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

перший бакалаврський
(рівень вищої освіти)

на тему *Розробка реєстратора індукційного струму малої потужності*

Виконав: студент IV курсу, групи 6.1531
спеціальності *G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»*
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Мікро- та наносистемна техніка
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

Д.А. Маренгольц
(ініціали та прізвище)

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

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

Запоріжжя
2025рік

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

Факультет _____ _____
Кафедра __*електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення*
Рівень вищої освіти _*перший бакалаврський*_____
Спеціальність *G5 «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка»* (код і назва)

Освітня програма __*Мікро- та наносистемна техніка* _____
(код і назва)
Спеціалізація _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _*ЕІСПЗ*____
_____*Критська Т.В.*_____
"___30_" травня 2025 року

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

_____*Маренгольцу Дмитру Антоновичу* _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) ___*Розробка реєстратора індукційного струму малої потужності*_____
_____
керівник роботи *Світанько Микола Вікторович, к.ф.-м.н., доцент*_____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від "*27" грудня 2024 року № 2029-с*_____

2 Строк подання студентом роботи ___*30 травня 2025 року*_____

3 Вихідні дані до роботи _*Super-conductive Quantum Interference Device (SQUID), 1Гц – 100 кГц, 10^{-12}–10^{-8} Тл, 220 В, 3-32В,*_____
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)*1. Індукційний струм як одна із важливих компонент дослідження магнітних полів 2. Розробка є реєстратора індукційного струму малої потужності 3. Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем реєстратора індукційного струму малої потужності* ____
5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
*1. Вимірювання індукційних струмів малої інтенсивності 2. Електрична схема диференціального підсилювача із синхронним детектором 3. Моделювання функціональних блоків пристрою*_____

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I	*Світанько М.В., доцент*	*28.12.2024*	*28.12.2024*
II	*Світанько М.В., доцент*	*28.12.2024*	*28.12.2024*
III	*Світанько М.В., доцент*	*28.12.2024*	*28.12.2024*

7 Дата видачі завдання _____*28 грудня 2024 року*_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Літературний огляд*	*29.03.2025*	
2	*Розрахункова частина*	*26.04.2025*	
3	*Розробка заходів із охорони праці та техногенної безпеки*	*30.05.2025*	
4	*Розробка графічної частини роботи*	*30.05.2025*	
5	*Оформлення пояснювальної записки*	*30.05.2025*	
6	*Нормоконтроль*	*30.05.2025*	
7	*Попередній захист роботи*	*30.05.2025*	

Студент _____ _____*Маренгольц Д.А.*_____
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

Нормоконтроль пройдено

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

Реферат

Дипломна робота містить 63 сторінки, 20 рисунків, 45 джерел літератури.

Об’єкт дослідження – реєстратори індукційних струмів слабких магнітних полів.

Мета роботи – розробка реєстратора індукційного струму малої потужності.

Завдання роботи – розробити структурну схему пристрою реєстрації індукційних струмів малої потужності;розробити електричні схеми основних апаратурних блоків пристрою; провести моделювання роботи електричних схем пристрою.

Методика досліджень – моделювання пристрою за допомогою програмних забезпечень Proteus.

Короткий виклад результатів досліджень – розроблено розроблено модель пристрою реєстрації індукційних струмів малої потужності на основі SQUID магнітометра.

Результати впроваджень – макет електронного приладу пройшов випробовування на кафедрі ЕІСПЗ.

Прогнозні пропозиції – подальше вдосконалення каналу реєстрації пристрою передбачає використання програмованих мікроконтролерів для підвищення роздільної здатності сигналу в умовах високого рівня шумів.

ІНДУКЦІЙНИЙ СТРУМ, МАГНІТОМЕТР, ОПЕРАЦІЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ, МІКРОКОНТРОЛЕР, SQUID, PROTEUS.

Дипломну роботу виконано на кафедрі електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення з 28.12.2024 р. по 30.05.2025 р.

ЗМІСТ

Стор.

Вступ ……. 6

1. Індукційний струм як одна із важливих компонент дослідження магнітних полів…… 7

1.1 Вплив магнітних полів на об’єкти, що їх оточують …… 7

1.2 Індуктивний струм – основа детектування електромагнітних полів ... 8

1.3 Датчики для вимірювання магнітних полів …… 10

1.3.1 Датчики магнітометрів……... 10

1.3.2 Магниторезистивні датчики…….. 11

1.3.3 Спін-тунельні магніторезистивні датчики (CTMP)……. 16

1.4 Напівпровідникові СКВІД-магнітометри …….. 20

2. Розробка реєстратора індукційного струму малої потужності ……... 23

2.1 Структурна схема реєстратора ……. 23

2.1.1 Індукційний струм – основна складова квантових інформаційних систем…… 23

2.1.2 Фізична модель реєстратора індукційного струму малої потужності…… 25

2.2 Джозефсонівські контакти реєстратора індукційного струму малої потужності …….. 28

2.3 Функціональні блоки реєструючої системи індукційного струму малої потужності …… 31

2.3.1 Генератор струму модуляції сигнальної характеристики……. 31

2.3.2 Канал підсилення із синхронним детектором…… 33

2.3.3 Реєстрація індукційного струму…… 38

2.4 Моделювання роботи каналу реєстрації індукційного струму в редакторі Proteus …….. 42

3 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем

реєстратора індукційного струму малої потужності ……. 46
3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів…… 46
3.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів…… 48
3.3 Виробнича санітарія……... 48
3.4 Електробезпека……... 50
3.5 Пожежна та техногенна безпека об’єкту …….. 51
3.6 Розрахунок штучного освітлення точковим методом …… 52
Висновки та рекомендації……... 57
Перелік посилань…….…… 59

Вступ

Магніти відіграють невід'ємну роль у багатьох приладах і пристроях. Магніти мають важливе застосування в медицині. Магнітно-резонансна томографія (МРТ) використовує потужні магніти для сканування тіла та створення детальних зображень внутрішніх органів і тканин. Магнітоенцефалографічні (МЕГ) сканери використовують магнітометри для картографування активності мозку шляхом виявлення дрібних магнітних полів, створених електричною активністю в мозку. Магнітотерапія або терапія магнітним полем використовує магнітні поля для н лікування болю та покращення здоров'я.

Особливе місце займають магнітні пристрої, які використовують при створенні інформаційних систем. І це не тільки пристрої зберігання даних, такі як жорсткі диски (HDD), твердотільні накопичувачі (SSD) і флеш-накопичувачі, а й унікальні логічні елементи, що є складовою компонентою новітніх обчислюваьних машин – квантових комп'ютерів.

З іншого боку не слід забувати і про негативний ефект від магнітних полів. Всі штучно згенеровані електричні, магнітні та електромагнітні поля складають електромагнітне забруднення навколишнього середовища, для якого віднедавна є спеціальний термін – електросмог [1,2]. Вплив зовнішнього електромагнітного поля на організм в цілому починається на молекулярному та клітинному рівні. Відбуваються коливання та рух заряджених частинок: електронів, протонів, йонів та молекул-диполів. Важко назвати молекули в клітині живого організму, що не мали б часткової поляризації на тих чи інших своїх ділянках: це і білки, молекула ДНК.

Проявом магнітих полів можуть бути як вихрові електричні поля,так і індукційні струми. Саме останні відірають веику роль у створенні надпотужних обчислюваьних компоент.

Тому, актуальним є питання генерації та детектування таких струмів.

1. Індукційний струм як одна із важливих компонент дослідження магнітних полів

1.1 Вплив магнітних полів на об’єкти, що їх оточують

Магнітне поле – це форма матерії, яка існує навколо магнітів, електричних струмів або заряджених частинок, що рухаються. Воно невидиме, але його вплив можна відчути завдяки силі, яка діє на інші магніти чи об’єкти, чутливі до магнетизму [3,4].

Магнітне поле створюють електричні заряди в русі або природні магніти. Його основні властивості залежать від напрямку та сили. Важливо зазначити, що магнітна індукція – це величина, яка визначає напруженість і напрямок магнітного поля. Вона є силовою характеристикою магнітного поля, що використовується для опису його взаємодії з іншими об’єктами.
Звідки береться магнітне поле Землі? Його джерелом є рух розплавленого заліза й нікелю в зовнішньому ядрі планети. Ці процеси генерують електричні струми, що, своєю чергою, створюють магнітне поле. Завдяки цьому явищу ми маємо компас, який допомагає визначати напрямки, та атмосферу, що захищає нас від космічної радіації [3,4].

До основних властивостей магнітного поля належать:

- Здатність діяти на заряджені частинки, що рухаються.
- Наявність напрямленості – лінії магнітного поля завжди спрямовані від північного полюса до південного.
- Можливість взаємодіяти з іншими магнітами або магнітними матеріалами.

Магнітне поле існує всюди, де є електричний струм чи природний магнетизм. Його вплив охоплює як мікросвіт частинок, так і глобальні процеси, що відбуваються на рівні планети.

Для більшості людей магнітне поле непомітне, але воно має важливе значення для нашого здоров’я. Дослідження показують, що слабкі магнітні поля можуть позитивно впливати на кровообіг, загоєння тканин і нервову систему. У медицині вже давно використовуються методи магнітотерапії, які допомагають при різних захворюваннях [5].

Магнітне поле діє також на пристрої, які ми використовуємо щодня. Наприклад, магнітні поля лежать в основі роботи електромоторів, генераторів і навіть комп’ютерних жорстких дисків. Завдяки цьому ми маємо сучасний транспорт, електроенергію та доступ до цифрової інформації.
Магнітне поле Землі виконує захисну функцію, блокуючи космічні промені та заряджені частинки сонячного вітру. Крім того, воно забезпечує умови для орієнтації в просторі, що використовують як люди, так і тварини. Без магнітного поля ми могли б втратити частину сучасних технологій і навіть зазнати шкоди від космічного випромінювання [5].

Таким чином, магнітне поле існує не лише як природне явище, але й як основа багатьох технологій, що визначають сучасне життя[5].

1.2 Індктивний струм – основа детектування електромагнітних полів

Явище виникнення електричного струму в замкнутому провіднику, що знаходиться в змінному магнітному полі, називається електромагнітною індукцією.Індукційний струм у замкненому провіднику завжди має такий напрямок, що створюваний цим струмом власний магнітний потік протидіє тим змінам зовнішнього магнітного потоку, які збуджують індукційний струм [6-10].

Практична значимість того явища яке прийнято називати електромагнітною індукцією така величезна, що це окремо взяте явище, той закон який його описує, та ті прилади принцип дії яких базується на його застосуванні, на сучасному етапі розвитку новітніх інформаційних технологій потребують особливої уваги та окремого розгляду [6-10].

Досліджуючи явище електромагнітної індукції, в якості джерела магнітного поля доречно застосовувати змінний електричний струм. Перевага змінного струму полягає в тому, що він дозволяє отримувати не короткотривалі індукційні імпульси, а як завгодно тривалі індукційні струми. Тому що змінний струм створює змінне магнітне поле і тому, той магнітний потік що пронизує струмопровідний контур постійно змінюється, а отже створює в цьому контурі відповідно довготривалий індукційний струм [6-10].

Індукційні струми виникають не лише в спеціально створених приладах, а і в будь яких ситуаціях де струмопровідні тіла знаходяться в змінних магнітних полях. Адже по суті, будь яке струмопровідне тіло представляє собою певну сукупність замкнутих струмопровідних контурів. І якщо ці контури знаходіться в змінному магнітному полі, то згідно з законом електромагнітної індукції, в них неминуче виникають індукційні струми. Ці струми називають вихровими індукційними струмами, або струмами Фуко. (Названо на честь французького фізика Жана Фуко (1819–1868)) [6-10].

Вихрові індукційні струми виникають не лише в тих струмопровідних тілах, що знаходяться в зовнішніх змінних магнітних полях, а й в тих випадках коли у відповідному тілі протікає змінний електричний струм. І це закономірно. Адже змінний струм, створює в навколо провідника змінне магнітне поле, яке в свою чергу, згідно з законом електромагнітної індукції, створює в тому ж провіднику відповідний індукційний струм – струм самоіндукції. Струм самоіндукції, це такий вихровий індукційний струм, який створюється основним змінним струмом і якай протікає в тому ж провіднику що і основний струм. По суті це означає, що в провіднику фактично протікає певний результуючий струм ($i_{рез}$), який можна представити як суму двох струмів: основного струму ($i_{осн}$) та струму самоіндукції (i_s) [6-10].

Отже, реєстрація індуктивних струмів, фактично є потужним інструментом при дослідженні магнітних полів, особливо полів із значеннями індукції меншими 10^{-6} Тл. Тобто, вимірюючи індуктивні струми

малої потужності ми маємо інформацію про магнітні поля, які можуть створюватися як біологічними об’єктами, так і низькорозмірними інформаційними системами [6-10].

1.3 Датчики для вимірювання магнітних полів

1.3.1 Датчики магнітометрів

Силовою характеристикою магнітного поля є вектор магнітної індукції. Засобом вимірювань модуля вектора магнітної індукції або його складових відповідно ДСТУ 24284 називається магнітометром [11].

У таких сферах, як мікромагнітне сканування або неруйнівний контроль єдиним критерієм вибору часто є розмір датчика. При пошуку і виявленні магнітних аномалій на великих відстанях важливішим параметром є шум і роздільна здатність [12]. При вирішенні завдань навігації, орієнтації і стабілізації на перший план виходять лінійність, температурні коефіцієнти і чутливість до поперечного поля [13]. При вимірюванні магнітного поля квантового чіпа особливого значення набуває тепловиділення і працездатність датчика при наднизьких температурах.

Основними характеристиками датчиків магнітного поля є: діапазон вимірювань; лінійність; гістерезис; похибка перетворення магнітної індукції (в тому числі залежність від температури); зміщення; довготривала стабільність; шум; діаграма спрямованості; чутливість до поперечного поля; частотний діапазон вимірювань; геометричні розміри датчика; споживана потужність; тепловиділення; діапазон робочих температур.

Залежно від використовуваного ефекту датчики магнітного поля поділяються на типи, показані на рисунку 1.1.

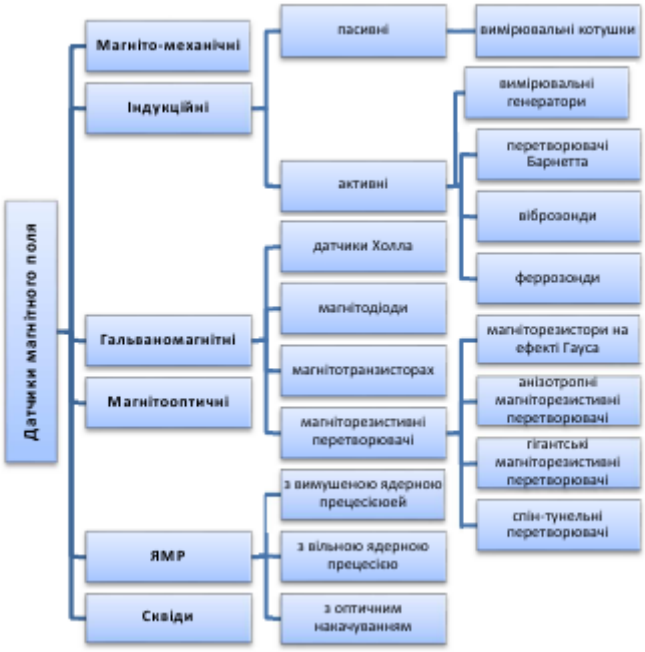


Рисунок 1.1 – Види датчиків магнітного поля

1.3.2 Магниторезистивні датчики

Магніторезистори мають низькі шуми, які не схильні до дії поверхневих ефектів і характеризуються дуже малим старінням.

