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 системи пристроїв вимірювання магнітних потоків*

Виконав: студент (ка) *II* курсу, групи *8.1764*

Спеціальності *176 Мікро- та наносистемна техніка*
(код і назва спеціальності)

освітньої програми *Мікроелектронні інформаційні системи*
(код і назва освітньої програми)

А. В. Сидоренко
(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, професор, д.т.н.*
Коваленко В. Л.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

м. Запоріжжя

2025 рік

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

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.
"15" грудня 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сидоренко Анастасії Віталіївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) *Дослідження та розробка системи пристроїв вимірювання магнітних потоків*
керівник проєкту (роботи) *Світанько Микола Вікторович, доцент, к.ф-м.н.*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від *"27" лютого 2025 року №313-с*
2. Строк подання студентом проекту (роботи) *12 грудня 2025 року*
3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Генератор синусоїдальних коливань 5 кГц; генератор експоненціальних імпульсів від 5 до 100 Гц; джерело живлення 36 В.*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Дослідження принципів та приладів вимірювання магнітних потоків. Розробка пристроїв вимірювання магнітних потоків. Техніко-економічне обґрунтування розробки схем магнітометрів. Охорона праці та техногенна безпека схем магнітометрів.*
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Датчики на гальваномагнітних ефектах. Фероіндукційні датчики. Структурна схема просторою вимірювання магнітних полів на гальваномагнітному ефекті. Зонд для виміру магнітного поля. Загальна схема портативного пристрою вимірювання магнітних полів. Крива намагнічування. Диференціальний феромагнітний датчик. Структурна схема диференціального феромагнітного магнітометра. Схема диференціального феромагнітного магнітометра.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
I	*Світанько М. В., доцент*	*13.10.2025*
II	*Світанько М. В., доцент*	*10.11.2025*
III	*Світанько М. В., доцент*	*17.11.2025*
IV	*Світанько М. В., доцент*	*23.11.2025*

7. Дата видачі завдання ____*03 березня 2025 року*_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	*Аналітичний огляд вимірювальних датчиків магнітних величин*	*14.09.2025*	
2	*Дослідження принципів вимірювання магнітного потоку*	*18.09.2025*	
3	*Дослідження принципів вимірювання індукції магнітного поля*	*13.10.2025*	
4	*Розробка портативного пристрою вимірювання магнітних полів*	*20.10.2025*	
5	*Розробка зонду виміру магнітного поля з датчиком Холла*	*27.10.2025*	
6	*Розробка диференціального феромагнітного магнітометра*	*03.11.2025*	
7	*Аналіз загальної схеми диференціального феромагнітного магнітометра*	*10.11.2025*	
8	*Техніко-економічне обґрунтування*	*17.11.2025*	
9	*Охорона праці та техногенна безпека*	*23.11.2025*	
10	*Написання пояснювальної записки*	*02.12.2025*	
11	*Оформлення графічного матеріалу*	*08.12.2025*	
12	*Попередній захист дипломної роботи*	*12.12.2025*	
13	*Оприлюднений захист кваліфікаційної роботи*	*18.12.2025*	

Студент _____ _____*Сидоренко А. В.*_____
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

Нормоконтроль пройдено

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

Реферат

Дипломна робота містить 79 сторінок, 49 рисунків, 16 таблиці, 24 джерелf літератури.

Об’єкт дослідження: пристрої вимірювання магнітних потоків.

Мета роботи: розробка та дослідження параметрів магнітометрів для вимірювання магнітних полів.

Задачі роботи: розробити пристрій вимірювання магнітних полів, заснований на гальваномагнітному ефекті, розробити диференціальний феромагнітний магнітометр, призначений для пошуку великих металічних предметів в умовах оперативних заходів.

Методика досліджень: моделювання пристрою за допомогою програмних забезпечень Electronics Workbench 5.12, SPlan 5.0.

Короткий виклад результатів досліджень: розроблений магнітометр на гальваномагнітному ефекті має номінальну чутливість 2,5 мВ/Гс і забезпечує повний діапазон вимірів сили магнітного поля 1800 Гс; розроблений диференціальний феромагнітний магнітометр дозволяє вимірювати індукцію в діапазоні від 0,01 до 1,6 Тл з похибкою, не більшою за 2%.

Результати впроваджень: електронний макет генератора імпульсів пройшов випробовування на кафедрі ЕІСПЗ.

Прогнозні пропозиції: рекомендується для подальшого дослідження з метою удосканалення.

МАГНІТНИЙ ПОТІК, МАГНІТНЕ ПОЛЕ, МАГНІТНИЙ ДАТЧИК, ІНДУКЦІЯ, ФЕРОМАГНІТ, МАГНІТОМЕТР

Дипломну роботу виконано на кафедрі електроніки, мікроелектронних систем та програмного забезпечення, з 03.03.2025 р. по 12.12.2025 р.

Зміст

Стор.

Вступ …….. 6

1 Дослідження принципів та приладів вимірювання магнітних потоків. 8

1.1 Вимірювальні датчики магнітних величин …….. 9

1.1.1 Індукційні та фероіндукційні датчики ……... 10

1.1.2 Гальваномагнітні датчики ……... 13

1.2 Вимірювання магнітного потоку …….. 17

1.3 Вимірювання індукції магнітного поля …… 19

1.4 Прилади з магніто резистивними сенсорами ……... 21

1.5 Прилади з напівпровідниковими сенсорами …… 26

2 Розробка пристроїв вимірювання магнітних потоків ……. 30

2.1 Розробка портативного пристрою вимірювання магнітних полів …. 31

2.1.1 Зонд виміру магнітного поля з датчиком Холла …….. 31

2.1.2 Лінійний регулятор напруги ……... 32

2.1.3 Драйвер індикаторного пристрою …….. 34

2.1.4 Загальна схема портативного пристрою вимірювання магнітних полів ……... 38

2.2 Розробка диференціального феромагнітного магнітометра ……... 40

2.2.1 Структурна схема диференціального феромагнітного магнітометра ……... 43

2.2.2. Моделювання схеми задаючого генератора ……. 44

2.2.3 Моделювання формувача сигналів ……..…….. 45

2.2.4 Моделювання підсилювача потужності …….……... 46

2.2.5 Моделювання приймального підсилювача ……... 47

2.2.6 Моделювання синхронного детектора та джерела живлення ……. 48

2.2.7 Загальна схема диференціального феромагнітного магнітометра... 51

3 Техніко-економічне обґрунтування розробки схем магнітометрів ….. 53

3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення схем магнітометрів ……... 53
3.2 Розрахунок витрат на виробництво схем магнітометрів ……... 57
4 Охорона праці та техногенна безпека при розробці схем магнітометрів ……... 59
4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів …….. 59
4.2 Заходи з поліпшення умов праці …… 61
4.2.1 Техніка безпеки при експлуатації електричних установок в лабораторії ……. 62
4.2.2 Електроустаткування ……... 63
4.2.3 Створення оптимальних умов праці в лабораторії травлення печатних плат ……..... 63
4.2.4 Природне та штучне освітлення ……. 67
4.3 Протипожежна та техногенна безпека …….. 67
4.4 Розрахунок місцевого освітлення робочого місця при монтажі елементів на плату …….. 69
Висновки та рекомендації …… 72
Перелік посилань …….. 73
Додаток А …….. 76

Вступ

Вимірювати характеристики магнітного поля можна за допомогою різних фізичних методів. Якщо брати, наприклад, популярні вимірювальні прилади для напруги, то існують магнітоелектричні, електромагнітні, електродинамічні вольтметри. Кожен метод точніший у певних умовах. Для конкретного завдання. Однією із найважливіших характеристик магнітного поля є інтенсивність його потоку. Саме вона буде визначати ступінь ефективності як корисної, так і небезпечної дози магнітного опромінення [1-4].

Магнітний потік (або потік магнітної індукції) – це фізична величина, яка характеризує кількість силових ліній магнітного поля, які проходять через певну поверхню. Він обчислюється як добуток магнітної індукції, площі поверхні і косинуса кута між вектором магнітної індукції та нормаллю до поверхні. Максимальне значення потоку досягається, коли поверхня перпендикулярна до силових ліній поля. Потік дорівнює нулю, коли поверхня паралельна силовим лініям поля. Одиницею вимірювання магнітного потоку в системі SI є вебер (Вб).

Вимірювання магнітного потоку здійснюється за допомогою магнітометра, приладу, який вимірює магнітні величини, зокрема магнітний потік (у веберах, Вб) або магнітну індукцію (у теслах, Тл).

Вимірювані магнітні величини в основному попередньо перетворюються в електричні, зручні для вимірювання. Перетворювачі магнітних величин використовують гальваномагнітні явища, явища електромагнітної індукції, зміни магнітного стану феромагнетика в магнітному полі, квантові явища та силову взаємодію досліджуваного поля з полем постійного магніту або контуру з електричним струмом.

Явище електромагнітної індукції покладене в основу принципу дії індукційних та феромодуляційних вимірювачів магнітного потоку.

Індукційні перетворювачі використовують в засобах для вимірювань як в сталих, так і в змінних магнітних полях. У першому випадку зміну потокозчеплення досліджуваного потоку з витками вимірювальної котушки можна здійснити швидким винесенням котушки за межі досліджуваного магнітного поля.

В основу побудови первинних перетворювачів магнітної індукції можуть бути покладені гальваномагнітні ефекти Гаусса та Холла.

Датчики Холла є важливими компонентами в області мехатроніки, що широко застосовуються для вимірювання магнітних полів та визначення положення об'єктів. Ці датчики засновані на ефект Холла, який був відкритий фізиком Едвардом Холлом в 1879 році. Коли електричний струм проходить через провідник, який знаходиться в магнітному полі, виникає поперечна напруга, пропорційна інтенсивності магнітного поля.

Датчики Холла використовуються для вимірювання величини магнітного поля, відстеження положення, швидкості та напрямку руху, а також для комутації

Вони знайшли широке застосування в автомобільній промисловості (наприклад, датчики положення колінчастого вала), промисловій автоматизації, споживчій електроніці, а також у системах контролю доступу та індуктивному перемиканні.

З появою напівпровідників - спочатку германію, а потім і кремнію - стала можливою реалізація ефекту в приладах, які отримали назву «датчиків або перетворювачів Холла». Датчики Холла практично не вносять втрат при вимірюванні постійних і змінних струмів, а напруга Холла пропорційна прикладеному магнітному полю, що доволі зручно для подальшої обробки [4].

Актуальність роботи полягає а розробці приладів мікроелектронних систем, які використовують магнітні величини.

1 Дослідження принципів та приладів вимірювання магнітних потоків

Однією з основних характеристик магнітного поля є вектор магнітної індукції В, який визначається силою $\overline{F}$ взаємодії магнітного поля з електричним зарядом q, що протікає крізь це поле:

$$\overline{F} = q(\bar{v}\,\overline{B}), \qquad (1.1)$$

де q – електричний заряд; $\bar{v}$ – швидкість заряду; $\overline{B}$ – магнітна індукція однорідного поля [5].

Як характеристику магнітного поля використовують також магнітний потік Ф та вектор напруженості магнітного поля $\overline{H}$:

$$\Phi = \int_S \overline{B} d\bar{s}, \qquad (1.2)$$

де B – магнітна індукція, s – поверхня.

Вектор напруженості магнітного поля, як і вектор магнітної індукції, визначається силою, з якою магнітне поле діє на заряд, який рухається в ньому, однак вектор $\overline{H}$ не залежить від властивостей середовища, в якому проявляється ця дія магнітного поля. Наприклад, якщо магнітне поле створено контуром з струмом, то напруженість поля визначається лише геометричними розмірами контура і струмом у ньому.

Зв’язок між B і H визначається одним із співвідношень:

– в вакуумі: $B = \mu_0 H$;

– в середовищі з відносною магнітною проникністю μ: $B = \mu\,\mu_0 H$,

де μ_0 – магнітна проникність вакууму (магнітна постійна), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м.

Інколи для визначення характеристик магнітного поля зручно користуватись поняттям “магнітний момент”. Магнітним моментом $M_м$ контура з струмом називають вектор, модуль якого дорівнює добутку площі контура і струму, а напрям перпендикулярний до площини контуру.

Якщо магнітне поле створюється намагніченим тілом, то магнітний момент тіла:

$$\overline{M}_{\text{М}} = \sum \overline{M}_{\text{М}_i}, \qquad (1.3)$$

де $\overline{M}_{\text{М}_i}$ – магнітний момент, який створюється рухом електронів у атомі.

Для характеристики ступеню намагніченості користуються поняттям “намагніченість” $\overline{J}$. Під намагніченістю розуміють магнітний момент одиниці об’єму намагніченого тіла:

$$\overline{J} = \overline{M}_{\text{М}} \Big/ v, \qquad (1.4)$$

де $M_{\text{М}}$ – магнітний момент тіла; v – об’єм тіла.

Для характеристики магнітного моменту в різних середовищах використовують три основні вектори: магнітну індукцію $\overline{B}$; напруженість магнітного поля $\overline{H}$ та намагніченість $\overline{J}$. Ці вектори пов’язані між собою співвідношенням:

$$\overline{B} = \mu_0\left(\overline{H} + \overline{J}\right). \qquad (1.5)$$

Калібрування і повірка приладів для вимірювання магнітних величин проводиться за допомогою відповідних мір магнітних величин [5].

Як міра магнітного потоку зазвичай використовується магнітний потік, який створюється котушкою з двома обмотками [1], з відомим коефіцієнтом взаємної індукції M, при наявності в одній з обмоток зміни струму ΔI (наприклад, вимкненні струму). Потокозчеплення другої обмотки і є мірою магнітного потоку:

$$\Psi = M\,\Delta I. \qquad (1.6)$$

1.1 Вимірювальні датчики магнітних величин

На сьогоднішній день магнітні датчики набули поширення у різних сферах промисловості, оскільки їх використання для вимірювання струму, фіксації частоти обертання, створенні аналітичних приладів, контролю лінійних і кутових зміщень, гальванічної розв’язки, безконтактних вимикачів, виконання завдань дефектології та геологорозвідки, розпізнавання образів фе-

ромагнітних об’єктів, моніторингу позиції поршня в пневматичних та гідравлічних циліндрах тощо, забезпечує дотримання більшості сучасних вимог до чутливості, роздільної здатності та інших важливих параметрів вимірювальних систем.

Для створення вимірювальних датчиків магнітних величин використовують різні прояви магнітного поля – електричний, механічний, оптичний та ін. При цьому вимірювальна величина перетворюється з допомогою вимірювального датчика на іншу, більш зручну для безпосереднього вимірювання.

Для побудови вимірювальних датчиків магнітних величин на електричні використовують різні фізичні явища й ефекти, в яких сукупність магнітних величин (потік, індукція, напруженість магнітного поля) пов’язана з вихідними електричними величинами строгими функціональними залежностями. Найширшого використання для перетворення магнітних величин на електричні знайшли індукційні, фероіндукційні, гальваномагнітні і квантові вимірювальні датчики [2].

1.1.1 Індукційні та фероіндукційні датчики

Індукційним датчиком є вимірювальна котушка. Якщо вимірювальна котушка з площею контура витка S і числом витків w розміщена в магнітному полі (рис. 1.1), то повний магнітний потік, який взаємодіє з котушкою (потокозчеплення):

$$\Psi = w\Phi = \mu\mu_0 HSw\cos\alpha, \qquad (1.7)$$

де α – кут між напрямом вектора H і нормаллю (перпендикуляром) до площини витків котушки.

При зміні потоку в контурі вимірювальної котушки наводиться ЕРС:

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -w\left(\frac{d\Phi}{dt}\right). \qquad (1.8)$$

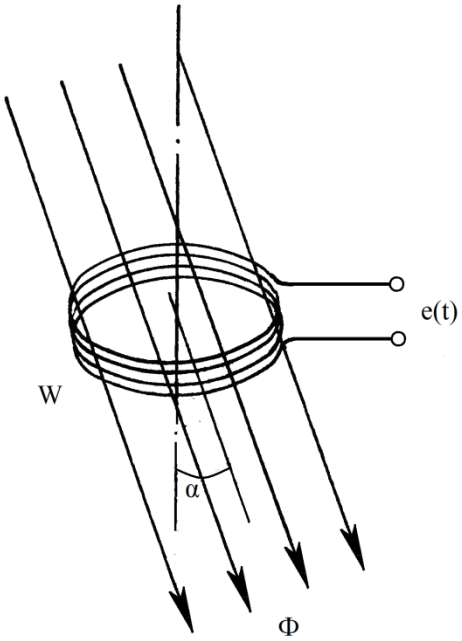


Рисунок 1.1 - Вимірювальна котушка у магнітному полі

Якщо магнітне поле рівномірне, то

$$e = -wS\left(\frac{dB}{dt}\right)\cos\alpha, \tag{1.9}$$

а коли, крім цього, магнітна проникність середовища в усіх точках, охоплених контуром витків котушки, є однаковою і незмінною, то ЕРС можемо визначити за формулою:

$$e = -wS\mu\mu_0\left(\frac{dH}{dt}\right)\cos\alpha. \tag{1.10}$$

Бачимо, що наведена у вимірювальній котушці ЕРС може за певних умов бути мірою магнітного потоку, індукції або ж напруженості магнітного поля.

Для перетворення зміни індуктивності у зміну напруги може застосовуватись електрична схема (рис. 1.2) [3].

На витки котушки 2 через опір навантаження R_H подається напруга живлення U змінного струму I . Струм у колі визначається виразом:

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_H + r_Д)^2 + (\omega L)^2}}, \tag{1.11}$$

де $r_Д$ - активний опір витків котушки.

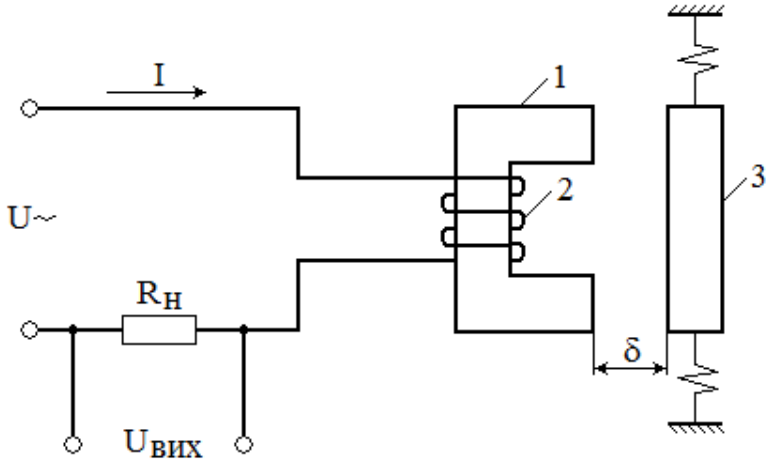


Рисунок 1.2 – Електрична схема ввімкнення індуктивного перетворювача у вимірювальне коло

Оскільки активна складова кола постійна, то зміна струму I може відбуватись лише за рахунок індуктивної складової, яка залежить від величини повітряного проміжку δ.

Кожному значенню δ відповідає певне значення струму I, який створює падіння напруги $U_{ВИХ}$ на опорі R_H . Величина

$$U_{ВИХ} = IR_H \qquad (1.12)$$

являє собою вихідний сигнал перетворювача. Підставляючи у (1.12) вираз (1.11) отримуємо :

$$U_{ВИХ} = \frac{2IR_H\delta}{\omega w^2 \mu_0 S} . \qquad (1.14)$$

Залежність $U_{ВИХ} = f(\delta)$, в першому наближенні, має лінійний характер.

Реальна характеристика представлена на рисунку 1.3.

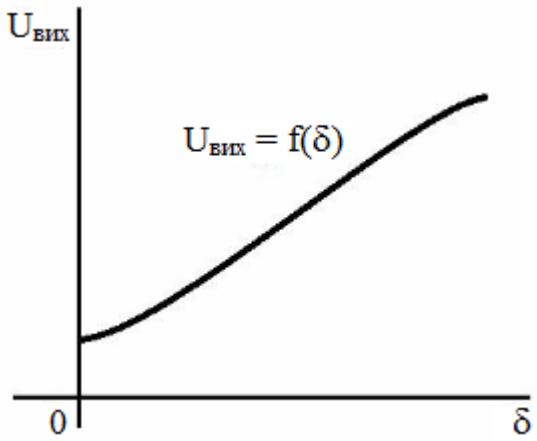


Рисунок 1.3 – Характеристика індуктивного перетворювача

Іншим поширеним видом індукційних перетворювачів є ферозонди – фероіндукційні датчики. Принцип дії фероіндукційних датчиків полягає у використанні зміни магнітного стану феромагнетика, намагнічуваного змінним магнітним полем збудження, коли на це поле накладається стале магнітне поле, індукція якого вимірюється. Існує кілька видів ферозондів, які відрізняються між собою способом збудження і просторовою орієнтацією магнітних полів (ферозонди з поздовжнім і поперечним збудженням), формою феромагнітного осердя (стрижневі, кільцеві, трубчасті), використанням основної чи другої гармоніки ЕРС [4].

Найпоширенішими зараз є двохстержневі ферозонди з поздовжнім збудженням. Такі ферозонди мають два ідентичні пермалоєві стрижні з нанесеними на них намагнічуючими обмотками $W1$, увімкненими зустрічно-послідовно (рис. 1.4). Вимірювальна обмотка $W2$ охоплює обидва стрижні. Амплітуда напруженості намагнічуючого поля ферозонда повинна бути достатньою для намагнічування стрижнів практично до насичення і значно більшою за напруженість досліджуваного поля H_x.

