Вінницький національний технічний університет
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
Кафедра радіотехніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської кваліфікаційної роботи
за освітньо–кваліфікаційним рівнем «магістр»
на тему:

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ СЕНСОР ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

08–36.МКР.008.00.000 ПЗ

Виконав: студент 2–го курсу, групи РТ–19м
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка (освітня програма: Радіотехніка)
_____ Маюн В. Ю.

Керівник: к.т.н., доц. каф. РТ
_____ Осадчук Я.О.
«____» _____ 2020 р.

Рецензент: к.т.н., доцент. каф. ТКСТБ
_____Михалевський Д.В.
«____» _____ 2020 р.

Вінниця ВНТУ – 2020 рік
Вінницький національний технічний університет

Факультет Інфокомунікацій , радіоелектроніки та наносистем
Кафедра Радіотехніки
Освітньо-кваліфікаційний рівень Магістр
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри РТ
д.т.н., професор О.В. Осадчук
“_28_” __09____2020 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Маюну Вадиму Юрійовичу
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи «Радіовимірювальний сенсор індукції магнітного поля з частотним виходом»
керівник роботи Осадчук Ярослав Олександрович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від “25” 09 2020 року №214
2. Строк подання студентом роботи 10 грудня 2020 року
3. Вихідні дані до роботи: напруга живлення радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом 5±0.5 В; струм споживання 1,5…25 мА; напруга живлення вузлів параметричний сенсора + 3,5…5,5 В; споживана потужність − 0,3 Вт; частота генерації − 100…3500 кГц; діапазон вимірювання магнітної індукції − 0...500 мТ.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз існуючого стану розвитку параметричних сенсорів індукції магнітного поля; фізико-математичні моделі для побудови радіовимірювальних параметричних сенсорів індукції магнітного поля; радіовимірювальний сенсор індукції магнітного поля з частотним виходом; економічна частина, безпека життєдіяльності; висновки; перелік посилань; додатки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень): параметричний сенсор для вимірювання напруженості індукції магнітного поля; оптична схема сенсора індукції магнітного поля; структурна схема мілітесламетра; схема вимірювання магнітної індукції; параметричний сенсор на ефекті Холла; схема радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля; структурна схема макету для експериментальних досліджень; радіо вимірювальний сенсор індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	к.т.н., доцент Осадчук Я. О.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	к.т.н., доцент Березюк О. В.		
Економічна частина	к.е.н., ст. викл. Кавецький В. В.		

7. Дата видачі завдання 29 вересня 2020 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	03.09.2020-14.09.2020	
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	15.09.2020-21.09.2020	
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	21.09.2020-25.09.2020	
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	26.09.2020-09.10.2020	
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	10.10.2020-25.10.2020	
6.	Розділ моделювання	26.10.2020-04.11.2020	
7.	Розробка графічної частини МКР	05.11. 2020-15.11.2020	
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	16.11.2020-19.11.2020	
9.	Охорона праці (ОП)	19.11.2020-22.11.2020	
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	23.11.2020-29.11.2020	
11.	Нормоконтроль	30.11.2020-01.12.2020	
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	02.12.2020-04.12.2020	
13.	Захист МКР ЕК	11.12.2020-14.12.2020	

Студент _____ Маюн В. Ю.
(підпис)

Керівник роботи _____ Осадчук Я. О.

(підпис)

РЕФЕРАТ

УДК 621.396

Маюн В.Ю. Радіовимірювальний сенсор індукції індукції магнітного поля з частотним виходом / Магістерська кваліфікаційна робота / Вінниця: ВНТУ, 2020. – 173 с. Укр. мовою /. Бібліограф. 80 найменувань, рисунків 32, таблиць 24.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена питанню радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом на основі транзисторних структур з від'ємним диференційним опором. Проведено літературний огляд параметричних сенсорів індукції магнітного поля. Розглянуті амплітудні та частотні параметричні сенсори індукції магнітного поля.

В роботі розглянуто магнітореактивний ефект в транзисторних структурах з від'ємним диференційним опором. Розроблено математичні моделі радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля на основі біполярного та польового транзисторів з чутливим елементом на основі сенсора Холла. Розроблено математичні моделі радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом. Проведено дослідження радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом на ефекті Холла. Отримано аналітичні вирази для функції перетворення та рівняння чутливості радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом. Чутливість радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля на основі біполярного та польового транзисторів з чутливим елементом на основі сенсора Холла у діапазоні від 1 мТл до 60 мТл складає 1000…1550 Гц/мТл. А для радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом чутливість складає 2000…2500 Гц/мТл.

Розроблена експериментальна установка для дослідження параметрів радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля. Проведено експериментальні дослідження радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом.

У четвертому п'ятому розділі проведено розрахунок кошторису витрат на виробництво пристрою та ефективність вкладених інвестицій.

В розділі охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях було розглянуто такі питання, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення допустимого часу перебування в зоні дії магнітної складової ЕМВ, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом, безпека у надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: індукція магнітного поля, радіовимірювальний перетворювач магнітного поля, від'ємний диференційний опір, радіовимірювальна система, математична модель.

ABSTRACT

Mayun V.Yu. Radiomeasuring sensor of magnetic field induction with frequency output / Master's thesis / Vinnytsia: VNTU, 2020. -173p. Ukr. language. Bibliographer.80 names, 32 figures, 24tables.

The master's thesis is devoted to the issue of radio measuring sensors of magnetic field induction with frequency output based on transistor structures with negative differential resistance. A literature review of parametric magnetic field induction sensors has been performed. Amplitude and frequency parametric sensors of magnetic field induction are considered.

The paper considers the magnetoreactive effect in transistor structures with negative differential resistance. Mathematical models of the radio measuring sensor of magnetic field induction based on bipolar and field-effect transistors with a sensitive element based on the Hall sensor have been developed. Mathematical models of the radio measuring sensor of magnetic field induction with frequency output based on three bipolar transistors with an active inductive element have been developed. The research of radio measuring sensors of magnetic field induction with frequency output on Hall effect is carried out. Analytical expressions for the conversion function and sensitivity equation of radio measuring sensors of magnetic field induction with frequency output are obtained. The sensitivity of the radio measuring sensor of magnetic field induction based on bipolar and field-effect transistors with a sensitive element based on the Hall sensor in the range from 1 mT to 60 mT is 1000… 1550 Hz/mT. And for the radio measuring sensor of magnetic field induction with frequency output based on three bipolar transistors with an active inductive element, the sensitivity is 2000… 2500 Hz/mT.

An experimental setup has been developed to study the parameters of radio measuring sensors for magnetic field induction. Experimental researches of radio measuring sensors of magnetic field induction with frequency output are carried out.

The fourth section describes the recommendations for occupational safety and health when working with this device.

The section on labor protection and safety in emergencies addressed such issues as technical solutions for occupational health and industrial sanitation, determining the allowable time in the area of the magnetic component of EMR, technical solutions for industrial and fire safety during the study of the radio sensor magnetic induction frequency output fields, safety in emergencies.

Keywords: magnetic field induction, radio magnetic transducer, negative differential resistance, radio measuring system, mathematical model.

ЗМІСТ

ВСТУП……9
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ПАРАМЕТРИЧНИХ СЕНСОРІВ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ……12
1.1 Параметричний сенсор для вимірювання індукції магнітного поля……12
1.2 Вимірювальний параметричний сенсор індукції магнітного поля……14
1.3 Сенсор індукції магнітного поля……17
1.4 Параметричний сенсор мілітесламетр……19
1.5 Сенсор Холла……21
1.6 Параметричний сенсор для вимірювання індукції магнітного поля……22
1.7 Параметричний сенсор для вимірювання слабих постійних магнітних полів……24
1.8 Параметричний сенсор для вимірювання напруженості індукції магнітного поля……25
1.9 Цифровий параметричний сенсор магнітної індукції……29
1.10 Параметричний сенсор для вимірювання напруженості індукції магнітного поля……29
1.11 Цифровий параметричний сенсор параметрів індукції магнітного поля….31
1.12 Висновки до розділу……32
2 ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ПОБУДОВИ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ СЕНСОРІВ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ……34
2.1 Методи вимірювання індукції магнітного поля……34
2.2 Механізм взаємодії індукції магнітного поля з напівпровідниковим матеріалом……40
2.3 Вплив індукції магнітного поля на властивості напівпровідникового матеріалу……..48
2.4 Фізичний механізм вплив індукції індукції магнітного поля на електропровідність напівпровідникового матеріалу ……53
2.5 Висновки до розділу……61
3 РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ СЕНСОР ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ……..62
3.1 Елементи магнітореактивного ефекту у транзисторних структурах з від’ємним диференційним опором……..62
3.2 Радіовимірювальний параметричний сенсор магнітного поля на ефекті Холла……..71
3.3 Виведення функції перетворення і рівняння чутливості радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля на біполярно-польовій транзисторній структурі з сенсором Холла……..74
3.4 Радіовимірювальний сенсор індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом……80
3.5 Висновки до розділу……93
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА……94

4.1 Оцінка наукового, технічного та економічного рівня НДДКР……...94
4.1.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки……95
4.1.2 Оцінювання рівня новизни розробки……99
4.1.3 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості для нового рішення……..103
4.2 Розрахунок витрат на проведення НДДКР з дослідження радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом……105
4.2.1 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації результатів розробки……..112
4.2.2 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності……..114
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ……..118
5.1 Гігієна праці та виробнича санітарія……...118
5.1.1 Склад повітря робочої зони та мікроклімат……118
5.1.2 Виробниче освітлення……119
5.1.3 Виробничі віброакустичні коливання……...121
5.1.4 Виробничі випромінювання……..122
5.2 Промислова та пожежна безпека під час проведення дослідження…….123
5.2.1 Безпека щодо організації робочих місць……..123
5.2.2 Електробезпека……...124
5.2.3 Пожежна безпека……124
5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях……...125
5.3.1 Дослідження стійкості роботи радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля в умовах дії іонізуючих випромінювань……...126
5.3.2 Дослідження стійкості роботи радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля в умовах впливу електромагнітного імпульсу…128
5.3.3 Розробка заходів по підвищенню стійкості радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля в умовах надзвичайних ситуацій……...129
ВИСНОВКИ……132
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……134
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання……..140
Додаток Б (обов'язковий) Параметричний сенсор для вимірювання напруженості індукції магнітного поля ……146
Додаток В (обов'язковий) Оптична схема сенсора індукції магнітного поля ……. 148
Додаток Д (обов'язковий) Структурна схема мілітесламетра……...150
Додаток Е (обов'язковий) Схема вимірювання магнітної індукції……...152
Додаток Ж (обов'язковий) Параметричний сенсор на ефекті Холла ……154
Додаток К (обов'язковий) Схема радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля ……. 156
Додаток Л (обов'язковий) Радіовимірювальний сенсор індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів

з активним індуктивним елементом …….158
Додаток М (обов’язковий) Структурна схема макету для експериментальних досліджень ……...160
Додаток Н (обов’язковий) Теоретичні і експериментальні залежності спадаючої ділянки ВАХ радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом …….162
Додаток П (обов’язковий) Теоретичні і експериментальні залежності активного опору радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом від напруги живлення ……164
Додаток Р (довідниковий) Програма моделювання радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом в середовищі Matlab 9.1…….166

ВСТУП

Актуальність. Розвиток економіки більшості країн базується на впровадженні сучасних нанотехнологій в такі галузі як металургія, енергетика, машинобудування, авіаційна та космічна техніка, хімічна промисловість, ефективність яких значною мірою залежить від якості контролю і автоматизації виробничих процесів. У зв'язку з цим важливим завданням сучасної радіотехніки, приладобудування та контрольно–вимірювальної техніки є вибір надійних методів вимірювання індукції магнітного поля в різних сферах, створення радіовимірювальних приладів необхідної точності, стабільності та швидкодії, а також дослідження впливів на результат вимірювань всієї сукупності інформативних параметрів, які супроводжують вимірювальний процес [1–5]. Для забезпечення високої точності та чутливості радіовимірювань необхідно здійснити підсилення інформативного сигналу первинного параметричного сенсора, компенсацію адитивної похибки, лінеаризації передатної характеристики, а також похибокок, які виникають у зв'язку зі зміною параметрів навколишнього середовища та часової нестабільності параметрів. Ефективно виконувати подібні перетворення можна тільки з використанням цифрової обробки інформативного сигналу, отже, необхідне створення інтелектуальних параметричних сенсорів на базі сучасних прогресивних напівпровідникових матеріалів та інтегральної технології з використанням мікропроцесорних пристроїв [6–8].

В літературних джерелах, на теперішній час, в недостатній мірі розглянуті сучасні дослідження в напрямку створення і розвитку параметричних сенсорів індукції індукції магнітного поля, особливо, параметричних сенсорів з частотним вихідним сигналом, тому написання цієї роботи має актуальне значення [9–10].

В магістерській кваліфікаційній роботі розглянуті два напрямки створення сенсорів індукції магнітного поля, одним із яких є розбудова параметричних сенсорів з вихідним амплітудним сигналом, а другий – створення параметричних сенсорів з частотним вихідним сигналом.

