації загального освітлення визначається за формулою:

$$N = \frac{F_{зсп}}{F_л} = \frac{40039}{4600} = 12 \qquad (4.4)$$

В якості світильників вибираємо ПВЛ-1, 2×65 Вт. Електрична потужність однієї лампи ЛБ65 $W_л$ = 65 Вт.

Потужність всієї освітлювальної системи:

$$W_{oc} = W_{л} \cdot N = 65 \cdot 12 = 780 Вт \quad (4.5)$$

Розміщення світильників ПВЛ-1, 2×65 Вт представлено на рисунку 4.2.

Таким чином, щоб забезпечити світловий потік $F_{зсп}$ = 40039 лм в даному приміщенні використовується 6 світильників по 2 лампи ЛБ65 в кожному. Згідно розрахунків освітленість приміщення відповідає встановленим нормам.

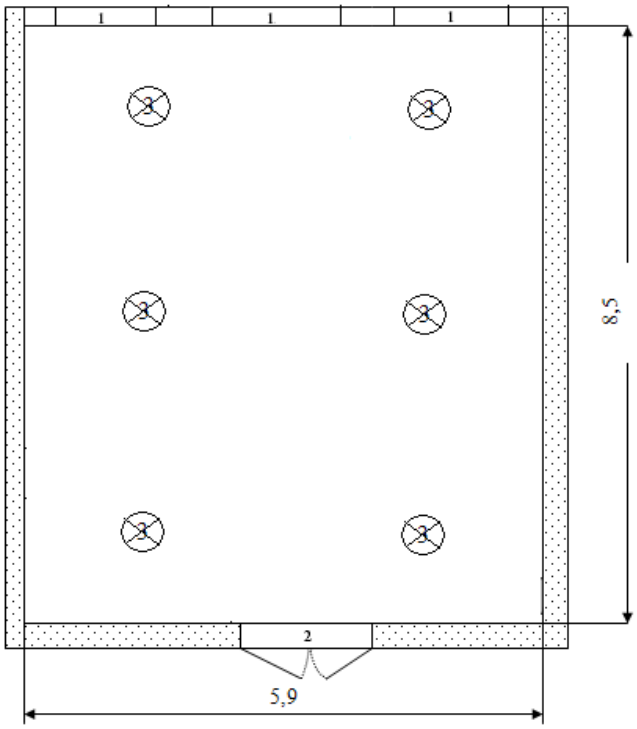


Рисунок 4.2 – План розташування світильників

Висновки та рекомендації

Отже, за результатами виконання роботи можна зробити наступні висновки:

1) у сучасних навігаційних системах оптимальним рішенням є комбінація GPS, МЕМС та оптичних гіроскопічних систем;

2) за основу дослідження і розробки було використано концепцію балкових вібраційних гіроскопів LL-типу на основі довгого стрижня;

3) у якості п'єзоелектричного сенсора було використано елемент одновісьового гіроскопа, змонтованого на мікросхемі ENC-3R;

4) у якості базової схеми для складання ВЧ фільтра у роботі використовуємо фільтр на основі мікросхеми MC3403;

5) у роботі проведено моделювання роботи фільтра ВЧ сигналу в демо-версії редктора Multisim за схемою Саллена і Кі та за схемою Рауха. Результати моделювання, показали, що схема Рауха є більш ефективною, так як дає можливість керувати парметрами вхідного сигналу за рахунок більш динамічної схеми зворотного зв'язку;

6) для підсилювача синалу було обрано мікросхему NJM8830 - має наднизькі спотворення, наднизький рівень шуму, широку смугу пропускання, високу швидкість наростання напруги, високий вихідний струм та компактний корпус;

7) у роботі проведено моделювання функціональних властивостей блоку підсилення. Результати моделювання добре узгоджуються із розрахунками;

8) із врахуванням вимог до розроблюваної схеми, для розробки було обрано плату на мікроконтролері Raspberry Pi Pico. Схема на мікроконтролері Raspberry Pi Pico дасть можливість оперативного паралельного втручання в роботу схеми для корекції параметрів. Вона також передбачає подальше розширення можливостей системи до багатовісної, а також можливість паралельної роботи із інформаційними перефирійними модулями.