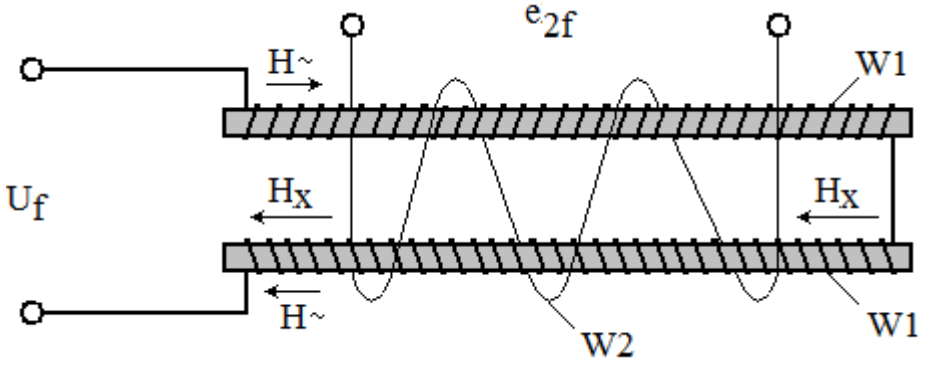


Рисунок 1.4 – Двохстержневий ферозонд з повздовжнім збудженням

При повній ідентичності двох половин перетворювача і відсутності досліджуваного поля ЕРС, наведена у вимірювальній обмотці, дорівнюватиме нулю внаслідок симетричності потоків H˜. При наявності підмагнічуючого вимірюваного поля, в напрямку якого розташовано стрижні ферозонда, симетрія потоків порушується (в одному стрижні вимірюване поле додається до намагнічуючого, а в другому – віднімається), тому у вимірювальній обмотці

$W2$ з'являється ЕРС вищих парних гармонік (непарні гармоніки віднімаються). Наведена ЕРС є мірою досліджуваного поля H_x. При зміні напрямку підмагнічуючого поля на протилежний міняється на 180º і фазі вихідної ЕРС.

1.1.2 Гальваномагнітні датчики

Гальваномагнітні ефекти спостерігаються при розміщенні провідника або напівпровідника з струмом у магнітному полі і полягають у зміні їх електричного стану або властивостей. До них відносять ефект Холла – ефект утворення ЕРС, та ефект Гаусса – ефект зміни електричного опору. Перетворювачі, побудовані на ефекті Холла називають магнітогенераторами або перетворювачами Холла, а перетворювачі які базуються на ефекті Гаусса називають магніторезисторами [5].

Ці ефекти можуть спостерігатися в будь-якому провіднику чи напівпровіднику, проте найкраще вони виявляються у матеріалах з чисто електронною або чисто дірковою провідністю (германій, кремній, вісмут арсенід та амоніт індію), з яких і виготовляють гальваномагнітні перетворювачі. Гальваномагнітні ефекти відчутніші у матеріалах з високою рухомістю носіїв струму і низькою їх концентрацією.

Якщо тонку прямокутну пластинку розмістити в магнітному полі і до вузьких її бічних граней підвести струм, то на широких гранях утвориться ЕРС і опір пластинки зросте. Ці ефекти пояснюються дією сил Лоренца на рухомі носії струму в магнітному полі. Під дією цих сил траєкторія руху носіїв струму змінюється, електрони зміщуються до бічних граней, внаслідок чого на останніх утворюються електричні потенціали. Разом з тим збільшується шлях, який проходять носії струму, що рівносильно зниженню їх рухомості й збільшенню електричного опору пластинки. Таким чином обидва ефекти утворюються одночасно, однак проявляються вони не в однаковій мірі, що істотно залежить від форми і геометричних розмірів перетворювача.

Перетворювач Холла являє собою чотириполюсник, виконаний у вигляді тонкої пластинки (рис. 1.5) [5]. Якщо через таку пластинку проходить електричний струм і одночасно діє магнітне поле, вектор якого перпендикулярний до площини пластинки, то на протилежних бічних гранях, паралельних до напрямку струму, утворюється ЕРС Холла:

$$E_{\text{хл}} = R_{\text{хл}} \frac{IB}{d}, \qquad (1.15)$$

де $R_{\text{хл}}$ – постійна Холла, яка залежить від властивостей матеріалу пластинки; I – керуючий струм перетворювача; B – магнітна індукція поля; d – товщина пластинки.

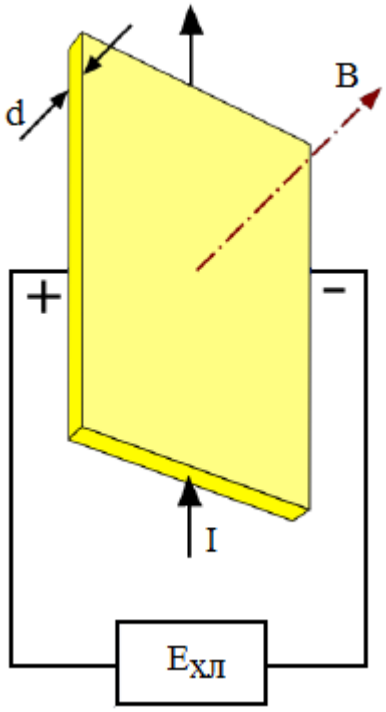


Рисунок 1.5 – Перетворювач Холла

ЕРС Холла може бути сталою або змінною. Якщо індукція B досліджуваного поля і струм I живлення постійні, то $E_{\text{хл}}$ стала. Якщо ж індукція поля постійна, а струм живлення змінний (і навпаки), то $E_{\text{хл}}$ буде змінною і тієї ж самої частоти, що й частота змінної вхідної величини (індукції чи струму).

Датчик Холла – це дуже поширений, дешевий в виробництві датчик, часто його моно зустріти в корпусі ТО-92, або у других розповсюджених корпусах (рис. 1.6).

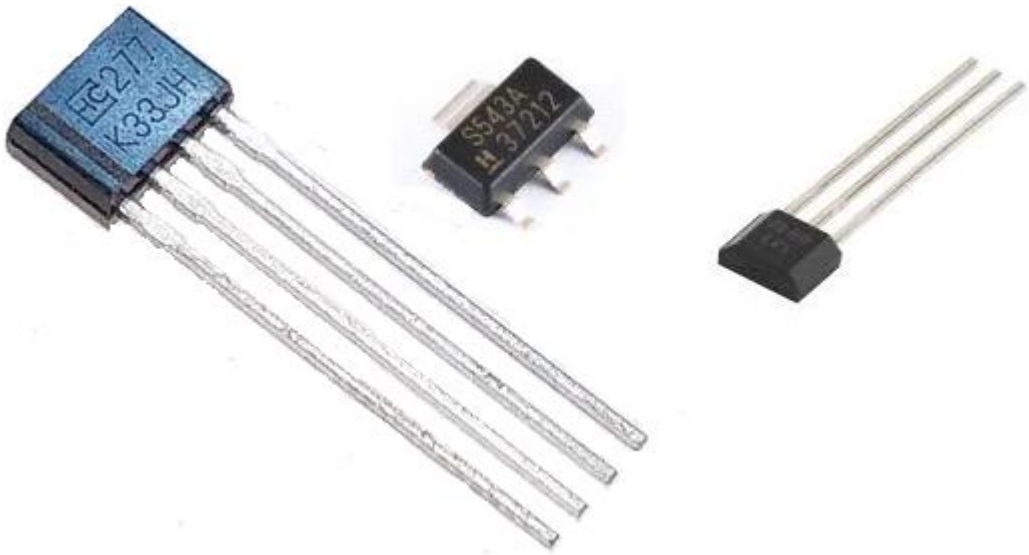


Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд датчиків Холла

Магніторезистивні перетворювачі слабких магнітних полів виготовляють з пласких напівпровідникових пластинок, з'єднаних послідовно і розділених провідниковою прокладкою (рис. 1.7) [5].

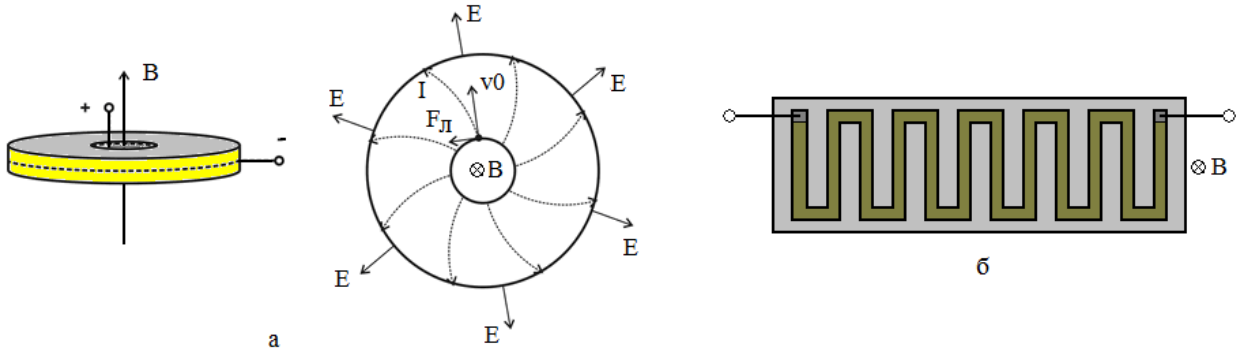


Рисунок 1.7 – Конструкції магніторезисторів

Електричне поле Холла практично відсутнє у диску Корбіно, у якому один електрод розміщують в центрі, а другий – по колу (рис. 1.6, а). У таких магніторезисторів ефект Гаусса проявляється найсильніше. За відсутності магнітного поля струм у такому зразку проходить у радіальному напрямку від центра диска до другого електрода, який знаходиться на периметрі диска. Відхилення носіїв під дією магнітного поля відбувається в напрямку, перпендикулярному до радіуса, а оскільки не існує граней, на яких може відбуватися накопичення заряду, то розділення носіїв заряду утворення електричного поля Холла в цьому зразку не відбувається.

Іншою конструкцією магніторезистора, хоча і з меншим проявленням магніторезистивного ефекту, ніж у диску Корбіно, є пластина напівпровідника з шириною, набагато більшою від її довжини (рис. 1.6, б). Для збільшення вихідного опору магніторезистори виготовляються у вигляді меандра.

Відносна зміна опору магніторезистора для слабких магнітних полів (до 0,3…0,5 Тл) пропорційна до квадрату індукції досліджуваного поля:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = A_{\text{тс}} B_0^2 \ , \qquad (1.16)$$

де $A_{\text{тс}}$ – коефіцієнт, який залежить від форми і розмірів перетворювача та фізикохімічних властивостей матеріалу (рис. 1.8).

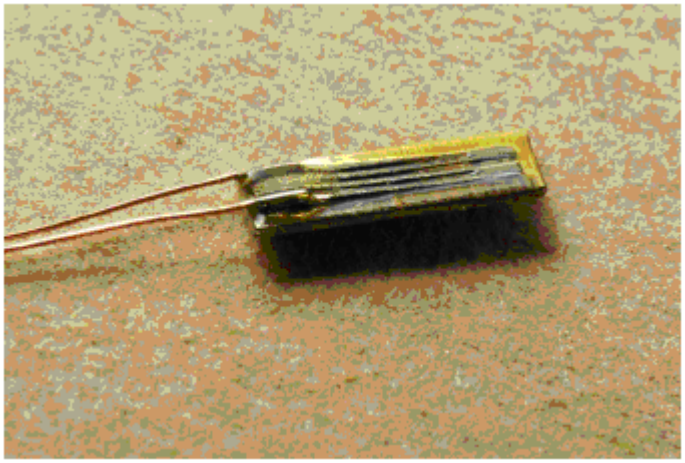


Рисунок 1.8 - Зовнішній вигляд вітчизняного магніторезистора СМ4-1.

1.2 Вимірювання магнітного потоку

Для вимірювань магнітного потоку постійного магнітного поля найчастіше використовують вимірювальні котушки – нерухомі або поворотні. При цьому вимірюють імпульс струму або імпульс напруги, що виникає при зміні повного потоку, який зчіплюється з витками вимірювальної котушки [6].

Вимірювання магнітного потоку за допомогою балістичного гальванометра ґрунтуються на вимірюванні за його допомогою імпульсу струму (рис.

1.9, *а*). Зміна потокозчеплення $\Delta\psi$ вимірювальної котушки визначається за формулою:

$$\Delta\psi = C_б R \alpha_{max} = C_\psi \alpha_{max}, \qquad (1.17)$$

де $C_б$ і R – ціна поділки і повний опір балістичного гальванометра відповідно; α_{max} – перша (максимальна) амплітуда відхилення рухомої частини гальванометра; $C_\psi = C_б R$ – ціна поділки балістичного гальванометра по потокозчепленню (знаходиться експериментально).

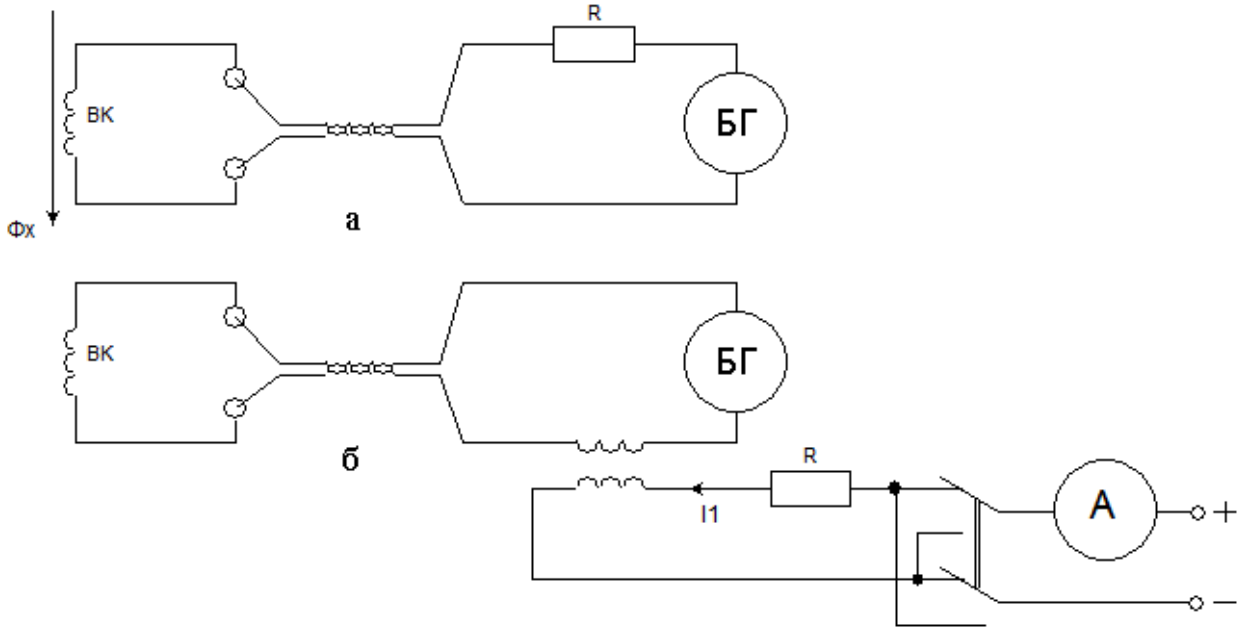


Рисунок 1.9 - Вимірювання магнітного потоку за допомогою балістичного гальванометра

Виміривши $\Delta\psi$ і знаючи число w витків котушки, можна знайти значення вимірюваного потоку:

$\Phi_x = \frac{C_\psi \alpha_{max}}{w}$ – для випадку, коли для зміни потоку від ψ_x до нуля котушка, наприклад, виноситься за межі поля;

$\Phi_x = \frac{C_\psi \alpha_{max}}{2w}$ – для випадку, коли для зміни потоку від $+\psi_x$ до $-\psi_x$ котушка, наприклад, повертається на 180˚.

Калібрування балістичного гальванометра, тобто визначення C_ψ, здійснюють за схемою, показаною на рисунку 1.9, *б*. Вимірювальна котушка під'єднується до кола гальванометра і при його калібруванні, щоб зберегти незмінним опір кола. Ціна поділу C_ψ гальванометра по потокозчепленню визначається як

$$C_\psi = M\Delta I_1 / \alpha_{\max 0}, \qquad (1.18)$$

де M – коефіцієнт взаємної індуктивності котушки; ΔI_1 – зміна струму; $\alpha_{\max 0}$ – відхилення показання гальванометра, спричинене зміною струму ΔI_1.

1.3 Вимірювання індукції магнітного поля

Вимірювання індукції постійного чи змінного магнітного поля з допомогою вимірювальних котушок (ВК) полягає у визначенні потокозчеплення ВК з досліджуваним полем. При цьому, виміривши, наприклад, за допомогою балістичного гальванометра повний потік, який зчіплюється з витками ВК, і знаючи число w витків та поперечний переріз S котушки, визначають індукцію як:

$$B_x = \frac{\psi_x}{wS} = \frac{C_\psi}{wS}\alpha_m. \qquad (1.19)$$

При вимірюванні індукції ВК розміщують у полі так, щоб вектор індукції був перпендикулярним до площини котушки [6].

Вимірювання індукції приладами з фероіндукційними ВП проводиться приладами, принципіальна схема яких подібна до показаної на рисунку 1.10. Це прилад для вимірювання індукції постійних магнітних полів. Перетворювачем магнітної індукції є перетворювач Холла, який живиться від RC-генератора змінним струмом з частотою 1000 Гц. ЕРС Холла вимірюється з допомогою тридекадного компенсатора змінного струму. Живлення компенсатора здійснюється через резистор R_0 від того самого джерела, що і живлен-

ня перетворювача Холла. Основна похибка такого приладу при вимірюванні індукції в межах 0,01…1,5 Тл становить 1,5…2%.

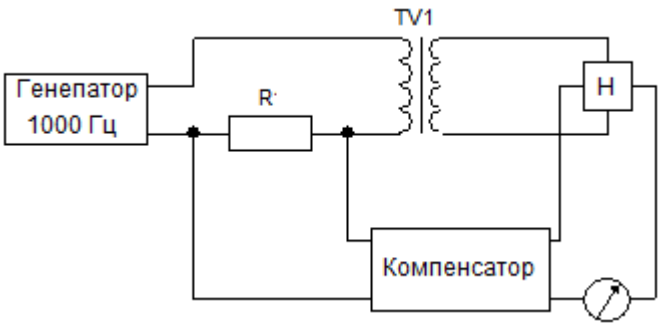


Рисунок 1.10 - Принципова схема приладу для вимірювання індукції постійних магнітних полів на базі перетворювача Холла

Вимірювання індукції за допомогою ферозонда можна здійснювати за схемою зображеною на рисунку 1.11. Обмотка збудження зонда такого приладу живиться від генератора звукової частоти через подільник частоти (1:2). ЕРС другої гармоніки, значення якої пропорційне вимірюваній індукції, відфільтровують фільтром, підсилюють, випрямляють і вимірюють вихідним приладом [7].

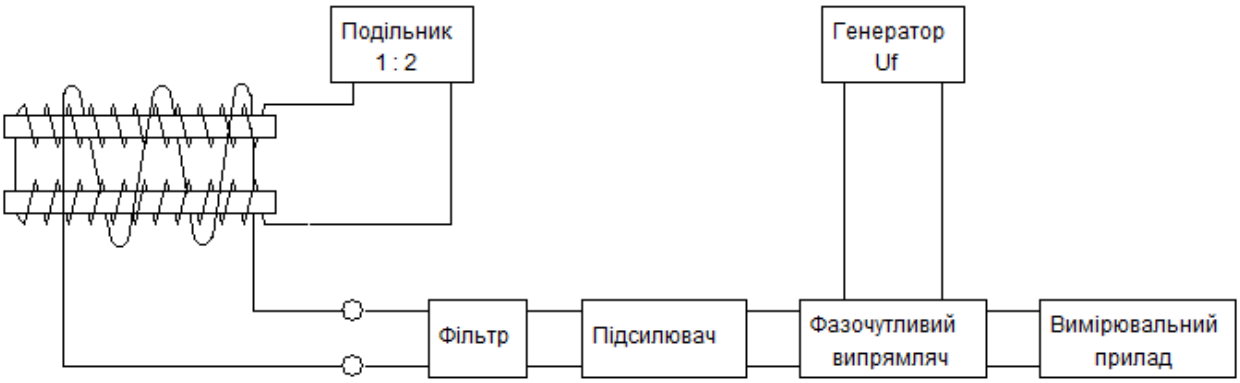


Рисунок 1.11 - Структурна схема ферозондового вимірювача магнітної індукції

Ферозондовим вимірювачем можна вимірювати індукцію в діапазоні від 0,01 до 1,6 Тл з похибкою, не більшою за 2%.

1.4 Прилади з магніто резистивними сенсорами

Ферозондові перетворювачі (ферозонди) є різновидом фероіндукційних перетворювачів [6, 8]. Чутливим елементом в фероіндукційних перетворювачах є осердя з феромагнітного матеріалу. Поширення отримали три типи фероіндукційних перетворювачів, які відрізняються способом збудження: механічним, тепловим і магнітним (рис. 1.12).