Частотний принцип роботи параметричних сенсорів індукції магнітного поля має ряд переваг перед амплітудним, які полягають у високій завадостійкості, що приводить до високої точності вимірювання, а також

високе значення вихідного частотного сигналу, що перевищує декілька вольт. Радіовимірювальні прилади з частотним вихідним сигналом дозволяють відмовитись від аналого–цифрового перетворення і подальшого підсилення вихідного сигналу, що значно здешевлює системи вимірювання та контролю. Використання реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференційним опором, які залежать від дії індукції магнітного поля дозволяє будувати радіовимірювальнічастотні параметричні сенсори, які легко узгоджуються з мікропроцесорними пристроями обробки сигналів і дозволяють створювати "інтелектуальні параметричні сенсори" [1, 2, 3].

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є покращення чутливості та точності, частотного параметричного сенсора індукції магнітного поля, який є технологічно сумісним з новітньою радіотехнічною мікроелектронною елементною базою.

Задачами дослідження є:

1) проаналізувати існуючі параметричні сенсори індукції магнітного поля та обґрунтувати переваги сенсорів індукції індукції магнітного поля з частотним виходним сигналом по відношенню до амплітудних сенсорів індукції індукції магнітного поля;

2) удосконалити математичну модель частотного параметричного сенсора індукції індукції магнітного поля на основі біполярних транзисторів з чутливим елементом Холла, та здійснити їх аналіз;

3) отримати аналітичні залежності функції перетворення та рівняння чутливості параметричного сенсора індукції магнітного поля з частотним вихідним сигналом на основі біполярних транзисторів та розглянути можливість їх застосування при розв'язанні прикладних задач.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення індукції магнітного поля в частоту в параметричному сенсорі індукції магнітного поля на основі біполярних транзисторів з елементом Холла.

Предмет дослідження – параметри радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним вихідним сигналом такі як точність та чутливість.

Методи дослідження: метод контурних струмів використано для аналізу функції перетворення та рівняння чутливості; методи лінійної та нелінійної оптимізації використано для визначення параметрів сенсора індукції магнітного поля з частотним вихідним сигналом та оцінювання метрологічних характеристик.

Наукова новизна роботи:

1. Розглянуто магнітореактивний ефект в транзисторних структурах з від'ємним диференційним опором.
2. Розроблено математичні моделі радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля на основі біполярного та польового транзисторів з чутливим елементом на основі сенсора Холла.
3. Розроблено математичні моделі радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом.
4. Проведено дослідження радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом на ефекті Холла.
5. Отримано аналітичні вирази для функції перетворення та рівняння чутливості радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що розроблено частотний параметричний сенсор індукції магнітного поля, який дозволить проводити вимірювання напруженості змінного індукції магнітного поля у двох діапазонах частот за малий проміжок часу. Розроблюваний частотний параметричний сенсор індукції магнітного поля є переносним та побудований на сучасній елементній базі з покращеними метрологічними параметрами, зокрема точністю і чутливістю.

Чутливість радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля на основі біполярного та польового транзисторів з чутливим елементом на основі сенсора Холла у діапазоні від 1 мТл до 60 мТл складає 1000…1550 Гц/мТл. А для радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом чутливість складає 2000…2500 Гц/мТл.

Розроблена експериментальна установка для дослідження параметрів радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля. Проведено експериментальні дослідження радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором практично самостійно в науковій школі д.т.н., проф. Осадчука О.В.

Структура і обсяг роботи. Магістерська кваліфікаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, додатків та переліку посилань.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ПАРАМЕТРИЧНИХ СЕНСОРІВ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

1.1 Параметричний сенсор для вимірювання індукції магнітного поля

В параметричних сенсорах для вимірювання напруженості індукції магнітного поля до П–видного магнітопроводу із електротехнічної сталі з компенсаційною обмоткою, один вихід якої з'єднаний із входом реєструючого параметричний сенсора, під'єднаного до загальної шини а інший до диференційного підсилювача і підсилювача потужності. В області, близькій до об'єкту контролю прикріплена пластина з магнітом'якого матеріалу, на якій розміщений сенсор Холла [11]. Між сердечником і пластиною знаходиться діелектрична прокладка. Таким чином, ми маємо можливість зосередити магнітний потік, що пронизує дану систему в області досліджуваного тіла.

На рис. 1.1 зображена та наведено в додатку Б блок–схему параметричного сенсора. До П–видного магнітопроводу 2 з конденсаційною обмоткою 6 припаяно магнітом'яку пластину 3 із вмонтованим в центрі площини сенсором Холла 5, 7 і 8 відповідно входи, з'єднані з джерелом живлення 12, і виходи сенсора Холла, підключені до диференційного підсилювача 9 і підсилювача потужності 10.

Параметричний сенсор працює наступним чином: П–видний магнітопровід накладається на об'єкт контролю. Частина магнітного потоку розсіюється і йде через осердя, але в основному зосереджується в області магнітом'якої пластини. Одночасно через входи сенсора Холла 7 проходить струм від джерела живлення, вихідний інформативний сигнал різниці потенціалів через виходи 8 поступають на диференційний підсилювач 9, а після нього – на підсилювач потужності 10. Через компенсуючу котушку 6 проходить струм, який наводить магнітний потік протилежний основному напрямку. Таке положення зберігається до повної компенсації магнітного потоку, що відповідає різниці потенціалів сенсора Холла. Таким чином відбувається автоматична компенсація магнітного потоку, а струм, що протікає через вимірювальний резистор R, створюватиме падіння напруг між контактними площинами магнітопроводу і об'єктом вимірювального контролю. За наявності тріщини зміниться опір матеріалу досліджуваного тіла, відповідно зміниться

струм і значення падіння напруг, а реєструючий параметричний сенсор покаже присутність дефекту об’єкту контролю.

Суть контролю полягає у різниці значень магнітної проникності матеріалів, з яких виконано об'єкт контролю (матеріал з показником μ_1), магнітопровід (електротехнічна сталь з $\mu_2 = 8000$) і впаяна пластина (пермалой високонікелевий із $\mu_3 = 300000$).

Магнітний потік через замкнений контур визначається виразом

$$\hat{O} = \hat{A} \cdot S \cdot \cos\alpha ,$$

де В – вектор магнітної індукції; Ф – магнітний потік; α – кут між вектором магнітної індукції та нормаллю до площини, через яку проходить магнітний потік.

Магнітна проникність через коерцитивну силу описується виразом

$$\mu = \frac{\hat{A}}{\mu_o \cdot H} ,$$

де Н – коерцитивна сила.

З вище наведених виразів видно, що магнітний потік прямо пропорційно зв'язаний з вектором магнітної індукції, який в свою чергу залежить від магнітної проникності. Таким чином, розмістивши пластину із матеріалу з максимально великим значенням магнітної проникності μ_3, ми зосередим значну частину магнітного потоку в області поверхні об'єкту контролю, тим самим збільшили чутливість сенсора до дефектів.

Через сенсор Холла, розташований в магнітному полі Н, проходить струм І, а електрорушійна сила, яка виникає описується виразом

$$E_x = I \cdot H \cdot R \cdot \frac{10^{-8}}{d\hat{o}\left(\frac{1}{\grave{a}}\right)}$$

де $\varphi\left(\frac{1}{\grave{a}}\right)$ – функція, що залежить від геометрії елемента Холла; R – постійна Холла (см/К); l, a – розміри сенсора Холла.

Таким чином із зміною магнітного потоку змінюється і значення ЕРС.

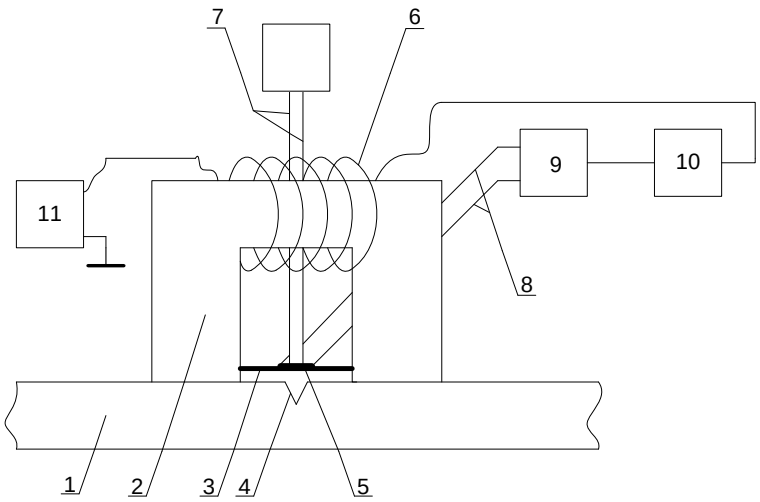


Рисунок 1.1 – Параметричний сенсор для вимірювання напруженості індукції магнітного поля

1.2 Вимірювальний параметричний сенсор індукції магнітного поля

В роботі [12] запропоновано напівпровідниковий сенсорів індукції магнітного поля, який використовує ефект Холла. У вимірювальному параметричному сенсорі індукції магнітного поля, що містить напівпровідникову робочу область квадратної форми, яка обмежена по периметру зовнішньою ізолюючою областю, а в кутах робочої області сформовано чотири струмові контакти, між якими по сторонах сформовано чотири потенційні контакти, згідно винаходу, в центрі робочої області вимірювального параметричного сенсора сформовано внутрішню ізолюючу область.

Введення нових елементів та відповідних зв'язків дозволяє обмежити область протікання струму, і тим самим, по–перше, збільшити густину струму, і, по–друге, вирівняти траєкторію руху носіїв струму. Перше забезпечує підвищення чутливості сенсора, а друге – зменшує перехресну чутливість, тобто перехресний взаємний вплив сигналів від окремих ортогональних складових вектора індукції індукції магнітного поля.

На рис. 1.2 схематично подано вид зверху вимірювального параметричного сенсора індукції магнітного поля, де 1 напівпровідникова робоча область; 2 – зовнішня ізолююча область; 3, 4, 5, 6 – чотири струмові контакти; 7, 8, 9, 10 – чотири потенційні контакти; 11 – внутрішня ізолююча область.

На рис. 1.3 схематично наведено вид вимірювального параметричного сенсора індукції магнітного поля збоку.

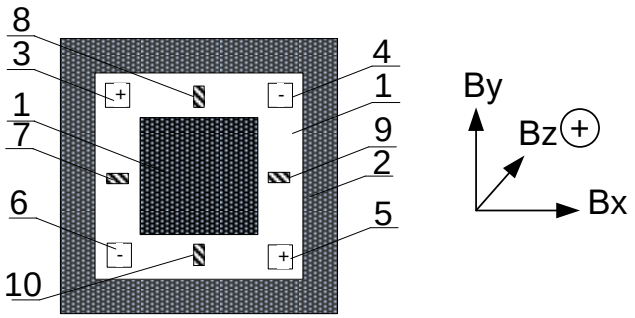


Рисунок 1.2 – Схематичний вид зверху вимірювального параметричного сенсора індукції магнітного поля

Рисунок 1.3 – Схематичний вид збоку вимірювального параметричного сенсора індукції магнітного поля

Параметричний сенсор живиться від джерела постійного струму, причому одну пару взаємно протилежних струмових контактів (наприклад 3 та 5 контакти) приєднують до одного полюса джерела живлення (наприклад додатнього), а іншу пару контактів (відповідно 4 та 6) – до іншого полюса джерела живлення (відповідно від'ємного). Відповідно до такої схеми під’єднання утворюють чотири ділянки протікання струмів I34, I36, I54, I56, де індекси в позначеннях струмів відповідають номерам позначень струмових контактів. Ці ділянки протікання струмів лежать на сторонах квадрату. Принципово важливим є те, що струми, які протікають в протилежних сторонах квадрату є рівними за величиною і протилежними за знаком

$$\vec{I}_{34} = -\vec{I}_{65};\ \vec{I}_{36} = -\vec{I}_{45};$$

Вихідним сигналом вимірювального параметричного сенсора є різниця напруг між контактами. Інформаційними сигналами про проекції вектора індукції магнітного поля Bx, By, Bz є напруги Vx, Vy, Vz, які в першому наближенні визначаються виразами

$$V_X = V_8 - V_{10};\ V_{O'} = V_7 - V_9;\ V_Z = \left\{\left(V_8 - V_9\right) + \left(V_{10} - V_7\right)\right\} / 2.$$

Відмінністю вимірювального параметричного сенсора згідно винаходу є обмеження області проходження струму між зовнішньою 2 та внутрішньою 11 ізолюючими областями. Це забезпечує підвищення чутливості сенсора до магнітних полів Bx, By та зменшує перехресний вплив між інформативними сигналами.

Підвищення чутливості пояснюється зменшенням розміру робочої області вимірювального параметричного сенсора. На противагу до класичних параметричних сенсорів Холла (чутливих до перпендикулярного до площини параметричного сенсора поля B), де розміром, який визначав чутливість, є товщина робочої області, у параметричний сенсорів полів Bx, By визначальним є розмір області розтікання струму по площині. Чим менший розмір займає область розтікання струму, тим більша різниця напруг між відповідними потенційними контактами, а отже вища чутливість [13].

Зменшення перехресного впливу між сигналами пояснюється вирівнюванням траєкторії руху носіїв струму. У параметричному сенсори, що є найближчим аналогом носії струму, які протікають через центральну частину параметричний сенсора, відхиляються від прямолінійної траєкторії. Це обумовлює одночасну дію на такі носії складових поля Bx, By, що призводить до значної перехресної чутливості Перехресна чутливість є негативною ознакою вимірювальних параметричних сенсорів, яка спричинює похибки визначення складових поля Bx, By. У вимірювального параметричного сенсора згідно винаходу в центральній частині знаходиться ізолююча область, а отже носії струму через неї не проходять.