Як рекомендації щодо розроблюваного пристрою можна відмітити наступне:

1) система може бути використана в подальших розробках мікроелектронних інформаційних систем навігації;

2) макетний варіант системи може бути використаний в лабораторному практикумі та при проведенні практичних занять кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення.

Перелік посилань

1. Навігаційна система URL : https:// https://uk.wikipedia.org (дата звернення 01.08.2025).

2. Глобальні навігаційні системи – роль в сучасних військових конфліктах URL : https:// defence-ua.com (дата звернення 01.03.2025).

3. Філяшкін М.К. Мікроелектромеханічні системи: Навчальний посібник – Київ: НАУ, 2019. – 276 с.

4. Головатий А. Розрахунок і конструювання робочих органів мікромеханічних гіроскопів / А. Головатий // Вісник Тернопільського технічного університету. – 2007. – Том 12, № 4. – С.20 - 25.

5. Голубек О. В. Основи навігації та орієнтації ракет-носіїв : Навчальний посібник / О. В. Голубек, А. П. Лебедь. – Дніпро : ЛІРА, 2015. 136 с.

6. Rogers R. M. Applied mathematics in integrated navigation systems. 2nd ed. Reston : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003. 330 p.

7. Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. London : Artech House, 2008. 504 p.

8. Titterton D. H., Weston J. L. Strapdown inertial navigation technology. 2-nd ed. – London : The Institution of Electrical Engineers, 2004. 581 p.

9. Сайт компанії Analog Devices URL : https://www.analog.com/en (дата звернення 01.08.2025).

10. Сайт компанії *InvenSense* URL : https://invensense.tdk.com(дата звернення 01.08.2025).

11. Сайт компанії Asahi Kasei Microdevices Corporation.URL :https://www.akm.com/global/en(дата звернення **01.03**.2025).

12. Anderson R., Bilger H. R., Stedman G. E. (1994). Sagnac effect : A century of Earth-rotated interferometers. Am. J. Phys. 62 (11) 975—985.

13. Волоконно-оптичні гіроскопи. [Електронний ресурс] https://ela.kpi.ua : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітня програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» / О. К. Кучеренко; КПІ ім. Ігоря Сікорського Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 106 с. (дата звернення **01.03**.2025).

14. Кучеренко О. К. Волоконна та інтегральна оптика. Навчальний посібник. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронний ресурс: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/20501, 2017. 216 с. (дата звернення **01.03**.2025).

15. King, A. D. (1998). Inertial Navigation — Forty Years of Evolution. GEC Review. General ElectricCompany, 13 (3), 140–149.

16. Macek, W. M., Davis, D. T. M. (1963). Rotation rate sensing withtraveling-wave ring lasers. Applied Physics Letters. AIP Publishing,2 (3), 67–68. doi:10.1063/1.1753778.

17. Nenchev M., Deneva M., Yasser A., Suat T., Chassagne L., Himbert M., Quantum electronics and optical techniques and devices for applications inbiology, atmosphere monitoring, optical communications and sciences // Journal of the Technical University Sofia Plovdiv branch, Bulgaria "Fundamental Sciences and Applications" Vol. 19, 2013. 7 – 22.

18. Deneva M., M. Nenchev, Development of original, simple quantum electronics device with emission passively frequency locked at atomic absorption line, // Proc. Intern. Confer."Laser technology and Lasers", Bulg., 2005, 37-45.

19. Сайт компанії GuideNav Ltd URL : https:// https://guidenav.com/uk (дата звернення 01.08.2025).

20. Hongkong Liocrebif Technology Co., Ltd URL : https://www.liocrebif.com (дата звернення **01.03**.2025).

21. Сайт компанії Murata URL : https://www.murata.com/en-eu (дата звернення **01.03**.2025).

22. Поплавко Ю. М. П’єзоелектрики: навч. посіб. / Ю. М. Поплавко, Ю. І. Якименко. Київ : НТУУ «КПІ», 2013 328 с.

23. Paarman L. D. Design and analysis of analog filters: a signal processing perspective. New-York: Kluwer academic publishers, 2001. 440 p.

24. Richard L. G. Digital signal processing. New Jersey: Upper Saddle, 2006. 656 p.

25. Atsuwe, B.A S Second order active multi-loop band pass filter for very low frequency receiver applications. International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD). Volume 9, Issue 8, August 2022, e-ISSN: 2348 - 4470, print-ISSN: 2348-6406.