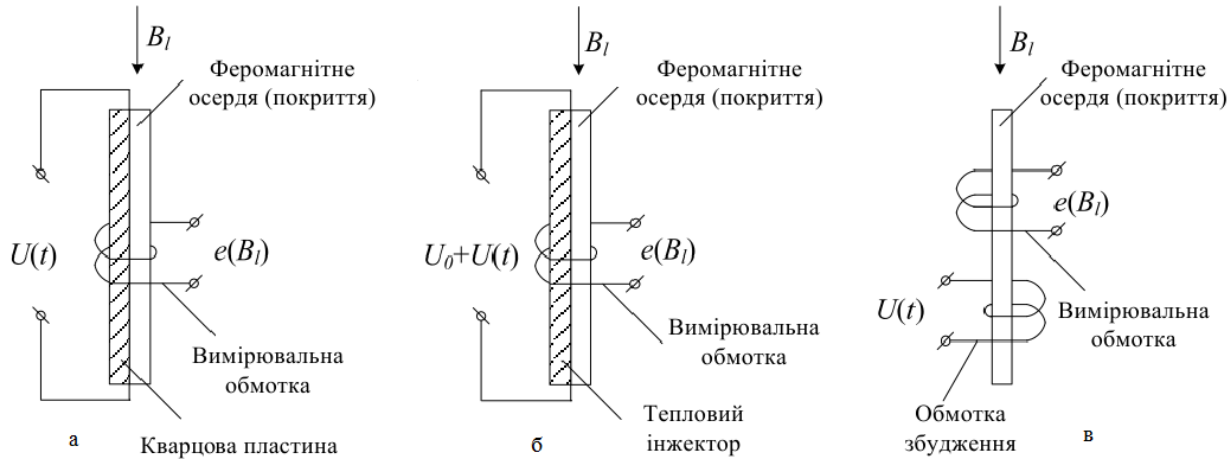


Рисунок 1.12 – Фероіндукційні перетворювачі з механічним (а), тепловим (б) і магнітним (в) збудженням

Перетворювач з механічним збудженням (рис. 1.12, а) являє собою кварцову пластинку з феромагнітним покриттям (наприклад, у вигляді тонкої пермалоєвої плівки), поверх якого розміщена вимірювальна котушка. Кварцова пластинка при впливі на неї електричної напруги резонансної частоти періодично подовжується, механічно впливаючи на плівку. В результаті, магнітна проникність плівки змінюється в часі, що призводить до виникнення електрорушійної сили (ЕРС) у вимірювальній котушці. Ця ЕРС пропорційна компонентові вектора магнітної індукції В, що збігається з поздовжньою віссю пластинки і котушки. Такий перетворювач має порівняно низьку чутливість через незначну зміну магнітної проникності.

У перетворювачі з тепловим збудженням (рис. 1.12, б) в вимірювальну котушку поміщений малоінерційний тепловий інжектор, який знаходиться в безпосередньому контакті з тонкою феромагнітною плівкою, виконаний з

матеріалу з низькою точкою Кюрі. При подачі на інжектор постійного струму, сердечник нагрівається до температури, близької до точки Кюрі. При цьому його магнітна проникність різко зростає відповідно до ефекту Гопкінсона. Після подачі на інжектор змінного струму, магнітна проникність сердечника змінюється з подвоєною частотою, сприяючи виникненню в вимірювальній котушці ЕРС, яка пропорційна вимірюваній компоненті вектора магнітної індукції B. Такий перетворювач має досить високу чутливість, але вимагає наявності матеріалу з малою тепловою інерційністю.

Перетворювач з магнітним збудженням (рис. 1.12, в) являє собою ферозонд - це прилад, чутливий до зовнішніх магнітних полів, головним чином постійних і повільно змінних, який містить один або два феромагнітних сердечника і обмотки, розподілені по їх довжині [9]. Принцип дії ферозонда заснований на зміні магнітного стану феромагнетика під впливом двох магнітних полів різних частот [10]. Найпростіший ферозонд це феромагнітний стрижень з розташованими на ньому котушкою збудження, яка живиться змінним струмом, і вимірювальною котушкою. За відсутності вимірюваного магнітного поля сердечник під дією змінного магнітного поля, яке створюється струмом в котушці збудження, перемагнічується по симетричному циклу (рис. 1.13, а).

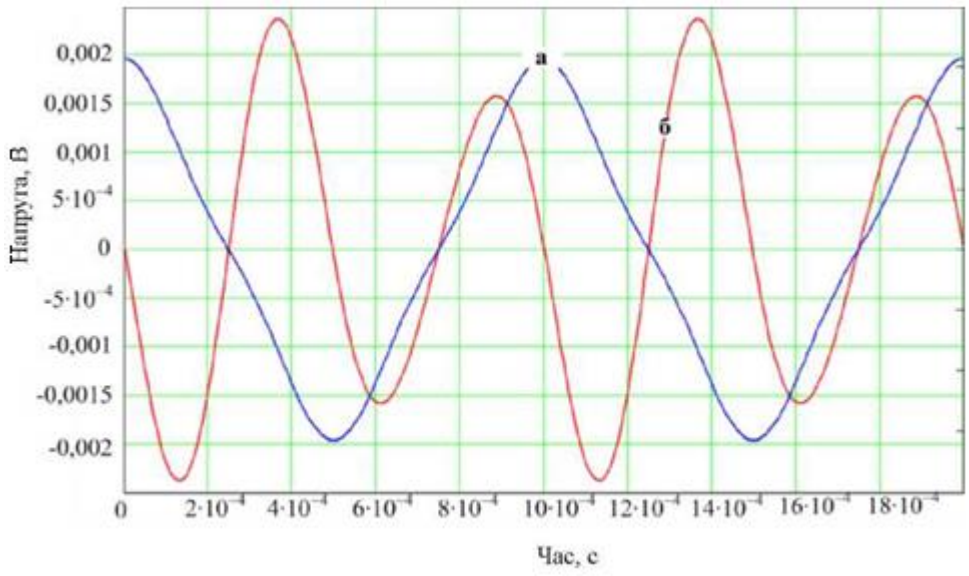


Рисунок 1.13 - Напруги на обмотці збудження (а) та у вимірювальній обмотці ферозонда (б)

На рисунку 1.14 представлена типова структурна схема магнітометра на основі ферозондового перетворювача [11].



Рисунок 1.14 – Типова структурна схема ферозондового магнітометра

Для збудження перетворювача сигнал синусоїдальної форми подається з генератора струму на обмотку збудження ферозонда, з виходу вимірювальної обмотки ферозонда інформативний сигнал підсилюється і подається на вибірковий підсилювач або синхронний детектор, налаштований на частоту другої гармоніки сигналу збудження. Виділений сигнал фільтрується фільтром нижніх частот і надходить на реєструючий прилад, якій вимірює постійну напругу і проградуйований в одиницях виміру магнітної індукції. Наявність природної діаграми направленості відрізняє ферозонди від ядерно-прецесійних і квантових сенсорів, які забезпечують більш високу чутливість, але безпосередньо вимірюють модуль вектора магнітної індукції. Вони можуть набувати діаграми спрямованості тільки за рахунок накладення допоміжного поля заздалегідь певного напряму і величини, що призводить до додаткових похибок, зниження надійності і збільшення габаритів.

На рисунку 1.15 типові сучасні ферозондові перетворювачі FGM-3 компанії Speake & Co, їх розмір становить 62×16 мм. Дані перетворювачі використовуються, наприклад, в магнітометрах для пошуку прихованих феромагнітних об'єктів під землею [12].



Рисунок 1.15 - Ферозондові перетворювачі FGM-3

Сучасні вимірювальні прилади з ферозондовими перетворювачами дозволяють вимірювати магнітну індукцію в діапазоні від 100 пТл до 1 мТл на частотах до 20 МГц, мають рівень власних шумів до 9 пТл/$\sqrt{\ }$ Гц і нелінійність функції перетворення на рівні до 0,001%. Діапазон робочих температур може досягати від мінус 180°С до 220°С [12]. До недоліків вимірювальних приладів з ферозондами можна віднести великі габарити, велику споживану потужність і тепловиділення. Для мінімізації недоліків ферозондового сенсора у вимірювальних приладах, застосовують такі технології: КМОП-сенсори; сенсори з мікросоленоїдами; прилади на печатній платі з котушками, виготовленими за допомогою доріжок і міжшарових отворів (планарні ферозонди). КМОП-ферозонди виготовляються за технологією інтегральних схем. Такий підхід веде до зниження споживаної потужності до рівня АМР сенсорів і зменшення вартості сенсора. Ферозонд, виконаний за інтегральною технологією, показаний на рисунку 1.16 [13].

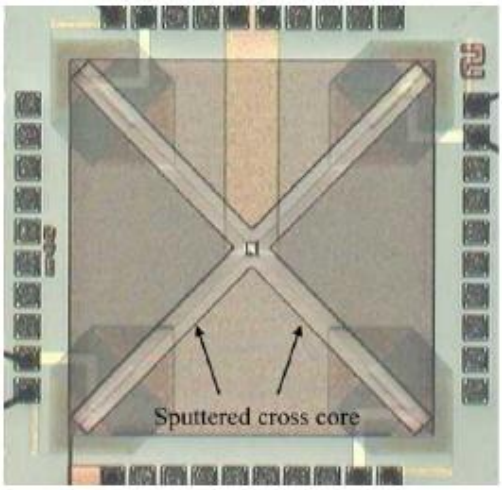


Рисунок 1.16 – КМОП-ферозонд

Використання інтегральної технології дозволяє створювати ферозондові сенсори з цифровим виходом за рахунок заміни аналогового синхронного детектора і фільтра нижніх частот на їх цифрові аналоги і використання аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Сенсори з мікросоленоїдами виготовляються за технологією мікроелектромеханічних систем (МЕМС) з використанням ультрафіолетової фотолітографії для створення котушок і електроосадження для створення осердя. На рисунку 1.17 представлений МЕМС-ферозонд [13].

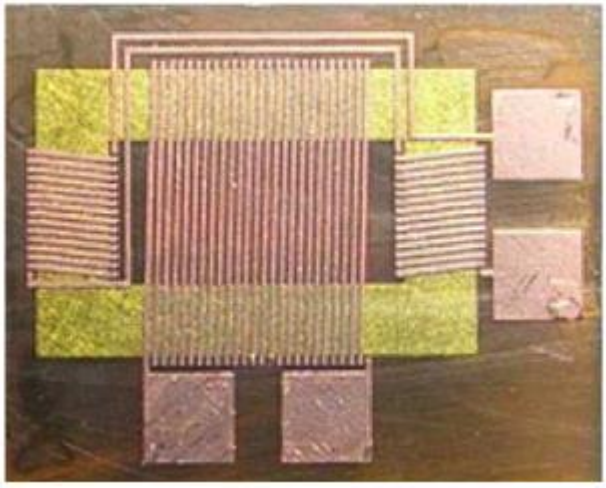


Рисунок 1.17 - МЕМС-ферозонд

На рисунку 1.18 показаний зовнішній вигляд прототипу планарного ферозонду [13].

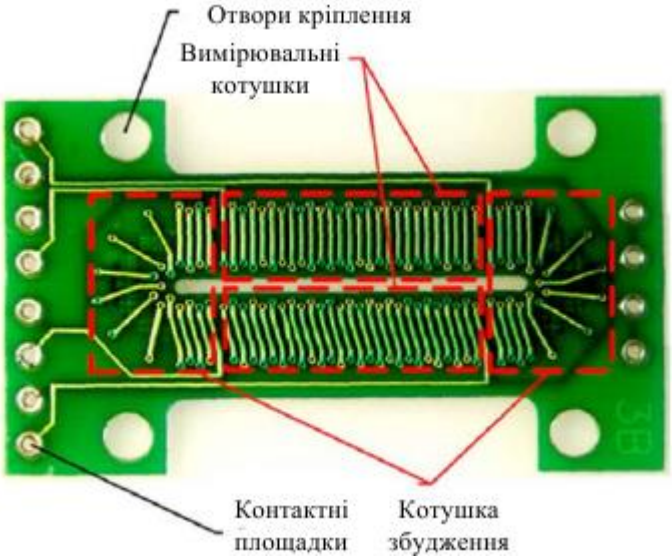


Рисунок 1.18 – Планарний ферозонд

Даний планарний феррозонд має наступні характеристики: коефіцієнт перетворення 241 В/Тл, рівень власних шумів 0,71 нТл/$\sqrt{\ }$ Гц і нелінійністю перетворення 0,17% в діапазоні ±100 мкТл, споживана потужність менше 5 мВт. Котушка збудження містить 30 витків і має опір 0,86 Ом, вимірювальна котушка складається з 54 витків і має опір 1,28 Ом. Роздільна здатність близько 100 нТл. У порівнянні з іншими технологіями (намотувальні, інтегральні схеми, і МЕМС) технологія печатних плат дозволяє створювати мініатюрні сенсори потрібної топології високої якості. Вимірювальні прилади з планарними ферозондами мають меншу чутливість в порівнянні з приладами з традиційними намотувальними ферозондовими перетворювачами, але мають набагато менші енергоспоживання і тепловиділення, являються мініатюрними, більш технологічні і прості у виготовленні.

1.5 Прилади з напівпровідниковими сенсорами

Одним із найпоширеніших напівпровідникових перетворювачів магнітного поля, який використовується у вимірювальних приладах, є елемент Холла (ЕХ), який являє собою пластину з напівпровідникового матеріалу, з чотирьох сторін якої розташовані контакти. Конструктивно перетворювачі Холла можуть бути виконані як у вигляді напівпровідникових структур, так і у вигляді дискретних елементів, розташованих в кристалі напівпровідникового матеріалу (рис. 1.19), в тому числі і разом з електронною схемою обробки сигналу ЕХ [14].

Польовий елемент Холла відрізняється від звичайного тим, що у звичайному ЕХ носії заряду забезпечуються самим матеріалом, а у польовому вони генеруються завдяки поверхневому ефекту поля. Напруга Холла в польовому елементі значно залежить від місця розташування холлівських контактів. Це пояснюється тим, що поле Холла при зменшенні концентрації носіїв заряду збільшується.

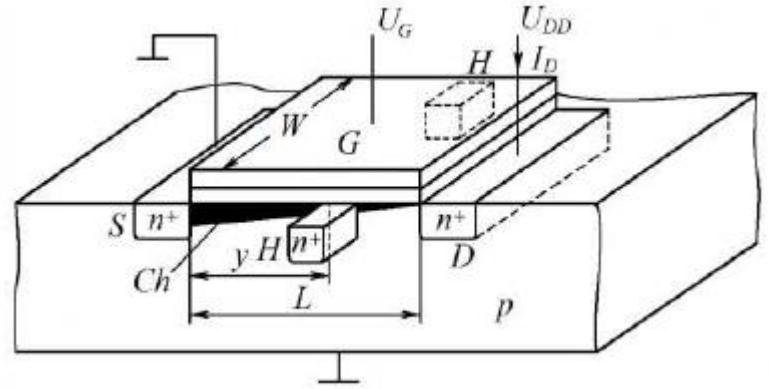


Рисунок 1.19 – Принципова структура польового елементу Холла

Наступним напівпровідниковим сенсором вимірювальних приладів є магнітотранзистор (МТ) - це транзистор, структура та параметри якого оптимізовані для отримання магнітної чутливості їх колекторних струмів. Дія магнітного поля на звичайні біполярні транзистори виявляється у викривленні траєкторії інжектованих із емітера носіїв заряду, що приводить до збільшення ефективної довжини бази та відхилення частини носіїв від колектора [14]. Роль останнього ефекту збільшується зі зменшенням ширини емітера та колектора, що забезпечує збільшення магніточутливості.

Двохколекторні магнітотранзистори (ДКМТ) характеризуються лінійною залежністю вихідного сигналу від індукції магнітного поля в широкому діапазоні значень магнітної індукції, чутливістю до напряму магнітного поля і високою чутливістю, оскільки ДКМТ. При однакових робочих струмах, чутливість двохколекторних магнітотранзисторів на два-три порядки вища ніж чутливість сенсорів Холла. Висока чутливість і лінійність характеристики при малих магнітних полях дозволяють використовувати магнітотранзистори як сенсори слабких магнітних полів (відтворюючі магнітних голівок, електронні компаси та ін.). При дії сильних магнітних полів чутливість зменшується за рахунок того, що всі носії вже перерозподілені. Біполярні магнітотранзистори мають великі значення керуючих струмів, високий рівень шумів [13].

Ще одним із напівпровідникових вимірювальних приладів є магніточутливі польові транзистори (МПТ). Топологія двохстокового магніточутливо-

го польового транзистора зображена на рисунку 1.20 [14]. Транзистор має два стоки, D1 та D2 , які розташовані один біля одного та розділені ізолятором, тому струм витоку S розподіляється між обома стоками рівномірно. При дії зовнішнього магнітного поля перпендикулярно до поверхні транзистора носії заряду під дією сили Лоренца відхиляються в бік одного зі стоків (залежно від напрямку складової індукції BZ), внаслідок чого струм одного стоку збільшується, а іншого - зменшується.

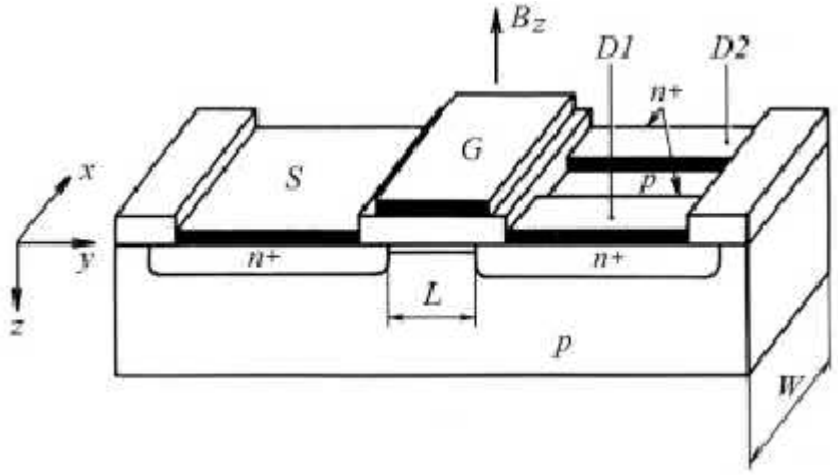


Рисунок 1.20 - Принципова структура двохстокового магнітотранзистора

Відносна чутливість багатостокових магнітних сенсорів при малих значеннях магнітної індукції визначається як похідна відносного розбалансу струмів по магнітній індукції, взята при нульовій індукції. Через низьку холлівську рухливість носіїв в області каналу чутливість виявляється низькою (2...3%/Тл). Проте можна одержати високі значення абсолютної чутливості, якщо транзистор працює в режимі насичення з підключеними до стокових елементів високоомними резисторами навантаження. У такому випадку корисний сигнал є різницею напруг між двома стоками. До основних недоліків польових магнітотранзисторів відносять температурну залежність опору каналу. Проте такі вимірювачі характеризуються також низьким рівнем шумів, низькими керуючими струмами, високою швидкодією.

Метою роботи являється розробка та дослідження параметрів магнітометрів для вимірювання магнітних полів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити пристрій вимірювання магнітних полів, заснований на гальваномагнітному ефекті;

- розробити диференціальний феромагнітний магнітометр, призначений для пошуку великих металічних предметів в умовах оперативних заходів;

- провести дослідження функціонування розроблених пристроїв на гальваномагнітному та фероіндукційному ефектах.

2 Розробка пристроїв вимірювання магнітних потоків

Магнітометри і магнітометричні пристрої знаходять широке застосування в різних галузях народного господарства і при наукових дослідженнях. Необхідність вимірювання слабких магнітних полів виникає при проведенні геофізичних і космічних досліджень, розвідці корисних копалин, вивченні і нормуванні полів розсіювання електротехнічних пристроїв, залишкової намагніченості їх елементів [15].

Існує багато різних типів магнітометрів, призначених для вимірювання напруженості, індукції, потоку та інших параметрів магнітного поля різної величини - від найслабкіших полів біологічних об’єктів до найсильніших полів надпровідникових магнітів [16]. Найширший діапазон вимірювань (понад 14 порядків величини) має магнітометр з вимірювальною котушкою, який працює на збудженні змінним магнітним полем струму у нерухомій котушці або постійним полем струму у рухомій. Цей магнітометр може вимірювати поля з індукцією, яка перевищує поріг чутливості - мінімальну вимірювану індукцію $B_{min} \sim 10^{-10}$ Тл (або напруженість $H_{min} \sim 8\ 10^{-3}$ А/м). Поля, слабкіші за це поле, можуть вимірювати лише сквіди, магнітометри з оптичною накачкою та волоконно-оптичні магнітометри.

Вимірювачі магнітного потоку різних марок і моделей, широко відомі як «Гаусметри», пропонуються на ринку за цінами, які роблять їх недоступними для багатьох розробників інформаційних систем.

В даний час магнітометри на основі датчиків Холла широко використовуються для прецизійного вимірювання індукції магнітного поля [17]. Однак при розробці витратомірів, радіоспектрометрів, дослідженні магнітних властивостей речовин тощо, потрібен вимір з відносною похибкою до 1% індукції низькочастотних (до 100 Гц) магнітних полів, амплітуда яких може змінюватися в діапазоні $5 \cdot 10^{-5}$ - 1 Тл. Така чутливість не забезпечується відомими схемотехнічними рішеннями.