Залежно від фізичного ефекту і матеріалу розрізняють такі магніторезистивні датчики:

− магніторезистори на ефекті Гауса;

− анізотропні магніторезистивні датчики (АМР);

− гігантські магніторезистивні датчики (ГМР);

− спін-тунельні магніторезистивні датчики (СТМР).

Магніторезистори на ефекті Гауса. Ефект Гаусса полягає в зміні електричного опору магніточутливого матеріалу внаслідок викривлення траєкторії руху носіїв заряду під дією зовнішнього магнітного поля. При приміщенні магніточутливого матеріалу в магнітне поле його опір збільшиться.

Більшість магніторезисторів на ефекті Гауса дозволяють вимірювати постійні і змінні магнітні поля до 1 МГц в діапазоні від 1 мТл до 1 Тл при

розсіюється до 1 Вт в діапазоні робочих температур від -40ºС до +110ºС. Температурний коефіцієнт чутливості типового датчика на ефекті Гауса варіюється в межах 2% / °С – 0,02% / °С [14].

Перевагами магніторезисторів на ефекті Гауса є малі габарити і низька вартість.

Недоліками магніторезисторів на ефекті Гауса є низька чутливість, нелінійність характеристики перетворення, висока залежність від температури, зміна чутливості магніторезистивного елемента при зміні кута між вектором магнітної індукції і площиною елемента, досить велика розсіювальна потужність.

Анізотропні магніторезистивні датчики (АМР). АМР датчики основані на анізотропному магніторезистивному ефекті, який є прямим наслідком спін-орбітальної взаємодії в феромагнітних провідниках і полягає в зміні електричного опору феромагнітного провідника залежно від зміни кута α між струмом, що протікає I і вектором намагніченості М. Принцип анізотропного магніторезистивного ефекту показаний на рисунку 1.2.

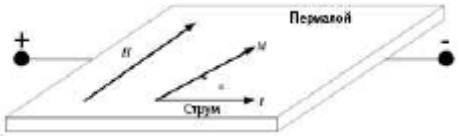


Рисунок 1.2 – Принцип анізотропного магніторизестивного ефекту

Зовнішнє магнітне поле Н повертає вектор намагніченості М на кут α і змінює електричний опір відповідно до вираження (виразу) [10]:

$$R_0 = R + \Delta R \cos 2, \qquad (1.1)$$

де R_0 – базовий опір АМР-датчика, Ом;

R – максимальна зміна опору, Ом.

З формули (1) випливає, що кутку α = 90° відповідає мінімальний опір, а кутку α = 0° (за відсутністю магнітного поля) – максимальне значення

опору, що дорівнює базовому опору R_0, до якого додається максимальний опір R, що становить від 2% до 3% від базового.

З формули (1) випливає також, що залежність опору від величини вимірюваного магнітного поля носить нелінійний характер. Для вирішення цієї проблеми в АМР-датчиках використовують структуру, в якій алюмінієві смуги напилюють на пермалой під кутом 45º, тим самим змінюючи напрямок струму на 45º і наближаючи функцію перетворення до лінійної.

Більшість АМР-датчиків дозволяють вимірювати постійні і змінні магнітні поля до частот близько 10 МГц в діапазоні від 10 нТл до 1 мТл, рівень власних шумів на рівні 10 нТл/√Гц, споживана потужність від 0,1 до 0,5 мВт, нелінійність функції перетворення на рівні 0,1%. АМР можуть працювати в діапазоні температур від -55ºС до +200ºС [10].

Температурний коефіцієнт чутливості типового АМР-датчика складає від 0,25%/°С до 0,01%/°С. Температурний коефіцієнт зміщення становить близько 10 нТл/°С, і варіюється навіть між екземплярами датчиків однієї партії [13].

Для підвищення точності вимірювання магнітного поля АМР-датчик включають по мостовій схемі і застосовують зворотний зв'язок для компенсації вимірюваного магнітного поля. Для цього в АМР-датчики вбудовують плоску котушку зворотного зв'язку. Такий підхід дозволяє підвищити поріг чутливості і лінійність, але при цьому значно звужується частотний діапазон.

Вихідна напруга U в АМР-датчиках залежить не тільки від вимірюваної компоненти вектора магнітної індукції Вх, але і від компоненти Ву, перпендикулярної напряму вимірювання. Для компенсації похибки від поперечного поля застосовують різні способи, наприклад, магнітну зворотний зв'язок, одночасне вимірювання двох або трьох компонент вектора магнітної індукції з подальшою цифровою обробкою та ін. Проте, для реалізації прецизійних способів компенсації необхідні складні аналого-цифрові схеми, які мають як високе енергоспоживання, так і тепловиділення.

Прості схемні рішення знижують чутливість датчиків і збільшити рівень шумів [13- 15].

Розвитку АМР-датчиків сприяла необхідність замінити індуктивні головки зчитування інформації у жорстких дисках. У цій якості пізніше вони були замінені ГМР- і СТМР-датчиками, оскільки ті володіють більш високою щільністю зберігання інформації завдяки меншим розмірам.

Перевагами АМР-датчиків є наявність осі чутливості, довгий термін служби і незалежність від магнітного дрейфу. Вони володіють (мають) невеликими розмірами, наприклад датчик компанії Honeywell HMC1021S має розміри 5×4×2 мм, можуть працювати в широкому діапазоні температур, мають низьке енергоспоживання і відносно дешеві.

До недоліків АМР-датчиків слід віднести низьку порогову чутливість і високий рівень шуму. Крім того, магніторезистивні датчики володіють великим виділенням тепла, пов'язаним з розсіюванням енергії в резистивном елементі.

Гігантські магніторезистивні датчики (ГМР). ГМР-датчики засновані на гігантському магніторезистивному ефекті (квантово-механічний ефект), що спостерігається в тонких металевих плівках та складаються із феромагнітних і провідних немагнітних шарів. Ефект полягає в істотній зміні електричного опору такої структури при зміні взаємного напряму намагніченості сусідніх магнітних шарів, як показано на рисунку 1.3.

Основним механізмом виникнення ГМР-ефекту є спін-залежне розсіювання електронів провідності. У ферромагнетиці електрони з одним напрямком спина розсіюються набагато сильніше, ніж електрони з протилежним напрямком (виділений напрям задає намагніченість зразка). Виходячи з одного феромагнітного шару, електрони потрапляють в інший, зберігаючи свою поляризацію. Таким чином, в разі паралельної намагніченості шарів опору, які розсіюються менше, проходять усю структуру без розсіювання; а носії протилежної поляризації відчувають сильне розсіювання в кожному з магнітних шарів. У разі ж антипаралельної

намагніченості шарів, носії обох поляризацій відчувають сильне розсіювання в одних шарах і слабке в інших. Отже, при паралельній намагніченості шарів опір, як правило, низький, а при антипаралельній – високий. В якості елемента на основі ефекту ГМР як правило використовується структура, що отримала назву спіновий клапан (spinvalve). У ній один з магнітних шарів нанесений на шар антиферомагнетика. Завдяки обмінній взаємодії між електронами феромагнетика і антиферомагнетика спини в цих двох шарах стають жорстко пов'язаними між собою.

ГМР-датчики характеризуються малими розмірами і великою зміною опору під впливом магнітної індукції, ніж АМР-датчики. У той час як зміна опору АМР-датчика не перевищує 3%, ГМР-матеріали забезпечують зміну від 10% до 20%. Крім цього, ГМР-датчики виготовляються за технологією, розробленою для виробництва напівпровідників, що зменшує собівартість датчиків. Сьогодні кращі ГМР-датчики здатні вимірювати поля від 10 нТл до 0,1 Тл.

Фірма Hitachi розробила ГМР-датчики з поліпшеною температурною стабільністю. У цих датчиків в діапазоні температур від -40° С до +120°С чутливість змінюється всього на 20%, крім того, вони здатні працювати при температурі 250°С протягом 30 хвилин [13 - 15].

Перевагами ГМР-датчиків є велика щільність інтеграції, внаслідок чого досягається висока роздільна здатність при розпізнаванні близько розташованих один до одного магнітних мікрооб'єктів (зокрема, бітів на магнітних носіях), висока швидкодія і низьке енергоспоживання.

До недоліків можна віднести те, що діаграма спрямованості має деформацію, при цьому сильні магнітні поля, особливо при високих температурах, здатні зруйнувати спину клапан через зміни в намагніченості з'єднувального шару. Така небезпека не загрожує АМР-датчикам [13 - 15].

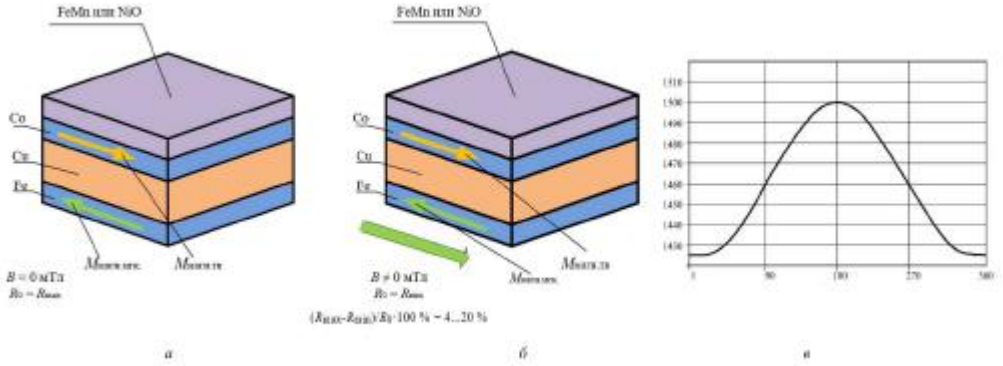


Рисунок 1.3 – Принцип гігантського магніторезистивного ефекту: а – антипаралельними напрямок векторів намагніченості приколоти і регульованого шарів (кут α ≥ 180°) – стан з максимальним опором; б – паралельне стан шарів (кут α ≥ 0) – стан з мінімальним опором; в – графік залежності опору від напрямку прикладеного поля (кута α між рухомим і рухомим шарами)

1.3.3 Спін-тунельні магніторезистивні датчики (CTMP)

Спін-тунельні магніторезистивні датчики (CTMP). CTMP-датчики засновані на спінтунельному магніторезистивному ефекті, який аналогічний гігантському магніторезистивному ефекту, де замість немагнітного металу феромагнітні шари розділені шаром діелектрика. Якщо шар діелектрика досить тонкий, проявляється тунельний ефект. Імовірність тунелювання електрона через потенційний бар'єр сильно залежить від взаємної орієнтації намагніченостей шарів, тому в англомовній літературі цей ефект називається «spindependent tunneling» (SDT) [14, 15].

Виміряний опір обернено пропорційний ймовірності тунелювання через тонкий ізолюючий бар'єр [14, 15]. Для аморфного ізолюючого шару Al2O3 відносна зміна опору досягає 70% при кімнатній температурі. Ще більш перспективним є бар'єр у вигляді монокристалічного шару MgO, який дозволяє досягти значень зміни опір до 600% при кімнатній температурі. Завдяки високому опору CTMP-датчики мають менше енергоспоживання, ніж ГМР-датчики. Однак, проблемою CTMP-датчиків залишається висока

коерцитивна сила і нелінійність. Так цифровий магнітометр з СТМР-датчиком, має розширення 1 мкТл і лінійний діапазон вище 1 мТл [13 - 15].

Перевагами СТМР-датчиків є малі габарити і, отже, висока просторова роздільна здатність, низьке енергоспоживання, можливість роботи в широкому діапазоні температур, довговічність, низька вартість [13 - 15].

До недоліків СТМР-датчиків відносяться невисока чутливість, нелінійність в широкому діапазоні вимірювань, високий рівень шуму і тепловиділення.

Конструкція MEMS-перемикача MS1. Магнітоуправляємий мікроперемикач, виготовлений на основі MEMS-технології, має всі переваги MEMS-пристроїв: мініатюрність, простота виготовлення, можливість інтеграції в мікроелектронні схеми і невисока вартість при великосерійному виробництві.

Мікроперемикач MS1 складається з виконавчого механізму і електричних контактів, укладених в герметичний кремнієвий корпус (рисунок 1.4). Кремнієвий корпус приладу включає в себе кремнієву підкладку, на якій розташований виконавчий механізм і кремнієвий ковпачок. Виконавчий механізм складається з рухомої феромагнітної пластини (якоря) з магнітомягкого гальванічного сплаву FeNi (Ni 80%, Fe 20%) товщиною 8 мікрон, прикріпленою за допомогою гнучких торсіонних важелів до кремнієвої підкладки, попередньо вкритої ізолюючим шаром. Феромагнітна пластина містить рухливий електричний контакт 1, покритий шаром рутенію, який має товщину близько 100 нм. Використання нанорозмірного рутенієвого покриття дозволяє істотно збільшити ресурс роботи комутатора (за критерієм залипання контактів) в порівнянні з золотими контактами без покриття. На ізоляційній підкладці також розташовані нерухомий електричний контакт 2 з аналогічним рутенієвим нанопокриттям і провідники із золота товщиною 1 мкм. Підкладка і ковпачок з'єднані герметизирующим кільцем. У кремнієвому SMD-корпусі (для поверхневого монтажу) виконані наскрізні струмопровідні канали (TSV), що

з'єднуються з контактними майданчиками для поверхневого монтажу (SMT), виконаними з евтектичного сплаву AuSnCu [14, 15].

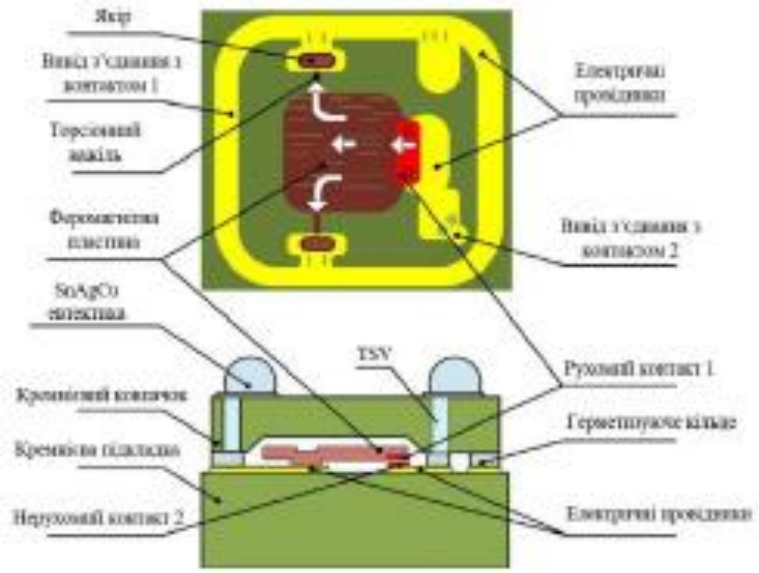


Рисунок 1.4 – Конструкція MEMS-перемикача MS1

Принцип роботи MEMS-перемикача MS1 істотно відрізняється від принципу роботи герконів і датчиків Холла. Замикання і розмикання контактів MS1 відбувається за рахунок переорієнтації феромагнітної пластини датчика уздовж ліній зовнішнього магнітного поля. Отже, стан перемикача визначається лінією орієнтації магнітного поля, а не тільки його силою, як у випадку з герконом або датчиком Холла. Тому для стабільної роботи перемикач повинен завжди перебувати під впливом магнітного поля. На рисунку 1.5 представлена схематична ілюстрація роботи приладу.