26. O. B. Olalekan and O. V. Toluwani Sallen-Key Topology, MFB and Butterworthy in Bandpass Design for Audio Circuit Design. Asian Journal of Electrical Sciences Sallen-Key Topology, MFB and Butterworthy in Bandpass Design for Audio Circuit Design ISSN: 2249 - 6297 Vol. 6 No. 1, 2017, pp.23-28

27. Бойко В. І. Схемотехніка електронних систем : в 3 т. / Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуков В. Я. – [2-ге вид., доп. і перероб.]. Київ. : Вища школа, 2004. Т. 1 : Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої. 2004. 366 с.

28. Рябенький В. М. Схемотехніка електронних пристроїв та систем : в 6 т. / Рябенький В. М. Миколаїв : Іліон, 2011. Т. 1. Аналогова схемотехніка. 2011. 389 с.

29. Шабатура Ю. В. Комп’ютерне моделювання електронних систем / Ю. В. Шабатура, В. В. Присяжнюк. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 142 с.

30. Основи аналогової техніки : лабораторний практикум / О. М. Василевський, В. В. Присяжнюк. Вінниця : ВНТУ, 2018. 140 с.

31. Сайт компанії kosmodrom URL : http://www.kosmodrom.com.ua (дата звернення 01.08.2025).

32. Multisim Live online simulator Сайт https URL : //www.multisim.com (дата звернення 01.08.2025).

33. Noga K. M., Palczynska B. The Simulation Laboratory Platform Based on Multisim for Electronic Engineering Education. 2018 International Conference on Signals and Elec tronic Systems (ICSES), 269–274.

34. Сайт компанії Nisshinbo Micro Devices Inc. URL : https://www.nisshinbo-microdevices.co.jp (дата звернення 01.08.2025).

35. Іспанський журнал електроніки URL : https://www.redeweb.com/uk (дата звернення 01.08.2025).

36. A. V. Brusko, O. Yu. Myronchuk Features of the Implementation of Multitasking on the Raspberry Pi and Arduino Platforms Вінниця : Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2022. № 5. с. 80-84.

37. D. Bovet, and M. Cesati, Understanding the Linux Kernel, Janaury 2001. OŔeally & Associates, Sebastopol (2001).

38. B. J. Catanzaro, Multiprocessor system architectures. Englewood Cliffs, N.J : PTR Prentice Hall, 1994.

39. G. P. Duggan, and P. Young, “Precision timing on low-cost Linux microcomputers,” in 2015 Annual IEEE Systems Conference (SysCon) Proceedings, 2015, pp. 469-471, https://doi.org/ 10.1109/SYSCON.2015.7116795.

40. A. Martelli, and D. Ascher, Eds., 2002. Python Cookbook. Sebastopol: O'Reilly. ISBN: 0-596-00167-3.

41. D. Saito, H. Washizaki, Y. Fukazawa, T. Yoshida, I. Kaneko, and H. Kamo, “Learning Effects in Programming Learning Using Python and Raspberry Pi: Case Study with Elementary School Students,” in 2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Education (TALE), 2019, pp. 1-8, https://doi.org/10.1109/TALE48000.2019.9225866.

42. Матеріали сайту robo-education URL : https://robo-education.com.ua/sravnenie-platform-arduino-i-raspberry-pi-cto-vybrat-dlia-svoix-proektov (дата звернення 01.08.2025).

43. Сайт компанії raspberrypi URL : https://pip.raspberrypi.com (дата звернення 01.08.2025).

44. Довгалець С. М. Алгоритмічні мови та програмування. Частина 1. Основи інформатики та комп'ютерної техніки. Навчальний посібник / С. М. Довгалець, Р. В. Маслій. Вінниця : ВНТУ, 2009. 116 с.

45. Яковенко А. Основи програмування: методичні вказівки до виконання комп'ютерних практикумів з дисципліни "Основи програмування". Основи програмування мовою Python / А. В. Яковенко. Київ : НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського", 2017. 87 с.

46. Основи наукових досліджень : навч. посіб. / за заг. ред. Т. В. Гончарук. Тернопіль, 2014. 272 с.

47. Бєлоконь К. В., Рижков В. Г., Куріс Ю. В., Манідіна Є. А. Основи охорони праці : навч.-метод. посіб. Запоріїжжя : ЗДІА, 2015. 180 с. URL http://ebooks.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/do2018/f356296.pdf.