Найбільш ефективним є вимірювальний параметричний сенсор згідно винаходу виготовлений на тонких напівпровідникових плівках. Чим менша товщина робочої області параметричного сенсора, тим меншими є паразитні ефекти, зокрема, пленарний ефект. Для забезпечення однакових значень чутливості по всіх складових поля необхідно, щоб товщина робочих областей параметричного сенсора була співмірна з розміром області розтікання струму в площині параметричного сенсора. Враховуючи, що товщина плівок високоефективних параметричних сенсорів Холла становить одиниці мікрометрів, а розмір області розтікання без використання внутрішньої ізолюючої області може мати значення порядку ста мікрометрів, чутливість вимірювального параметричний сенсора до складових поля Bx, By буде на декілька порядків меншою ніж доскладової поля Bz. Така різниця чутливостей до різних складових поля, в свою чергу, призводить до значної перехресної чутливості.

Введення внутрішньої ізолюючої області згідно винаходу дозволяє обмежити до мінімального значення розмір області розтікання струму (10 мкм і менше). При виготовленні вимірювального параметричного сенсора на тонких напівпровідникових плівках (10 мкм і менше), його чутливість до складових поля Bx, By при введенні внутрішньої Ізолюючої області зростає в 10 раз і більше, а перехресна чутливість зменшується в декілька разів.

Відмінністю вимірювального параметричного сенсора згідно винаходу є обмеження області проходження струму між зовнішньою 2 та внутрішньою 11 ізолюючими областями. Це забезпечує підвищення чутливості сенсора до магнітних полів Bx, By та зменшує перехресний вплив між інформативними сигналами [14].

Підвищення чутливості пояснюється зменшенням розміру робочої області вимірювального параметричний сенсора. На противагу до класичних параметричних сенсорів Холла (чутливих до перпендикулярного до площини параметричний сенсора поля Bz), де розміром, який визначає чутливість, є товщина робочої області, у параметричний сенсорів полів Bx, By визначальним є розмір області розтікання струму по площині. Чим менший розмір займає область розтікання струму, тим більша різниця напруг між відповідними потенційними контактами, а отже вища чутливість. Зменшення перехресного впливу між сигналами пояснюється вирівнюванням траєкторії руху [14].

1.3 Сенсор індукції магнітного поля

В сенсора індукції магнітного поля, складеного з Y–подібного розгалуженого оптичного волокна джерела світла з влаштуванням запровадження у одного торця розгалуженої частини волокна, фотоприймача на другому торці розгалуженої частини волокна, згідно приладу, влаштування запровадження випромінювання в оптичне волокно, виконане з можливістю збудження тільки вісьової моди, період доменної структури в МОМ, зв'язаний з числовою апертурою волокна співвідношенням [15]

$$\frac{\alpha}{d} \leq 2 \cdot N \cdot A,$$

де α – довжина хвилі; d – період доменної структури в МОМ; NA – числова апертура волокна.

МОМ освітлюється у основному випромінюванні осьової моди, та частково випромінюванням вищих мод, що утворилися при проходженні

вісьовой моди крізь оптичне волокна Основна частина випромінювання, що освітлює МОМ, має розходження, багато менш числової апертури оптичного волокна [15]. Тому для ефективного гасіння у оптичному волокні випромінювання вищих порядків дифракції на МОМ достатньо, щоб кут дифракції перевищував апертурний кут оптичного волокна, однак не два апертурних кута, як у прототипі. Зменшення у два разі мінімального куту дифракції дозволяє у два рази збільшити період ДС у МОМ, що використається, збільшити товщину у сенсорові МОМ, дифракційну ефективність МОМ та динамічний діапазон влаштування, що використовується [15].

На рисунку 1.4 представлена та наведена в додатку В оптична схема параметричного сенсора. 1– У – подібного розгалужене оптичне волокно, 2 – джерело світла, 3 – влаштування запровадження випромінювання у оптична волокно (1), розміщені у області одного торця розгалуженої частини волокна, 4 – плівка МОМ, розміщена на торці нерозгалуженої частини оптичного волокна (1), 5 – фотоприймач, розміщений на другому торці розгалуженої частини волокна (1).

Параметричний сенсор працює наступним чином. Параметричний сенсор для запровадження випромінювання у оптичне волокно (3) спрямовує пучок випромінювання лазера (2) на торець оптичного волокна (1) та порушує вісьову моду волокна. Випромінювання вісьової моди оптичного волокна (1) дифрагує на ДС у МОМ (4). Випромінювання нульового порядку дифракції на МОМ вертається у оптичне волокно та влучає на фотоприймач (5). Випромінювання вищих порядків дифракції на МОМ влучає у оболонку оптичного волокна та поглинається.

Тому, що у сенсорі, що заявляється, використовуються більш товсті МОМ, відношення корисного оптичного сигналу до всього світлового потоку (динамічний діапазон) зростає, що підвищує точність вимірювання напруженості індукції магнітного поля.

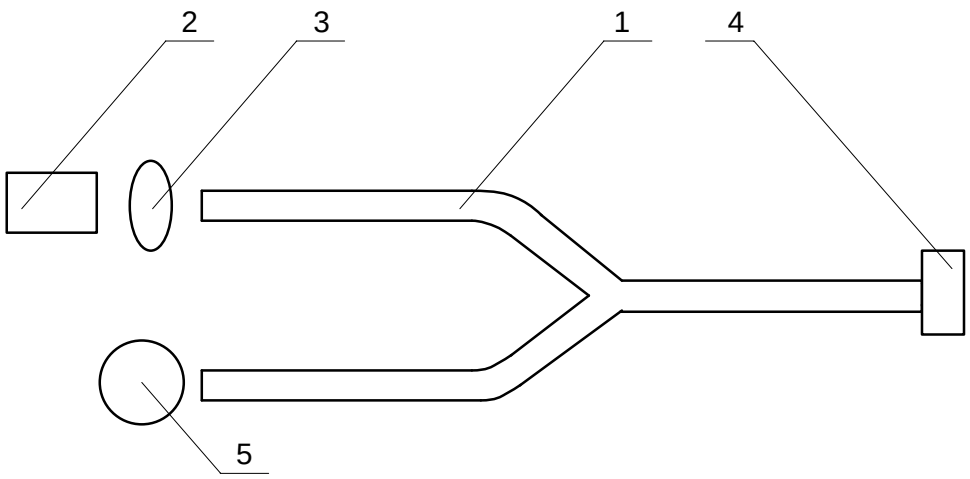


Рисунок 1.4 – Оптична схема сенсора індукції магнітного поля

Приклад. Плівка МОМ виконана з гранату, що містить вісмут. При числовій апертурі оптичного волокна 0,17 мінімальний період ДС повинен складати у прототипі 3,5 мкм. У рішенні, що заявляється, технічно можливо використання МОМ з періодом ДС 7 мкм Відповідно, товщина МОМ повинна складати не 2–3 мкм, як у прототипі, а 4 – 6 мкм. Інтенсивність нульового порядку дифракції буде змінюватися не на –1%, як в прототипі, а на –4%. Точність вимірювання зросте приблизно у 4 рази. У налаштуванні, що заявляється, підвищується точність вимірювання за рахунок розширення динамічного діапазону [15].

1.4 Параметричний сенсор мілітесламетр

Параметричний сенсор відноситься до області магнітних вимірювань і може бути використаний для вимірювання магнітної індукції слабких постійних полів [16].

В параметричний сенсор, що містить послідовно сполучені джерело напруги, знижувальний трансформатор і параметричний сенсор Холла, а також перший випрямляч, вхід якого сполучений з холловскими електродами параметричний сенсора Холла, і міливольтметр, своїм входом сполучений з виходом першого випрямляча, введені польовий транзистор, другий випрямляч і резистор, при цьому заслін і витік польового транзистора сполучений через другий випрямляч з резистром, включеним послідовно з первинною обмоткою знижувального трансформатора, а польовий транзистор включений послідовно з міливольтметром [16].

На рис. 1.5 зображена та наведена в додатку Д структурна схема параметричного сенсора. Параметричний сенсор містить сенсор Холла 1, джерело напруги 2, знижувальний трансформатор 3, перший випрямляч 4, міливольтметр 5, резистор 6, другий випрямляч 7 і польовий транзистор 8.

Параметричний сенсор працює таким чином. При зміні температури навколишнього середовища змінюється чутливість сенсора 1 Холла (пропорційно зміні рухливості носіїв заряду матеріалу пластини) Одночасно відбувається зміна опору пластини параметричного сенсора, що приводить до пропорційної зміни струму у вторинній і первинній обмотках трансформатора 3, що, у свою чергу, викликає приріст напруги на резисторі 6. Напруга випрямляється за допомогою випрямляча 7 і прикладається до затвора польового транзистора 8, змінюючи його опір і, отже, струм через міливольтметр 5 так, щоб компенсувати зміну чутливості сенсора 1 Холла [16].

Перевага запропонованого мілитесламетра полягає в тому, що роль термістора (сенсора температури), призначеного для компенсації додаткової температурної погрішності, виконує сам параметричний сенсор Холла, що продовжує при цьому працювати в режимі заданої напруги. Це дозволяє зменшити габарити вимірювального зонда (в порівнянні з тими приладами, в яких термистор розташований в безпосередній близькості від параметричного сенсора Холла) або підвищити точність компенсації додаткової температурної погрішності в порівнянні з тими приладами, в яких термистор і параметричний сенсор Холла рознесені [16].

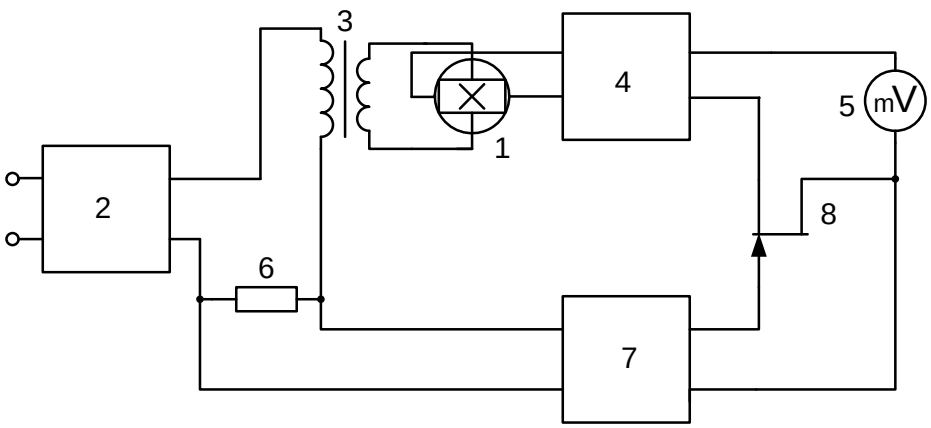


Рисунок 1.5 – Структурна схема мілітесламетра

Мілітесламетр, що містить послідовно сполучені джерело напруги, знижувальний трансформатор і параметричний сенсор Холла, а також

перший випрямляч, вхід якого сполучений з холловскими електродами перетворення Холла, і міливольтметр, своїм входом сполучений з виходом першого випрямляча, відмінний тим, що з метою підвищення точності вимірювання, в нього введені польовий транзистор, другий випрямляч і резистор, при цьому затвор і витік польового транзистора сполучений через другий випрямляч з резистором, включеним послідовно з первинною обмоткою знижувального трансформатора, а польовий транзистор включений послідовно з мілливольтметром [16].

1.5 Сенсор Холла

Прилад відноситься до приладобудування, зокрема до приладів, заснованих на ефекті Холла. Він може бути використаний при створенні параметричний сенсорів чалих переміщень, безконтактних параметричний сенсорів струму і потужності, а також в пристроях автоматики і обчислювальної техніки [17].

Поставлена мета досягається тим, що в сенсору Холла, що містить напівпровідникову пластину, холлівські і струмові електроди, один з яких розщеплений на два окремі контакти, контакти розщепленого струмового електроду виконуються лінійними на всю ширину сенсора і відділяються один від одного розрізом, що проходить по струмовій осі симетрії і ділячим сенсор на два канали від розщепленого струмового електроду до лінії, що сполучає ближні краї холлівских електродів.

На рис. 1.6 показана конструкція сенсора. Напівпровідникова пластина 1 містить холлівські електроди 2 і лінійний (на всю ширину пластини) струмовий електрод 2. Другий струмовий електрод розтоплений на два лінійні електроди 4 і 5 розрізом 6, який проходить уздовж струмової осі симетрії А–А сенсора, причому розріз виконаний до лінії Б–Б, яка сполучає ближні до розщепленого електроду краю холлівских електродів. Для усунення I) до лінійних електродів 4 і 5 під'єднують змінний резистор 7. Змішенням движка резистора управляю-чий струм перерозподіляють по струмових каналах через електроди 4 і 3 [17].

Сенсор Холла, що містить напівпровідникову пластину, холівські і струмові електроди, один з яких розщеплений на два окремі контакти, відмінний тим, що, з ланцюгом підвищення його чутливості і надійності, контакти розщепленого струмового електроду виконані лінійними на всю ширину сенсора і відокремлені друг від другу розрізом, що проходить по струмовій осі симетрії і длячтим сенсор на два канали від розщепленого

струмового електроду до лінії, що сполучає ближні краї хололовских електродів [17].