2.1 Розробка портативного пристрою вимірювання магнітних полів

Структурна схема просторою вимірювання магнітних полів на гальваномагнітному ефекті представлена на рисунку 2.1.

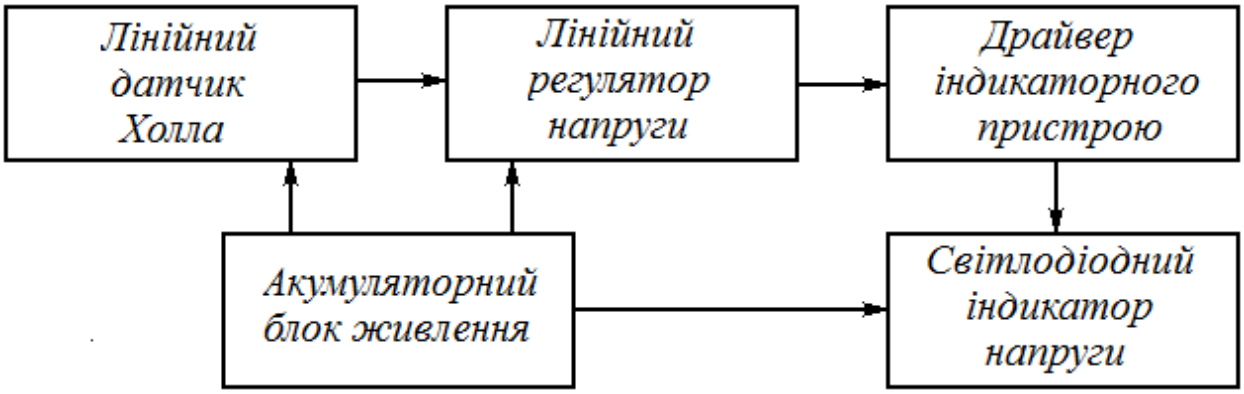


Рисунок 2.1 – Структурна схема просторою вимірювання магнітних полів

2.1.1 Зонд виміру магнітного поля з датчиком Холла

Активний елемент зонда складається з лінійного датчика Холла А1323 фірми Allegro MicroSystems, який видає напругу пропорційну магнітному полю. Датчик Холла працює від джерела живлення 4,5 … 5,5 В і в стані спокою (при нульовому магнітному полі) видає на виході напругу, яка становить 50% від напруги живлення.

Маючі номінальну чутливість 2,5 мВ/Гс, мікросхема А1323 при напрузі живлення 4,5 В забезпечує повний діапазон вимірів сили магнітного поля 1800 Гс:

$$4{,}5 \text{ В} / 2{,}5 \text{ мВ/Гс} = 1800 \text{ Гс}.$$

Вплив магнітного поля, яке зорієнтоване до S від поверхні датчика, збільшує вихідну напругу датчика пропорційно прикладеному полю, перпендикулярному лицьовій стороні датчика, а магнітне поле, яке направлено до N від тієї ж поверхні, викликає пропорційне зменшення вихідної напруги. При напрузі живлення 4,5 В вихідна напруга датчика, яка в стані спокою дорів-

нює 2,25 В, може збільшуватися до 4,5 В при полі силою 900 Гс, яке направлене на південь, або зменшуватися до 0 В при полі силою 900 Гс з направленням на північ. Хоча датчик може визначати інтенсивність та полярність постійного магнітного поля, його смуга пропускання для змінного поля досягає 30 кГц.

Зонд розташовано на печатній платі (рис. 2.2), довжина якої оптимальна для розташування в зручному пластиковому корпусі.

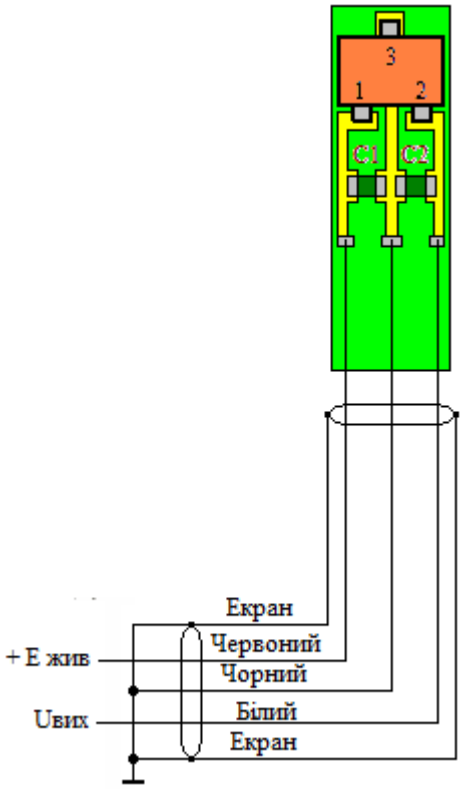


Рисунок 2.2 – Зонд для виміру магнітного поля

2.1.2 Лінійний регулятор напруги

Лінійний регулятор напруги базується на операційному підсилювачі (рис. 2.3).

Схема працює, порівнюючи вихідну напругу регулятора та опорну напругу (опорну напругу на основі кремнієвого переходу з виходом ~1.25 В) усередині зворотного зв'язку.

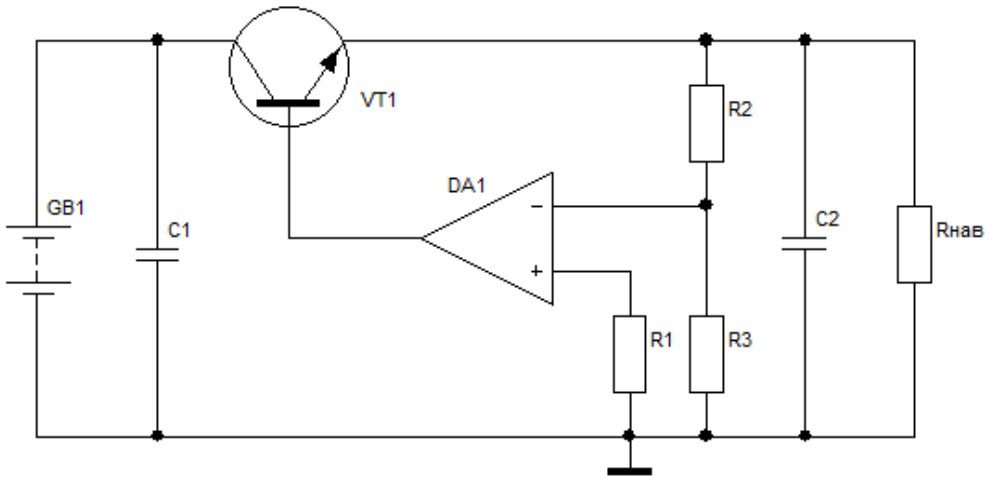


Рисунок 2.3 - Лінійний регулятор напруги

Для пристроїв з низьким споживанням потужності використовують два типи регуляторів напруги: лінійний регулятор напруги (іноді званий регулятором з низьким падінням напруги або LDO) або імпульсний регулятор. Можна комбінувати їх на різних ділянках шини живлення, але все ж таки залишається питання вибору між використанням LDO і імпульсних регуляторів, а також відмінності між лінійними регуляторами та імпульсними регуляторами.

Регулятори напруги з низьким падінням напруги мають деякий "зазор", також відомий як падіння напруги, яке є невеликою напругою вище номінального вихідного, що визначає, чи буде компонент включатися. Доки $U_{вх}$ - $U_{вих} > U_{оп}$, схема буде видавати номінальну вихідну напругу. Дільник напруги використовується для зниження вхідної напруги, тому операційний підсилювач може порівняти його з опорною напругою $U_{оп}$. Схема LDO будується на мікросхемі 7530, а не на дискретних компонентах. Тому не потрібно налаштування схеми операційного підсилювача та вибір R1/R2; ці елементи інтегровані у мікросхему.

C1 і C2 – конденсатори, які фільтрують напруги на вході і виході відповідно. Операційний підсилювач встановлює вихідну напругу регулятора на бажаний рівень, доки вхідна напруга вище необхідної для регулятора.

У якості лінійного регулятора напруги використаємо мікросхему 7530 (рис. 2.4).

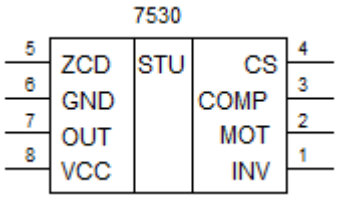


Рисунок 2.4 – Лінійний стабілізатор напруги

2.1.3 Драйвер індикаторного пристрою

Для індикації напруги, для виміру сили магнітного поля, необхідно використати семисегментні індикатори.

Для відображення необхідної інформації використовують перетворювачі кодів. Перетворювачі кодів можуть бути ваговими і не ваговими. Вагові ПК перетворюють інформацію з однієї системи числення в іншу. Основне призначення не вагових – перетворення інформації для її подальшого відображення. Інтегральні мікросхеми перетворювачів кодів випускаються лише для найбільш поширених операцій, серед яких:

- перетворювачі двійкового коду в код управління сегментними індикаторами;
- перетворювачі двійкового або двійково-десяткового коду в код управління шкальними або матричними індикаторами.

Перетворювач двійкового коду в код управління семисегментними світлодіодними індикаторами повинен мати чотири входи, оскільки для кодування десяткових цифр від 0 до 9 вистачає чотири двійкових розряди, і сім виходів, поодинці на кожен сегмент (рис. 2.5) [18].

З таблиці функціонування перетворювача коду (табл. 2.1) видно, що, наприклад, в цифрі 0 повинні світитися всі сегменти за винятком сегменту g, в цифрі 1 світяться лише два сегменти b і c і т. д. Вагові коефіцієнти двійкових розрядів дорівнюють $(8421)_2$. Нулі проставлені для тих цифр, в яких сегмент не світиться [18].

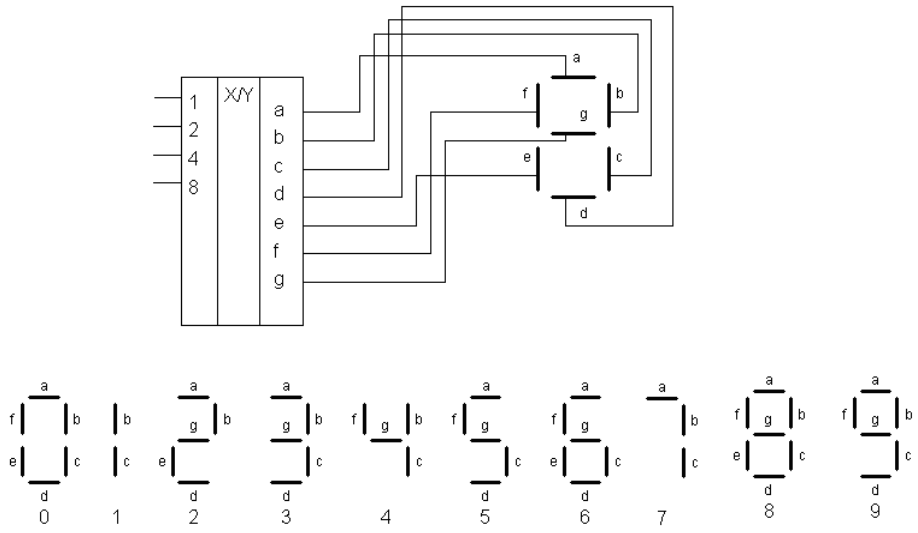


Рисунок 2.5 – Не ваговий перетворювач двійкового коду

Таблиця 2.1 - Таблиця функціонування перетворювача двійкового коду в код управління семисегментними світлодіодними індикаторами

DEC цифра	Входи				Виходи						
	A	B	C	D	a	b	c	d	e	f	g
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
4	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
5	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
7	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1

Мікросхема 7447PC являє собою перетворювач логічних сигналів з двійкового коду 8-4-2-1 в семисегментний (рис. 2.6). Мікросхема має виходи з відкритим колектором і підвищеною навантаженою здатністю. Призначення виводів представлено в таблиці 2.2. Схема знаходиться в працездатному стані, коли на виводі управління BI/RBO присутній високий рівень [18].

Для перевірки роботоздатності мікросхеми на вивід LT подається низький рівень сигналу. При цьому на усіх виходах з’являється логічний 0.

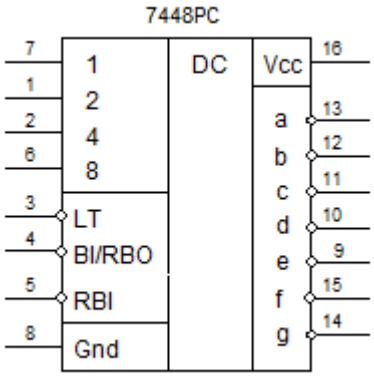


Рисунок 2.6 – Мікросхема 7447РС

Таблиця 2.2 – Призначення виводів мікросхеми 7447РС

№ вивода	Призначення
1	Вхід з ваговим значенням розряду (2)
2	Вхід з ваговим значенням розряду (4)
3	Вхід контролю індикатора (LT)
4	Вихід сигналу схеми послідовного погашення (BI/RBO)
5	Вхід сигналу схеми послідовного погашення (RBI)
6	Вхід з ваговим значенням розряду (8)
7	Вхід з ваговим значенням розряду (1)
8	Загальний (Gnd)
9	Вихід сегменту (e)
10	Вихід сегменту (d)
11	Вихід сегменту (c)
12	Вихід сегменту (b)
13	Вихід сегменту (a)
14	Вихід сегменту (g)
15	Вихід сегменту (f)
16	Напруга живлення (+Vcc)

Схема електрична принципова перетворювача двійкового коду чисел в коди семисегментного індикатора на мікросхемі 7447РС являє собою перетворювач логічних сигналів з двійкового коду 8-4-2-1 в код семисегментного індикатора з загальним анодом (рис. 2.7).

Для динамічної індикації можливо використати спеціальний драйвер (рис. 2.8), який дозволить одночасно спостерігати значення напруги, для переводу її у силу магнітного поля.

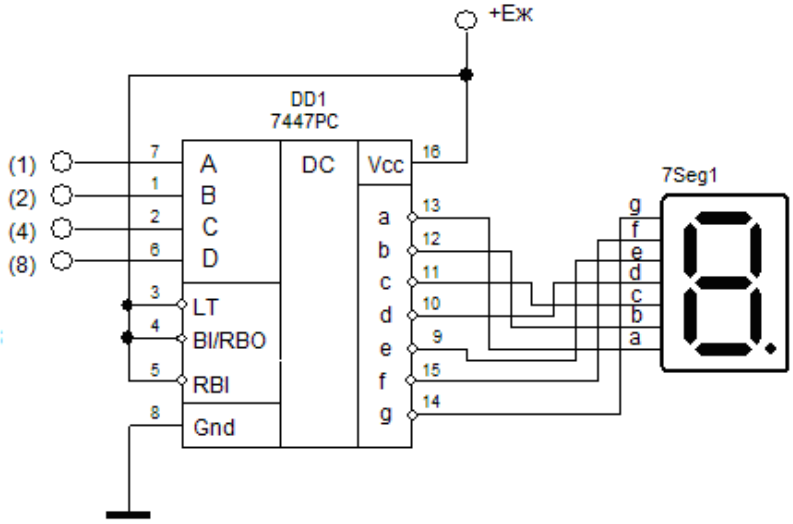


Рисунок 2.7 – Схема перетворення двійкового коду 8-4-2-1 в код семисегментного індикатора на мікросхемі 7447РС

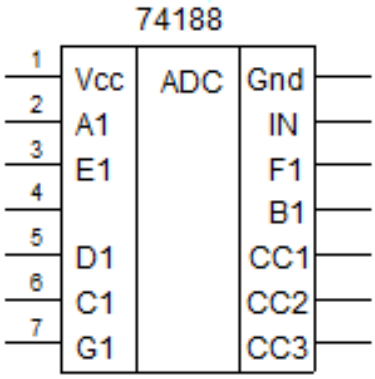


Рисунок 2.8 – Драйвер індикаторного пристрою

Оберемо світлодіодний індикатор напруги 3631А, який повністю відповідає спряженню з драйвером 74188 (рис. 2.9).

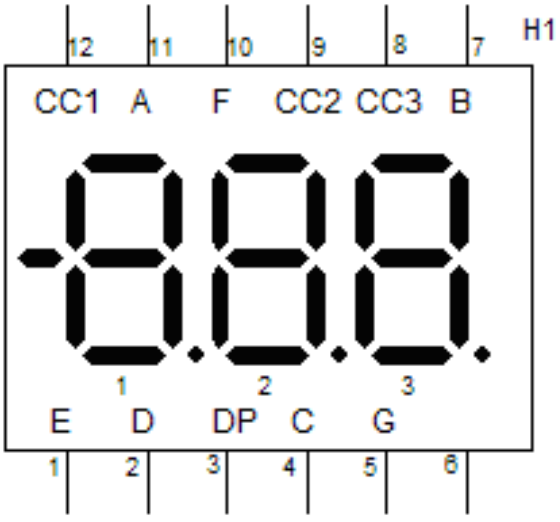


Рисунок 2.9 – Світлодіодний індикатор напруги

2.1.4 Загальна схема портативного пристрою вимірювання магнітних полів

Схема пристрою вимірювання магнітних полів живиться від акумуляторних батарей і заряджається від стандартного зарядного пристрою DC: U = 5 В, I = 2 А, через вмонтований USB роз'єм.

Схема акумуляторного блока живлення побудована на основі мікросхеми LTC4054, яка є контролером заряджання акумулятора. На ній виконано контролер зарядки (рис. 2.10).

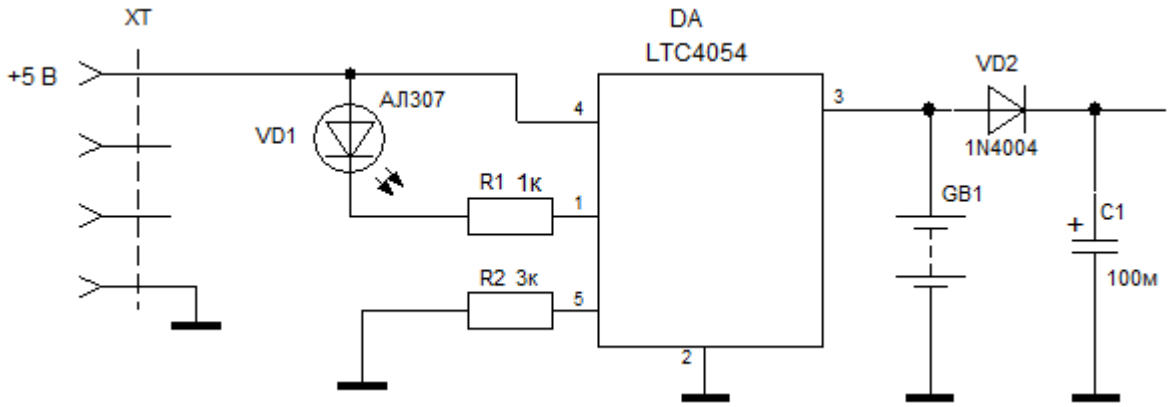


Рисунок 2.10 – Акумуляторний блок живлення пристрою вимірювання магнітних полів

Світлодіод VD1 служить індикатором заряджання. Поки виконується зарядка, він світиться, коли акумулятор заряджений - гасне. Підбираючи опір резистора R2, можна змінювати струм зарядки.

Загальна схема портативного пристрою вимірювання магнітних полів представлена на рисунку 2.11.

Для проведення дослідження максимальної чутливості виміру магнітного поля, необхідно розташувати поверхню датчика перпендикулярно полю.

Якщо направлення поля невідоме, зонд обертається навкруги продовжної вісі, для пошуку положення з максимальною вихідною напругою.

Щоб розрахувати щільність магнітного потоку треба розділити виміряну вихідну напругу датчика на його чутливість (2,5 мВ/Гс). Якщо індикатор показує -1,98 В, магнітне поле зорієнтовано на північ і дорівнює 792 Гс.