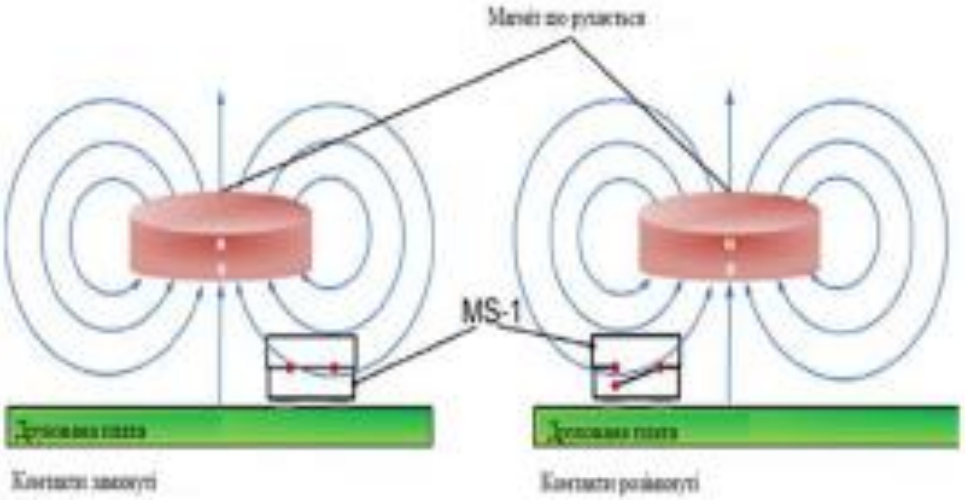


Рисунок 1.5 – Схематична ілюстрація роботи мікроперемикача

Видно, що при переміщенні постійного магніту щодо перемикача змінюється напрямок ліній магнітного поля всередині датчика, і контактна феромагнітна пластина, закріплена на гнучких торсіонних важелях, повертається, замикаючи або розмикаючи контакти. Комутація контактів відбувається в точці перетину медіаною магніта центру перемикача.

Нанорозмірне покриття контактів MEMS-комутатора MS-1. Ресурс роботи і експлуатаційні характеристики (перш за все, опір в замкнутому стані) будь-яких комутаційних приладів, включаючи MEMS-комутатори, в основі конструкції яких лежить «сухий контакт», визначаються властивостями контактного покриття. З метою підвищення ресурсу роботи і зниження контактного опору в MEMS комутаторах MS-1, в якості контактного покриття використовується шар рутеніютовщиною 100 нм, що формується з використанням PVD-технології, що дозволяє отримати високу ступінь хімічної чистоти і гладкості покриття. Обрана товщина рутенієвого покриття рівна 100 нанометрів, виходячи з вимог досягнення балансу між ерозійною стійкістю (зростає зі збільшенням товщини) і напругою покриття (чим тонше, тим менше внутрішньої напруги, велика товщина контактного покриття може стати причиною виходу MEMS-комутатора з ладу через відшаровування покриття при комутації великих струмів).

Перед початком випробувань всі MEMS комутатори мали електричний опір в замкнутому стані менше 1 Ом. Використовувався режим гарячої комутації (напруга, що комутується 3 В, струм 10 μА, резистивне навантаження, частота комутації 100 Гц). Випробування завершувалися після 100 млн циклів комутацій. Всі випробувані MEMS-комутатори (20 штук) в ланцюг включалися однаковим чином, при якому на рухливий контакт підводився позитивний потенціал, а на нерухомий – негативний.

1.4 Напівпровідникові СКВІД-магнітометри

Назва СКВІД, яка затвердилась в нашій технічній і науковій літературі, походить від англійської абревіатури SQUID (Super-conductive Quantum Interference Device) [16 - 18]. Ці прості по конструкції пристрої відкрили нові надзвичайно важливі можливості у техніці низькотемпературних вимірювань. Існує чимало способів вимірювання магнітних полів, у тому числі магніторезистивні, на ефекті Хола, магнітооптичні з оптичною накачкою. Чутливість таких магнітометрів знаходиться в діапазоні мікро тесла до піко тесла. Але чутливість СКВІД магнітометрів дає змогу вимірювати магнітні поля до 10-17 Тл. І не тільки магнітні поля. Будь-які фізичні величини, які можна перетворити в магнітний потік теж вимірюються з величиною роздільною здатністю й чутливістю. Наприклад, напруги до 10-15 В, струми до 10-11 А. Можна створювати і інші унікальні по чутливості прилади перед підсилювачі струму для кріогенних радіаційних детекторів, таких як надпровідникові тунельні переходи або болометри. Неперервно розширюються області застосування СКВІДів. Це фізика, астрономія, археологія, геофізика, медицина [19]. Для кожного із цих застосувань створені унікальні СКВІД системи. Хоча варто відмітити, що на широкий ринок всупереч передбаченням СКВІДи іще не вийшли. По своїй енергетичній чутливості СКВІД упритул підійшов до квантової межі $\hbar$=6,63x10-34 Дж, тобто максимальної чутливості, яку можна отримати у будь-якій квантово-механічній системі у відповідності з принципом невизначеності Гейзенберга. Є повна впевненість, що не існує інших технологій, які б забезпечували таку надвисоку чутливість [16 - 18].

В основі роботи СКВІДа є поєднання явища квантування магнітного потоку у надпровідному контурі і стаціонарного ефекту Джозефсона. Ефект Джозефсона проявляється, наприклад, у тунельному переході, що

складається із двох надпровідних плівок, розділених тонким шаром діалектрика – ізоляційним бар`єром (до 50 нм). Тоді у рідкому гелії, коли металеві плівки стають надпровідними, через нього можуть без опору і перешкод тунелювати куперівські пари електронів, які є носіями надпровідного струму. Тобто, коли струм через бар`єр не перевищує певного критичного значення Ic, напруга на тунельному контакті відсутня. Існує два основних типи СКВІДів: високочастотний (ВЧ) з одним джозефсонівським переходом і СКВІД постійного струму (ПС) з двома джозефсонівськими переходами [20, 21]. На рисунку 1.6 представлена СКВІД система з двома паралельно включеними переходами Джозефсона [20,21].

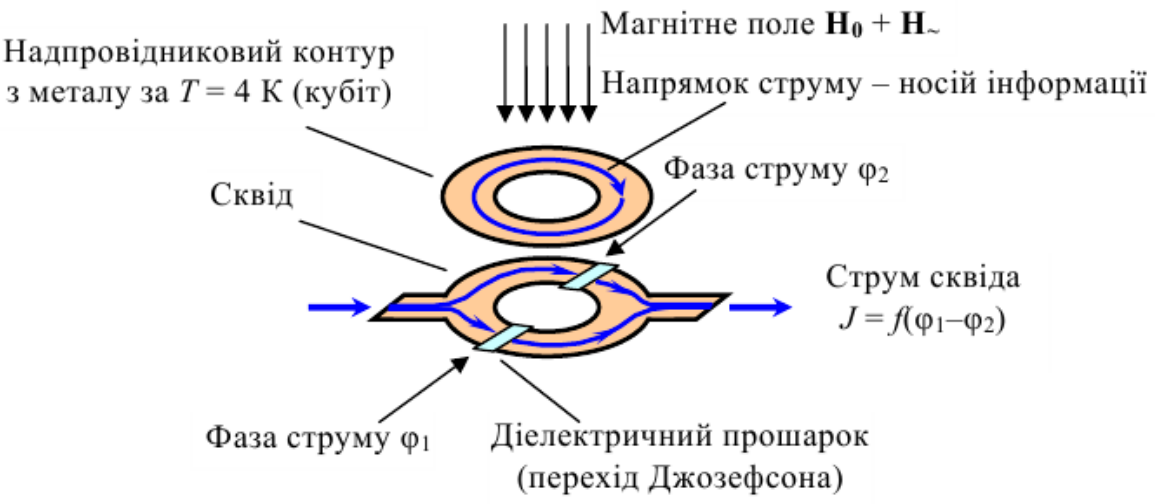


Рисунок 1.6 - СКВІД система з двома паралельно включеними переходами Джозефсона.

Практичне використання подібних пристроїв все більше знаходить у створенні новітніх інформаційних систем - квантових комп’ютерів [13 - 15].

Тому, метою роботи є розробка реєстратора індукційного струму малої потужності.

Для досягнення поставленої мети необхідно було виконати наступні завдання:

1) провести аналіз існуючих методів реєстрації індукційних струмів малої потужності;

2) розробити структурну схему пристрою реєстрації індукційних струмів малої потужності на основі СКВІД магнітометра;

3) розробити електричні схеми основних апаратурних блоків пристрою;

4) провести моделювання роботи електричних схем пристрою за допомогою сучасних САПР;

5) розробити заходи по умовам дотримання техніки безпеки та охорони праці робіт, що планується здійснити.

2. Розробка реєстратора індукційного струму малої потужності

2.1 Структурна схема реєстратора

2.1.1 Індукційний струм – основна складова квантових інформаційних систем

У сучасних інформаційних системах інформація кодується просторово-часовою послідовністю двох станів середовища. У деякий момент часу існує траєкторія, складена з відрізків, на яких спостерігається один із двох станів середовища. Таку траєкторію можна простежити і в космічному вакуумі, й в електричному або волоконно-оптичному кабелі, й на магнітному або оптичному диску. Цифровий сигнал на приймачі інформації виникає і під час руху бінарно промодульованих електромагнітної хвилі або зарядів відносно приймача, і під час руху приймача відносно середовища з просторово промодульованим станом (за умови електромагнітного зв'язку між ними). У квантових системах з двома базисними станами аналогом біта є кубіт (англ. quantum bit – квантовий біт) – цифра, яка може мати будь-яке значення між 0 та 1; кубітом також називають фізичний елемент, стан якого може набувати таких значень [22,23].

Перший прототип квантового комп'ютера, Orion, був продемонстрований канадською фірмою D-Wave Systems [24]. Orion містив 16 кубітів, що забезпечувало паралельну обробку 2^{16} обчислювальних потоків. Якщо фірмі вдасться створити комп'ютер з 512 кубітами, то це означатиме паралелізм у 2^{512} обчислювальні потоки (для порівняння: кількість частинок у видимому Всесвіті становить приблизно 10^{80} або 2^{270}).

Одним із варіантів фізичної реалізації кубіта є потоковий кубіт – контур з надпровідникового матеріалу (наприклад, ніобію) розміром у декілька мікрометрів з двома вбудованими переходами Джозефсона, тобто

шарами діелектрика товщиною 1 нм, між надпровідниками. У потоковому кубіті використовується стаціонарний ефект Джозефсона – протікання струму через діелектрик, яке завдяки тунельному ефекту не супроводжується падінням на діелектрику напруги. Після припинення дії на контур магнітного поля у контурі продовжує протікати джозефсонівський струм, причому з експериментів видно, що цей струм може існувати у контурі протягом багатьох років. Струм у контурі своїм магнітним полем екранує прикладене зовнішнє магнітне поле, обмежуючи його величиною mh/2e, де m – натуральне число. Струму у контурі з певним напрямком протікання і відповідно певним енергетичним рівнем контура може відповідати лише ціле число квантів магнітного потоку, кожен з яких має величину h/2e Якщо через контур пропустити магнітний потік, величина якого відповідає півцілому числу квантів магнітного потоку (m/2)h/2e то енергетичні рівні контура зближаються, утворюючи рівні базисні стани E_1 та E_2. Прикладання до контура надвисокочастотного електромагнітного поля з енергією квантів $h\nu=E_1-E_2$ у контурі створює квантову суперпозицію базисних станів $a|E_1> +b|E_2>$ і 2 контур починає працювати як кубіт. Для отримання потрібних для обчислювальних операцій імовірностей $|a|^2|b|^2$ на контур діють імпульсами надвисокочастотного поля [23-26].

Зчитування інформації з квантових регістрів може здійснюватися декількома методами. Так, в одному з методів зчитування стану потокового кубіта використовується контур сквіда, індуктивно пов’язаний з контуром кубіта. Сквід (англ. SQUID, Superconducting Quantum Interference Device – надпровідниковий квантовий інтерференційний пристрій) – це дуже чутливий магнітометр, який дає змогу вимірювати магнітні поля до 10^{-18} Тл. У ньому також використовується надпровідниковий контур з двома паралельно включеними переходами Джозефсона (рис. 1.6) [20,21].

2.1.2 Фізична модель реєстратора індукційного струму малої потужності

Для складання фізичної моделі пристрою використаємо систему двох контактів Джозефсона на постіному струмі. У результаті отримаємо СКВІД постійного струму (ПС СКВІД). Такий СКВІД має більшу чутливість [27]. Еквівалентна схема такої системи представлена на рисунку 2.1.

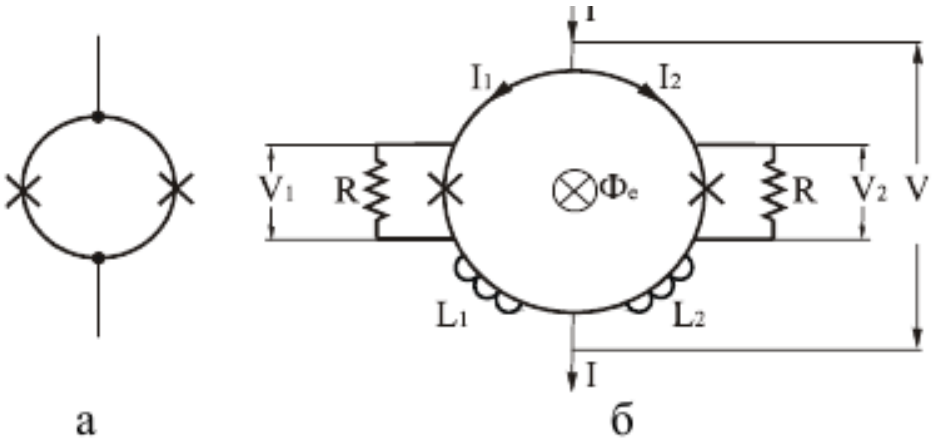


Рисунок 2.1 - Еквівалентна схема двоконтактного ПС СКВІД: а) СКВІД постійного струму, б) еквівалентна схема

При подачі на СКВІД постійного струму живлення в його гілках установлюються струми I_1 і I_2, такі що[27, 28]

$$I = I_1 + I_2 \qquad (2.1)$$

На струми I_1 і I_2 накладається циркулюючий у кільці СКВІДа струм Іц, величина якого визначається як [27, 28]

$$I_ц=(I_1-I_2)/2 \qquad (2.2)$$

Приймаємо, що обидва джозефсонівські контакти однакові, тоді [27, 28]

$$I_1 = I_c \sin(\varphi_1) + \frac{V_1}{R}, \qquad (2.3)$$

$$I_2 = I_c \sin(\varphi_2) + \frac{V_2}{R}, \qquad (2.4)$$

де ϕ1 і ϕ2 різниці фаз на джозефсонівських контактах [27, 28], причому

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{2e}{h} V_1, \qquad (2.5)$$

$$\frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{2e}{h} V_2, \qquad (2.6)$$

Конструктивно кільце СКВІДа виконується таким чином, що взаємоіндуктивностю між гілками порівняно з їх самоіндукціями L1 I L2 можна знехтувати. Тоді напруга V на СКВІДі дорівнюватиме

$$V=V_1+L_1 dI_1/dt= V_2+L_2 dI_2/dt\ . \qquad (2.7)$$

Звідси, результуюча напруга індукційного струму реєстратора дорівнює [27, 28]:

$$V=\frac{h}{4e}\left(\frac{d\varphi_1}{dt}+\frac{d\varphi_2}{dt}\right), \qquad (2.8)$$

На підставі розрахункової моделі та загальних принципів реєстрації струмів за допомогою контактів Джозефсона складаємо структурну схему реєстратора. Структурна схема реєстратора індукційного струму малої потужності представлена на рисунку 2.2.