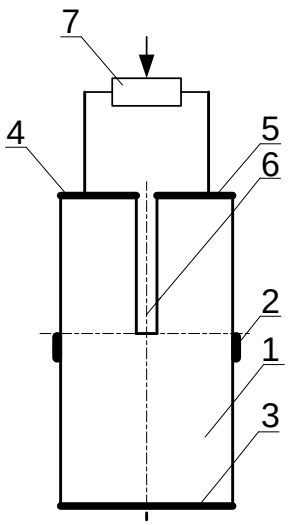


Рисунок 1.6 – Конструкція сенсора Холла

1.6 Параметричний сенсор для вимірювання індукції магнітного поля

Параметричний сенсор відноситься до області магнітних вимірювань і призначене для вимірювання імпульсних, синусоїдальних і постійних полів. В параметричний сенсори струмовий і вимірювальний ланцюги забезпечені двома злагодженими коаксіальними лініями, при цьому в струмовому ланцюзі коаксіальні лінії включені між струмовими кінцями сенсора і розділовим трансформатором, який виконаний високочастотним і сполучений з генератором високої частоти, а у вимірювальній між холловіскими кінцями і первинною обмоткою розділового трансформатора, також виконаного широкосмуговим. Завдяки цьому розширяється частотний діапазон вимірювань і підвищується завадостійкість параметричний сенсора [18].

На рис. 1.7 зображена блок–схема запропонованого параметричного сенсора. Параметричний сенсор містить генератор високої частоти, блок 2 установки нуля, симметруюче і погоджуюче параметричний сенсори 3 і 4, сенсор 5 Холла, фільтр 6 високої частоти, ртутний переривник 7, аттенюатор 8, підсилювач 9 високої частоти, синхронний детектор 10, фільтр низької частоти, катодний повторитель 12, реєструючий прилад 12 [18].

Генератор 1 складається із задаючого генератора на тунельному діоді і трьохкаскадного резонансного підсилювача на напівпровідникових тріодах і

забезпечує стабільну напругу високої частоти 32 мгц, яка в п'ять разів перевищує верхню граничну частоту спектру індукції магнітного поля.

Симетрируючий параметричний сенсор 3 ланцюги живлення складається з розділового трансформатора на феритових кільцях і двох злагоджених на кінці 50–омних коаксіальних ліній і забезпечує стабільну передачу високочастотної енергії до сенсора і від нього на досить велику відстань (до 10 м) не порушуючи симетрії підключення останнього. Така система не чутлива до електромагнітних перешкод і сама не створює їх. Пятиланцюгові фільтри у високій частоти у вимірювальному ланцюзі оберігають сенсор і підсилювач від перевантаження завдяки наведенням від індукції магнітного поля. Як симметруючий і погоджуючий параметричний сенсори, в цьому ланцюзі застосовано дві злагоджені на вході коаксіальні лінії і широкосмуговий трансформатор. Катодний повторювач, зібраний по каскодной схемі, погоджує трансформатор з малим опором аттенюатора 8 і забезпечує постійність коефіцієнта передачі (0,55) в більш широкому динамічному і частотному діапазонах. Ртутний переривник 7 перетворить гармонійну напругу сигналу в радіоімпульси з фронтом наростання порядку 1 нсек і цим полегшує компенсацію паразитних сигналів в сигнальному ланцюзі при вимірюванні постійного індукції магнітного поля і калібруванні приладу, а також настройку приладу. Калібрувальний аттенюатор 8 забезпечує ослаблення сигналу при вимірюванні великих полів. Резонансний підсилювач 9 налаштований на частоту 29 МГц і має смугу пропускання 7 МГц. Синхронний детектор 10 зібраний; по двотактній послідовній схемі на напівпровідникових діодах. Четирьохланцюговий фільтр 11 низкої частоти на виході детектора 10 з частотою зрізу 6 МГц забезпечують крутий спад частотної характеристики тракту посилення. Періодичне градуювання параметричний сенсора здійснюється за допомогою калібрувального електромагніту, який живиться від стабілізованого джерела напруги [18].

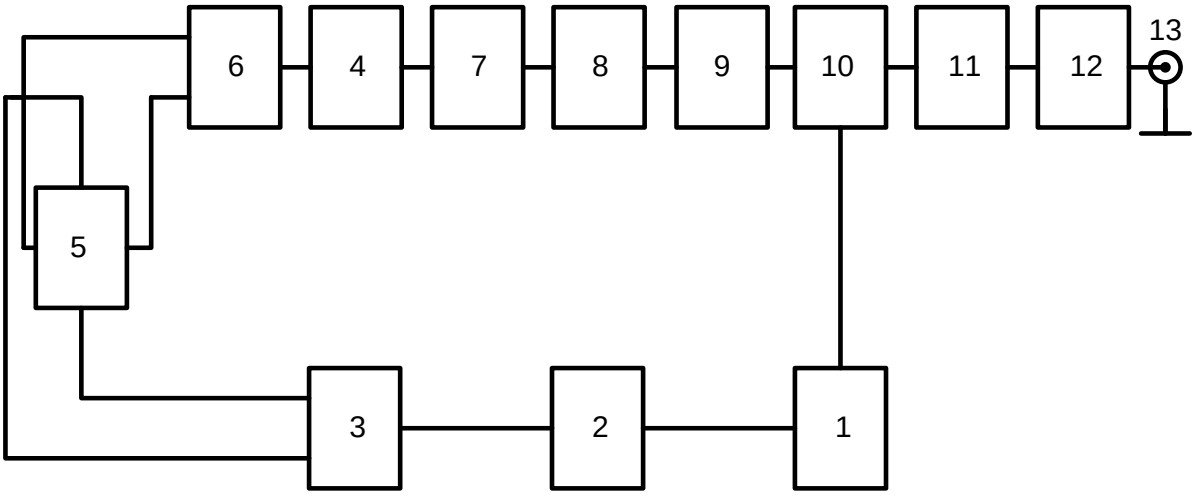


Рисунок 1.7 – Блок–схема параметричного сенсора індукції магнітного поля

1.7 Параметричний сенсор для вимірювання слабих постійних магнітних полів

В параметричному сенсори грані з холловскими електродами потокочутливого елемента мають різні швидкості поверхневої рекомбінації носіїв струму. Концентратор виконаний з отвором, в якому розміщена модуляційна обмотка. Це дозволяє збільшити чутливість параметричний сенсора і спростити його конструкцію [19].

На рис. 1.8 представлена принципова схема запропонованого параметричного сенсора. Параметричний сенсор містить концентратор 1, через отвір 2 яке проходить модуляційна обмотка 3, підключена до джерела змінного струму 4, сенсор ЕРС Холла 5, грані з холлівскими електродами якого мають різні швидкості поверхневої рекомбінації носіїв струму (грань сенсора з великою швидкістю рекомбінації на кресленні заштрихована, на протилежній їй грані швидкість рекомбінації носіїв струму мала). Сенсор одержує живлення через резистор 6 від джерела постійного струму 7 і сполучений з вихідним приладом 8 [19].

Модуляційна обмотка 3 наводить місцеве поле поблизу отвору 2, насичуюючи магнітний матеріал на цій ділянці концентратора. При цьому збільшується величина магнітного опору в зазорі концентратора, що викликає зменшення магнітного потоку в ньому [19].

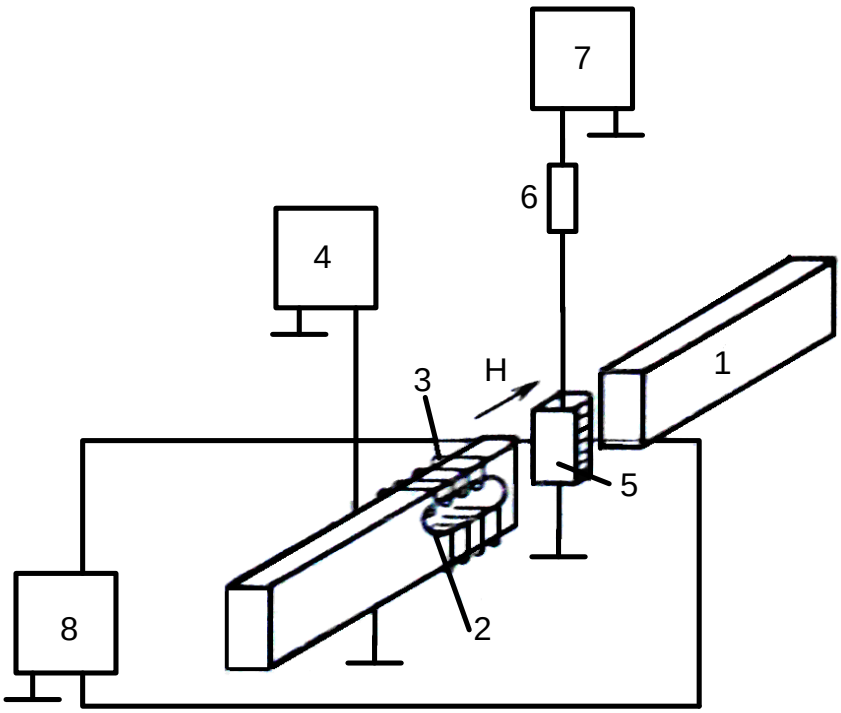


Рисунок 1.8 – Принципова схема параметричного сенсора слабких постійних магнітних полів

При показаних на кресленні напрямах струму і напруженості індукції магнітного поля сила Лоренца відхилює носії струму до грані з великою швидкістю рекомбінації, але концентрація їх біля цієї грані майже не міняється, тоді як у протилежної грані – значно зменшується. В результаті середня по перетину сенсора концентрація носіїв струму також зменшується в порівнянні з їх рівноважною концентрацією. Коефіцієнт Холу, обернено пропорційний середній концентрації носіїв струму, збільшується, що приводить до збільшення ЕРС Холла, реєстрованої вихідним приладом 8 [19].

1.8 Параметричний сенсор для вимірювання напруженості індукції магнітного поля

Параметричний сенсор відноситься до області приладобудування і призначений, зокрема, для вимірювання слабих магнітних полів. В параметричному сенсори на кожну з чотирьох бічних граней паралелепіпеда нанесені недотичні між собою дифузійні шари із знаком провідності, протилежним знаку провідності решти маси напівпровідникового кристала, причому до кожного дифузійного шару приєднані струмові і холлівскі електроди [20].

На рис. 1.9 показаний описуваний параметричний сенсор, що складається з напівпровідникового кристала 1, на бічні грані якого нанесені дифузійні шари 1. Знак провідності останніх протиставлений знаку провідності напівпровідникового кристала [20]. Пари шарів 2, лежачих на протилежних гранях кристала 1, є парами паралельно розташованих сенсорів Холу, до яких приєднані струмові 3 і холлівскі 4 електроди.

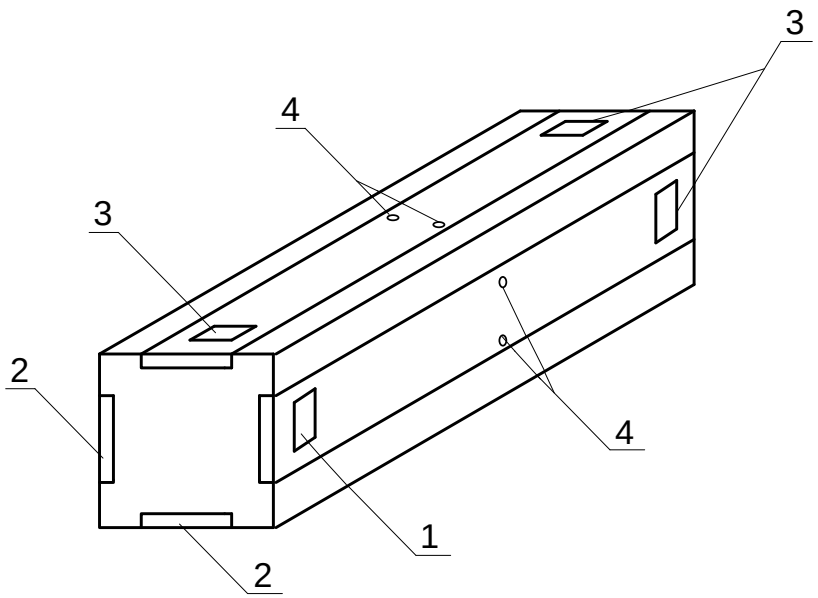


Рисунок 1.9 – Параметричний сенсор напруженості індукції магнітного поля

При вимірюванні напруженості індукції магнітного поля кристал поміщають в магнітне поле і з електродів 3 кожної пари паралельно розташованих сенсорів знімається сигнал ЕРС Холла, а струмові електроди 4 сполучають так, щоб управляючий струм проходив послідовно через дифузійні шари 2, розташовані на протилежних гранях кристала [20].

Оскільки пари шарів 2, лежачих на протилежних гранях, розташовані взаємно перпендикулярно, то кожна з пар виміряє одну з двох взаємно перпендикулярних складових напруженості індукції магнітного поля. При цьому на межі дифузійного шару 2 і кристала 1 утворюється p–n перехід і електричний струм, що увійшов до шару 2, може розповсюджуватися тільки уздовж цього шару, не проникаючи в товщу кристалла1. При послідовному з'єднанні дифузійних шарів 2, розташованих на протилежних гранях кристала 1, p–n переходи служать ізоляторами, що виключають можливість витоку зарядів в товщу кристала 1 [20].