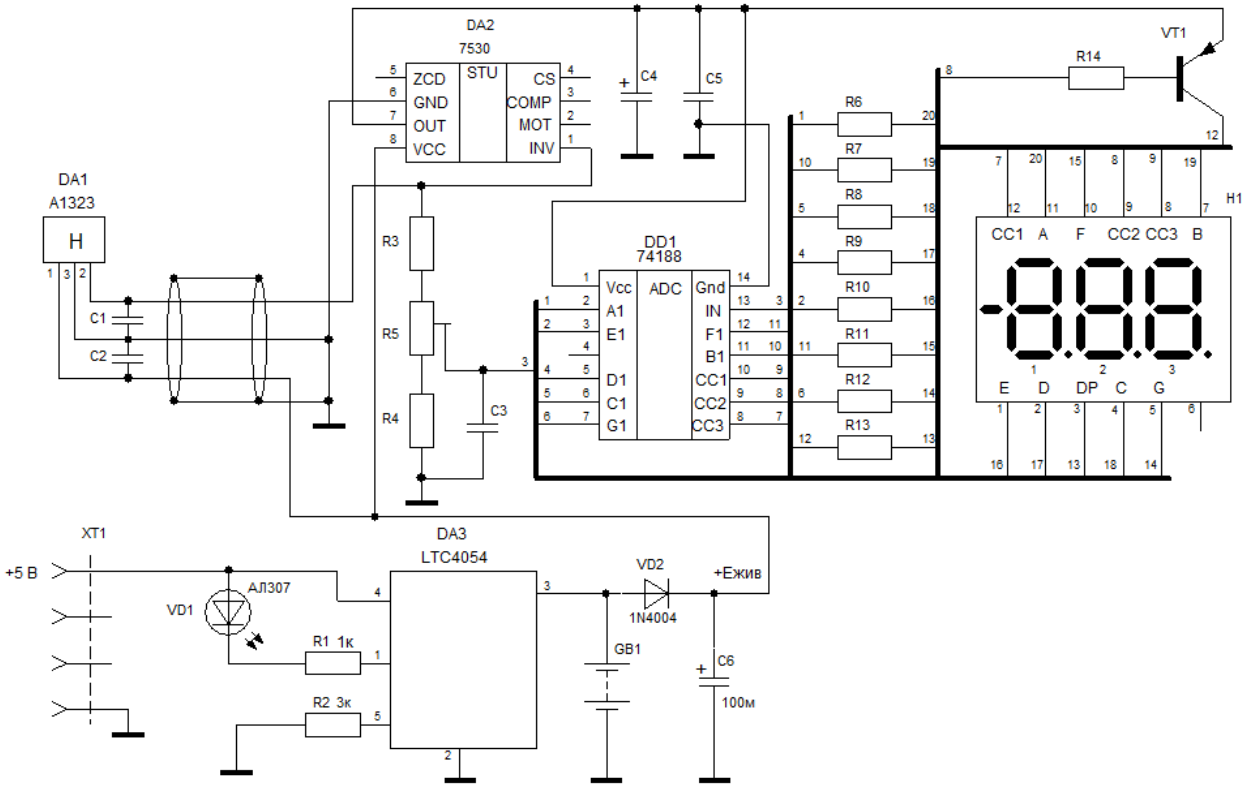


Рисунок 2.11 – Загальна схема портативного пристрою вимірювання магнітних полів

При вимірюванні змінного магнітного поля використовується режим відображення дійсного середньоквадратичного значення для відображення змінної вихідної напруги датчика.

Індукцію магнітного поля в повітрі можна розрахувати за допомогою формули:

$$B = \mu_0 \cdot H,$$

де Н – магнітна індукція, Тл; Н – напруженість магнітного поля, А/м; μ_0 - магнітна проникність вакууму $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Для підвищення дозволу вимірів можна використати наступні коефіцієнти: 10,000 Гс = 1 Тл; 1 Гс = 79,6 А/м; 1,2560 мТл = 1 кА/м.

Вимірювачі магнітного поля знаходять використання при пошуку несправностей датчиків лінійного переміщення при виготовлені двигунів постійного струму, дослідження низькочастотних магнітних перешкод, при проєктуванні та виготовлені електромагнітних екранів і т. п.

2.2 Розробка диференціального феромагнітного магнітометра

Диференціальний магнітометр призначений для пошуку великих залізних предметів. Таким приладом можна здійснити пошук танків, кораблів та інших зразків військової техніки, які неглибоко затонули.

Спотворення магнітного поля Землі далеко від мішені мало, і воно оцінюється по різниці сигналів від двох рознесених на деяку відстань датчиків. Тому прилад названо диференціальним. Кожен датчик вимірює сигнал, пропорційний напруженості магнітного поля. Найбільшого поширення набули феромагнітні датчики.

Котушка збуджується змінним синусоїдальним сигналом несучої частоти. Як видно з рисунку 2.29, зміщення кривої намагнічування феромагнітного сердечника котушки зовнішнім магнітним полем Землі призводить до того, що індукція поля і пов'язана з ним напруга на котушці починають спотворюватися несиметричним чином.

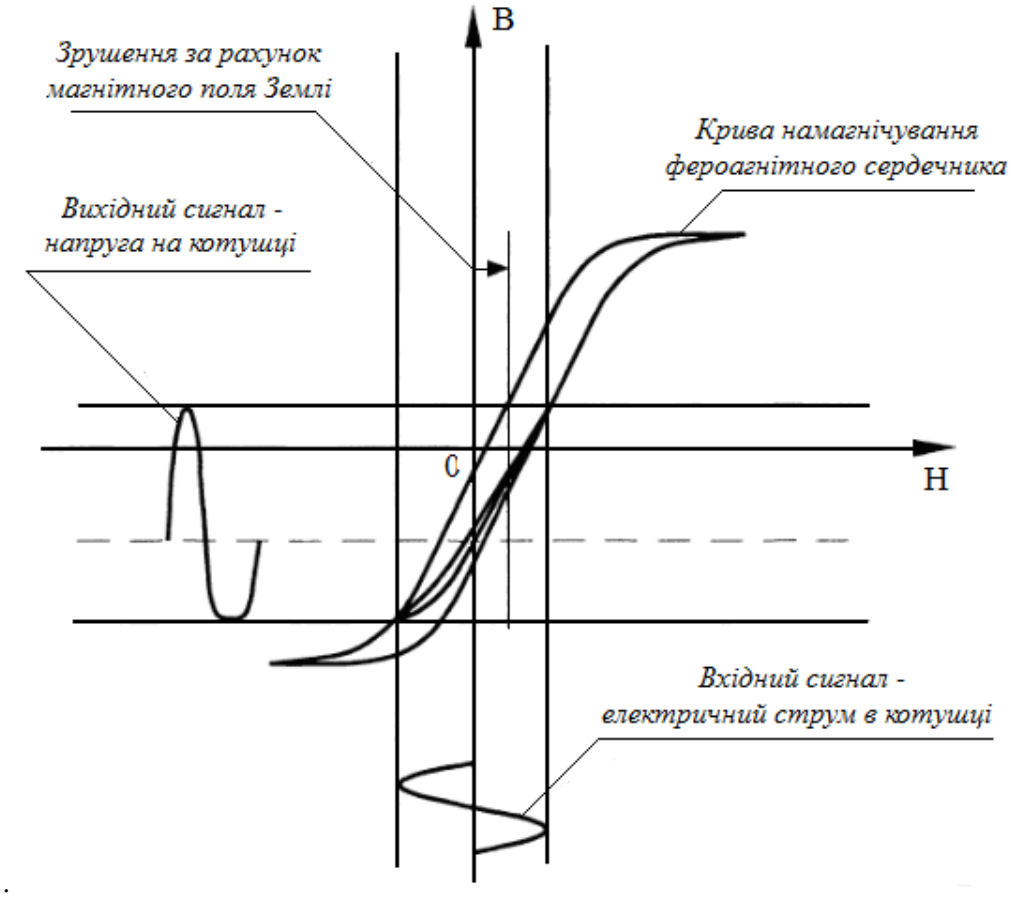


Рисунок 2.29. Крива намагнічування

Напруга датчика при синусоїдальному струмі несучої частоти відрізнятиметься від синусоїди більш "приплюснутими" верхівками напівхвиль. І ці спотворення будуть несиметричні. З точки зору спектрального аналізу це означає появу в спектрі вихідної напруги котушки парних гармонік, амплітуда яких пропорційна напруженості магнітного поля зміщення (поля Землі). Ці парні гармоніки необхідно визначити диференціальним феромагнітним магнітометром.

Розглянемо конструкцію ускладненого варіанта феромагнітного датчика. Він складається з двох сердечників та трьох котушок (рис. 2.0). Така конструкція являє собою диференціальний датчик.

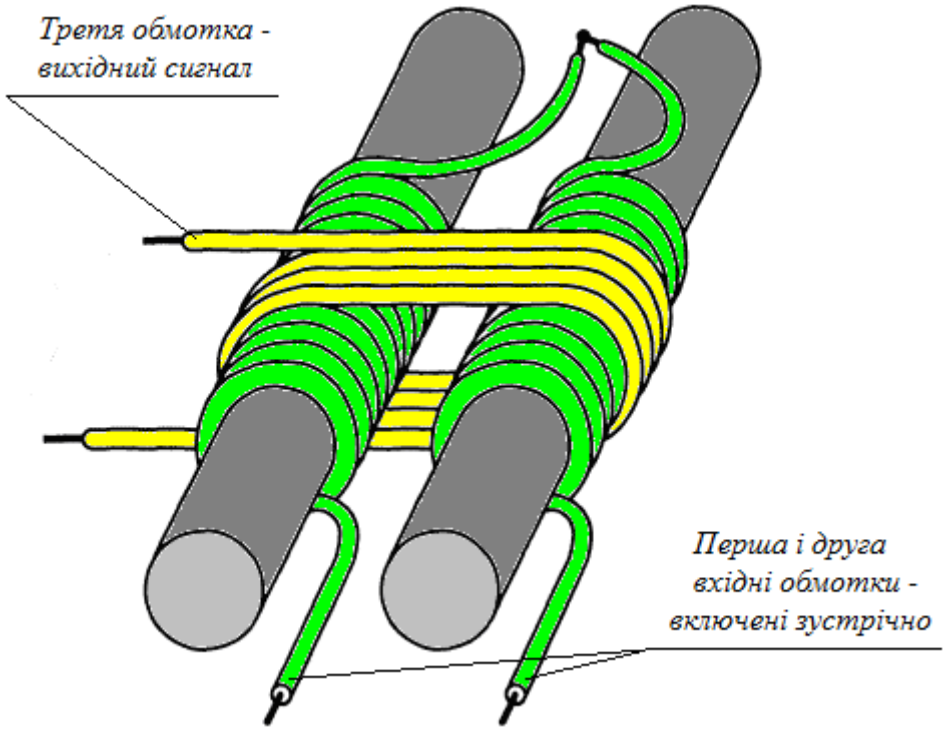


Рисунок 2.30 – Диференціальний феромагнітний датчик

Конструкція складається з двох ідентичних феромагнітних сердечників з ідентичними котушками, розташованими паралельно поруч один з одною. По відношенню до збуджуючого електричного сигналу опорної частоти включені зустрічно. Третя котушка являє собою обмотку, намотану поверх двох складених разом перших двох котушок з серцевинами. За відсутності зовнішнього зміщуючого магнітного поля електричні сигнали першої та дру-

гої обмоток симетричні і в ідеальному випадку діють так, що вихідний сигнал у третій обмотці відсутній, оскільки магнітні потоки через неї повністю компенсуються.

За наявності зовнішнього зміщуючого магнітного поля картина змінюється. То один, то інший сердечник на піку відповідної напівхвилі переходить в насичення глибше, ніж зазвичай внаслідок додаткового впливу магнітного поля Землі. В результаті на виході третьої обмотки з'являється сигнал неузгодженості подвоєної частоти. Сигнали основної гармоніки в ідеалі повністю компенсуються.

Зручність розглянутого датчика полягає в тому, що його котушки можна включити для підвищення чутливості в коливальні контури. Першу і другу - коливальний контур, налаштований на несучу частоту. Третю - коливальний контур, налаштований на другу гармоніку.

Обраний датчик має яскраво виражену діаграму спрямованості. Його вихідний сигнал максимальний при розташуванні поздовжньої вісі датчика вздовж силових ліній зовнішнього магнітного постійного поля. Коли поздовжня вісь перпендикулярна силовим лініям - вихідний сигнал дорівнює нулю.

Датчик розглянутого типу, особливо разом із синхронним детектором, може успішно працювати як електронний компас. Його вихідний сигнал після випрямлення пропорційний проекції вектора напруженості магнітного поля Землі на вісь датчика. Синхронне детектування дозволяє дізнатися і знак цієї проекції. Але навіть і без знака - зорієнтувавши датчик за мінімумом сигналу, отримаємо напрямок на захід або на схід. Зорієнтувавши датчик по максимуму отримаємо напрямок магнітної силової лінії поля Землі. У середніх широтах (наприклад, у Запоріжжі) вона йде похило і "встромляється" в землю у напрямку на північ. По кутку магнітного відмінювання можна оцінити географічну широту місцевості.

Диференціальні феромагнітні магнітометри мають свої переваги і недоліки. До переваг відноситься простота приладу. До недоліків відноситься трудомісткість виготовлення датчиків - потрібний абсолютно точний збіг кі-

лькості витків відповідних обмоток. Похибка один-два витка може сильно знизити можливу чутливість. Іншим недоліком є неможливість повної компенсації поля Землі відніманням сигналів від двох рознесених датчиків. Це призводить до помилкових сигналів при поворотах датчика навколо вісі, перпендикулярної поздовжньої.

2.2.1 Структурна схема диференціального феромагнітного магнітометра

Структурна схема диференціального феромагнітного магнітометра представлена на рисунку 2.22.

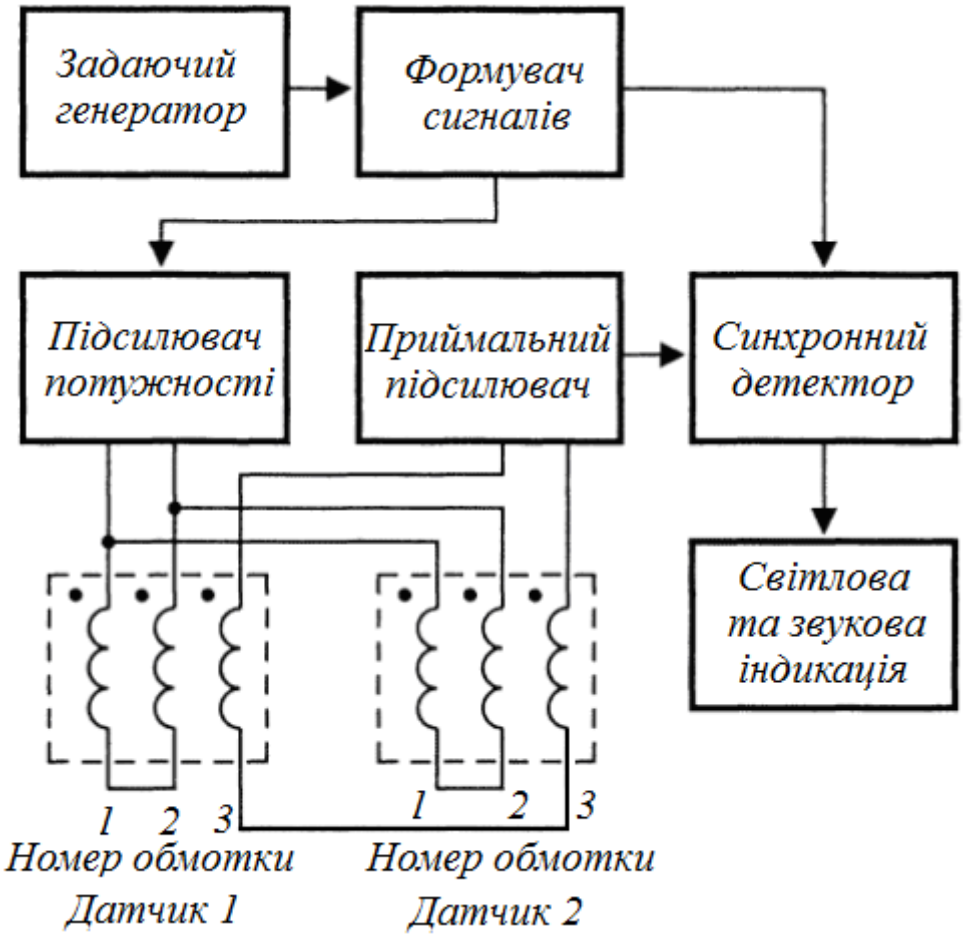


Рисунок 2.31 – Структурна схема диференціального феромагнітного магнітометра

Стабілізований кварцом задаючий генератор, видає синхроімпульси тактової частоти для формувача сигналів.

На одному його виході присутній меандр першої гармоніки, який поступає на підсилювач потужності, що збуджує випромінюючі котушки датчиків 1 і 2. Інший вихід формує меандр опорної подвійної тактової частоти зі зсувом 90° для синхронного детектора. Диференціальний сигнал з вихідних (третіх) обмоток датчиків посилюється в приймальному підсилювачі і випрямляється синхронним детектором. Постійний випрямлений сигнал можна реєструвати мікроамперметром пристроями світлової га звукової індикації.

2.2.2 Моделювання схеми задаючого генератора

Цифрові генератори – це пристрої, які створюють електричні сигнали, використовуючи цифрові методи. Вони можуть бути як електронними (генерують сигнали різної форми, такі як синусоїдальні, квадратні, трикутні), так і інверторними генераторами, які перетворюють постійний струм на змінний з стабільною синусоїдою.

Задаючий генератор (рис. 2.15) зібрано на інверторах DD1-DD3 [19].

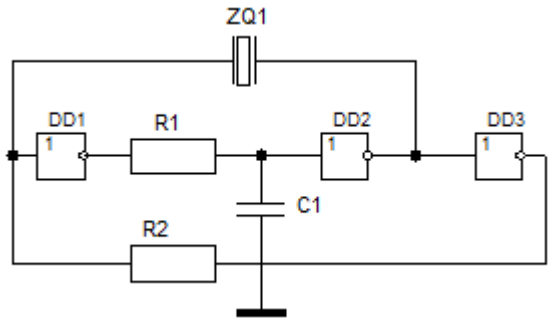


Рисунок 2.15 – Схема задаючого генератора з кварцом

Частота генератора стабілізована кварцовим резонатором ZQ1 з резонансною частотою 215Гц – 32 вГц. Коло R1C1 заважає збудженню генератора на вищих гармоніках. Резистор R2 забезпечує негативний зворотний зв’язок.

$$f = \frac{2n}{\frac{T}{4}} = \frac{409{,}6}{0{,}025c} = 16384Гц \approx 16кГц \qquad (2.4)$$

Схему задаючого генератора реалізовано на мікросхемі К561ЛН2 (рис. 2.16).

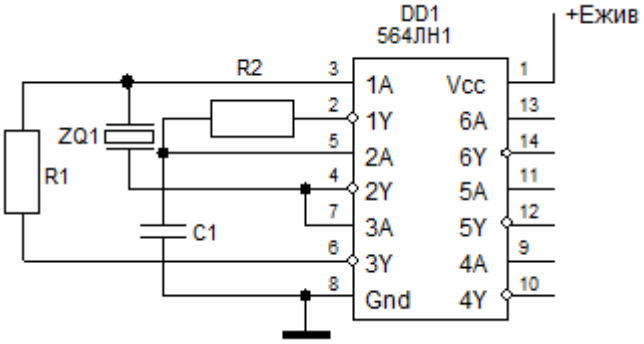


Рисунок 2.16 – Схема задаючого генератора

2.2.3 Моделювання формувача сигналів

Формувач сигналів зібрано на двійковому лічильнику на D-тригері (рис. 2.17) [18].

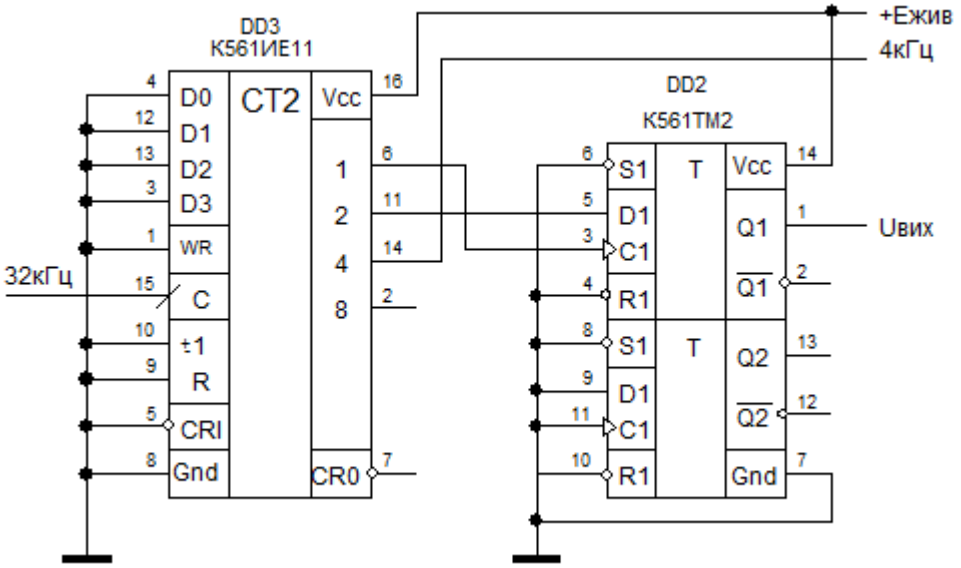


Рисунок 2.17 – Формувач сигналів

Лічильник призначений для поділення частоти на 2, 4 і 8, отримав таким чином меандри з частотами 16кГц, 8кГц і 4кГц. Несуча частота для збу-

дження випромінюючих котушок 4кГц. Сигнали з частотами 16кГц і 8кГц впливаючи на D-тригер, формують на його виході меандр подвоєний по відношенню до несучої частоти 8кГц, зрушений на 90º відносно сигналу 8кГц двійкового лічильника. Таке зрушення необхідне для нормальної роботи синхронного детектора, так як таке ж зрушення має корисний сигнал на виході датчика.

2.2.4 Моделювання підсилювача потужності

Підсилювач потужності модулюється на потужних інверторах DD1-DD1, які в протифазі розгойдують коливальний контур, який складається з послідовно паралельно включених вилучаючи котушок датчика і конденсатора (рис. 2.18).