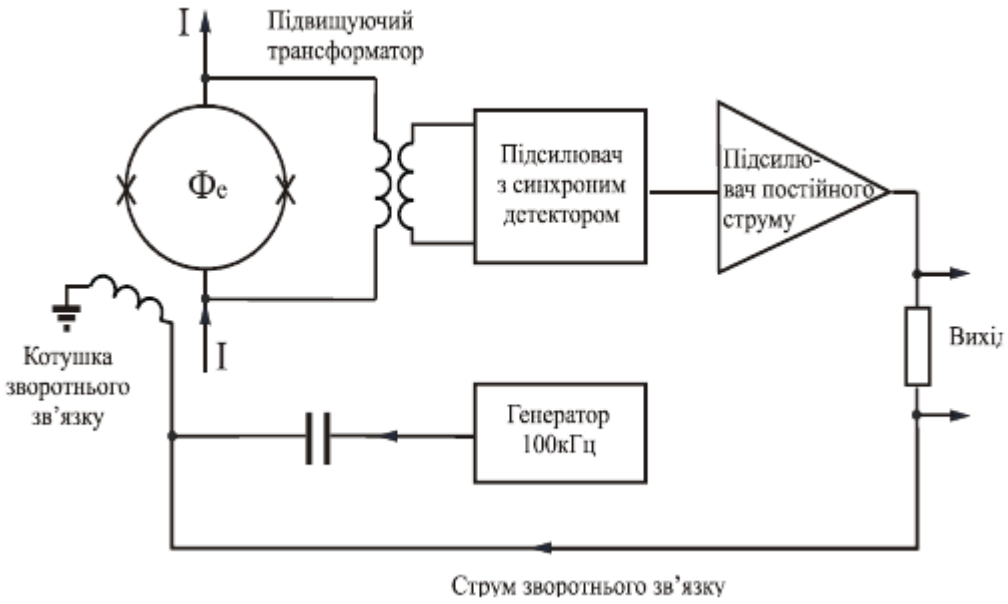


Рисунок 2.2 – Структурна схема реєстратора індукційного струму малої потужності

Залежність напруги V від вхідного потоку в схемі магнітометра на рис. 2.2, називається сигнальною характеристикою. Ця характеристика є нелінійною. Щоб забезпечити лінеаризацію залежності вихідної напруги від магнітного потоку, використовується негативний зворотній зв'язок (НЗЗ). Для цього через котушку НЗЗ, яка показана в лівій частині схеми, подається струм пропорційний вихідній напрузі, і змінний струм модуляції з частотою біля 100 кГц. Перший із них компенсує магнітний потік, що вимірюється, а другий використовується для вузько смугового синхронного детектування. Таким чином, вихідний сигнал пропорційний струму зворотного зв`язку і отже магнітному потоку, потрібному для компенсації потоку, що вимірюється.

Підсилювач з синхронним детектором вимірює компоненту коливань з частотою 100 кГц і забезпечує вихідний сигнал, який подається назад у СКВІД у протифазі таким чином, щоб звести сигнал з частотою 100 кГц до найменшого можливого рівня.

Струм, який подається назад в котушку зворотного зв`язку, є таким чином мірою зовнішнього магнітного потоку, який намагається змістити робочу точку.

2.2 Джозефсонівські контакти реєстратора індукційного струму малої потужності

У спрощеному вигляді структурна схема апаратури для відтворення ефекту Джозефсона і передачі його розміру мірам ЕРС на нормальних елементах або твердотільних мірах наведена на рис. 2.3. До її складу входять такі основні системи [29, 30]:

Кріогенна система, яка включає в себе контакти Джозефсона (КД), що монтуються на спеціальній платі кріогенного зонда, за допомогою якого плата з КД занурюється у кріогенне середовище (рідкий гелій). Крім того, зонд містить хвилевід, за допомогою якого на плату з КД подається НВЧ-опромінення [29, 30].

Кріогенне середовище створюється в спеціальній посудині великої ємності (40–80 л), яка одержала назву посудини Дьюара. Система включає також провідники, за допомогою яких підводиться напруга зміщення до КД та відводиться створена джозефсонівська напруга [29, 30].

Джерело НВЧ опромінювання, яке містить НВЧ-генератор необхідної частоти і потужності, систему автоматичного підстроювання частоти, джерелом опорного сигналу для якої служить еталон частоти, а також прецизійний вимірювач частоти опромінення f [29, 30].

Блок керування, який складається з джерела напруги зміщення U_0 для КД, а також з приладу візуального контролю ВАХ (осцилографічного характеріографа).

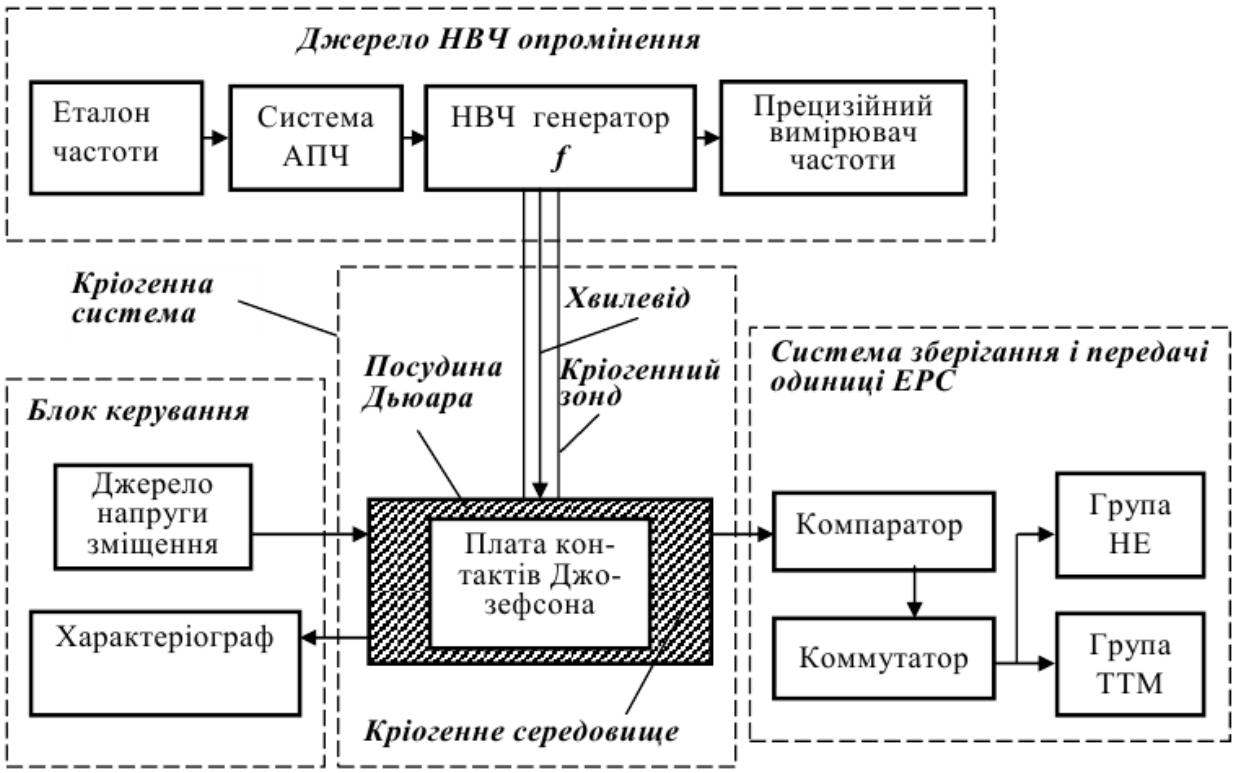


Рисунок 2.3 – Апаратура для відтворення напруги на основі ефекту Джозефсона

Вимірювальна система, що складається з компаратора напруг джерела U_j і мір напруги, яким передається розмір «джозефсонівського вольта», а також комутуючого пристрою [29, 30].

Система реєстрації і передачі одиниці ЕРС, яка складається з компаратора напруг джерела U_J і мір напруги, яким передається розмір «джозефсонівського вольта» (нормальні елементи та твердотільні міри ЕРС). До складу цієї системи входить також спеціальний комутатор [29, 30].

Низьке значення відтвореної джозефсонівської напруги змушувало включати до складу компаратора масштабні перетворювачі напруги різної конструкції (подільники).Це призводило до значної втрати точності. Однак надалі були створені інтегральні схеми (матриці), що включали до себе кілька тисяч послідовно з’єднаних контактів Джозефсона. Такі матриці дозволяють відтворювати безпосередньо напругу в 1 В і більше при частоті f ~ 70 ГГц. Створення матриць було великим технологічним проривом, який забезпечив широке впровадження ефекту Джозефсона в метрологічну

практику. Додамо, що роботи з удосконалення джозефсонівських матриць продовжуються. На сьогодні вже створено матриці типу SNS (надпровідник – но-рмальний метал − надпровідник), а також SINIS (надпровідник – ізолятор − нормальний метал − ізолятор − надпровідник), які дозволили одержати на пругу вище 10 В при надійній роботі. Технологія виготовлення таких інтегральних схем дуже складна, нею володіють лише деякі країни (особливо це стосується 10-вольтових матриць). Зовнішній вигляд матриці наведено на рисунку 2. 4 [29, 30].

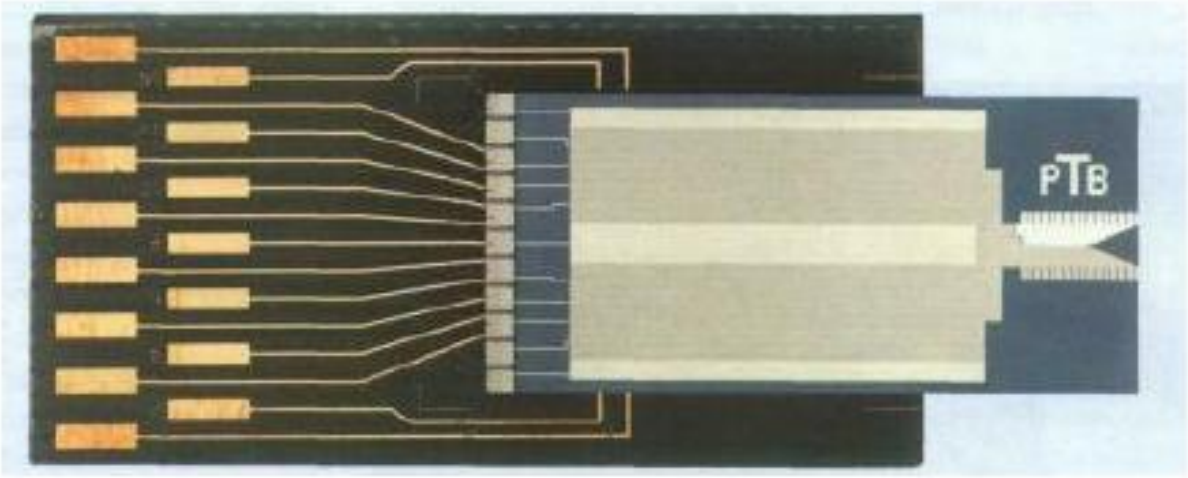


Рисунок 2.4 - Зовнішній вигляд матриці Джозефсона , розмір 17×10 мм

Були розроблені спеціальні високочутливі нановольтметри для вимірювання різниці між напругою, що створюється матрицями КД, і вимірювальною апаратурою [29, 30].

Треба також зазначити, що у структуру схеми повинні входити дуже важливі додаткові пристрої і системи, що істотно впливають на метрологічні характеристики: фільтри електричних і магнітних завад у складі кріозонда, система екранування приміщення від зовнішніх електромагнітних завад, системи термостатування, заземлення, гідроізоляції, високоякісного енергопостачання [29, 30].

Отже, на етапі створення реєструючої системи перед нами постає завдання забезпечити точну фіксацію малих напруг із подальшим їх

підсиленням, відповідною цифровою обробкою і відтворенням на пристрої індикації, або за допомогою персонального комп'ютера (ПК).

2.3 Функціональні блоки реєструючої системи індукційного струму малої потужності

2.3.1 Генератор струму модуляції сигнальної характеристики

Принципова схема генератора НЧ струму модуляції показана на рисунку 2.5. Схема побудована на операційному підсилювачі А1. Це генератор синусоїдального сигналу, що перебудовується по частоті здвоєним змінним резистором R17 у чотирьох діапазонах генерації частоти 10-100 кГц, 1-10 кГц, 100-1000 Гц, 10-100 Гц [31-33].