1.9 Цифровий параметричний сенсор магнітної індукції

На рис. 1.10 зображена блок–схема цифрового параметричного сенсора магнітної індукції. В блок–схему включені: вибірковий підсилювач 1, лінійний детектор 2, автоматичний перемикач 3, низькоомий резистор 4, сенсор Холла 5, джерело змінного струму 6, нуль–орган 7, інтегратор 8, автоматичний перемикач 9, джерело опорної напруги 10, генератор тактових імпульсів 11, схема управління 12, ключ 13, генератор рахункових імпульсів 14, лічильник 15, регістр пам'яті 16, параметричний сенсор напруга — код 17, симметруючий [21].

Вимірювання проводиться в два такти. В одному такті на вхід вибіркового підсилювача 1, сполученого з лінійним детектором 2, через автоматичний перемикач 3 подається напруга, що знімається з низкоомного резистора 4, включеного в коло живлення сенсора Холла 5 від джерела змінного струму 6. Посилена і випрямлена напруга подається на один з входів нуль–органу 7. На інший вхід нуль–органу 7 поступає напруга, що лінійно змінюється, з виходу інтегратора 8, на вхід якого через автоматичний перемикач 9 подається сигнал від джерела опорної напруги 10. Одночасно з початком розгортки лінійної напруги генератор тактових імпульсів і через схему управління 12 за допомогою ключа 13 підключає вихід генератора рахункових імпульсів 14 до входу лічильника 13. При рівності порівнюваних напруг нуль–орган 7 за допомогою ключа 13 відключає лічильник 15 від генератора рахункових імпульсів [21].

Таким чином, в кінці першого, такту вимірювання число підрахованих імпульсів N1 буде зафіксовано лічильником у вигляді цифрового статичного коду, який по сигналу з схеми управління 12 переноситься в регістр пам'яті 16 і за допомогою параметричний сенсора “код — напруга” 17 назад перетвориться у відповідну напругу U2 . В другому такті вимірювання на вхід виборчого підсилювача 1 через автоматичний перемикач 3 і симметруючий трансформатор 18 подається вихідна напруга сенсора 3. На інший вхід нуль–органу 7 поступає напруга, що лінійно змінюється, з виходу інтегратора 8, на вхід якого через автоматичний перемикач 9 подається напруга з виходу параметричний сенсора “код — напруга” [21].

Таким чином, на вхід лічильника 15 встановленого до початку другого такту вимірювання стан сигналом з схеми управління 12, поступає число імпульсів N2, яке лічильник зафіксує у вигляді цифрового статичного коду. Стан лічильника відображається цифровим відліковим пристроєм 19.

Автоматичні перемикачі 3 і 9 сполучені через схему управління 12 з генератором тактових імпульсів 11, здійснюючим двотактну послідовність перетворень.

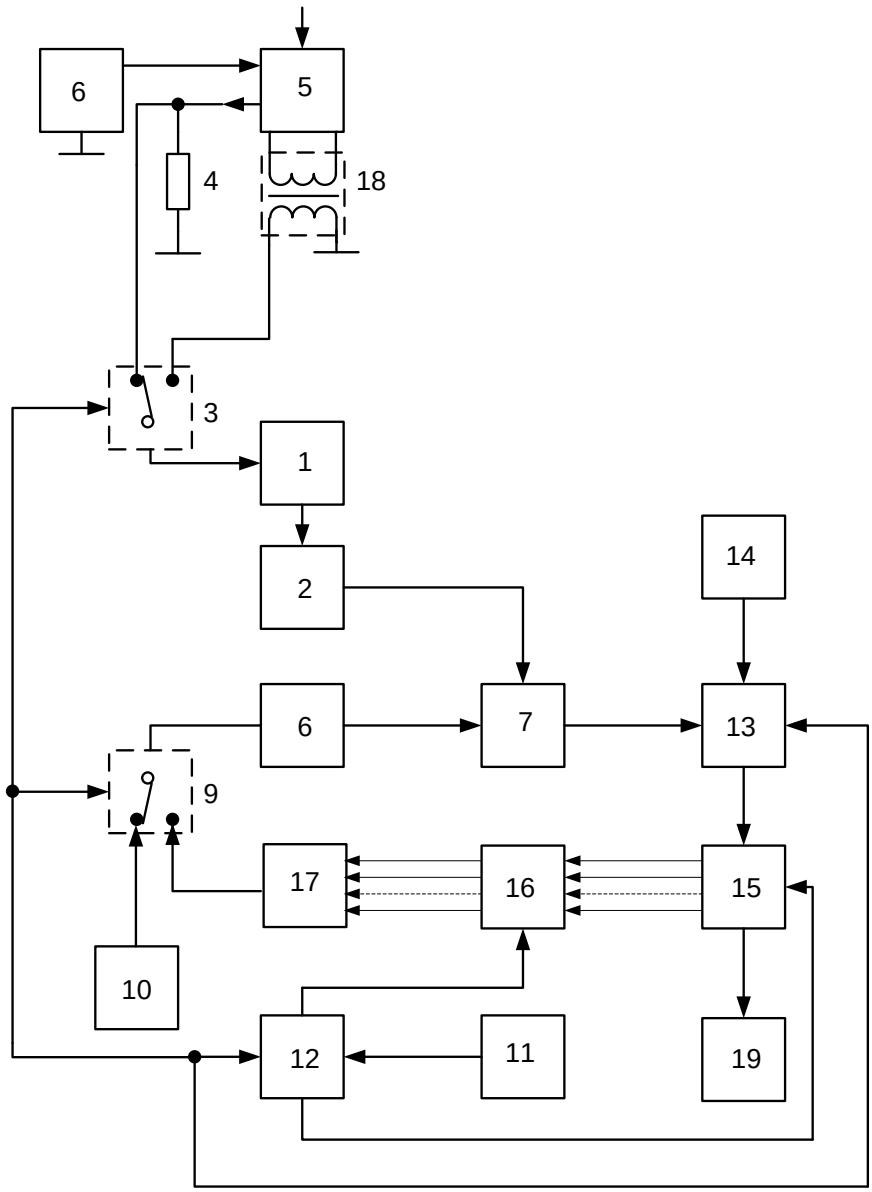


Рисунок 1.10 – Блок–схема цифрового параметричного сенсора магнітної індукції

Цифровий параметричний сенсор магнітної індукції сенсор Холла, що містить, з симетруючим трансформатором на виході і з низькоомним резистором в ланцюзі живлення сенсора від джерела змінного струму, послідовно сполучені автоматичний перемикач, виборчий підсилювач і лінійний детектор, підключений до одного входу нуль–органу, інший вхід якого через інтегратор пов'язаний з другим автоматичним перемикачем, що

працює синхронно з першим, а вихід – з першим входом ключа, другий вхід якого підключений до виходу генератора рахункових імпульсів, третій вхід — через схему управління до виходу генератора тактових імпульсів, вихід же ключа через лічильник пов'язаний з цифровим відліковим пристроєм, відмінний тим, що, з метою підвищення точності, він забезпечений джерелом опорної напруги, параметричний сенсорем “код – напруга” і регістром пам'яті, входи якого сполучені з виходами лічильника, а виходи – з входами параметричний сенсора “код – напруга”, вихід останнього сполучений з одним контактом другого автоматичного перемикача, другий контакт якого підключений до виходу джерела опорної напруги [21].

1.10 Параметричний сенсор для вимірювання величини і напрямку магнітних полів

Винахід відноситься до параметричних сенсорів для вимірювання напряму і величини напруженості магнітних полів, заснований на ефекті Холла. Для цього пропонований параметричний сенсор забезпечений двома сенсорами Холла, поміщеними в зазори магнітного кола головки у основи центрального стержня симетрично щодо нього, причому центральний стержень виконаний укороченим і із збільшеним діаметром торця, а виводи ЕРС Холла сенсорів через детектори підключені до вимірювального кола [22].

На рис. 1.11 зображений пропонований параметричний сенсор для вимірювання величини і напряму магнітних полів. Параметричний сенсор містить магнітну головку 1, центральний стержень 2, який виконаний більш коротким, ніж бічні стержні, і із збільшеним діаметром торця, тобто Т–подібним. На стрижні є обмотка 3, що живиться постійним струмом. В зазорах магнітного кола головки поміщені сенсори Холла 4 і 5, підключені до джерела змінного струму. Виводи ЕРС Холла сенсорів підключені до схем 6 і 7 посилення і детектування. Виходи схем 6 і 7 сполучені з мостовою схемою 8, в діагоналі якої коштує індикатора 9 з «О» посередині [22].

Вимірюванню підлягає магнітне поле, створюване магнітним зразком 10, поміщеним поблизу робочого зазора головки 1. Постійний струм f= живлячий обмотку 3, створює постійний магнітний потік, який розгалужується на два симетричні потоки. Силові лінії цих потоків проходять через Т–образний стрижень і бічні стрижні магнітної головки 1, не перетинаючи її робочого зазору [22].

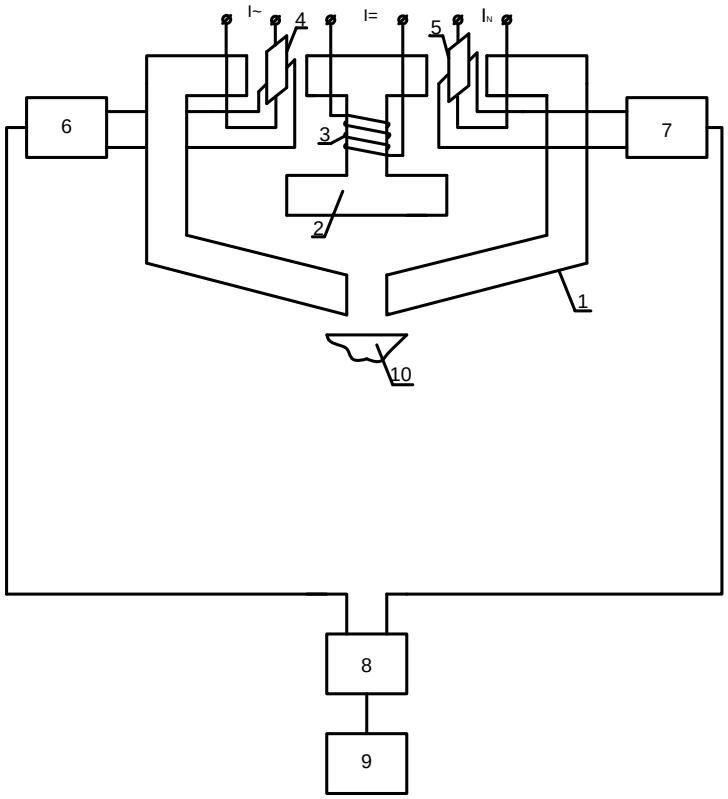


Рисунок 1.11 – Параметричний сенсор для вимірювання величини і напряму магнітних полів

За відсутності зовнішнього магнітного потоку напруга з висновків ЕРС Холла сенсорів 4 і 5, посилене і продетектувало в схемах 6 і 7, поступає на плечі мостової схеми 8, не викликаючи його розбалансу, і на індикатор 9. За наявності зовнішнього потоку, створюваного зразком 10, що виміряється, змінюється магнітний потік, пронизливий сенсори 4 і 3. При цьому залежно від напряму потоку ЕРС одного сенсора збільшується, а іншого зменшується. Підсилена і продетектована напруга з висновків ЕРС Холла сенсорів, поступивши на мостову схему 8, викликає її розбаланс в певну сторону у відповідності з напрямом індукції магнітного поля, створюваного зразком 10. Ступінь розбалансу дає величину поля. На результати вимірювань не позначається ні зовнішнє (побічне) магнітне поле, ні нестабільність живлення обмотки 2 [22].

1.11 Цифровий параметричний сенсор параметрів індукції магнітного поля

Параметричний сенсор відноситься до області приладобудування і може бути використаний при визначенні параметрів індукції магнітного поля, створюваного різними джерелами, зокрема, наприклад, магнітними головками в апаратурі магнітного запису, магнітним носієм з високоінтенсивним робочим шаром і іншими джерелами [23].

Метою винаходу є автоматизація процесів вимірювання і здійснення можливості проведення цих вимірювань в районі межі зміни напряму постійного індукції магнітного поля. На рис. 1.12 приведена структурна схема описуваного параметричного сенсора. Параметричний сенсор 1 Холла включений між джерелом 2 змінної напруги і керованим подільником 3, пов'язаним з аналого–цифровим сенсорем 3. З параметричного сенсора Холла сигнал також поступає на блок 5 визначення знака який сполучений через трігер 6, схеми 7 і 8, схему 9 повторного запуску, блок 10 управління і аналогово–цифровий сенсор 4 з цифровим пристроєм 11 [23].