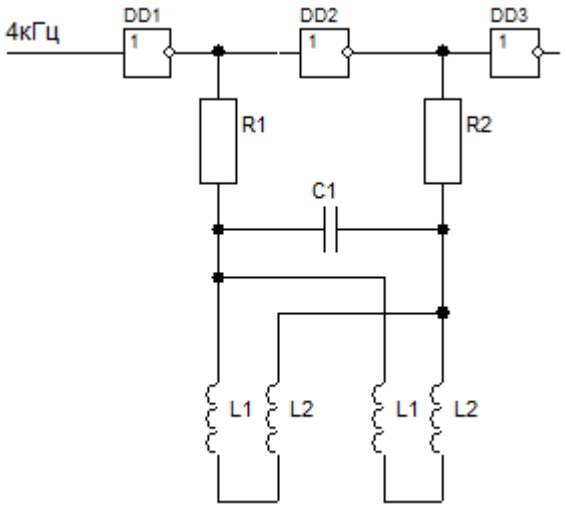


Рисунок 2.18 – Підсилювач потужності на інверторах

Елемент DD3 інвертує сигнал. Резистори R1 і R2 обмежують вихідний струм інверторів і разом з коливальним контуром утворюють смуговий фільтр, завдяки чому форма напруги і струму у вилучаючи котушках датчика практично співпадає з синусоїдальною.

Для побудови підсилювача потужності використаємо незадіяні елементи мікросхеми 564ЛН2 задаючого генератора (рис. 2.19).

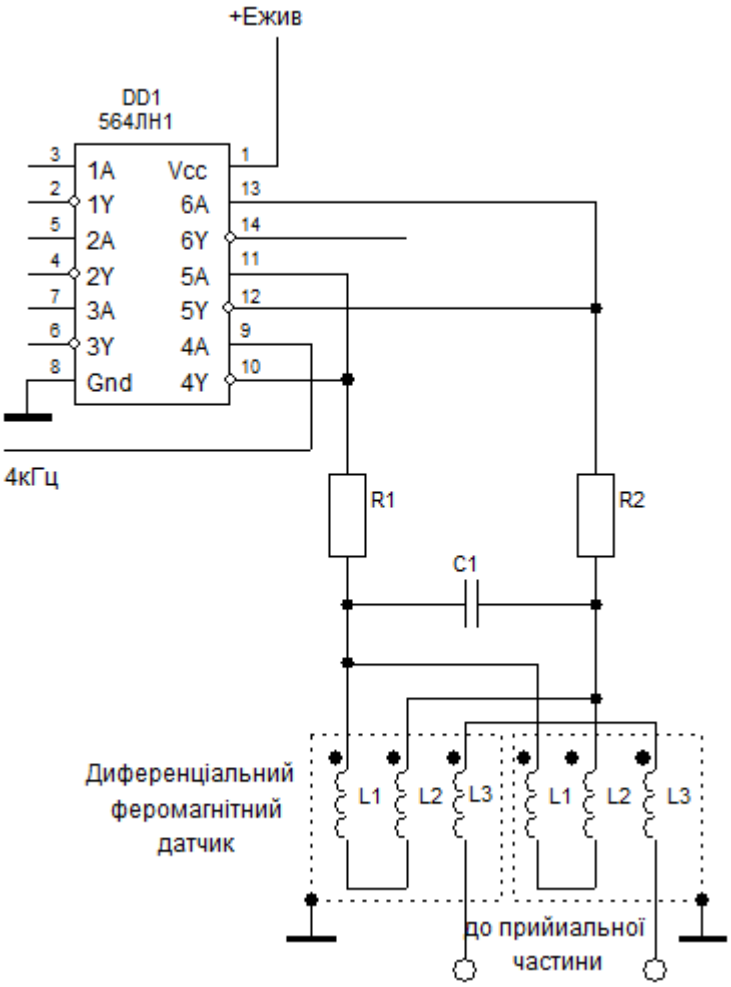


Рисунок 2.19 – Підсилювач потужності з диференціальним феромагнітним датчиком

2.2.5 Моделювання приймального підсилювача

Приймальний підсилювач підсилює різницевий сигнал, який поступає з приймальних котушок датчика L3, які утворюють разом з конденсатором С1 коливальний контур, налаштований на подвійну частоту 8кГц.

Приймальний підсилювач двохкаскадний він зібраний на операційних підсилювачах DA1.1 і DA1.2 з паралельним зворотним зв’язком. Конденсатор С2 зменшує посилення на високих частотах, запобігаючи тим самим перевантаження підсилюючого тракту наводками від силових мереж та інших джерел.

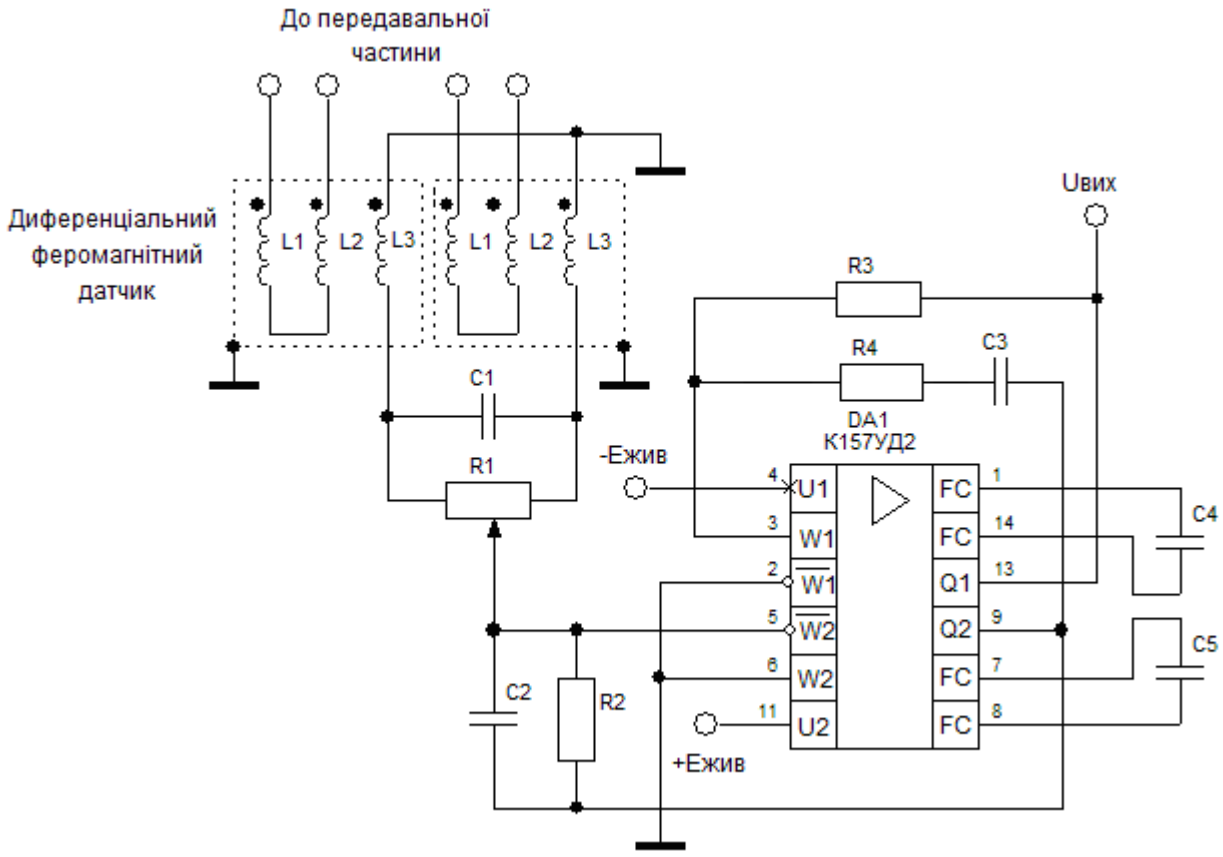


Рисунок 2.20 – Схема приймального підсилювача з вхідною котушкою

2.2.6 Моделювання синхронного детектора та джерела живлення

Мультиплексор – пристрій комбінаційного типу, який має n- адресних входів, $N = 2^n$ інформаційних входів, один вихід і здійснює керовану комутацію інформації, яка поступає по N вхідним лініям, на одну вихідну лінію. Комутація певної вхідної лінії відбувається відповідно до двійкового адресного коду [18].

Розглянемо мультиплексор "8 в 1", який має 8 інформаційних входів і $\log_2 8 = 3$ адресних входа. Якщо є вхід дозволу виходу OE, то "0" на цьому вході повинен перевести вихід в пасивний стан. Алгоритм функціонування такого мультиплексора приведений в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Таблиця функціонування мультиплексора 8 в 1

Dec	Входи										Q
	A	B	C	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	
0	0	0	0	D0	×	×	×	×	×	×	×	D0
1	0	0	1	×	D1	×	×	×	×	×	×	D1
2	0	1	0	×	×	D2	×	×	×	×	×	D2
3	0	1	1	×	×	×	D3	×	×	×	×	D3
4	1	0	0	×	×	×	×	D4	×	×	×	D4
5	1	0	1	×	×	×	×	×	D5	×	×	D5
6	1	1	0	×	×	×	×	×	×	D6	×	D6
7	1	1	1	×	×	×	×	×	×	×	D7	D7

Рівняння функціонування мультиплексора:

$$Q = \overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C}D0 + \overline{A}\,\overline{B}CD1 + \overline{A}B\overline{C}D2 + \overline{A}BCD3 + A\overline{B}\,\overline{C}D4 + A\overline{B}CD5 +$$

$$+ AB\overline{C}D6 + ABCD7$$

Проведемо моделювання мультиплексора в програмному застосуванні Electronics Workbench (рис. 2.21).

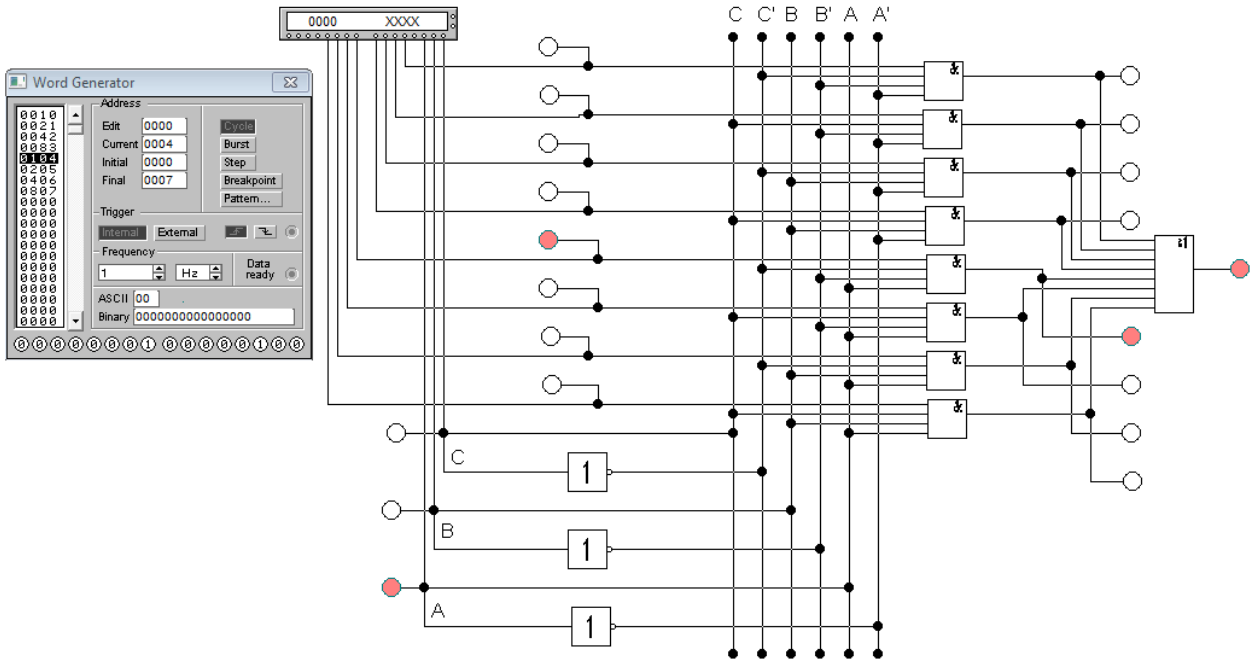


Рисунок 2.21 – Функціонування мультиплексора 8 в 1

Синхронний детектор виконано на операційному підсилювачі (рис. 2.22). У якості аналогових ключів використаний мультиплексор DD1 8 в 1. Адресний сигнал перебирається тільки у молодшому розряді, забезпечуючи почергову комутацію точок К1і К2 на загальну шину.

Випрямлений сигнал фільтрується конденсатором С1 і підсилюється операційним підсилювачем з одночасним ослабленням не відфільтрованих ВЧ складових колами R6C3 і R5C2.

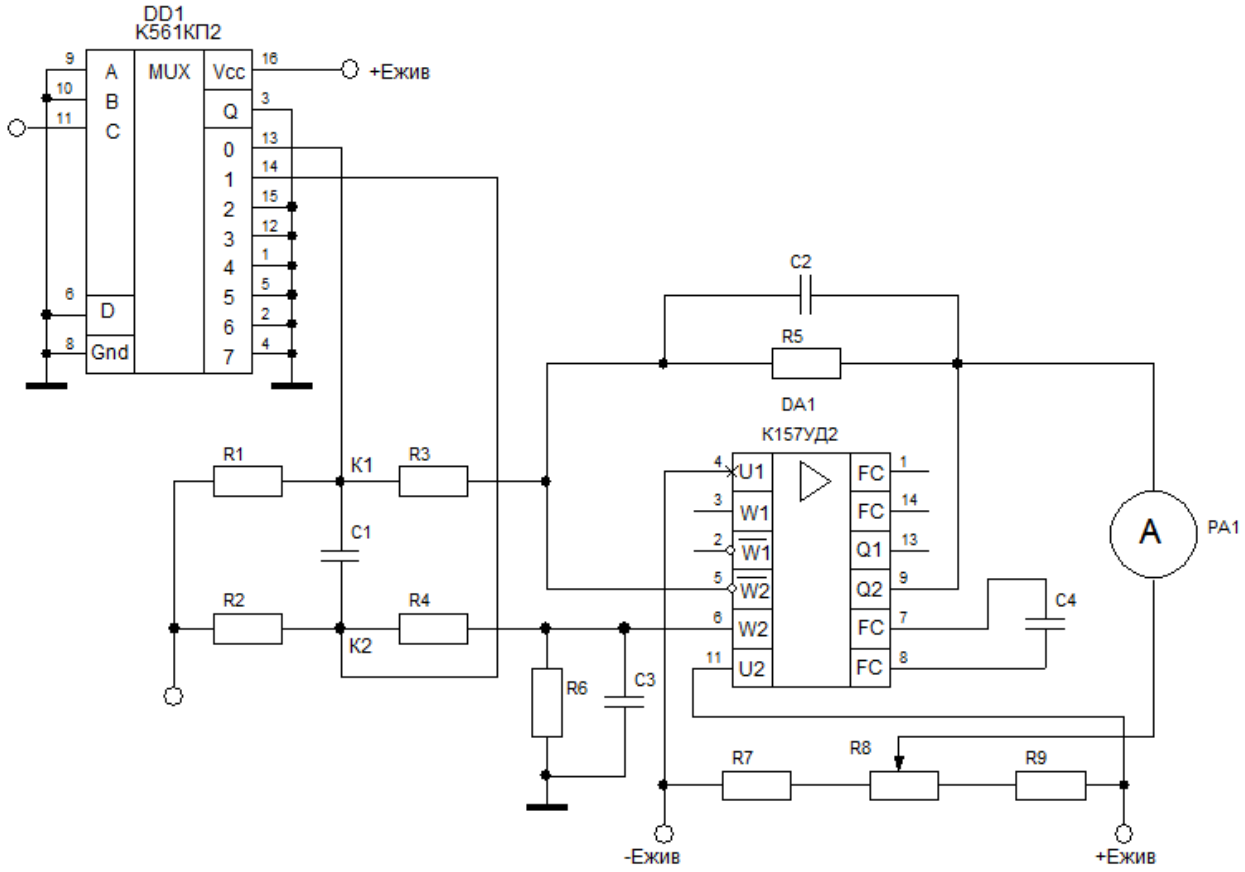


Рисунок 2.22 – Синхронний детектор

Індикатор являє собою мікроамперметр з нулем посередині шкали.

Мікросхема DD1 стабілізує однополярну напругу живлення. За допомогою операційного підсилювача DA створюється штучна середня точка живлення, що дозволяє використовувати звичайну двох полярну схемотехніку операційного підсилювача (рис. 2.23).

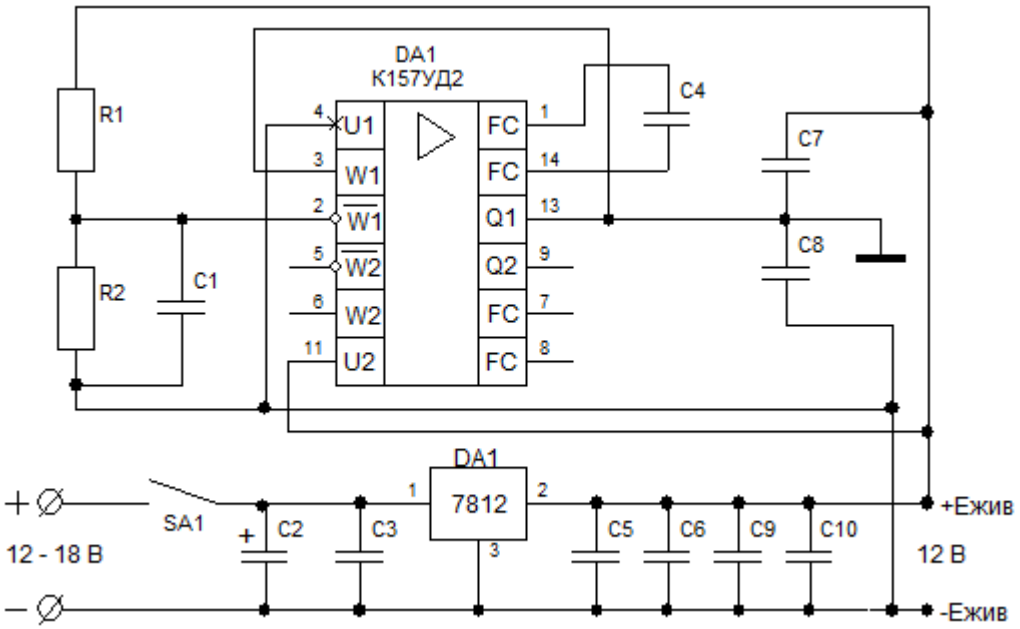


Рисунок 2.23 Джерело живлення феромагнітного магнітометра

2.2.7 Загальна схема диференціального феромагнітного магнітометра

Схема феромагнітного магнітометра представлені на рисунках 2.24, 2.25.