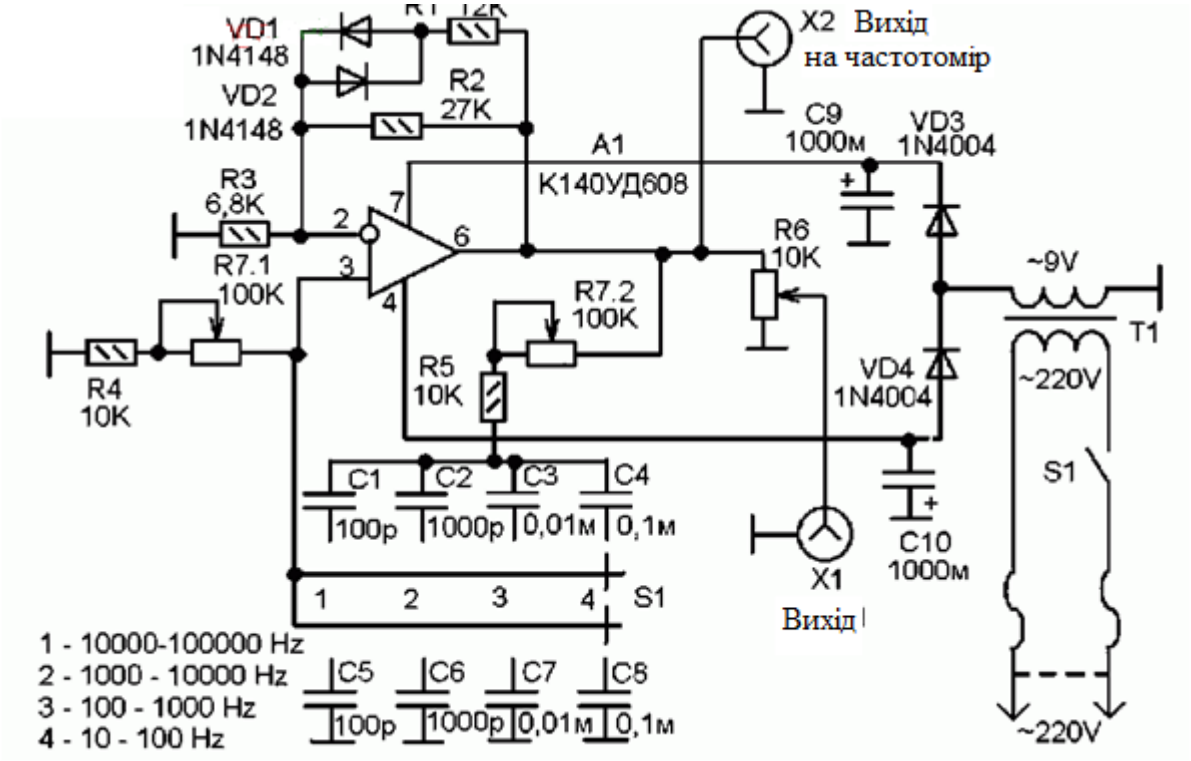


Рисунок 2.5. Принципова схема генератора низької частоти на мікросхемі К140УД608 [31-33].

Схема побудована з мостом Вінна в ланцюзі позитивного зворотного зв'язку операційного підсилювача. Здвоєний змінний резистор регулює R-складову цього мосту. С-складова складається з восьми конденсаторів С1-С8, що перемикаються галетним перемикачем S1 при зміні діапазону генерації. А стабілізація коефіцієнта передачі ОУ виконується ланцюгом ООС підсилювача за допомогою зустрічно-паралельно включених діодів VD1, VD2 і резистора R1. Підбором опору цього резистора при налагодженні генератора виставляється правильна синусоїда на виході генератора (з мінімальними спотвореннями). З виходу операційного підсилювача сигнал, що генерується, надходить на два виходи - роз'єми X1 і X2. Основним виходом, з якого сигнал подають досліджувану схему, є роз'єм X1. Величину напруги НЧ у ньому можна регулювати змінним резистором R6. І, за потреби, доповнити ще й дільником на резисторах [31-33].

Другий вихід на роз'єм X2 служить контролю частоти з допомогою зовнішнього самостійного частотомера. Цей вихід не регулюється амплітудою сигналу. Операційний підсилювач живиться двополярною напругою близько +12V. Для отримання цієї напруги використовується малопотужний силовий трансформатор Т1. Він при включенні первинної обмотки в мережу 220V на вторинній видає на холостому ході змінну напругу 9 В. Обмотка одна, і для одержання двох однакових за модулем, але різних за значенням напруг використовується схема випрямляча на двох діодах VD3 і VD4 та двох конденсаторах С9 та С10. Фактично, це два різні однонапівперіодні випрямлячі, що отримують змінну напругу від одного джерела, - вторинної обмотки трансформатора Т1. Діод VD3 випрямляє позитивну напівхвилю, а діод VD4 – негативну. Так як в електромережі змінна напруга синусоїдальна та напівхвилі симетричні, то на конденсаторах С9 і С10 виділяються рівні за модулем напруги, але протилежні за полярністю. Ось цією двополярною напругою і живиться операційний підсилювач [31-33].

Усі конденсатори повинні бути на напругу не нижче 16V. Операційний підсилювач К140УД608 можна замінити практично будь-яким операційним підсилювачем загального призначення, наприклад, К140УД6, К140УД7, К140УД708 та ін, включаючи закордонні аналоги. Монтаж виконується із використанням друкованої плати [31-33].

2.3.2 Канал підсилення із синхронним детектором

У базових пристроях підсилювачів слабких струмів із синхронним детектором використовувались схеми, аналогічні, представленій на рисунку 2.6 [31-34].

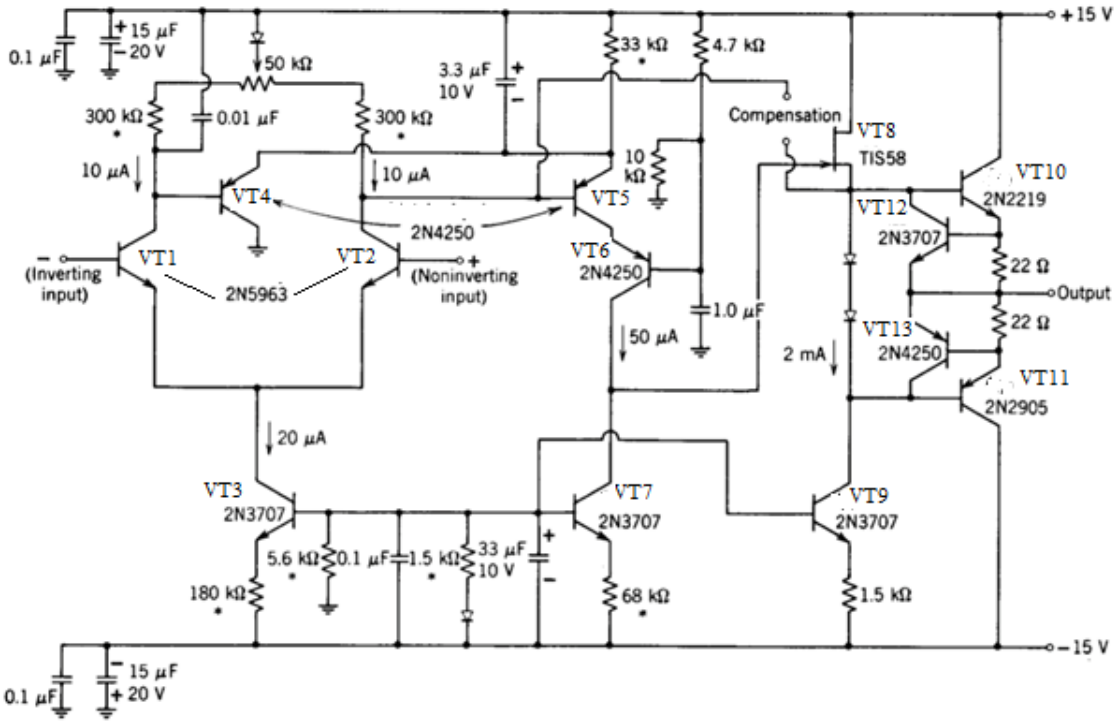


Рисунок 2.6 – Схема диференціального підсилювача із синхронним детектором

Схема являє собою модифікацію основного підсилювача, який поєднує в собі диференціальний підсилювач, що включає кілька методів мінімізації дрейфу з високим коефіцієнтом посилення, що складається з підсилювача каскаду, завантаженого джерелом струму. Буферний підсилювач одиниці-напруга-посилення ізолює вузол високого опору на виході підсилювача

каскаду і забезпечує високу потужність вихідного приводу струму. Підсилювач призначений для забезпечення±10 В максимального вихідного сигналу і роботи від стандартних±15 В джерел живлення. Напруги живлення обидва реалізовані паралельним поєднанням електролітичного і керамічного конденсатора, так як ця комбінація ефективна в широкому діапазоні частот [31-34]..

Із самої схеми видно, що транзистори VT1 і VT2 є диференціально-підсилювачем вхідного каскаду. Топологія другого ступеня обмежує емітерне з'єднання VT4−VT5 пари. Таким чином,VT6 формує підсилювач каскаду. Цей каскад, завантажений джерелом струму, забезпечує найбільшу частку посилення підсилювача, з аналізом, який повинен бути представлений, вказуючи на посилення напруги на 180,000 у цій частині схеми [31-34]..

Вузол високого опору на виході підсилювача каскаду ізольований з підключеним джерелом VT8. Повторювач джерела приводить в дію VT10 і VT11, які з'єднані як додатковий емітер повторювача.

Наведений вище аналіз показує, що шлях сигналу включає в себе тільки транзистори VT1,VT2,VT5,VT6,VT8,VT10,VT11. Решта транзисторів використовуються або як джерела струму (VT3,VT9,VT7), або для зменшення дрейфу напруги, що відноситься до входу шляхом формування диференціального другого каскаду на VT4, або для обмеження вихідного струму (VT12 і VT13) [31-34].

Після вибору топології схеми рішення щодо приблизних рівнів зміщення струму є необхідним першим кроком у детальному процесі проектування. Низькі рівні струму дають покращену продуктивність постійного стркму, оскільки вхідні струми та самонагрівання вхідного каскаду зменшуються. Однак частотна характеристика підсилювача знижується при роботі на малих струмах [31-34].

Для транзисторів першого каскаду був обраний компромісний колекторний струмовий рівень10 мкА, який може забезпечити відмінну

продуктивність постійного струму в поєднанні із замкнутим контуром частотної характеристики декількох МГц. ТранзисторVT3 є джерелом струму, який забезпечує20 мкА загальний струм спокою першого каскаду і забезпечує високий коефіцієнт відхилення синфазного режиму. Це джерело струму поділяє загальну мережу упередження з двома іншими джерелами струму. Мережа зміщення включає в себе діод, який забезпечує приблизну температурну компенсацію джерел струму, а також включає ємнісний обхід до негативного живлення. Обхід негативного живлення, а не до землі, є кращим в цьому випадку, оскільки він гарантує, що вихід джерела струму не залежить від високошвидкісних перехідних процесів на негативній лінії живлення.Диференціальний вхідний каскад являє собою узгоджену пару транзисторів 2N5963. Пристрої вибираються так, щоб напруга база-емітер відповідала в межах 3 мВ при рівних струмах колектора і, крім того, щоб коефіцієнт посилення струму збігався з точністю до 10% на рівні робочого струму. Вони монтуються в безпосередній тепловій близькості для зменшення температурних перепадів. Обгортання дроту навколо пари або кріплення їх у алюмінієвому блоці, просвердленому для прийняття транзисторів, покращує тепловий зв'язок. 2N5963 обраний тому, що він недорогий і забезпечує типовий коефіцієнт посилення струму 1100 при струмі колектора10 мкА. Результуючий струм зміщення, необхідний на будь-якому вході, приблизно10 нА без будь-якої форми компенсації струму. Компенсаційні методи можуть бути використані для зниження цього струму зміщення до меншого,ніж 1 нА ніж у діапазоні температур до 50°C [31-34].

Транзистори VT5 і VT6 є каскадом-підсилювачем транзисторів. Додатковий транзистор PNP, VT4, використовується для поліпшення продуктивності шляхом формування диференціального підсилювача з транзистором VT5. Хоча цей транзистор знижує дрейф, він ніяк не впливає на роботу VT5−VT6 пари. Видно, що на низьких частотах точка загального емітера пари VT4−VT5 поступово заземлена, оскільки лише диференціальні сигнали може бути застосований до цієї пари вхідним. Конденсатор має лише

незначний вплив на загальну продуктивність підсилювача, але ускладнює аналіз. Цей конденсатор включений через резистор33 кОм емітера Оскільки транзисторVT4 включений тільки для поліпшення продуктивності і не потрібен для посилення на будь-якій частоті, його базову схему можна обійти на помірних і високих частотах. Обхід страхує, щоVT1 працює як загальноколекторний каскад на цих частотах [31-34].

Підсилювач врівноважується зміною відносних значень резистора навантаження колектора на першому каскаді. Оскільки транзистори вхідного каскаду підібрані для максимального диференціалу напруги база-емітер 3 мВ при рівних колекторних струмах, відношення струмів колектора буде максимальне – 3 мВ (VT/kT)≃1.12e3mV(VT/kT)≃1.12 при рівних напругах база-емітер. Потенціометр 50 кОм, який дозволяє максимальне співвідношення колектор-резистор 1. 17:1, отже, є достатнім для балансування, навіть якщо існує деяка невідповідність базових струмів другого ступеня. Діод, що входить вVT1−VT2 колекторну схему, забезпечує ступінь компенсації зміни напруги база-емітер транзисторівVT4−VT5 з температурою з метою стабілізації їх струму спокою.Транзистори 2N4250, що використовуються на другому етапі підсилення, є одним із доступних типів PNP з найвищим коефіцієнтом посилення, з типовим коефіцієнтом посилення струму понад 300 при 50 мкА струмі колектора. Це посилення дозволяє п'ять до одного збільшити рівень спокою роботи між першим і другим каскадами без серйозної шкоди продуктивності дрейфу. Це також сприяє високому загальному посиленню підсилювача. Хоча не потрібно використовувати один і той же тип транзистора для обох членів пари підсилювача каскаду, 2N4250 також використовується в загальній базовій секції каскаду (VT6), оскільки він має високий K_I, тобото необхідну умову для посилення високої напруги. 2N3707, що використовується в якості навантаження джерела струму для каскаду, також вибирається частково через високий коефіцєнт посилення [31-34]..

Всі критичні резистори, пов'язані з першими двома етапами, є прецизійними типами металевої плівки. Вони є кращими, оскільки їх низькі температурні коефіцієнти зменшують дрейф напруги та через низькі шумові характеристики.

Польовий транзистор використовується для ізоляції високоімпедансного вузла на виході каскаду. Практично нескінченний вхідний опір транзистора покращує посилення напруги. Також досягається економічність компонентів, оскільки для ізоляції, ймовірно, буде потрібно додатковий етап посилення струму, якби використовувалися біполярні транзистори. Джерело струму використовується для зміщення FET напруги, так що струм зміщення не залежить від рівня вихідної напруги. Рівень спокою цього етапу обраний таким чином, щоб відповідати максимальним вимогам приводу для наступного етапу [31-34]..

Додаткова пара VT10−VT11 використовується для забезпечення великих позитивних або негативних вихідних струмів з мінімальним розсіюванням потужності спокою. На цій стадії використовуються транзистори з металевою банкою, а не з епоксидним корпусом для підвищення потужності. Два діоди, що входять в базову схему пари емітер-послідовник, зменшують перехресні спотворення, в той час як резистори виключають можливість теплового розбігу, що супроводжує це з'єднання [31-34]..