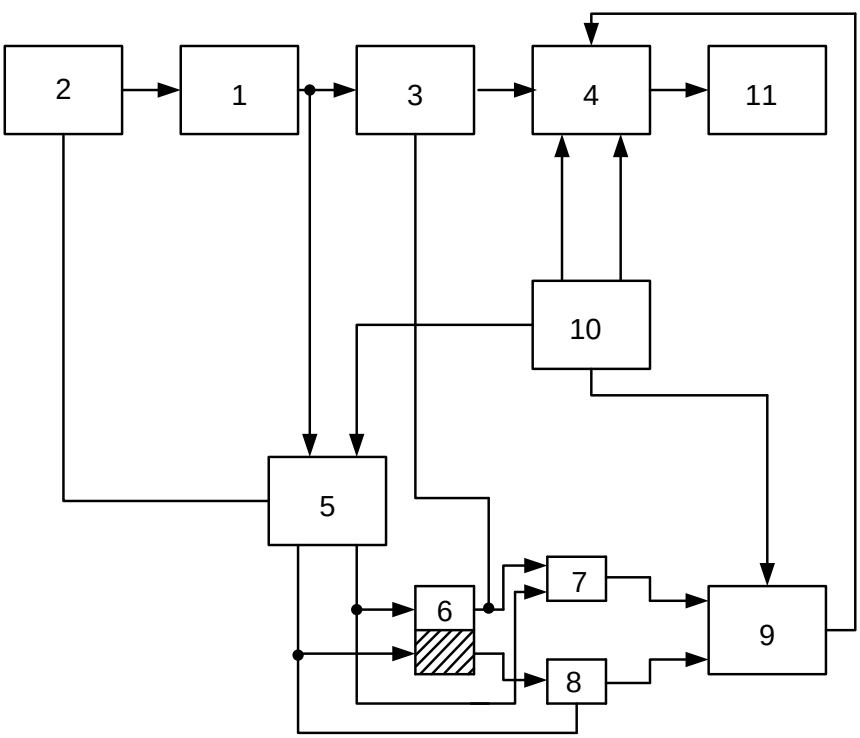


Рисунок 1.12 – Структурна схема цифрового параметричного сенсора параметрів індукції магнітного поля

Вихідний сигнал з параметричного сенсора Холла через керованого дільника 3 поступає на аналого–цифровий параметричний сенсор 3. Залежно від напряму постійного індукції магнітного поля, визначуваного по фазі вихідного сигналу параметричного сенсора Холла щодо опорного сигналу, що виробляється джерелом 8 змінної напруги, блок 5 виробляє управляючі сигнали позитивної або негативної полярності. Сигнали різної полярності поступають на різні входи трігера 6, залежно від чого він і перемикається в той або інший стан. При одному, наперед заданому напрямі індукції магнітного поля щодо параметричного сенсора Холла, тобто коли чутливість цього параметричного сенсора до наявного індукції магнітного поля одного направлення менше чутливості до нуля іншого напряму, вихідний сигнал параметричного сенсора Холла через керованого дільника 3 повністю поступає на аналого–цифровий параметричний сенсор 3. При зміні напряму індукції магнітного поля блок 5 перемикає трігер 6, який, у свою чергу, видає сигнал на перемикання керованого дільника 2. Остання змінює чутливість схеми в цілому, а отже, компенсує збільшення чутливості до індукції магнітного поля параметричний сенсора Холла [23].

Робота всього параметричного сенсора синхронізується блоком 10 управління. Таким чином, в пропонованому цифровому параметричному сенсори процес вимірювання індукції магнітного поля автоматизований, що дозволяє у будь–який момент здійснити необхідні вимірювання без попередньої підготовки. Здійснення ж проведення вимірювань в районі межі зміни напряму постійного індукції магнітного поля дозволяє отримати максимально об'єктивне уявлення про якісну характеристику поля, що виміряється [23].

1.12 Висновки до розділу

На підставі аналізу літературних джерел по розгляду сучасного стану розвитку були розглянуті параметричні сенсори для вимірювання напруженості індукції магнітного поля, вимірювальні параметричні сенсори індукції магнітного поля, сенсори індукції магнітного поля, мілітесламетр, сенсори Холла, параметричні сенсори для вимірювання слабких постійних магнітних полів, цифровий параметричний сенсор магнітної індукції, параметричний сенсор для вимірювання величини і напрямку магнітних полів, цифровий параметричний сенсор параметрів індукції магнітного поля. Усі ці параметричні сенсори можна поділити на чотири класи: 1) параметричні сенсори, в яких використовується сенсори Холла; 2) параметричні сенсори, що

мають напівпровідникову структуру; 3) параметричні сенсори, що мають транзисторну структуру; 4) цифрові.

В результаті аналізу сучасних параметричних сенсорів магнітного поля виявлено необхідність створення радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом, що усував би виявлені недоліки і характеризувався високою точністю і чутливістю. При цьому перетворювачі типу «індукція магнітного поля – частота» дозволяють вирішити проблеми узгодження перетворювачів з системами цифрової обробки даних.

2 ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ПОБУДОВИ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ СЕНСОРІВ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

2.1 Методи вимірювання індукції магнітного поля

Вимірювання індукції магнітного поля знаходять практичне застосування в дослідженнях властивостей різноманітних матеріалів, випробуванні магнітних деталей і елементів, у магнітній дефектоскопії, при вивченні магнітних полів Землі, при вимірювальному контролі магнітних полів в установках атомної і ядерної фізики [27].

Основними величинами, які характеризують магнітне поле, є магнітний потік, магнітна індукція і напруженість індукції магнітного поля. Магнітні матеріали оцінюють по їхніх характеристиках і параметрах – статичних і динамічних [28].

Вимірювані магнітні величини, зазвичай, попередньо перетворяться в електричні, які більш зручні для вимірювання та подальшої обробки. Параметричні сенсори магнітних величин в електричні будуються на основі явищ електромагнітної індукції, ядерного магнітного резонансу, гальваномагнітного і деяких інших явищ.

Розглянемо використання вимірювальної котушки так, якщо вимірюваний магнітний потік Φ зчеплений з котушкою, то в останній виникає електро-рушійна сила, яка описується виразом [29]

$$e = -w_k \frac{d\Phi}{dt}, \tag{2.1}$$

де w_k – число витків котушки.

Таким чином, котушка виконує роль параметричного сенсора магнітної величини, яка перетворює магнітну величину в електричну. Вибір форми та конструкції і розмірів такого індукційного параметричний сенсора, названого вимірювальною котушкою, залежить від параметрів індукції магнітного поля та умов його вимірювання. У будь–якому випадку потрібно, щоб витки вимірювальної котушки були зчеплені лише з вимірюваним магнітним потоком. Вираз (2.1) можна перетворити до вигляду [30]

$$d\Phi = -(1/w_k)edt,$$

і проінтегрувавши

$$\int_{t_1}^{t_2} d\Phi = -\frac{1}{w_k}\int_{t_1}^{t_2} e dt$$

або

$$\Delta\Phi = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = -\frac{1}{w_k}\int_{t_1}^{t_2} e dt \quad . \qquad (2.2)$$

З виразу (2.2) видно, що зміну потоку за час $\Delta t = t_2 - t_1$ можна визначити, проінтегрувавши електро-рушійну силу в зазначеному часовому інтервалі. Інтегрування можна провести різними способами. У магнітних вимірюваннях для цих цілей зазвичай використовують гальванометр чи веберметр.

Для вимірювання постійного магнітного потоку за допомогою гальванометра збирається ланцюг, який представлений на рисунку 2.1. Вимірювальна котушка, в якості параметричного сенсора, з числом витків w_k і опором R_k підключається до гальванометра, рамка якого має опір R_r. Вимірювання магнітного потоку проводиться наступним способом. Вимірювальна котушка спочатку поміщається у вимірюваний магнітний потік таким чином, щоб площина її витків була перпендикулярна магнітному потоку. Потім котушка швидко виноситься з області індукції магнітного поля. Виникаючий імпульс електро-рушійної сили врівноважується спаданням напруги в ланцюзі і описується виразом

$$e = iR + L\frac{di}{dt}, \qquad (2.3)$$

де i – миттєве значення струму; $R = R_k + R_r$ – активний опір ланцюга;

L – її індуктивність.

З врахуванням виразу (2.3) формулу (2.2) можна переписати у вигляді [3]

$$\Delta\Phi = \Phi(t_2) - \Phi(t_1) = -(R/w_k)\int_{t_1}^{t_2} i dt - (L/w_k)\int_{t_1}^{t_2} di =$$

$$= -(R/w_k)\left[Q(t_2) - Q(t_1)\right] - (L/w_k)\left[i(t_2) - i(t_1)\right],$$

де Q – кількість електрики.

Інтегрування з врахуванням початкових і кінцевих умов

$$\Phi(t_1)=\Phi,\quad \Phi(t_2)=0,\quad Q(t_1)=0,\quad Q(t_2)=Q,\quad i(t_1)=0,\quad i(t_2)=0$$

дає

$$\Delta\Phi=\Phi=(R/w_k)Q. \tag{2.4}$$

Оскільки перше відкидання a_b покажчика гальванометра зв'язано з кількістю електрики в імпульсі струму співвідношенням

$$a_b=S_bQ,$$

то

$$\Phi=(R/S_bw_k)a_b=(C_\Phi/w_k)a_b, \tag{2.5}$$

де C_Φ – постійна гальванометра по магнітному потоку (ціна поділки), яка визначається експериментально.

Схема для визначення C_Φ, представлена на рисунку 2.1. При переключенні перемикача SA з положення 1 у положення 2 напрямок струму в обмотці w_1 котушки взаємної індуктивності зміниться на протилежне, тобто $\Delta I=2I_1$, і у вторинній обмотці відбудеться зміна потоку, яка рівна

$$\Delta\Phi_2=M\Delta I_1=M\cdot 2I_1,$$

де M – коефіцієнт взаємної індукції котушки.

Відповідно така зміна потоку $\Delta\Phi$ приводить до відхилення стрілки гальванометра a_b. Отже, ціна поділки параметричного сенсора магнітного потоку визначається виразом [30]

$$C_\Phi=\Delta\Phi_2/a_b=2MI_1/a_b. \tag{2.6}$$

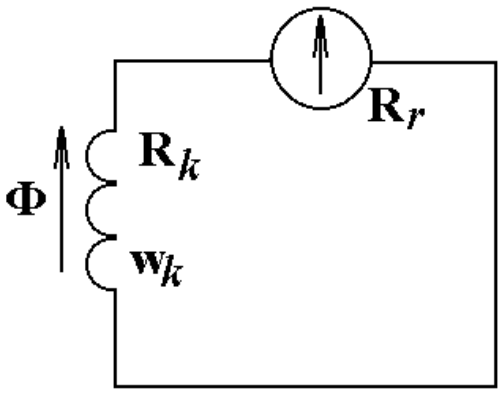


Рисунок 2.1 – Спрощена схема веберметра

Відносна похибка вимірювання магнітного потоку за допомогою гальванометра складає десяті частки відсотка. Під час вимірювання постійного магнітного потоку магнітоелектричним приладом як первинний параметричний сенсор також використовується вимірювальна котушка. Веберметр представляє собою магнітоелектричний механізм, що не має протидіючого моменту і працює в аперіодичному режимі [30]. Схема його включення аналогічна схемі включення гальванометра, яка показана на рисунку 2.1. Веберметр працює наступним чином: спочатку вимірювальна котушка міститься у вимірюваний постійний магнітний потік Φ так, щоб площина її витків була перпендикулярна магнітному полю [30]. Потім котушка швидко забирається з області магнітного потоку. Під час зміни магнітного потоку, зчепленого з вимірювальною котушкою, $\Delta\Psi = w_k\Phi$, виникає електро-рушійна сила, що викликає струм у замкнутому ланцюзі. Під впливом струму рамка веберметра повернеться на деякий кут α_b, причому зміна потоку, зчепленого з рамкою веберметра, $\Delta\Psi_b = w_b B_b S_b \alpha_b$, виявляється приблизно рівним – $\Delta\Psi$ (рис.2.2). Таким чином,

$$w_k\Phi = w_b B_b S_b \alpha_b \tag{2.7}$$

або

$$\Phi = (w_b B_b S_b / w_k)\alpha_b = (C_\Phi / w_k)\alpha_b, \tag{2.8}$$

де w_b і S_b – число витків і площа рамки веберметра відповідно; B_b – магнітна індукція, створювана магнітом веберметра; C_Φ – ціна поділки веберметра.

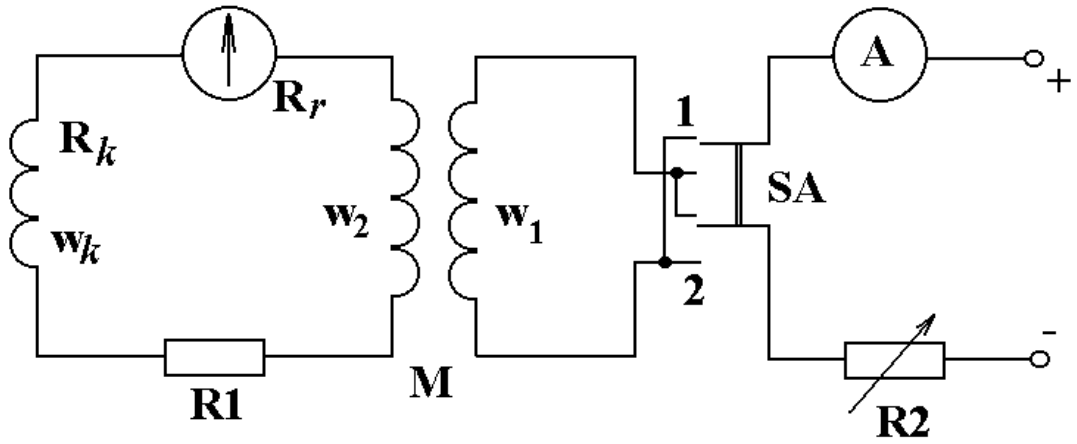


Рисунок 2.2 – Схема вимірювання магнітного потоку за допомогою веберметра [30]

Оскільки стала веберметра не залежить від опору ланцюга, він має шкалу, відградуйовану в одиницях магнітного потоку – веберах. Через відсутність протидіючого моменту покажчик веберметра може займати довільне положення. Для встановлення його на нульову поділку шкали застосовують електромеханічний коректор, що являє собою допоміжний магнітоелектричний механізм, рамку якого можна обертати спеціальною ручкою. Електромеханічний коректор підключається до виводів веберметра. Поворот рамки коректора приводить до виникнення електро-рушійної сили [30], що викликає в рамці веберметра імпульс струму, від чого рамка приводиться в рух. Це дозволяє установити покажчик на нульову поділку шкали.