48. Бєлоконь К. В., Суржицька Л. А., Цимбал В. А., Карнаух А. А. Цивільний захист : конспект лекцій. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 69 с. URL: http://files.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/do2018/f356329.pdf.

Додаток 1

Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

Wyższa Szkoła Zarządzania Ochroną Pracy w Katowicach (WSZOP)
Департамент захисту довкілля Запорізької обласної державної адміністрації
ДУ «Запорізький обласний центр контролю та профілактики хвороб МОЗ України»
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Національний університет «Львівська політехніка»
Національний університет кораблебудування імені Адмірала Макарова
Національний університет «Києво-Могилянська Академія» Київський національний університет будівництва і архітектури Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
Національний транспортний університет
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

28-30 жовтня 2025 року

ЗАПРОШУЄМО ДО УЧАСТІ У

Всеукраїнській науково-практичній конференції за участю молодих учених та здобувачів вищої освіти

«АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ СУСПІЛЬСТВА У СФЕРАХ ЕКОЛОГІЧНОЇ ТА ЦИВІЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, МЕНЕДЖМЕНТУ ТА ЕКОНОМІКИ»

(режим роботи – дистанційний)

Запоріжжя, 2025

ОРГКОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Шило Г.М. – голова оргкомітету, доктор технічних наук, професор, ректор ЗНУ.
- Метеленко Н.Г. – заступник голови оргкомітету, доктор економічних наук, професор, директор ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.
- Бєлоконь К.В. – заступник голови оргкомітету, кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ.

Члени оргкомітету:
- Bohdan Mochnacki – prof. drhab. ing., Rektor WSZOP;
- Амінов Р.Ф. – кандидат біологічних наук, старший викладач кафедри фізіології, імунології і біохімії з курсом цивільного захисту та медицини біологічного факультету ЗНУ, голова Ради молодих вчених ЗНУ;
- Барабаш О.В. – доктор технічних наук, професор, в.о. завідувача кафедри екології та ТЗНС Національного транспортного університету;
- Білоскурський Р.Р. – доктор економічних наук, ректор Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;
- Воронкова В.Г. – доктор філософських наук, професор, завідувач кафедри управління та адміністрування ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ;
- Клопов І.О. – доктор економічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ;
- Коваленко В.Л. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем ІННІ ім. Ю.М. Потебні ЗНУ;
- Мальований М.С. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету «Львівська політехніка»;
- Пірогова І.М. – заступник директора Департаменту захисту довкілля Запорізької обласної державної адміністрації;
- Степова О.В. – доктор технічних наук, професор, проректор з наукової та міжнародної роботи Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;
- Глущевська В.В. – здобувач, голова наукового товариства студентів, аспірантів та докторантів Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ;
- Ткаченко Т.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва і архітектури;
- Трохименко Г.Г. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій *Національного університету кораблебудування імені Адмірала Макарова*;
- Тулушев Є.О. – завідувач відділу моніторингу та реагування на небезпеки ДУ «Запорізький обласний центр контролю та профілактики хвороб МОЗ України»;
- Храпкіна В.В. – доктор економічних наук, професор, кафедра маркетингу та управління бізнесом, Національний університет «Києво-Могилянська Академія»;
- Шмандій В.М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології та біотехнології Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

УДК621.396

Косяк Антон Костянтинович
здобувач вищої освіти спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»
Сидоренко Анастасія Віталіївна
здобувачка вищої освіти спеціальності G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»
Світанько Микола Вікторович
кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедра Електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення ІННІ ім. Ю.М, Потебні ЗНУ

РОЗРОБКА МІКРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ОРІЄТАЦІЇ У ПРОСТОРІ

Застосування у сучасних екологічних системах моніторингу навкольшнього середовища лідарних систем стає все більш актуальним. У мобільних наземних робототехнічних комплексах і безпілотних літальних апаратах (БПЛА) ця технологія відіграє дуже важливу роль: вона використовується для автоматичної побудови тривимірної карти (сцени) навколишнього простору і просторової орієнтації апарату [1,2].