Транзистори VT12 і VT13 комбінуються з резисторами, щоб обмежити вихідний струм підсилювача приблизно30 мА. Ця схема обмежувача, яка по роботі схожа на діодний обмежувач, ідентична тій, яка часто використовується в інтегральних схемах. Розглянемо «обмежувальний процес, коли вихідна напруга підсилювача негативна. Якщо струм перевищує 25 30 мА, транзисторVT13 відкривається, так як його напруга база-емітер наближається до 600 мВ. Ця провідність зменшує базовий привід дл VT11. Струм, який повинен проводитися до VT13 для того, щоб виключити базовий приводVT11 є не більше 2 мА, і також євихідним рівнем

джерела струму VT9. Коли вихідна напруга підсилювача позитивна, транзистор VT12 відкривається для обмеження вихідного струму. Ця ситуація потенційно небезпечна, оскільки можливо, що ведучий транзистор VT8 може бути зруйнований, якщо жоден механізм не обмежував струм його стоку. Однак геометрія TIS58 така, що струм його стоку є порядку 5мА, коли напруга затвор-джерело цього пристрою досягає значення прямої провідності. Таким чином, хоча транзистор VT12 може проводити струм приблизно3 мА в плюсовому межі вихідного струму, руйнування VT8 не відбувається. Відзначимо також, що оскільки максимальний струм колектораVT6 обмежується значеннями опору емітер-ланцюга 33 кОм резистором, з'єднаним із VT4−VT5, то максимальний струм віVT6, не може спричинити коротке замикання будь-якого пристрою.Заряд, що накопичується на конденсаторі 3.3 мкФ конденсаторі, затримує відновлення від перевантаження, але оскільки обмеження струму при нормальній роботі не передбачається ця затримка не є критичною [31-34].

2.3.3. Реєстрація індукційного струму

При проєктуванні кінцевого каналу реєстрації індукційного струму враховувалось те, що сигнал із детектора буде надходити слабким за амплітудою, а також можливі завадові шуми.

Тому, вимірювання індукційного струму після проходження каналу детектування було вирішено побудувати на основі мікросхеми ADS1115 [35-37].

ADS1115 - це прецизійний 4-х канальний 16-бітний АЦП з низьким енергоспоживанням. І він має наступні характеристики:

Розрядність - 16 біт, що забезпечує високу точність вимірів. Число каналів – 4 аналогові входи, які можна використовувати як 4 одноканальні або 2 диференціальні (Рисунок 2.7) [35-37].

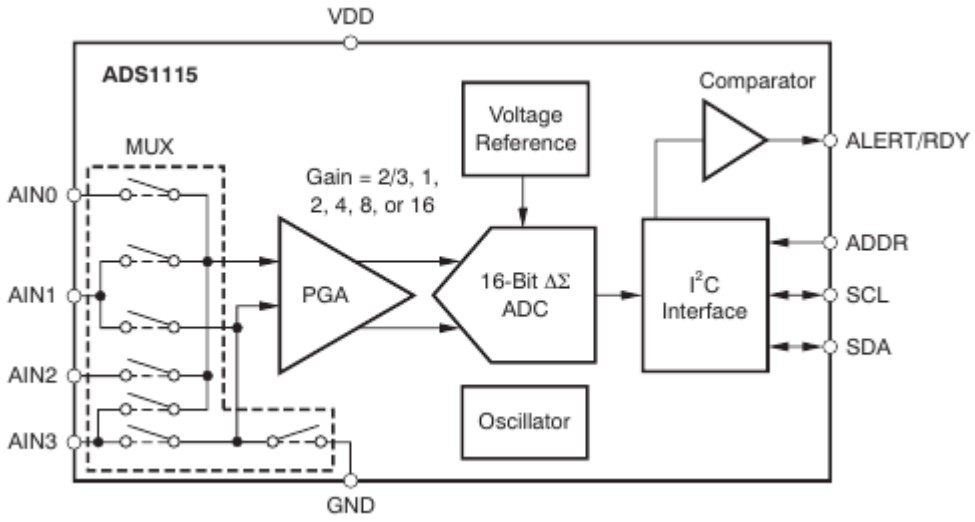


Рисунок 2.7 – Функціональна схема ADS1115

Напруга живлення – від 2.0 до 5.5, робить її сумісною з мікроконтролерами на 3.3 і 5 В. Напруга на аналогові входи можна перевищувати лише 0,3В. Таким чином, величина напруги логічних сигналів може накладати обмеження на діапазон вимірюваної напруги. Вбудований програмований підсилювач (PGA) з програмним вибором коефіцієнта посилення. Вибраний коефіцієнт посилення дає можливість задати необхідний діапазон вимірювання напруги. У всіх діапазонах АЦП вимірює як позитивну напругу, так і негативну. Негативна частина шкали працює лише у диференціальному режимі (-32768 - 32767). В одиночному режимі - лише половина шкали АЦП і відповідно половина точності (0 - 32767).Частота вибірки – до 860 вимірів за секунду [35-37].

Для керування роботою мікросхеми і подальшою трансляцією результатів вимірювання на ПК використовуємо інтерфейс – I^2C, що спрощує підключення до Arduino, ESP32 та інших мікроконтролерів (рисунок 2.8) [38].

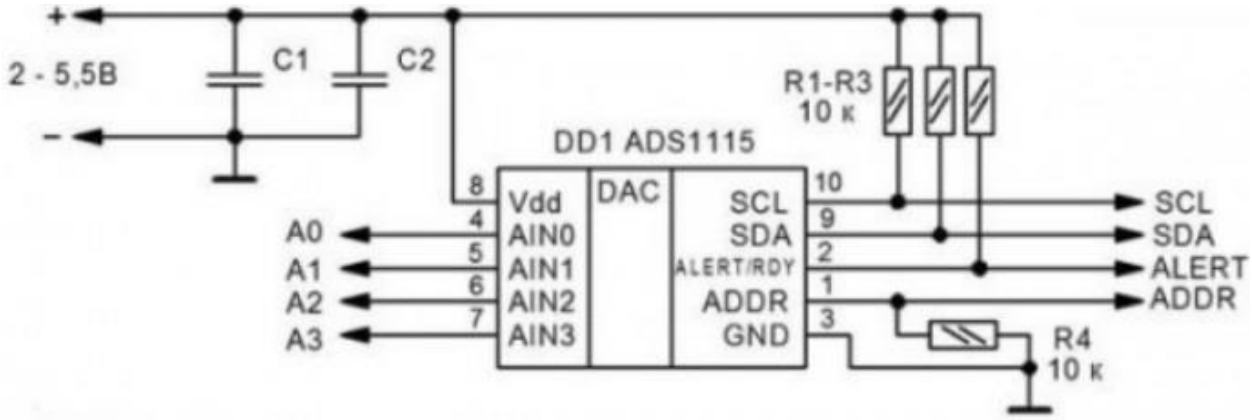
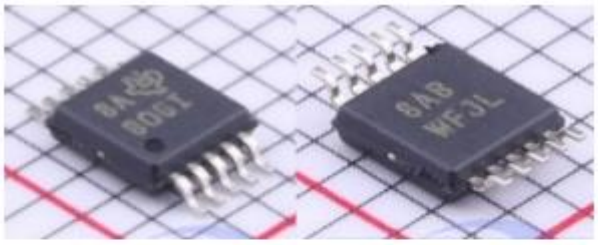
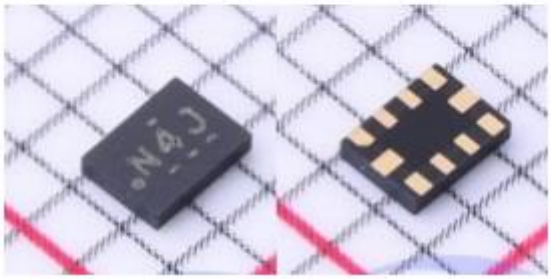


Рисунок 2.8 – Інтерфейс підключення мікросхеми ADS1115 до мікроконтролера

На рисунку 2.9 представлено зовнішній вигляд мікросхеми ADS1115 для різних типів корпусів.



а)



б)

Рисунок 2.9 – Мікросхема ADS1115 для різних типів корпусів: а - VSSOP-10; б - X2QFN-10.

Отже, ADS1115 –перетворювач, який значно розширить можливості мікроконтролерів. Завдяки 16-бітній точності, вбудованому підсилювачу та підтримці I^2C, він ідеально підходить для роботи зі слабкими аналоговими

сигналами та високоточними вимірюваннями. Дуже зручний програмний вибір підсилювача, що дозволяє вибирати з низки діапазонів вимірювання напруги.

Подальше можливе інтегрування перетворювача ADS1115 із мікроконтролером Arduino Nano представлене на рисунку 2.10

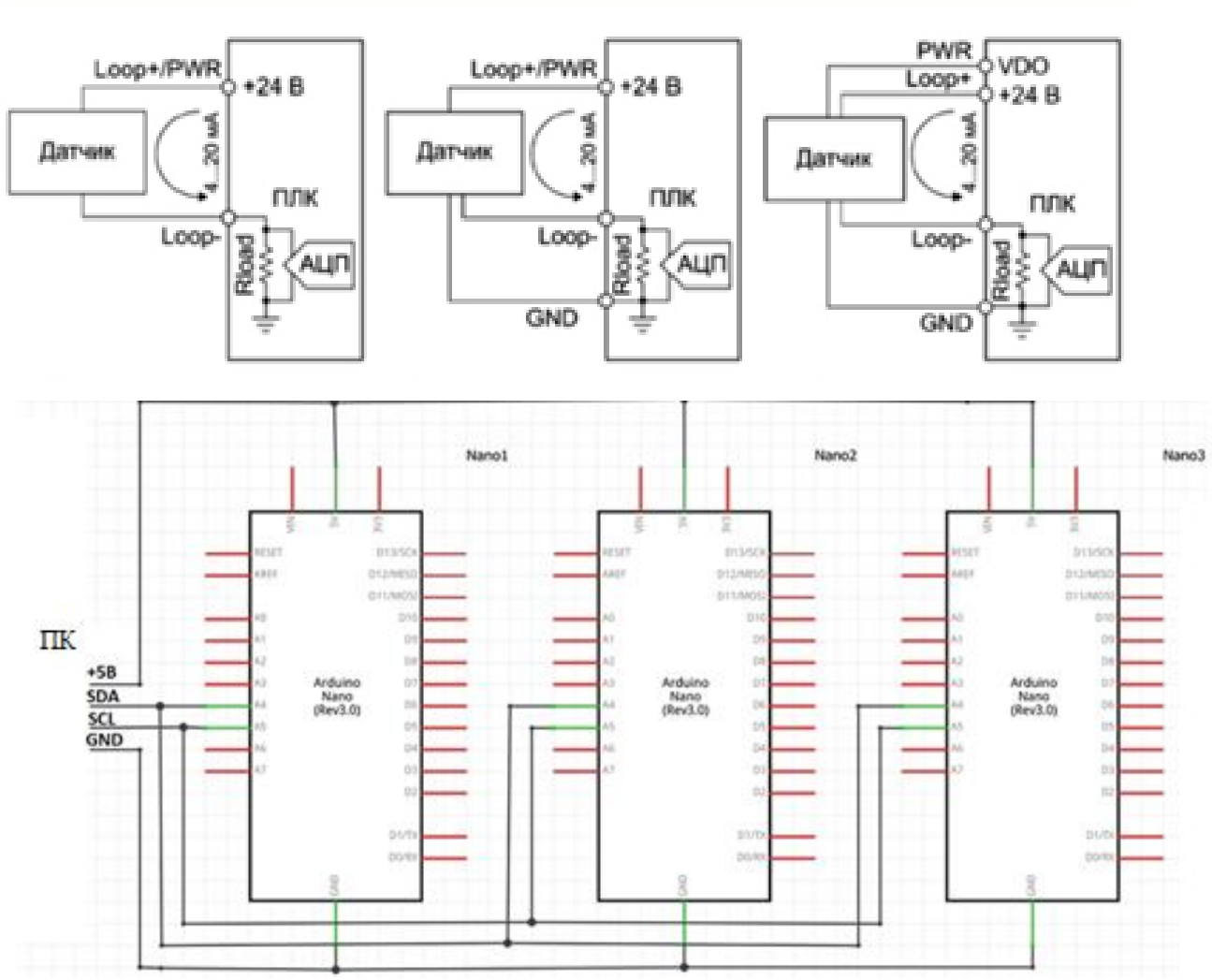


Рисунок 2.10 – Підключення перетворювача ADS1115 до мікроконтролера Arduino Nano

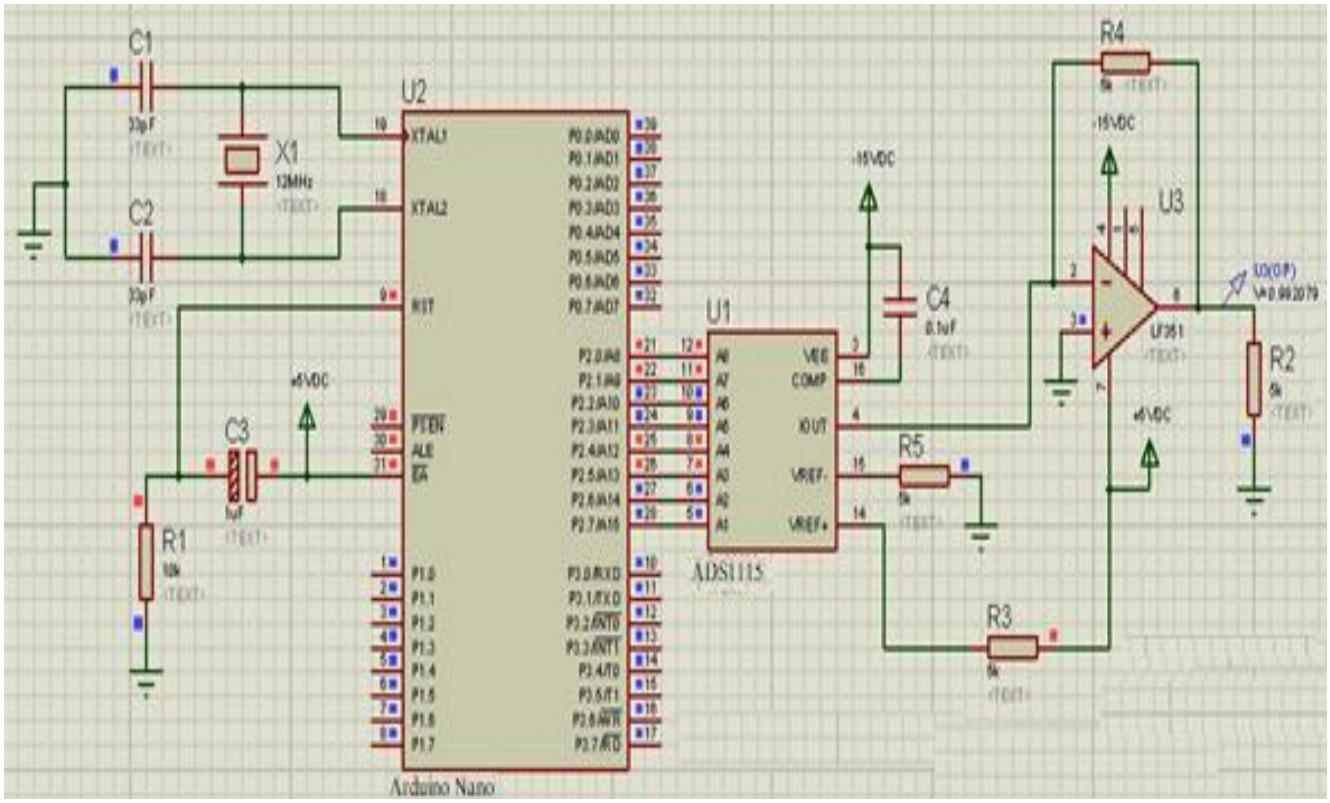
Для відображення даних буде використовуватись персональний комп’ютер (ПК).