Веберметр зручно використовувати при вимірюваннях магнітного потоку, але його чутливість і точність поступаються параметричному сенсору на основі балістичного гальванометра. Класи точності веберметрів 1,5 – 2,3. Гальванометри і веберметри можна використовувати для визначення магнітної індукції і напруженості постійного магнітного поля, виходячи зі співвідношень між цими величинами і магнітним потоком [30]

$$B = \Phi / S_k, \tag{2.9}$$

$$H = \Phi / (\mu_0 S_k), \tag{2.10}$$

де S_k – площа витка вимірювальної котушки; μ_0 – магнітна стала ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Розглянемо використання гальваномагнітних параметричних сенсорів. Гальваномагнітними називаються параметричний сенсор, що використовує гальваномагнітні явища, що виникають при поміщенні деяких матеріалів у магнітне поле. До таких явищ, зокрема, відносяться ефекти Холла і Гаусса. Ефект Холла полягає у виникненні електро-рушійної сили на бічних гранях поміщеної в магнітне поле напівпровідникової пластинки, якщо по ній протікає струм. Принцип побудови приладу для вимірювання магнітної індукції з параметричним сенсором Холла представлений на рисунку 2.3 та наведена в додатку Е [30]. Через напівпровідникову пластинку, площину якої розташовано перпендикулярно магнітному полю B, від грані a до грані b протікає постійний струм I. На гранях c і d виникає електро-рушійна сила

$$E_x = (R_x I / h)B, \tag{2.11}$$

де R_x – постійна Холла, що залежить від матеріалу пластини; h – товщина пластини.

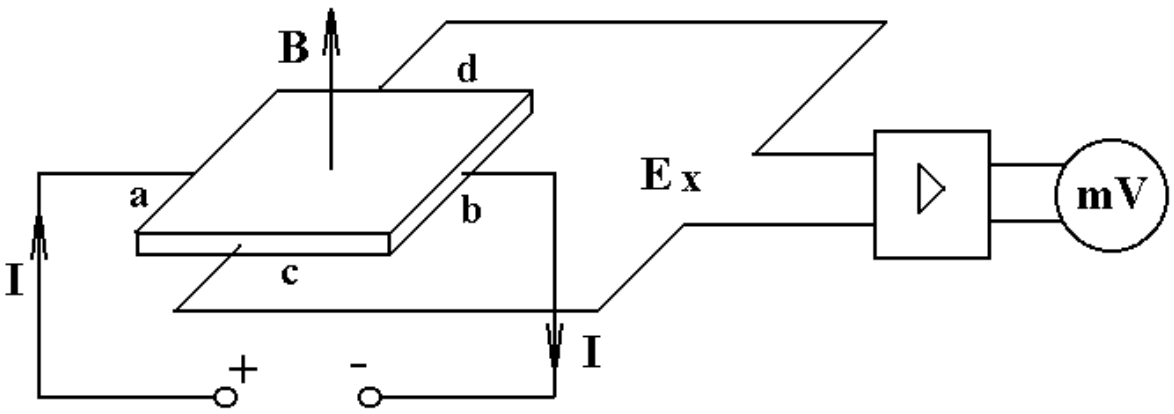


Рисунок 2.3 – Схема вимірювання магнітної індукції [30]

Перевагами приладів на основі ефекту Холла є можливість вимірювання як постійних, так і змінних магнітних полів, хороший просторовий дозвіл завдяки малим розмірам параметричний сенсорів. Недоліком є порівняно велика залежність електро-рушійної сили від температури. Основна похибка яка виникає при вимірюванні складає десяті частки відсотка, діапазон вимірювань складає від сотих часток до одиниць тесла. Ефект Гаусса покладений в основу магніторезистивних параметричних сенсорів, електричний опір яких змінюється під впливом індукції магнітного поля.

2.2 Механізм взаємодії індукції магнітного поля з напівпровідниковим матеріалом

Якщо напівпровідниковий матеріал, по якому протікає електричний струм, помістити у магнітне поле, то в ньому виникає явище, яке отримало назву гальваномагнітного ефекту. Даний ефект полягає у тому, що зменшується електропровідність напівпровідникового матеріалу у напрямку, який перпендикулярний магнітному полю і струму, виникає різниця потенціалів [4, 5, 6]. Гальваномагнітні явища виникають при одночасній дії на напівпровідниковий матеріал електричного і магнітного поля.

Розглянемо дію електричного і індукції магнітного поля на рух вільного електрона у напівпровідниковому матеріалі окремо, а потім при їх одночасній дії на електрон. Вплив періодичного поля ґратки враховується шляхом введення ефективної маси електрона.

На рух електрона у постійному електричному полі діє сила, яка описується виразом

$$\vec{F} = q\vec{E} \tag{2.12}$$

Прискорення електрона у постійному електричному полі описується виразом

$$\vec{a}_E = \frac{q}{m}\vec{E} \quad . \tag{2.13}$$

Швидкість електрона у напівпровідниковому матеріалі змінюється згідно виразу

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}_E t \tag{2.14}$$

В загальному випадку електрон рухається по параболі, якщо напрямок початкової швидкості не співпадає з напрямком електричного поля,

$$\vec{r} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}_E t^2}{2} \quad . \tag{2.15}$$

У випадку, коли $v_0 = 0$ або напрямок початкової швидкості $\vec{v}_0$ співпадає з напрямком електричного поля $\vec{E}$, то парабола вироджується в пряму лінію.

У магнітному полі на електрон діє сила яка описується виразом [32]

$$\vec{F}_H = q[\vec{v} \cdot \vec{B}] \tag{2.16}$$

Прискорення електрона у магнітному полі описується виразом [32]

$$\vec{a}_H = \frac{q}{m}[\vec{v} \cdot \vec{B}], \tag{2.17}$$

де m – ефективна маса електрона. По абсолютній величині згідно виразу (2.16)

$$\left|\vec{F}_H\right| = evB\sin(\vec{v} \cdot \vec{B}). \tag{2.18}$$

Якщо швидкість електрона $\vec{v}$ співпадає з напрямком індукції магнітного поля $\vec{H}$, то $\vec{F}_H = 0$, але у випадку, коли $\vec{v}$ перпендикулярна $\vec{B}$, то $\vec{F}_H = qvB$. У загальному випадку швидкість електрона можна розкласти на дві складові паралельну і перпендикулярну магнітного поля $\vec{B}$ [30]:

$$\vec{v} = \vec{v}_{||} + \vec{v}_{\perp}, \tag{2.19}$$

В цьому випадку магнітна сила дорівнює

$$\left|\vec{F}_H\right| = ev_{\perp}B. \tag{2.20}$$

Якщо сила $\vec{F}_H$ буде перпендикулярна $v_{\perp}$ і $v_{||}$, то вона увесь час буде міняти напрямок $v_{\perp}$ і не діятиме на $v_{||}$, при цьому електрон буде рухатися по гвинтовій лінії уздовж індукції магнітного поля. Якщо $v_{||} = 0$, то електрон буде рухатися по колу, радіус якого визначається з умови рівності відцентрової і доцентрової сил

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \quad , \tag{2.21}$$

звідки

$$r = \frac{mv}{qB} \quad . \tag{2.22}$$

Оскільки всі складові (2.22) є сталими, то радіус траєкторії також буде постійним. Це є підтвердженням того, що електрон рухається по колу. Період обертання електронів згідно (2.22) дорівнює

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \quad , \tag{2.23}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{qB}{m} \quad . \tag{2.24}$$

де w – кутова швидкість.

З виразу (2.24) визначається кількість обертів за 1 секунду

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{qB}{2\pi m} \quad . \tag{2.25}$$

Як видно з виразів (2.24) і (2.25), кутова швидкість і кількість обертів не залежать від швидкості електрона до того часу, поки швидкість не досягне релятивіських значень, при яких маса починає залежати від швидкості.

Перейдемо до розгляду більш важливого випадку, коли одночасно на електрон в напівпровідниковому матеріалі діє електричне і магнітне поле. Загальна сила, яка діє на електричний заряд q в електричному полі E і магнітному полі B, описується формулою

$$\vec{F} = \vec{F}_E + \vec{F}_H = q[\vec{E} + [\vec{v} \cdot \vec{B}]] \quad . \tag{2.26}$$

Вираз (2.26) є фундаментальним для всіх розрахунків сучасних перетворювачів магнітного поля, а також прискорювачів частинок. При одночасній дії електричного і індукції магнітного поля швидкість електрона в напівпровідниковому матеріалі не буде постійною і в загальному випадку він

буде рухатись по складній траєкторії. Якщо електричне і магнітне поле паралельні, то електрон в напівпровідниковому матеріалі рухається таким чином, як і при відсутності електричного поля, тоб-то по гвинтовій лінії, при цьому швидкість обертання електрона залишається постійною $(v_{\perp} = const)$, а швидкість поступального руху $(v_{||})$ увесь час зростає, що відповідає зростанню кроку гвинта. В цьому випадку рух електрона в напівпровідниковому матеріалі відповідає параболі, яка навивається на циліндр.

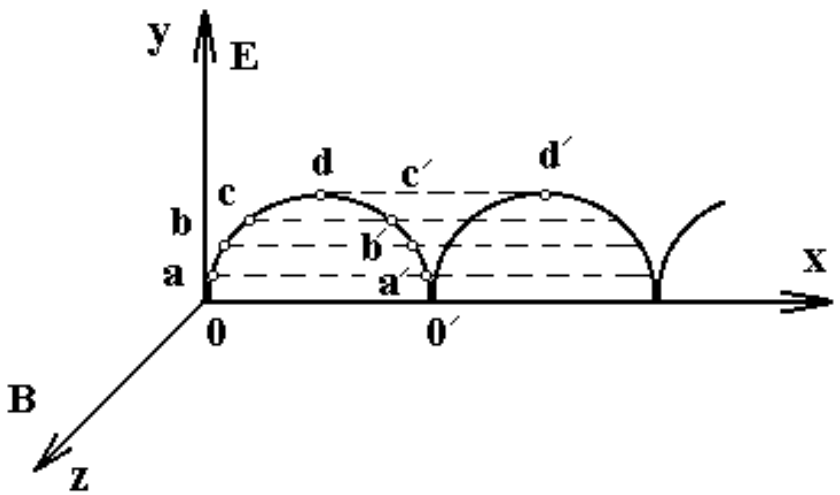


Рисунок 2.4 – Рух електрона в напівпровідниковому матеріалі у взаємоперпендикулярних електричному і магнітному полях

Початкова швидкість електрона в напівпровідниковому матеріалі дорівнює нулю або паралельна магнітному полю, то ця гвинтова лінія вироджується у пряму. Один з найважливіших для практики випадків, коли електричне і магнітне поля взаємоперпендикулярні. При цьому випадку вважається, що початкова швидкість електрона в напівпровідниковому матеріалі v_0 дорівнює нулю, а отже в початковий момент $F_H = 0$. Якщо електричне поле буде направлено по осі у (див. рисунок 2.4), а магнітне поле – перпендикулярно площині, то

$$a_y = \frac{q}{m} E_y \quad , \tag{2.27}$$

При дії електричного поля на напівпровідник створюється прискорення і в перший момент електрон починає рухатись рівноприскорено уздовж осі у.

Проте відразу при цьому виникає магнітна сила яка починає відхиляти електрон в напівпровідниковому матеріалі від початкового напрямку руху.

$$F_H = qvB \ , \tag{2.28}$$

У перший момент магнітна сила $\vec{F}_H \perp \vec{F}_E$, тому вона не впливає на прискорення електрона в напівпровідниковому матеріалі. В подальшому при зростанні швидкості електрона в напівпровідниковому матеріалі зростає і магнітна сила весь час залишаючись перпендикулярно до швидкості, при цьому F_H розкладається на дві складові, одна із яких $(F_H)_y = qv_xB$ створює прискорення, яке віднімається із прискорення електричного поля. Тому з певного моменту Т складова швидкості електрона в напівпровідниковому матеріалі по осі y почне зменшуватися і в якийсь момент набуде нульове значення (точка d на рисунку 2.4). Після цієї точки електрон в напівпровідниковому матеріалі почне рухатись по осі y у протилежному напрямку, наближаючись до осі х. Повна магнітна сила весь час залишається перпендикулярною до повної швидкості електрона в напівпровідниковому матеріалі і тому не може змінювати цю швидкість, яка дорівнює

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \ .$$

Однак, зменшуючи одну складову, одночасно певним чином збільшується другу складова. Отже, в кожний момент швидкість електрона в напівпровідниковому матеріалі, згідно закону збереження енергії, буде визначаться роботою сил електричного поля і описуватися виразом

$$\frac{mv^2}{2} = qE_y \ . \tag{2.29}$$

Із виразу (2.29) витікає, що швидкість електронів в напівпровідниковому матеріалі у точках a і a', b і b', c і c' (тобто у точках однаково віддалених від осі х) будуть однакові. Таким чином, у точці $0'$ швидкість електрона в напівпровідниковому матеріалі знову стане дорівнювати нулю, після чого вся ділянка траєкторії $oabb'a'o'$ повторюється, але вже зсунута на величину oo' по осі х [6].