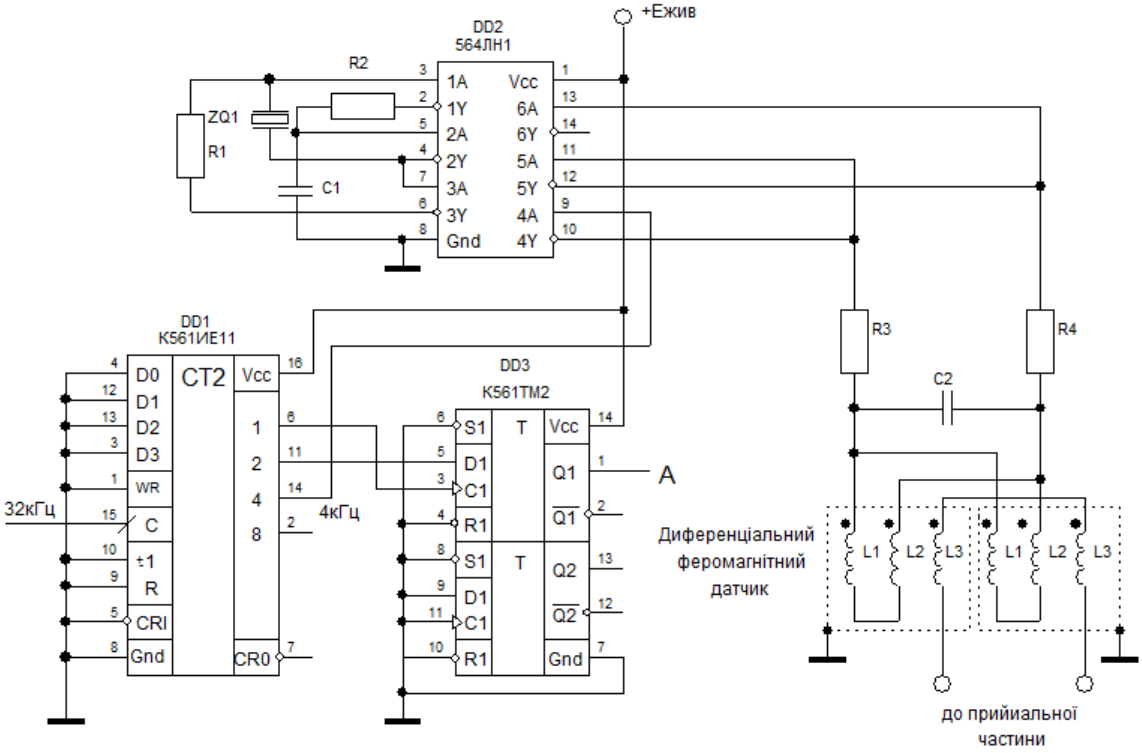


Рисунок 2.24 – Схема генераторної частини диференціального феромагнітного магнітометра

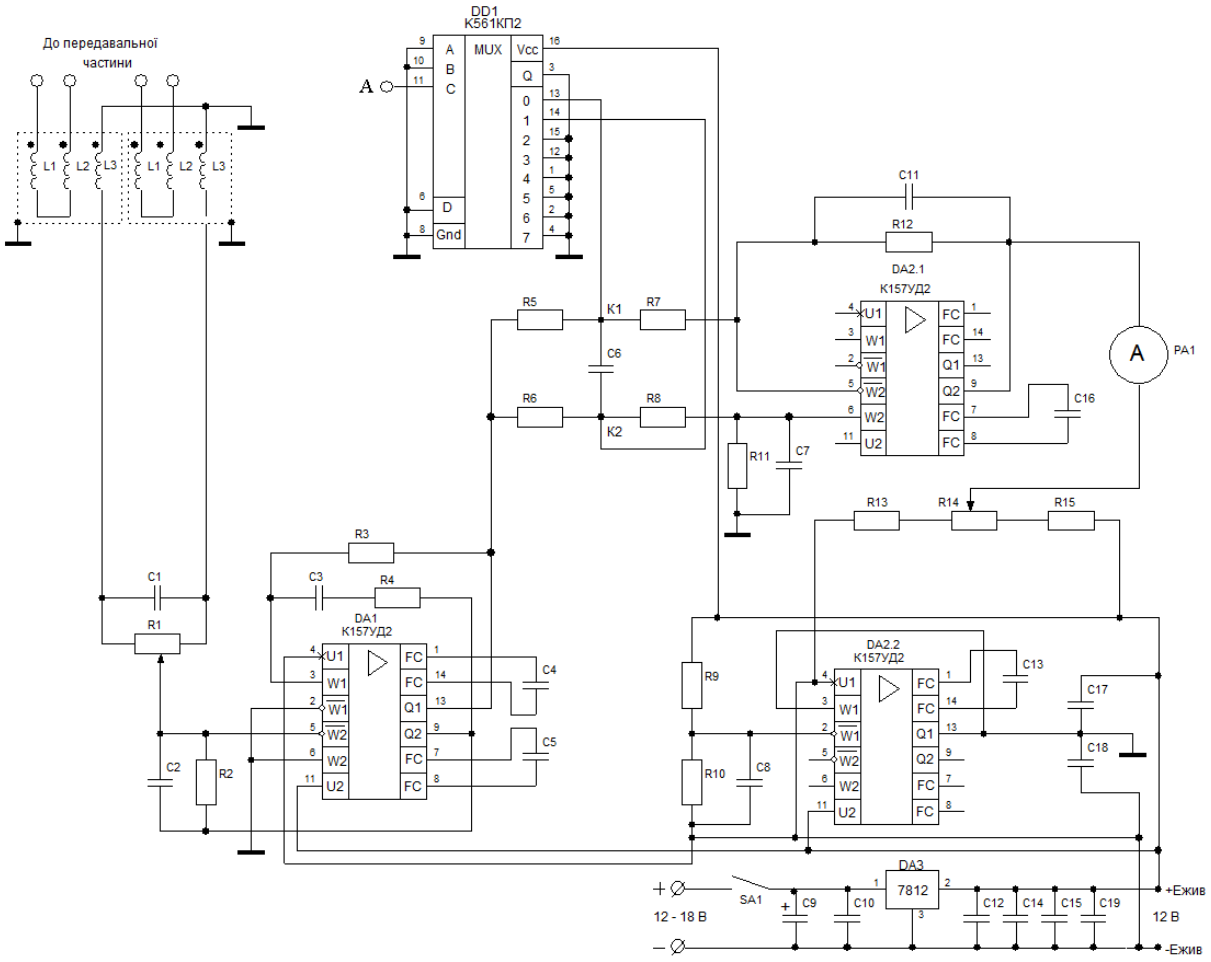


Рисунок 2.25 – Схема приймальної частини диференціального феромагнітного магнітометра

Котушки датчика виконані на круглих магнітних сердечниках діаметром 8 мм та довжиною 10 см. Кожна обмотка складається з щільно намотаних у два шара 200 витків мідного дроту діаметром 0,31 мм в ізоляції. Зверху усіх обмоток кріпиться шар фольги екрану. Краї екрану ізолюються один від одного для запобігання коротко замкнутого витка.

Кінці феритових сердечників закріплені в фторопластових центруючих дисках, завдяки яким кожна з двох половин датчика утримується всередені пластикової труби з текстоліту, яка служить корпусом. Довжина труби 60 см.

3 Техніко-економічне обґрунтування розробки схем магнітометрів

3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення схем магнітометрів

Топологічний аналіз показує, що магнітометр може бути реалізований у вигляді малогабаритного мікромодуля 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 магнітометрів проаналізуємо ієрархії чотирьох варіантів (табл. 3.1), враховуючи шкалу відносної важливості (табл. 3.2) [21].

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 композітних 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) [21].

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
Всього					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
Всього					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
Всього					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
Всього					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
Всього					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
Всього					5,47	1,00

Глобальний пріоритет для кожної альтернативи обчислюється як сума добутків кожного локального пріоритету на його ваговий коефіцієнт (табл.. 3.10) [21].

З порівняння глобальних пріоритетів різних технологій видно, що найбільшим є пріоритет у варіанта реалізації схем магнітометрів 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 магнітометрів 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 магнітометрів.

3.2 Розрахунок витрат на виробництво схем магнітометрів

Витрати на матеріали і напівфабрикати вказані в таблицях 3.11, 3.12. Витрати на матеріали і напівфабрикати склали 564,45 грн.

Таблиця 3.11 – Розрахунок вартості матеріалів на виробництво схем магнітометрів

Матеріали	Одиниця виміру	Кіль-кість	Ціна за одиницю, грн.	Усього ви-трат грн.
Мікросхема К561ИЕ11	шт.	1	30,80	30,80
Мікросхема К561ЛН2	шт.	1	15,90	15,90
Мікросхема К15УД2	шт.	1	11,40	11,40
Мікросхема К564ТМ2	шт.	1	18,20	18,20
Мікросхема К561КП2	шт.	1	18,00	18,00
Резистори	уп.	1	80,20	40,80
Конденсатори	уп.	1	112,00	112,00
Діод BAV23S	шт.	1	25,50	25,50
Світлодіод L-169XHD	шт.	1	64,00	64,00
Аккумулятор SL-350	шт.	2	6,00	12,00
Стабілітрон ZHCS500	шт.	1	12,00	12,00
Транзистор A1323	шт.	1	75,00	75,00
З’єднач раз’ємний DLK-02	шт.	1	3,75	3,75
Дросель SDR0604-470 к	шт.	1	5,00	5,00
Всього				523,55

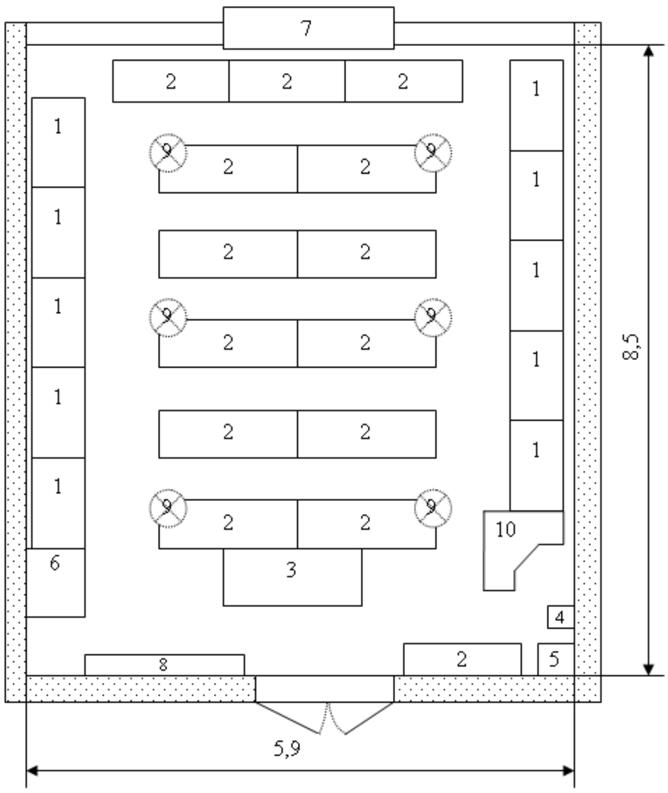
Таблиця 3.12 – Розрахунок вартості напівфабрикатів

Матеріали	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Усього витрат грн.
Фольгований тек-століт 100 × 100	шт.	3	8,00	24,00
Травильник	уп.	1	4,90	4,90
Трафарет	шт.	2	6	12,00
Усього				40,90

4 Охорона праці та техногенна безпека при розробці схем магнітометрів

4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

При виконанні дипломної роботи комп'ютерне моделювання та макетування сонячного трекера підвищеної чутливості, проводилися в аудиторії № 216 кафедри ЕІСПЗ, план якої представлено на рисунку 4.1.



1 - стіл комп'ютерний; 2 - стіл аудиторний; 3 - стіл викладача; 4 - автомат відключення електричного живлення; 5 - шафа силова; 6 - шафа універсальна; 7 - спліт система; 8 - дошка аудиторна; 9 - світильник 4-х ріжковий; 10 - стіл адміністратора мережі

Рисунок 4.1 – План аудиторії № 216

Площа приміщення складає 50,15 м^2; об’єм 188,06 м^3; довжина приміщення 8,5 м; ширина приміщення 5,9 м; висота приміщення 3,5 м; число вікон 1; число робочих місць 2; освітлення: природне (через бічне вікно) і загальне штучне. Параметри приміщення задовольняють нормативним значенням: площа 6 м^2, об’єм 20 м^3 на одного працюючого [22].

Роботи, що проводяться в дослідницькій лабораторії, не представляють великої небезпеки, оскільки приміщення інженерної академії належать до приміщень без підвищеної небезпеки. Проте вживання електроустаткування може нести в собі ряд шкідливих і небезпечних для життя і здоров'я людей чинників, що працюють з ним. Основну небезпеку дослідницької лабораторії представляють використання електроприладів, які працюють при напрузі тих, що є небезпечними для життя.

Дія електричного струму на живу тканину носить своєрідний характер. Проходячи через організм, електричний струм виробляє термічну, електролітичну і біологічну дію [23].

Міра небезпечної і шкідливої дії на людину електричного струму і електричної дуги залежить від роду і величини напруги струму, частоти струму, дороги струму через тіло організму, тривалість дії електричного струму, умов зовнішнього середовища.

У дослідницькій лабораторії існує можливість виникнення небезпеки при роботі з шкідливими речовинами в процесі моделювання плати пристрою. При монтажі електронних плат застосовують ацетон, спирт для знежирення і очищення від пилу мікросхеми, а також олово і каніфоль для припаювання ніжок напівпровідникового приладу до плати.

Спирт, ацетон викликає сухість шкіри. При систематичному вдиханні можливі захворювання сітківки ока. Також можливі нирко-психічні захворювання. Каніфоль дратівливо діє на слизисті оболонки дихальних шляхів і на шкіру, що наводить до дерматитів.

При недостатній освітленості на робочому місці може виникнути зорова втома.

4.2 Заходи з поліпшення умов праці

Забезпечення безпеки пацієнтів і медичного персоналу від поразки електричним струмом при експлуатації - медичних електронних апаратів є одним з найважливіших умов їх проектування.

При проведенні лікувально-діагностичних заходів дотик пацієнта до якої-небудь заземленої металевої поверхні може викликати зміну напряму робочого струму, що в кращому разі понизить точність виміру. Тому коло пацієнта повинно мати подвійну або посилену ізоляцію, здатну витримати випробувальну напругу не менше 4000 В (при мережевій напрузі 150 … 200 В).

Міра небезпечної і шкідливої дії на людину електричного струму і електричної дуги залежить від роду і величини напруги струму, частоти струму, шляху струму через тіло організму, тривалість дії електричного струму, умов зовнішнього середовища [24].

У дослідницькій лабораторії існує можливість виникнення небезпеки при роботі з шкідливими речовинами в процесі моделювання плати пристрою. При монтажі електронних плат застосовують ацетон, спирт для знежирення і очищення від пилу мікросхеми, а також олово і каніфоль для припаювання ніжок напівпровідникового приладу до плати.

Спирт, ацетон викликає сухість шкіри. При систематичному вдиханні можливі захворювання сітківки ока. Також можливі нирко-психічні захворювання. Каніфоль дратівливо діє на слизисті оболонки дихальних шляхів і на шкіру, що наводить до дерматитів.

При недостатній освітленості на робочому місці може виникнути зорова втома.

У таблиці 4.1 [23] приведені гранично допустимі значення параметрів, що характеризують якість посиленої ізоляції, ці значення забезпечують необхідні умови електробезпеки діагностичних пристроїв.

Максимальна електробезпека забезпечується пристроями діагностики з внутрішніми джерелами живлення, споживаючими мало енергії.

Таблиця 4.1 – Допустимі значення параметрів, що характеризують якість посиленої ізоляції

Стан ізоляції		Норма	Одиничні порушення
Мережа-корпус	Imax, мкА	100	500
	Rmin, МОм	7	
	Umin, В	4000*	
	‘’min, мм	8**	
	‘min, мм	5**	
Мережа-ємкісний вимірник	Imax, мкА	100	500
	Rmin, МОм	7	
	Umin,В	4000*	
	‘’min, мм	8**	
	‘min, мм	5**	

* – для робочої напруги 150 … 250В;

** – для робочої напруги 125 … 250В.

Imax – максимально допустиме значення струму витоку;

Rmin – мінімальний допустимий опір ізоляції;

Umin – мінімальне значення випробувальної напруги при випробуваннях на електричну міцність;

‘min – мінімальний шлях струму;

’’ min – мінімально допустимий повітряний зазор.

4.2.1 Техніка безпеки при експлуатації електричних установок в лабораторії

Наявність в лабораторії шкідливих і небезпечних чинників застосовує проведення заходів щодо їх усунення, або зменшення до безпечних для життя і здоров'я величин.

Захисне заземлення застосовує для зниження напруга відносно землі до безпечної величини на металевих корпусах електроустановок, що нормально не знаходяться під напругою але що виявилися під таким в результаті пошкодження ізоляції.

Оскільки на ділянці проведення роботи в лабораторії застосовується устаткування до 1000 В, опір заземлення має бути не вище 4 Ом [22]. Приміщення відноситься до приміщень без підвищеної небезпеки. Клас по ПВЕ В – 1а.

4.2.2 Електроустаткування

Для досліджень вибрано електроустаткування, що не перевищує 1000 В, живлення здійснюється від двофазної мережі струму частотою 50 Гц, напруга 220 В з глухо-заземленою нетраллю. Все устаткування є стандартним і відповідає нормам СНіП11-2-80. Електроприлади, згідно ПВЕ, мають бути надійно заземлені. Допустимий опір заземлюючого системи 4 Ом. Також передбачається наявність автоматичних пристроїв відключення при коротких замиканнях або перевищення сили струму в ланцюзі.

4.2.3 Створення оптимальних умов праці в лабораторії травлення печатних плат

При моделюванні схем магнітометрів, одним з етапів виготовлення макету було травлення печатних плат для подальшої збірки електронної частини експериментального макету. Розглянемо умови праці і можливі шкідливі чинники, які можуть виникнути при роботі на ділянці травлення печатних плат.

1. Освітлення – недостатнє освітлення викликає зменшення продуктивності праці, підсилює стомлюваність, збільшує кількість помилкових дій, що можуть привести до браку або нещасного випадку, також може розвинутися короткозорість. Для недопущення виникнення цих чинників на ділянці травлення печатних плат застосовується комбінована система – природне і штучне освітлення.

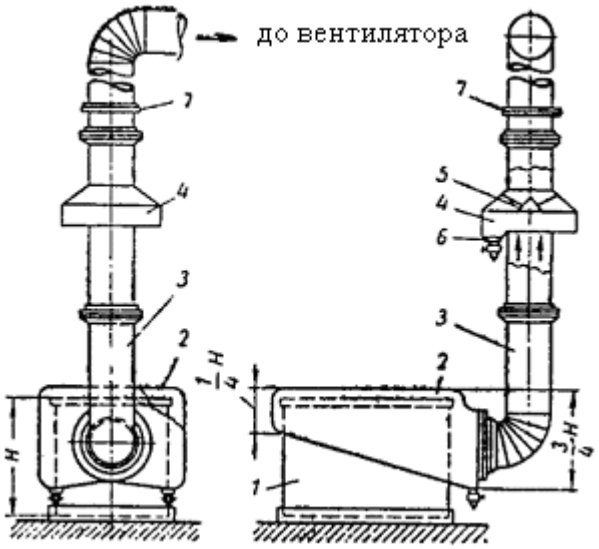
2. Мікроклімат – відхилення окремих параметрів мікроклімату від рекомендованих значень знижують працездатність, погіршують самопочуття, і можуть привести до професійних захворювань. Так, при низькій температурі повітря відбувається охолоджування організму, що сприяє виникненню простудних захворювань. При високій температурі виникає перегрів організму, що веде до підвищеного потовиділення і зниження працездатності. Працівник втрачає увагу, що може стати причиною нещасного випадку. Підвищена вологість повітря утрудняє випар вологи з поверхні шкіри і легенів, що веде до порушення терморегуляції організму, і до погіршення стану людини і зниження працездатності. При зниженій відносній вологості у людини з'являється відчуття сухості слизистих оболонок верхніх дихальних доріг. Швидкість руху повітря також має важливе значення, при температурі до 35…36 ºС надає на людину освіжаючу дію, а при температурі більше 40 ºС – несприятливе. По характеру виконувана на ділянці робота відноситься до легкої фізичної категорії 1б (виробляється сидячи, стоячи або пов'язана з ходьбою і супроводиться деякою фізичною напругою). У приміщенні де виробляються роботи такої категорії, встановлені наступні нормовані значення мікрокліматичних умов [23]:

- температура повітря в холодний період року 23…25ºС;
- відносна вологість 40…60 %;
- температура повітря в теплий період роки 22…24 ºС;
- швидкість руху повітря не більше 0,2 м/с.

3. Виділення шкідливих речовин – при роботі на ділянці травлення печатних плат виділяється велика кількість шкідливих речовин. Травлення від-

бувається в розчині соляної кислоти. Температура розчину складає 60…70 ºС. Прі цьому виділяються хлорид міді $CuCl_2$, водень H_2, можливе виділення хлору Cl_2. Водень при змішуванні з атмосферним киснем утворює вибухонебезпечну суміш. Хлор відноситься до другого класу небезпеки (високонебезпечні речовини), його нормована гранично допустима концентрація в повітрі робочої зони складає 1 мг/м^3 [23]. Він може викликати важкі отруєння із смертельним результатом. Для захисту від дії на людину шкідливих речовин необхідне вживання не лише загальної, але і місцевої вентиляції.

Для ефективного відведення забрудненого повітря від ділянки травлення печатних плат застосуємо двобортні відсмоктувачі, розташовані біля кожної з чотирьох ванн травлення печатних плат. Ванни мають однакові розміри 500×200 мм. Схема двобортного відсмоктувача приведена на рисунку 4.2.



1 – корпус ванни; 2 – кожух бортового відсмоктування: 3 – витяжний повітропровід; 4 – збірка для уловлювання розчину; 5 – конус в збірці; 6 – видалення конденсату: 7 – заслінка.

Рисунок 4.2 - Схема двостороннього бортового відсмоктування

Кількість повітря L (м^3/час), що видаляється одним двобортним відсмоктувчем, визначається по формулі [23]:

$$L = 1400 \cdot (0{,}53 \cdot B \cdot l / (B + l + H)\ 1/3 \cdot B \cdot L \cdot \alpha \cdot \beta \cdot k\Delta T,$$

де В – розрахункова ширина ванни, м; L – довжина ванни, м; Н – відстань від дзеркала електроліту до осі щілини, м (по конструктивних міркуваннях приймаємо 100 мм); α - коефіцієнт обліку конструкції відсмоктувача, що приймається рівним 1 для двобортного відсмоктувача; β – коефіцієнт обліку токсичності шкідливих речовин, що виділяються, приймається рівним 1,25; kΔT - коефіцієнт обліку температури електроліту, при різниці температур електроліту і довколишнього повітря в 50ºС приймається рівним 1,79.