Ведучий контролер буде послідовно опитувати другий та третій контролер. Прийняті дані перший контролер повинний виводити на ПК. Опитування ведених Arduino Nano буде проводитися з частотою 1 раз/сек.

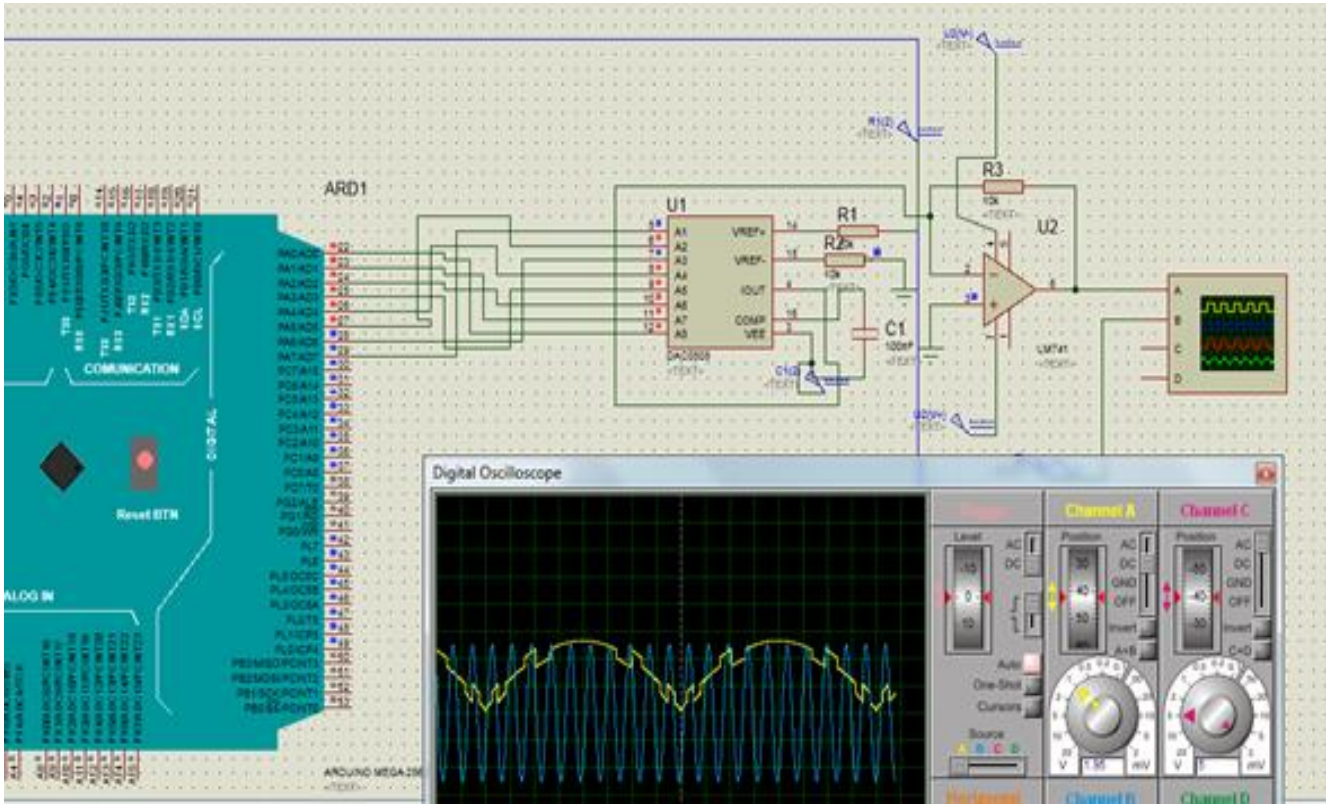
2.4 Моделювання роботи каналу реєстрації індукційного струму в редакторі Proteus

Моделювання роботи реєструючого каналу індукційного струму на мікросхемі ADS1115, а також ожливість її комутації з мікроконтролером на базі Arduino Nano проводилось в середовищі редактора САПР електронних схем Proteus [39].

На рисунку 2.11 представлено результати моделювання роботи перетворювача ADS1115 сумісно із мікроконтролером Arduino Nano.


C1
33pF
X1
12MHz
C2
33pF
U2
XTAL1
XTAL2
RST
PSEN
ALE
EA
P1.0
P1.1
P1.2
P1.3
P1.4
P1.5
P1.6
P1.7
Arduino Nano
+5VDC
C3
1uF
R1
10k
U1
ADS1115
-15VDC
C4
0.1uF
R4
5k
U3
LF351
R5
5k
R3
5k
R2
5k
+5VDC

a)



б)

Рисунок 2.11 – Результати моделювання роботи перетворювача ADS1115 сумісно із мікроконтролером Arduino Nano: а) схема, зібрана в редакторі Proteus; б) осцилограма інформаційного сигналу приймального пристрою.

На рисунку 2.11 б показано, що на виході мікроконтролер має достатньо чіткий сигнал, без спотворень.

Отже, за результатами розділу можна зробити наступні висновки:

1) за основу надчутливого реєстратора індукційного струму в роботі використовували Сквід (англ. SQUID, Superconducting Quantum Interference Device – надпровідниковий квантовий інтерференційний пристрій) – дуже чутливий магнітометр, який дає змогу вимірювати магнітні поля до 10^{-18} Тл;

2) фізична модель пристрою розроблена на системі двох контактів Джозефсона на постіному струмі;

3) на підставі розрахункової моделі та загальних принципів реєстрації струмів за допомогою контактів Джозефсона складено структурну схему реєстратора;

4) на етапі створення реєструючої системи розв’язувлось завдання забезпечити точну фіксацію малих напруг із подальшим їх підсиленням, відповідною цифровою обробкою і відтворенням на пристрої індикації, або за допомогою персонального комп’ютера (ПК);

5) вимірювання індукційного струму після проходження каналу детектування було вирішено побудувати на основі мікросхеми ADS1115-прецизійного 4-х канального 16-бітного АЦП з низьким енергоспоживанням;

6) у подальшому було проаналізовано можливість інтегрування перетворювача ADS1115 із мікроконтролером Arduino Nano;

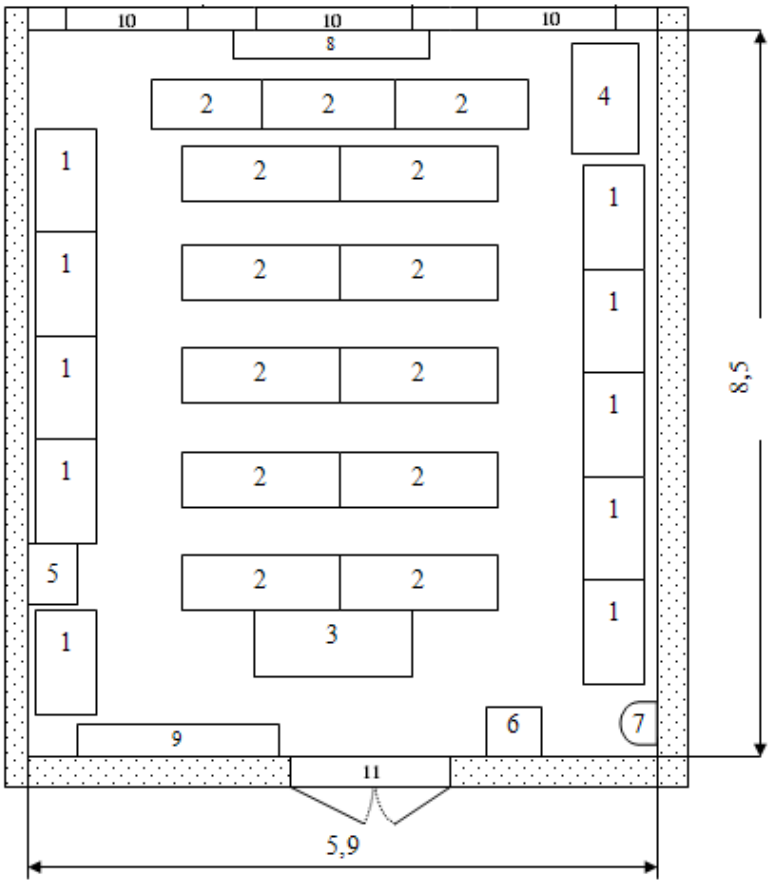
7) використання лінійного стабілізатора напруги на 3,3 В MAX8860EUA33, зменшило рівень шумів, порівняно із прототипом ADP3330 (55-65 мкВ проти 95 мкВ для ADP3330);

8) у результаті моделювання роботи каналу реєстрації індукційного струму в редакторі Proteus було показано, що на виході мікроконтролера сигнал є достатньо чітким, без спотворень.

3 Охорона праці та техногенна безпека при розробці електричних схем реєстратора індукційного струму малої потужності

3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

В даному розділі як об’єкт дослідження розглянуто приміщення в якому проводяться роботи по дослідженню та вивченню мікропроцесорних систем. План приміщення наведено на рисунку 3.1 [40-45].



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

Рисунок 3.1 – План розташування робочих місць

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

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

Відповідно до ПХТ 12.0.003-74 небезпечні та шкідливі фактори за природою дії поділяються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні [40-45].

В даному приміщені діють такі фізичні небезпечні та шкідливі фактори:

• підвищений рівень вібрацій, інфразвукових коливань, ультразвуку, іонізуючих випромінювань, статичної електрики, електромагнітних випромінювань, ультрафіолетової чи інфрачервоної радіації;

• підвищені чи знижені барометричний тиск, вологість, іонізація та рухомість повітря;

• небезпечне значення напруги в електричному колі; підвищена напруженість електричного чи магнітного полів;

• недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла;

Також присутні небезпечні та шкідливі психофізіологічні фактори, до яких належать фізичні (статичні та динамічні) і нервово-психічні перевантаження (розумове перенапруження, перенапруження органів чуття, монотонність праці, емоційні перевантаження).

3.2 Заходи зі зменшення впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Одним із заходів є підвищення комфортності роботи шляхом раціоналізації параметрів робочого місця та робочого приміщення з ергономічної точки зору [40-45].

Обсяг приміщення на одного працюючого за санітарними нормами має становити не менше 20 $м^3$, а площа приміщення – не менше 6 $м^2$. Ширина основних проходів у приміщенні повинна становити не менше 1,5 м. Ширина виходів з приміщення повинна бути не менше 1 м, висота – не менше 2,2 м. Дане приміщення має обсяг V=188,06 $м^3$, а площу S=50,15 $м^2$. Таким чином наше приміщення не відповідає нормам з ергономічної точки зору.

Для зменшення впливу психофізіологічних факторів складено правильний графік трудового дня, встановлено необхідний час перерв, темп та ритм роботи, які необхідні для зменшення дії на організм людини фізичних зусиль, що в свою чергу дозволяють захистити людину від перевтомлення та втрати здоров'я [40-45].

3.3 Виробнича санітарія

Мікроклімат характеризується наступними параметрами: температура, вологість, швидкість повітря, атмосферний тиск, шум [40-45].

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

Наше приміщення відповідає цим температурним нормам.

В даному приміщенні є два види вентиляції:

– природна (аерація через вікна і двері);

– примусова (приточно-витяжна).

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

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

У приміщенні є наявність відео термінальних пристроїв та учбових стендів для проведення лабораторних робіт. Всі ці устаткування мають низький рівень шуму, що в свою чергу не перевищує допустиму норму рівня шуму в 65 дБ.

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

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

Розрахунок його здійснюється за методом світлового потоку з урахуванням потоку, відбитого від стін і стелі [40-45]

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

3.4 Електробезпека

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

Причини ураження електричним струмом [40-45].

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

Для забезпечення електробезпеки в даному приміщенні використовуються такі технічні засоби:

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

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

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

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

3.5 Пожежна та техногенна безпека об’єкту

Приміщення відноситься за вибухопожежною небезпекою до категорії “Б” [40-45].

Основними причинами пожеж в даному приміщенні є:

- необережне поводження з вогнем;

- незадовільний стан електротехнічних пристроїв, порушення правил їх

- монтажу та експлуатації;

- невиконання вимог нормативних документів з питань пожежної безпеки.

Приміщення за класом пожеж відноситься до категорії “Е” [40-45]. Це горіння обладнання та установок, які знаходяться під електричною напругою. Серед необхідних засобів гасіння пожежі в даному приміщені є два вуглекислих вогнегасники типу ОУ-2. Для мінімізації виникнення пожежі в даному приміщені вчасно проводиться профілактичний огляд та ремонт електроустаткування. В приміщенні є план евакуації згідно якого люди повинні залишити приміщення у разі виникнення пожежі. Ширина шляхів евакуації в світлі повинна бути не менше 1 м, дверей - не менше 0.8 м. При дверях, що відкриваються з приміщень в загальні коридори, за ширину евакуаційного шляху коридором слід приймати ширину коридору, зменшену:

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

- на ширину дверного полотна - при двосторонньому розташуванні дверей.

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

3.6 Розрахунок штучного освітлення точковим методом

Точковий метод призначений для розрахунку локалізованого та комбінованого освітлення, а також освітлення похилих площин [40-45]. Загальне локалізоване освітлення, а також загальне рівномірне при наявності суттєвих затінень повинні розраховуватись за точковим методом. Цей же метод використовується при розрахунку освітленості похилих площин та відкритих просторів, а також місцевого освітлення. Відбита складова освітленості у точковому методі враховується наближено.

Метод називається точковим тому, що дозволяє визначити потужність освітлювальної установки на основі розрахунку освітленості в будь-якій точці робочої поверхні. Методом користуються у всіх випадках, коли метод коефіцієнта використання є неприйнятним (в приміщеннях, захаращених обладнанням, затемнених і т. ін.), а також у випадку перевірки освітленості окремих ділянок. Він широко використовується при розрахунку освітлення конвеєрних ліній та галерей, охоронного освітлення, освітлення сходів, спусків, доріг, залізничних колій, підземних протяжних виробок і т. п.. Метод дає хороші результати у випадках використання світильників прямого та переважно прямого світла.

Для виконання розрахунку освітлення попередньо вибирають тип світильників та варіант їх розміщення (висоту підвісу та відстань між ними). В загальному випадку точковий метод дозволяє знайти освітленість робочої поверхні, довільно орієнтованої в просторі. В практиці проектування освітлювальних установок випадки розрахунку освітленості на похилих площинах зустрічається рідко, частіше виникає необхідність розрахунку освітлення або на поверхні, перпендикулярній вісі симетрії світильника (го-

ризонтальна освітленість), або на поверхні, паралельній їй (вертикальна освітленість). Це дає можливість спростити схему розрахунку.

Принцип розрахунку освітленості на горизонтальній та вертикальній поверхні від світильника з круглосиметричним світлорозподіленням наглядно ілюструється на рисунку 3.2, де точка А на робочій поверхні є точкою, в якій визначається освітленість [40-45].