Сучасні тенденції розвитку навігаційних комплексів вказують на триваючий розвиток систем глобального позиціонування і особливу роль, яка їм приділяється з боку розвинених держав і союзів. При цьому, кожна з країн, розуміючи ризики і загрози безпеці, пов'язані з порушенням роботи аналогічних систем інших країн, послугами яких доводиться користуватися, намагаються розвивати власні навігаційні системи, стійкі до активних дій [3].

Тому, актуальним є питання розвитку, як нових навігаційних систем, так і систем орієнтації у просторі, незалежних від супутникових мереж. Основою таких комплексів мають стати прилади, створені на базі сучасних електронних і інформаційних технологій [4,5].

У роботі пропонується мікроконтролерна мікромеханічна система орієтації у просторі. На рисунку 1 представлена електрична схема системи.

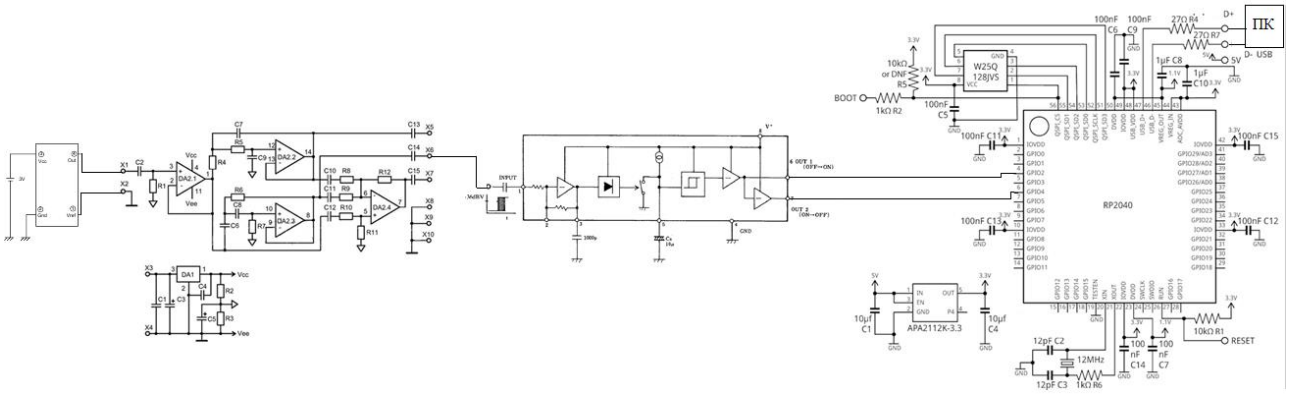


Рисунок 1 - Електрична схема мікромеханічної системи орієтації у просторі

Система живлення пристрою, в залежності від режиму роботи, може бути реалізована як окремими джерелами напруги в діапазоні від 3 В до 30 В, так і за рахунок джерел напруги, вбудованих у систему керування (живлення від ПК по каналу USB для логіки – 3 – 5 В).

ВЧ фільтр призначений для пкращення якості сигналу, що реєструється.

Підсилення сигналу після обробки ВЧ фільтром здійснюється за допомогою операційного підсилювача.

Мікропроцесорна система здійснює осаточну обробку сигналу реєстрації, передачу сигналу на пристрій реєстрації (ПК – персональний комп’ютер), корекцію за рахунок результатів обробки, а також, за потреби, може виконувати функцію низьковольтного джерела живлення 0 – 5 В.

У якості сенсорів у сисемі передбачено використання як гіроскопічних, так і магнітних датчиків. Це дасть можливість використовувати у прстрої одночасно дві складові орієнтації – магнітну і гравітаційну.

Список використаних джерел

1. Gregorio E., Rosell-Polo J. R., Sanz R., Rocadenbosch F., Solanelles F., Garceá C., Chueca P., Arnó J., del Moral I., Masip J., et al. LIDAR as an alternative to passive collectors to measure pesticide spray drift. Atmos. Environ. 2014. 247p.

2. Kovalev V. A., Eichinger W. E. Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods. Wiley-Interscience : New York, NY, USA : 2004. 165p.

3. Глобальні навігаційні системи – роль в сучасних військових конфліктах URL : https:// defence-ua.com (дата звернення 01.08.2025).

4. Філяшкін М.К. Мікроелектромеханічні системи: Навчальний посібник Київ : НАУ, 2019. 276 с.

5. Rogers R. M. Applied mathematics in integrated navigation systems. 2nd ed. Reston : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003. 330 p.