Остаточно, маємо:

$$L = 1400(0{,}53 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}2 / (0{,}5 + 0{,}2) + 0{,}1)1/3 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}2 \cdot 1{,}79 \cdot 1{,}25 \cdot 1 = 175 \ (м^3/ч)$$

Загальна кількість повітря, що видаляється, $м^3/ч$, рівна:

$$L_{общ} = L \cdot n,$$

де n – кількість двобортних відсмоктувань.

$$L_{общ} = 175 \cdot 8 = 1400 \ м^3/ч$$

Заходи безпеки при роботі з ваннами для травлення печатних плат і травильними розчинами:

- вентиляція в лабораторії включається до початку робіт, а вимикається лише після їх закінчення;

- категорично забороняється робота з несправною вентиляцією, оскільки хлор, що в цьому випадку виділяється, може викликати отруєння людей, а водень створює з атмосферним киснем вибухонебезпечну суміш;

- всі роботи виробляються в гумових рукавичках і скляних окулярах щоб уникнути попадання травильного розчину на шкіру і в очі;

- в разі попадання розчину в очі або на шкіру, пошкоджені ділянки тіла необхідно промити водою протягом 15…20 хвилин і звернутися до лікаря;

- ємності з травильним розчином зберігаються в щільно закупорених ємкостях в місцях, що виключають їх можливе пошкодження;

- всі працівники зобов'язані знати техніку безпеки і міри надання першій допомозі хлором, що постраждав при отруєннях, і іншими хімічними речовинами, а також при поразці електричним струмом.

4.2.4 Природне та штучне освітлення

При виробництві якість продукту залежить від освітлення, тому на робочій ділянці має бути передбачене штучне освітлення.

Недостатнє освітлення викликає зменшення продуктивності праці, підсилює стомлюваність, збільшує кількість помилкових дій, які можуть привести до браку або нещасного випадку, також може розвинутися короткозорість. Для недопущення виникнення цих чинників на ділянці застосовується комбінована система – природне і штучне освітлення.

Зорова робота характеризується найвищою точністю, що відповідає першому розряду; для загального штучного освітлення норма освітленості складе 400 лк; при природному бічному освітленні КЕОєн = 3,5 %. Оскільки виробництво не є пожежовибухонебезпечним, в лабораторії застосовують лампи розжарювання з робочою напругою 220 В. Це дає можливість рівномірно освітити всю лабораторію. Залежно від класу приміщення по вибухонебезпеці і від чистоти середовища виробничих приміщень, визначається схема розташування світильників, їх марка і конструктивного виконання.

Для освітленості приміщення з розмірами А = 8,5 м, В = 5,9 м та висотою Н = 3,5 м використовуються 6 світильників з чотирма лампами розжарювання. Коефіцієнти віддзеркалення світлового потоку від стелі, стін і підлоги відповідно рівні $p_{ñòåë} = 70\%$, $p_{ñò^3í} = 50\%$, $p_{ï^3äëîãè} = 10\%$. Затінювання робочих місць немає. Висота світильника $h_c = 0{,}9ì$, висота робочої поверхні над рівнем підлоги $h_p = 0{,}8$ м. Нормативна величина освітленості робочих місць з відеоплейними терміналами складає $E_í = 300...500$ лк. В даному приміщенні освітленість 350 … 500 лк.

4.3 Протипожежна та техногенна безпека

Виробництво схем на мікромодульних елементах, згідно ДБН В.1.1–7–2002 [23], відноситься до категорії Б, оскільки це виробництво зв'язане із за-

стосуванням трихлоретилену і аміаку з температурою спалаху парів від 28 °С до 61°С. Для зниження пожежної небезпеки використовують строго обмежену кількість (0,5 л) матеріалів, що зберігаються, здатних горіти, створюють перешкоди для виникнення пожеж; попередження можливості руйнування виробничих пристроїв.

Характерними причинами виникнення пожеж в лабораторії є необережне поводження з вогнем, порушення технологічних процесів, неправильні електропроводки і устаткування, неправильне користування електричними приладами і ін. Для лабораторії встановлена категорія пожежної небезпеки В.

Основні будівельні конструкції будівлі, в якій знаходиться ділянка, виконані з тих, що не згорають і важко згорають матеріалів, що цегельних і виштукатурюють. Отже, вогнестійкість будівлі має 2 рівень. Для евакуації людей на випадок пожежі, згідно ДБН В.1.1–7–2002, в лабораторії є два евакуаційні виходи, розташованих в протилежних кінцях приміщення ділянки. Ширина дверей і сходів рівна 1,6 м, що відповідає нормі.

Відстань від найбільш видаленого робочого місця до найближчого виходу – 15 м. Швидкість пересування людей при евакуації – 16 м/хв [24].

Згідно правилами влаштування електроустановок ПВЕ, будівля, в якій знаходиться ділянка по заходах захисту від блискавок, відноситься до категорії 3 і захищається від прямих ударів блискавок, і від замету високих потенціалів через землю, тобто підземні металеві комунікації приєднуються при введенні в об'єкт, що захищається, до заземлювачів електроустаткування. Отже, грозозахист заснований на стержневих громовідводах.

Для попередження пожеж на ділянці необхідно створити строгий протипожежний режим. Створюється загально об'єктова і лабораторна інструкція по ПБ, проводиться первинний протипожежний інструктаж на робочому місці; створюється план протипожежних заходів і евакуації людей на випадок пожежі.

Як вогнегасні речовини можна застосовувати воду, вуглекислоту, хімічну і повітряно-механічну піну. Для гасіння вогнищ усередині будівлі на

майданчиках сходових кліток, в коридорах і отворі встановлюють пожежні крани, які розміщені в шафах, де знаходиться і рукав з протипожежним стволом. Для гасіння пожеж електроустановок використовується вуглекислий вогнегасник ОУ-2, в кількості двох вогнегасників на приміщення. Існує пожежна електрична сигналізація, яка забезпечує прямий зв'язок пожежної охорони з охоронним об'єктом. У даній будівлі застосовують звукову систему сигналізації. При появі сигналу сповіщення про пожежу співробітники лабораторії № 216 організовано без паніки покидають лабораторію і, залежно від місця спалаху, слідують або вліво через лабораторний корпус для виходу на вулицю Фанатська, або управо для виходу на вулицю Незалежної України (рис. 4.3).

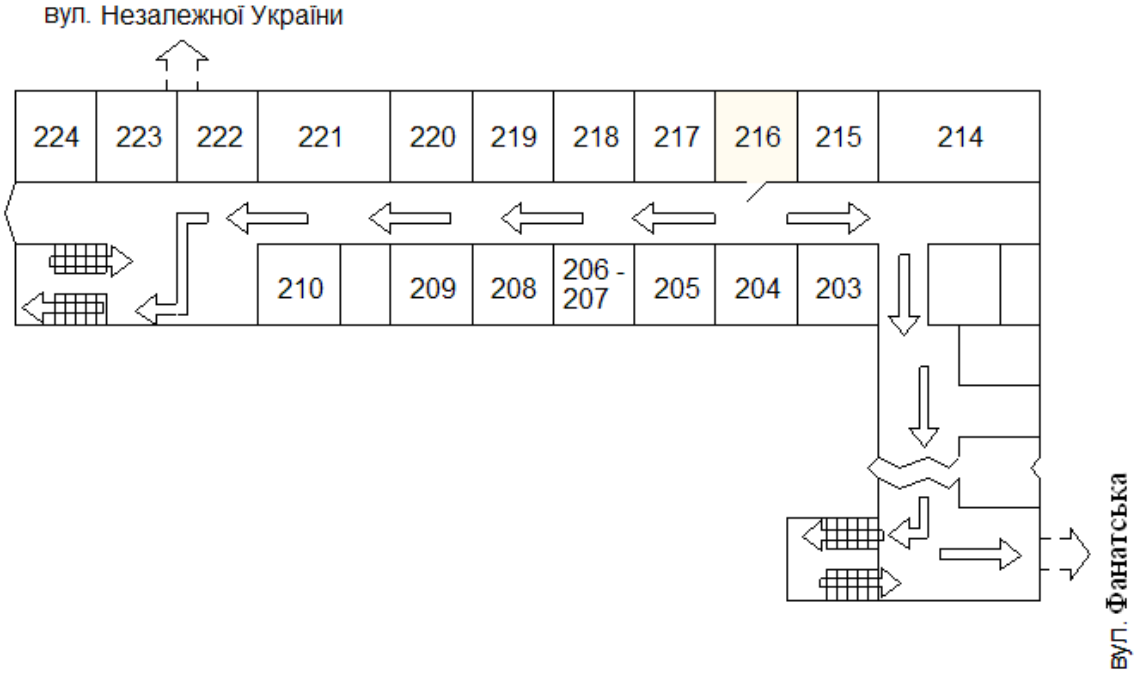


Рисунок 4.3 – План евакуації при пожежі із аудиторії № 216

4.4 Розрахунок місцевого освітлення робочого місця при монтажі елементів на плату

Для місцевого освітлення (у складі комбінованого освітлення) слід використовувати світильники з непрозорими відбивачами. Світильники місце-

вого освітлення слід розташовувати так, щоб їх елементи, що світять, не потрапляли прямо у поле зору працівників як даного так і інших робочих місць [23].

Вираження для освітленості даної точки “а” поверхні спостережуваного об'єкту визначається вираженням:

$$E_a = \frac{J_{\text{ñâ}}}{l_{\text{ñà}}^2}\cos\gamma_{\text{ñà}}.$$

Тут $J_{св}$ – сила світла, що випромінюється світильником, кд/м^2; $l_{са}$ – довжина шляху світлового променя від елементу, що світить, до точки “а” спостережуваного об'єкту, м; $\gamma_{са}$ - кут, що утворюється світловим променем в напрямі від елементу, що світить, до точки “а” і нормаллю до спостережуваної поверхні в точці “а”, рад. Розташування світильника на робочому місці показане на рисунку 3.3.

У точці “а” світильник місцевого освітлення повинен створювати освітленість, рівну нормативному значенню для місцевого освітлення (в даному випадку 180 лк), з відхиленням в межах –10% - +20%.

Визначимо силу світла, потрібну від світильника місцевого освітлення:

$$x_{св} = 20см; y_{св} = 10см; z_{св} = 20см; x_a = 20см; y_a = 30см$$

$$l^*_{са} = \sqrt{(x_{св} + x_a)^2 + (y_{св} + y_a)^2} = 56{,}6см$$

$$l_{са} = \sqrt{l^{*\,2}_{са} + z^2_{св}} = 60см$$

$$\gamma_{са} = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{z_{св}}{l_{са}}\right) = 1.231рад$$

У світильнику використовується лампа розжарювання, тому для вибору лампи світильника місцевого освітлення по величині створюваного світлового потоку має вигляд

$$\Omega_{св} = 2\pi\left\{1 - \cos\left[arctg\left(\frac{d_{св}}{2h_л}\right)\right]\right\} = 4{,}14$$

$$\Phi_Л = E_{норм.м} \cdot l^{\,2}_{св.а.} \cdot \frac{4\pi}{\cos\gamma_{са}}\left[1 + \chi_{св}\rho_{св}\left(\frac{4\pi}{\Omega_{св}} - 1\right)\right]^{-1} = 796$$

З таблиці [23] вибираємо лампу розжарювання типа БК-215-225-60 потужністю 60 Вт (рис. 4.4).

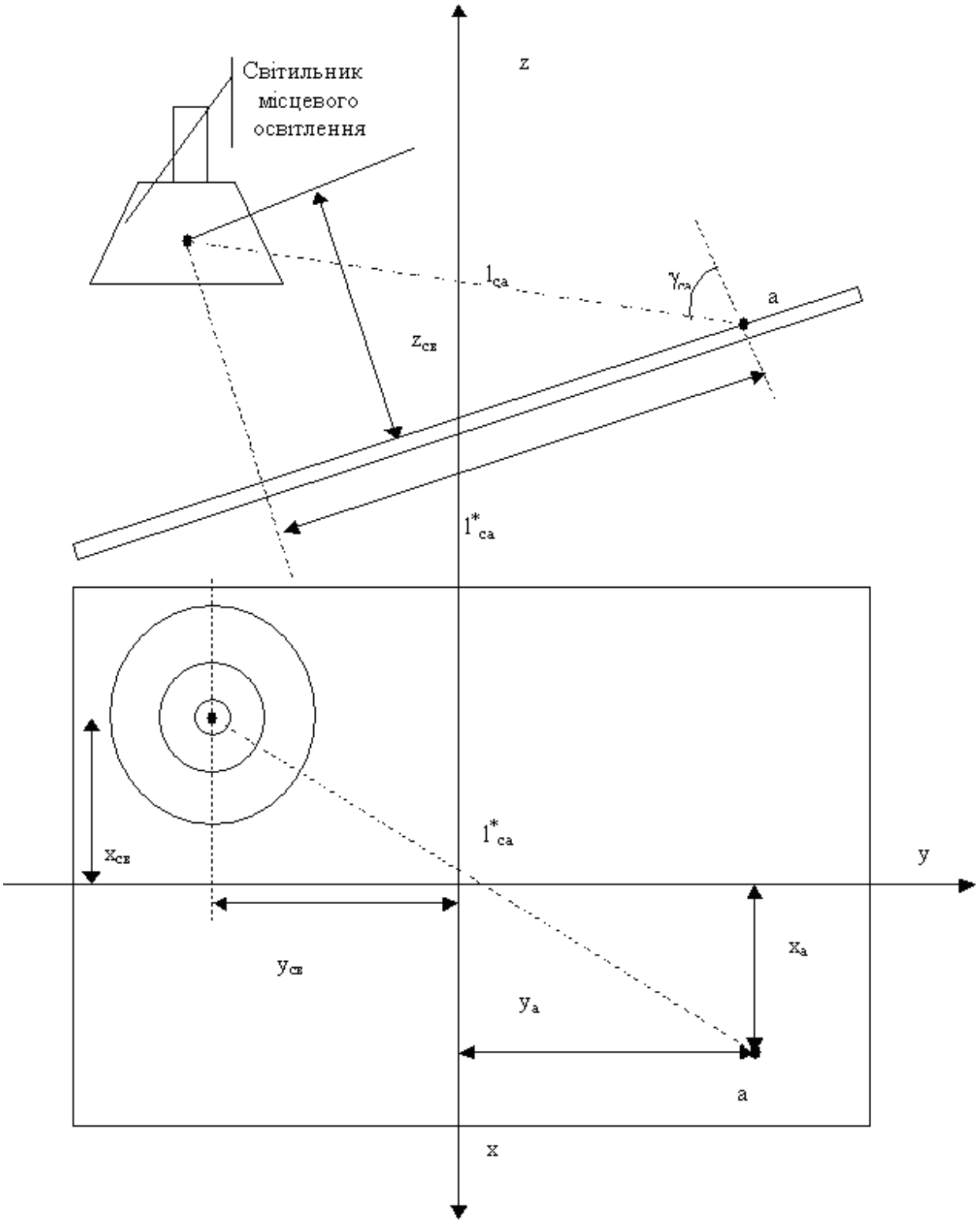


Рисунок 4.4 – Розташування світильника місцевого освітлення

Висновки та рекомендації

1. Розроблений магнітометр на гальваномагнітному ефекті має номінальну чутливість 2,5 мВ/Гс і забезпечує повний діапазон вимірів сили магнітного поля 1800 Гс.

2. Розроблений диференціальний феромагнітний магнітометр дозволяє вимірювати індукцію в діапазоні від 0,01 до 1,6 Тл з похибкою, не більшою за 2%.

3. Аналіз схемотехнічних і конструктивних рішень розроблених пристроїв вимірювання магнітних потоків, показує правильність функціонування згідно з поставленим завданням.

Розроблені методики і пристрої рекомендуються для подальшого дослідження з метою удосконалення та зручності у використанні.

Перелік посилань

1. Бондар П. М. Вимірювальні перетворювачі, прилади та системи [Електронний ресурс] : конспект лекцій. Київ : НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». Кафедра ПСОН, 2009. Режим доступу: http://kafpson.kpi.ua/Arhiv/Bondar/lecture1.pdf (дата звернення 17.03.2017).

2. Схеми ввімкнення та основні розрахункові співвідношення індукційних магнітометрів / В. О. Нічога, В. О. Проненко, О. В. Салдан та ін. Львів : Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : збірник наукових праць, 2015. № 818. С. 25–31.

3. Давачі сучасних інформаційно-вимірювальних систем метрології надслабких інфранизькочастотних магнітних полів : тези доповіді / В. О. Нічога, П. Б. Дуб, В. О. Проненко та ін. Черкаси : 4-а МНТК, 2008. С. 92.

4. Луцька Н. М. Ладанюк А. П. Оптимальні та робастні системи керування технологічними об’єктами : монографія. Київ : Ліра-К, 2015. 288 с.

5. Опанасюк Н. М.Мікроелектронні сенсори : конспект лекцій. Суми : Сумський державний університет, 2013. 102 с.

6. High-sensitivity atomic magnetometer unaffected by spinexchange relaxation / J. C. Allred, R. N. Lyman, T. W. Kornack, M. V. Romalis. Phys. Rev. Lett., 2002, vol. 89, № 13. P. 130801-1–130801-4.

7. Lenz J. E. A review of magnetic sensors. Proc. IEEE, 1990. vol. 78. № 6. P. 973–989.

8. Федишин Я. І. Фізика з основами біофізики. Львів: Світ, 2005. 552 с.

9. Ripka, P. Magnetic Sensors and Magnetometers. Boston : Artech house, 2000. 494 p.

10. Ripka P. Advances in Magnetic Field Sensors. IEEE Sensors journal, 2010. Vol. 10, № 6. P. 1108-1116.

11. Васецький Ю. М. Електродинаміка. Основні поняття, потенціальні та квазістаціонарні поля : навч. посібн. Київ : Вид-во Нац. авіац. ун-ту НАУ-друк, 2009. 160 с.

12. Соколов С. В., Писаренко Л. Д., Журба В. О. Теорія електромагнітного поля і основи техніки НВЧ : навч. посіб. Суми : Сумський державний університет, 2011. 393 с.

13. Фізика : підручник / І. Є. Лопатинський, І. Р. Зачек, Г. А. Ільчук та ін. Львів : Афіша, 2009. 384 с.

14. Чолпан, П. П. Фізика : підручник. Київ : Вища школа, 2003. 568 с.

15. Посудін Ю. І. Фізика : підручник. Біла Церква : Вид-во БНАУ, 2008. 250 с.

16. Бушок Г. Ф., Венгер Є. Ф. Курс фізики, частина 2. Київ : Вища школа, 2003. 278 с..

17. Кучерук І. М, Горбачу. І. Т. Загальна фізика. Електрика і магнетизм. Київ : Вища школа 1990, 367 с.

18. Цифрова схемотехніка : підручник / Л. Л. Верьовкін, М. В. Світанько, Є. М. Кісельов та ін. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 214 с.

19. Рябенький В. М., Жуйков В. Я., Гулий В. Д.. Цифрова схемотехніка : навч. посіб. Львів : Новий Світ-2000, 2019. 736 с.

20. Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. Основи схемотехніки електронних систем : підручник. Київ : Вища шк., 2004. 527 с.

21. Белуха М.Т. Основи наукових досліджень / Белуха М.Т. Київ : Вища шк., 1997. 271с.

22. Бєлоконь К. В., Куріс Ю. В., Манідіна Є. А. Інформаційні технології в охороні праці : навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА спец. 263 "Цивільна безпека" ден. та заоч. форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 160 с. URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/2018/f359035.pdf. (дата звернення: 20.10.2025).

23. Бєлоконь К. В., Рижков В. Г., Куріс Ю. В., Манідіна Є. А. Основи охорони праці : навч.-метод. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 180 с. URL http://ebooks.znu.edu.ua/files/ZII/metodychky/do2018/f356296.pdf. (дата звернення: 20.10.2025).

24. 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. (дата звернення: 20.10.2025).

Додаток А

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.

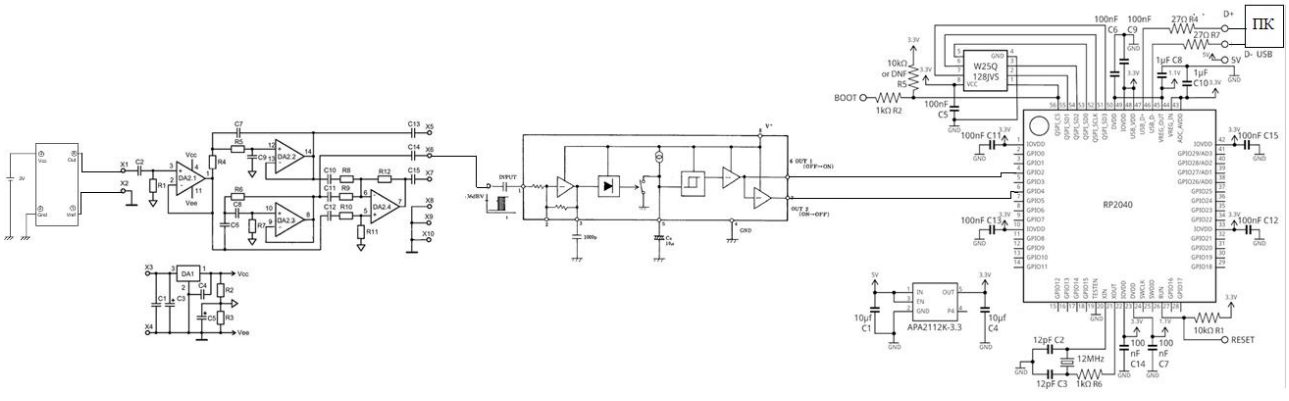


Рисунок 1 - Електрична схема мікромеханічної системи орієтації у просторі

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., Garcerá 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.