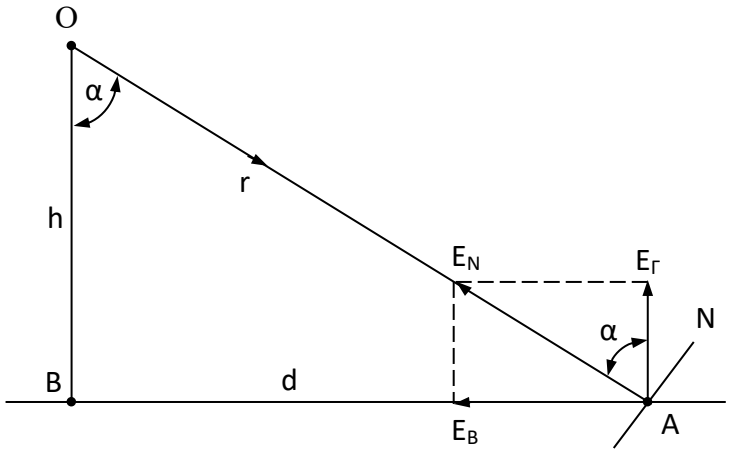


Рисунок 3.2 – Графік до розрахунку освітленості

Освітленість E_N в точці А на площині, перпендикулярній променю світла, що падає в цю точку, залежить від сили світла Iα в цьому напрямку та віддаленості r джерела до точки [40-45].

$$E_N = \frac{I_\alpha}{r^2}. \tag{3.1}$$

Освітленість в точці А на горизонтальній та вертикальній площині відповідно становить:

$$E_г = \frac{I_\alpha}{r^2} \cdot \cos\alpha, \tag{3.2}$$

$$E_в = \frac{I_\alpha}{r^2} \cdot \sin\alpha. \tag{3.3}$$

Для практичних розрахунків доцільно положення джерела світла (точка О) визначати через координати h, d та кута α. Тоді із трикутника АОВ можна знайти:

$$\cos\alpha = \frac{h}{r}, \tag{3.4}$$

$$r = \frac{h}{\cos\alpha}. \tag{3.5}$$

Тоді вище наведені залежності для освітленості можна представити:

$$E_г = \frac{I_г \cdot \cos^3\alpha}{h^2}, \tag{3.6}$$

$$E_в = \frac{I_\alpha \cdot \cos^2\alpha \cdot \sin\alpha}{h^2} = E_г \cdot tg\alpha \ . \tag{3.7}$$

Приймаючи до уваги, що криві розподілення сили світла світильників приводяться для умовної лампи з світловим потоком 1000 лм, для реальної лампи

$$I'_\alpha = c \cdot I_\alpha, \tag{3.8}$$

$$c = \frac{Ф_л}{1000}, \tag{3.9}$$

де $Ф_л$ – світловий потік реального джерела світла, лм.;

I_α – сила світла в напрямі точки А за характеристиками світлорозподілення світильника.

Тоді остаточна залежність для розрахунку освітленості в точці А:

$$E_г = \frac{c \cdot I_\alpha \cdot \cos^3\alpha}{h^2 \cdot k_3}, \tag{3.10}$$

де k_3 – коефіцієнт запасу, що враховує зниження світлового потоку в процесі експлуатації освітлювальної установки.

Освітленість в розрахунковій точці визначається від кожного світильника, тобто загальна освітленість в точці знаходиться як сума освітленостей $\sum E_г$ від всіх світильників [40-45]. Розрахунок вважається закінченим, якщо зберігається умова $E_{min} \geq \sum E_г$.

Практично розрахункова освітленість може відрізнятися від нормованого значення в межах –10% … +20%. Якщо умова з такими припущеннями не виконується, необхідно скоректувати розташування світильників.

В якості контрольних вибираються такі точки в межах приміщення, для яких $\sum E_г$ є мінімальною.

Якщо використовується світильник з несиметричним світло розподіленням, положення розрахункової точки А відносно джерела світла буде визначатися висотою hp, кутом α та кутом φ, що відраховується від площини симетрії світильника ОО'О" (рисунок 3.3).

При цьому значення кутів визначається з рисунку 3.3:

$$\alpha = arctg\frac{d}{h_p}; \quad \varphi = arctg\frac{b}{a} \quad . \tag{3.11}$$

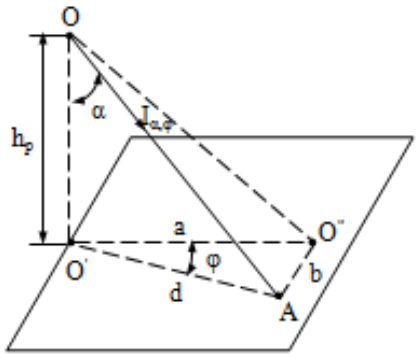


Рисунок 3.3 – Координати, що визначають положення точкового елементу, що світиться, відносно розрахункової точки А

Знайдені значення кутів α та φ дозволяють, користуючись кривими рівних значень сили світла, визначити значення сили світла в напрямі розрахункової точки і розрахувати освітленість елементу поверхні в цій точці [40-45].

$$E_г = \frac{I_{\alpha,\varphi} \cdot \cos^3 \alpha}{h_p^2} \quad . \tag{3.12}$$

Стосовно випадку розташування світильників світними лініями (світильники з люмінесцентними лампами) широко використовують видозмінений точковий метод – метод кривих рівної відносної освітленості. Характеристикою світних ліній є лінійна густина світлового потоку ламп (Ф'), лм/м, що визначається діленням сумарного потоку ламп Ф в лінії на її довжину (L). При цьому лінії з рівномірно розподіленими по їх довжині розривами (lp)

розглядаються в розрахунках як безперервні якщо lp ≤ 0,5 h. Для протяжних ліній з такими розривами можна рахувати:

$$\Phi' = \frac{\Phi}{l_{с.л.} + l_p}, \tag{3.13}$$

де Ф – потік ламп в суцільній частині лінії ($l_{с.л.}$).

При l_p > 0,5 h для кожної суцільної частини лінії окремо визначається Ф' і створювана цією частиною освітленість.

Розрахунок освітлення виконується за допомогою лінійних ізолюкс, які дають відносну горизонтальну освітленість ε при h = 1 м та Ф' = 1000 лм/м, що приводяться в довідниках для проектування освітлення.

Відносна освітленість ε за графіками лінійних ізолюкс визначається для точок, що знаходяться навпроти кінця ряду світильників, в залежності від координат:

– відносна довжина світної лінії

$$L' = \frac{n \cdot (l_c + l_p)}{h}, \tag{3.14}$$

– відносна відстань від проекції осі лінії до контрольної точки А (рисунок 4.4).

$$P' = \frac{P}{h}. \tag{3.15}$$

Освітленість в точках, що знаходяться не навпроти кінця ряду світильників, визначається шляхом розподілу лінії на дві її частини або доповнення умовним відрізком з послідуючим складанням чи відніманням освітленості.

Підсумовуючи значення ε для всіх рядів, що освітлюють контрольну точку, знаходять ∑ε.

Після цього знаходиться густина потоку Ф', необхідна для одержання в точці заданої освітленості Е при коефіцієнті запасу Кз:

Помноживши Ф' на довжину кожного ряду світильників l, знаходиться повний світловий потік ламп ряду, на основі чого підбирається кількість та потужність ламп [40-45].

Висновки та рекомендації

Отже, за результатами виконання роботи можна зробити наступні висновки:

1) за основу надчутливого реєстратора індукційного струму в роботі використовували Сквід (англ. SQUID, Superconducting Quantum Interference Device – надпровідниковий квантовий інтерференційний пристрій) – дуже чутливий магнітометр, який дає змогу вимірювати магнітні поля до 10^{-18} Тл;

2) фізична модель пристрою розроблена на системі двох контактів Джозефсона на постіному струмі;

3) на підставі розрахункової моделі та загальних принципів реєстрації струмів за допомогою контактів Джозефсона складено структурну схему реєстратора;

4) на етапі створення реєструючої системи розв'язувлось завдання забезпечити точну фіксацію малих напруг із подальшим їх підсиленням, відповідною цифровою обробкою і відтворенням на пристрої індикації, або за допомогою персонального комп'ютера (ПК);

5) вимірювання індукційного струму після проходження каналу детектування було вирішено побудувати на основі мікросхеми ADS1115- прецизійного 4-х канального 16-бітного АЦП з низьким енергоспоживанням;

6) у подальшому було проаналізовано можливість інтегрування перетворювача ADS1115 із мікроконтролером Arduino Nano;

7) у результаті моделювання роботи каналу реєстрації індукційного струму в редакторі Proteus було показано, що на виході мікроконтролера сигнал є достатньо чітким, без спотворень.

Як рекомендації щодо розроблюваного пристрою можна відмітити наступне:

1) система може бути використана в подальших розробках мікроелектронних інформаційних систем слабких магнітних полів та пhистроїв кріоелектронки;

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

Перелік посилань

1. Electrosmog – a phantom risk. Copyright 1996 by Swiss Reinsurance Company Author: Christian Brauner, D-Freiburg i.Br. 33 p

2. EMI Shielding: Methods and Materials—A Review. S.Geetha, K.K. Satheesh Kumar, Chepuri R.K. Rao, M. Vijayan, D.C. Trivedi. Journal ofAppliedPolymer Science,Vol. 112, 2073–2086 (2009).

3. Фізика : підручник / І. Є. Лопатинський, І. Р. Зачек, Г. А. Ільчук, Б. М. Романишин. Львів : Афіша, 2009. - 384 с.

4. Чолпан, П.П. Фізика: підручник / П.П. Чолпан. – Київ : Вища школа, 2003. - 568 с.

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

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

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

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

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

10. Теорія електромагнітного поля і основи техніки НВЧ: навч. посіб. / С. В. Соколов, Л. Д. Писаренко, В. О. Журба; за заг. ред. Г. С. Воробйова. – Суми: Сумський державний університет, 2011. – 393 с.

11. Scherbakov, G.N., Antselevich, M.A., Udintsev, D.N., (2005). Ways to improve the noise immunity of magnetometric search tools and their practical implementation // Special equipment, 3, 19-24.

12. Ripka, P. Magnetic Sensors and Magnetometers / P. Ripka. – Boston: Artech house, 2000. – 494 p.

13. Ripka P. Advances in Magnetic Field Sensors // IEEE Sensors journal. – 2010. – Vol. 10, N 6. – P.1108-1116.

14. Hava Can, Uğur Topal Design of Ring Core Fluxgate Magnetometer as Attitude Control Sensor for Low and High Orbit

15. Satellites // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism March. – 2015. – Vol. 28, № 3. – P.1093-1096.

16. Будник М.М. Дослідження сигнальних та шумових характеристик надпровідникових квантових інтерферометрів // Дис. канд. техн. наук : 05.13.08, НАН України, Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова. – Київ : – 1997. – 209 с.

17. Drung D. Improved dc SQUID read-out electronics with low 1/f noise preamplifier // Review of Scientific Instruments. – 1997. – Vol. 68. – N.11. – P. 4066–4074.

18. Lec Y.H., Kwon H.C., Kim J. M. et al. A multichannel SQUID magnetometer system based on double relaxation oscillation SQUIDs // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2003. – Vol.13. – N.2. – P. 755–758.

19. Carr, C. The Double Star magnetic field investigation // Ann. Geophys. – 2005.– № 23. – P. 2713-2732.

20. Josephson B.D. Possible now effects in superconductive tunneling // Phys. Lett. – 1962. – Vol.1. – P. 251–253.

21. Anderson P.W., Rowell J.M. Probable observation of the Josephson superconducting tunneling effect // Phys. Rev. Lett. – March – 1963. – Vol. 10. – P. 230–232.

22. Aspect A. Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm gedankenexperiment: a new violation of Bell's inequalities / A. Aspect, P. Grangier, G. Roger // Physical Review Letters. 1982. Vol. 49. № 2. P. 91–94.

23. Steane A. Quantum computing / A. Steane // Reports on progress in Physics. 1998. Vol. 61. P. 117–173.

24. Electro-optics handbook / Editors: R. W. Waynant, M. N. Ediger. 2nd ed. New York. : McGraw-Hill Inc., 2000. 911 p. ISBN 0-07-068716-1.

25. Grover L. K. A fast quantum mechanical algorithm for database search / L. K. Grover // Proc. 28th Ann. ACM Symp. «Theory of computing». New York : ACM Press, 1996. P. 212–219.

26. Shor P. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer / P. Shor // SIAM J. Computing. 1997. Vol. 10. P. 1484–1509.

27. Clarke J. Ultrasensitive measuring devices // Physica (B+C) 1984. Vol. 126B. P. 441–448.

28. Golubović D. S., Moshchalkov V. V. Hard magnetic dot for flux bias of DC SQUIDs // IEEE Transactions on Applied Superconductivity 2006. Vol.16. N.3. P. 1908–1912.

29. Popel R. The Josephson Effect and Voltage Standards / R. Popel // Metrologia. – 1992. – V. 29. − P. 153-174.

30. Павленко Ю. Ф., Кондрашов С. І., Неєжмаков П. І. та ін. Вступ до квантової метрології : підручник / за ред. Ю. Ф. Павленка. Харків : ФОП Мезіна В.В., 2017. 244 с.

31. Стахів П. Г., Коруд В. І., Гамола О. Є. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування. Підручник для студентів неелектротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Львів : “Новий Світ – 2000”; “Магнолія плюс”. 2003. 208 с.

32. Гуржій А.М., Самсонов В.В., Поваротнюк Н.І. Імпульсна та цифрова техніка: Підручник. – Харків : Компанія “Сміт”, 2005. 424 с.

33. Верьовкін Л. Л., Світанько М. В. Кісельов Є. М. Мікропроцесорна техніка // Методичні вказівки до самостійної роботи та виконання контрольної роботи. Запоріжжя : ЗДІА. 2014. С.15-29.

34. Open Educational Resources веб-сайт. URL: http : //www. https://ocw.mit.edu / (дата звернення: 10.01.2025).

35. ADS1115 are 2mm Ч 1,5mm Ч 0,4mm precision analog-to-digital converters (ADCs) with 16 bits of resolution offered in an ultra-small, leadless QFN-10 package or an MSOP-10 package. Texas Instruments Incorporated веб-сайт. URL: http : // www.ti.com/ (дата звернення: 10.01.2025).

36. Calcutt D., Cowan F., Parchizadeh H. 8051 Microcontrollers: An Applications Based Introduction. Oxford: Newnes, 2004.

37. Mazidi M.A., McKinlay R. 8051 Microcontroller and Embedded Systems. NJ: Prentice Hall, 2005. 640 p.

38. Курс Arduino. Базовий веб-сайт. URL: http : // https://siluette.com.ua/uk/product/arduino/ (дата звернення: 10.01.2025).

39. Antognetti, P.; Massobrio, G.: Semiconductor device Modeling with SPICE. New York: McGrawwHill, 1988.

40. Атаманчук П. С., Мендерецький В. В., Панчук О. П., Білик Р. М. Охорона праці в галузі : навч. посіб. Київ : ЦУЛ, 2017. 322 с. URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi56/0041366.pdf.

41. 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.

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

43. 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.

44. Охорона праці. Методичні вказівки до проведення практичних занять та виконання контрольних робіт для студентів ЗДІА інженерних спеціальностей / Укл. В.Г. Рижков – Запоріжжя, 2005. – 43 с.

45. Безпека життєдіяльності. Методичні вказівки до практичних занять та контрольні завдання для студентів ЗДІА всіх спеціальностей денної та заочної форм навчання / Укл. В.Г. Рижков. – Запоріжжя, 2005. – 24 с.