Траєкторію руху електрона в напівпровідниковому матеріалі можна визначити, якщо проінтегрувати його рівняння руху

$$m\vec{a} = q\vec{E} + q[\vec{v} \cdot \vec{B}] \quad . \tag{2.30}$$

В координатній формі вираз (2.30) має вигляд [6]

$$m\ddot{x} = q\dot{y}B \quad , \tag{2.31}$$

$$m\ddot{y} = qE - qB\dot{x} \quad . \tag{2.32}$$

Позначимо через змінні $b = qE/\ m$ і $\omega = qB/m$, тоді вираз (2.31) і вираз (2.32) можна записати у вигляді [6]

$$\ddot{x} = \omega\dot{y} \quad , \tag{2.33}$$

$$\ddot{y} = b - \omega\dot{x} \quad . \tag{2.34}$$

При інтегруванні виразу (2.33) та виразу (2.34) з початковими умовами $t = 0$, $\dot{x} = 0$ і $\dot{y} = 0$ отримаємо формулу [6]

$$\dot{x} = bT\left(1 - \cos\frac{t}{T}\right) \quad , \tag{2.35}$$

$$\dot{y} = bT\sin\frac{t}{T} \quad , \tag{2.36}$$

де t – час; T – період коливань.

Подальше інтегрування виразу (2.35) та виразу (2.36) дозволяє отримати траєкторію руху електрона в напівпровідниковому матеріалі [6]

$$x = bT^2\left(\frac{t}{T} - \sin\frac{t}{T}\right) \quad , \tag{2.37}$$

$$y = bT^2\left(1 - \cos\frac{t}{T}\right) \quad . \tag{2.38}$$

Вираз (2.37) та вираз (2.38) є рівняннями циклоїди у параметричному вигляді, яка описує рух точки, що знаходиться на ободі колеса, яке котиться. Згідно з цими рівнянями середня швидкість поступального руху $v_y = 0$, $v_x = bT$, кутова швидкість обертання $\omega = qB/m$ і радіус

$$r = \frac{mv}{qB} \quad . \tag{2.39}$$

Якщо початкова швидкість електрона в напівпровідниковому матеріалі v_0 відмінна від нуля, то в залежності від напрямку початкової швидкості отримаємо скорочену або подовжену циклоїду.

Розглянемо поняття слабих і сильних магнітних полів в напівпровідниковому матеріалі. Слабими називають такі магнітні поля, в яких радіус кривизни траєкторії електрона в напівпровідниковому матеріалі набагато більший його довжини вільного пробігу [6]

$$r >> l \quad . \tag{2.40}$$

За цих умов дія індукції магнітного поля на електрон в напівпровідниковому матеріалі за час його вільного руху буде відносно слабою, що відіб'ється на траєкторії електрона в напівпровідниковому матеріалі, яка незначно викривиться і напрямок руху електрона в напівпровідниковому матеріалі відхилиться від початкового положення на невеликий кут φ

$$\varphi = \frac{l}{r} \quad . \tag{2.41}$$

З другого боку, рухливість електрона в напівпровідниковому матеріалі μ визначається через його довжину вільного пробігу

$$\mu = \frac{e}{m} \cdot \frac{l}{v} \quad . \tag{2.42}$$

Підставивши у вираз (2.42) значення змінної r з виразу (2.39) отримаємо формулу [6]

$$\varphi = \frac{e}{m} \cdot \frac{l}{v} B \tag{2.43}$$

або

$$\varphi = \mu B \quad . \tag{2.44}$$

Таким чином, нерівність (2.40), яка покладена в основу визначення слабого поля в напівпровідниковому матеріалі, може бути записана як $\varphi << 1$ або

$$\mu B << 1 \quad . \tag{2.45}$$

Визначення поняття слабого поля, яка описується виразом (2.45) є більш зручним, тому що на практиці величини μ і H можна виміряти.

Сильними магнітними полями є поля, в яких виконується нерівність, протилежна виразу (2.40) або виразу (2.45) [6]

$$r << l \tag{2.46}$$

або

$$\mu B >> 1 \quad . \tag{2.47}$$

У сильних магнітних полях характер траєкторії руху електрона в напівпровідниковому матеріалі суттєво змінюється, тому в проміжках між зіткненнями він вже не рухається майже прямолінійно, а проходить ряд циклів або гвинтової лінії, або циклоїди, або ще більш складної траєкторії.

Поділ на слабі і сильні поля не є абсолютним, тому що при одному і тому ж значенні поля для одного напівпровідникового матеріалу (низька рухливість) може виконуватись нерівність (2.45), а для другого (велика рухливість) – протилежна нерівність (2.47).

На основі квантової механіки існує інше визначення сильного поля в напівпровідниковому матеріалі, яке засновано на зміні енергетичного спектру електронів в напівпровідниковому матеріалі за рахунок сильного магнітного поля. У магнітному полі енергетичний спектр електрона в напівпровідниковому матеріалі стає частково дискретним до того часу, коли середня теплова енергія менше відстані $h\omega$ між дискретними рівнями, які отримали назву рівнів Ландау. Таким чином, можна визначити два критерії сильного поля, один із яких є класичним, вираз (2.47), а другий критерій – квантовим [16]

$$\frac{h\omega}{kT} >> 1 \quad . \tag{2.48}$$

Дані критерії не рівнозначні один одному ні з точки зору фізичної природи, ні з точки зору величини критичного поля. Згідно критерію вираз (2.47) траєкторія електрона зазнає радикальних змін, а вираз (2.48) вказує на зміну енергетичного спектру. Критерію, вираз (2.48) відповідають більш сильні поля або низькі температури [6].

2.3 Вплив індукції магнітного поля на властивості напівпровідникового матеріалу

Розглянемо механізм ефекту Холла, який полягає в тому, що при дії індукції магнітного поля на напівпровідниковий матеріал, по якому проходить струм густиною j, при цьому напруженість B індукції магнітного поля перпендикулярна напрямку струму, то у напівпровідниковому матеріалі виникає електричне поле, напрямок якого перпендикулярний як до струму, так і до індукції магнітного поля. Величина напруженості цього електричного поля E_H пропорційна густині струму j у напівпровідниковому матеріалі і індукції магнітного поля B, в якому перебуває напівпровідник і описується виразом

$$E_H = R_H jB \quad , \tag{2.49}$$

де R_H –стала Холла; $B = \mu_1 H$ – магнітна індукція; μ_1 – магнітна стала напівпровідникового матеріалу.

Розглянемо механізм виникнення ефекту Холла спочатку на прикладі домішкового напівпровідникового матеріалу електронного типу провідності, в якому струм здійснюється тільки електронами [33].

За існування струму в електронному напівпровідниковому матеріалі електрони провідності рухаються з певною середньою швидкістю v_0 у напрямку, протилежному напрямку струму. Якщо такий напівпровідник розташувати у магнітному полі H, яке перпендикулярне струму, то на електрони провідності буде діяти сила Лоренца F_L, напрямок якої перпендикулярний до їх швидкості v_- і напруженості індукції магнітного поля H (рис.2.5). Оскільки заряд електронів від'ємний, то під дією сили Лоренца вони відхиляються від напрямку струму у сторону, яка протилежна напрямку вектора $[\vec{v}_- \cdot \vec{B}]$ (рисунок 2.5 – вгору).

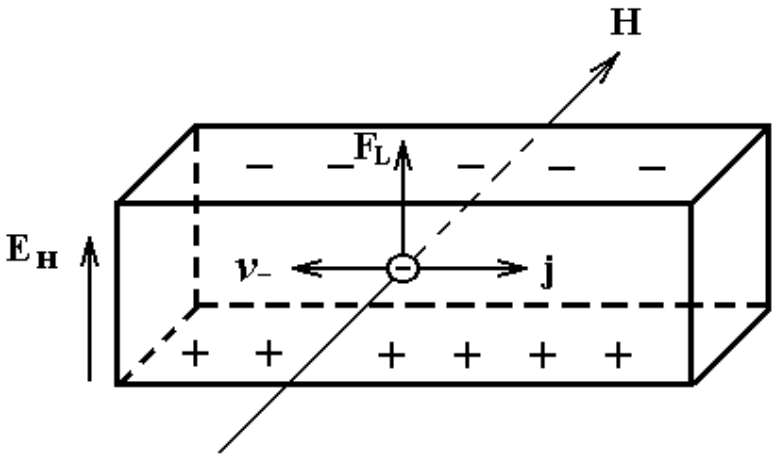


Рисунок 2.5 – Пояснення виникнення поля Холла у напівпровідниковому матеріалі з електронною провідністю

Внаслідок дії магнітного поля на напівпровідниковий матеріал електрони накопичуються на одній з граней напівпровідникового матеріалу, яка перпендикулярна вектору $[\vec{v}_- \cdot \vec{B}]$. У протилежної грані зразка напівпровідникового матеріалу з'являється нескомпенсований позитивний заряд. Між позитивними і негативними зарядами у напівпровідниковому матеріалі з'являється електричне поле E_H, яке гальмує відхилення електронів під дією сили Лоренца. Процес накопичення зарядів різних знаків на протилежних гранях напівпровідникового матеріалу продовжується до тих пір, поки напруженість Холлівського поля, яка зростає по величині, не досягає значення, при якому сила qE_H, яка діє на електрони, врівноважить силу Лоренца і описується виразом

$$qE_H = q[\vec{v}_- \cdot \vec{B}] \quad . \tag{2.50}$$

Густина струму, який проходить через напівпровідниковий матеріал, описується виразом

$$j = qnv_- \quad , \tag{2.51}$$

З якого швидкість електронів можна визначити формулою

$$v_- = j / qn \quad . \tag{2.52}$$

За підстановки виразу (2.52) у вираз (2.50) отримаємо

$$E_H = \frac{1}{qn} jB \quad . \tag{2.53}$$

Вираз (2.52) співпадає з виразом (2.49), тому стала Холла дорівнює

$$R_H = \frac{1}{qn} \quad . \tag{2.54}$$

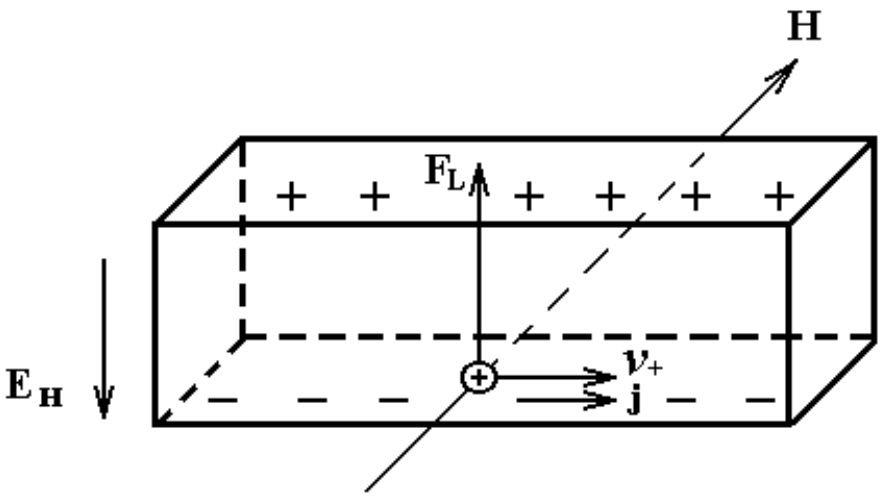


Рисунок 2.6 – Пояснення виникнення поля Холла у напівпровідниковому матеріалі з дірковою провідністю

Якщо магнітне поле діє на дірковий напівпровідниковий матеріал, через який проходить струм, то носії заряду у ньому є дірки, швидкість направленого руху дірок v_+ співпадає з напрямком струму, то при цьому на дірки діє сила Лоренца. Оскільки дірки мають позитивний заряд, то напрямок дії сили Лоренца у напівпровідниковому матеріалі співпадає з напрямком вектора $[\vec{v}_+ \cdot \vec{B}]$ (рисунок 2.6). При вибраному напрямку струму у напівпровідниковому матеріалі швидкості електронів і дірок v_- і v_+ протилежні, тому $[\vec{v}_- \cdot \vec{B}] = [\vec{v}_+ \cdot \vec{B}]$, причому сили Лоренца, які діють на електрони і дірки у напівпровідниковому матеріалі, що рухаються у протилежних напрямках, направлені однаково (рисунок 2.5 і рисунок 2.6).

Таким чином, у дірковому і електронному напівпровідниковому матеріалі при однакових напрямках струму і індукції магнітного поля носії заряду силою Лоренца відхиляються в одну і ту ж сторону. На основі цих досліджень можна зробити висновок, що при однакових напрямках струму і індукції магнітного поля у напівпровідниковому матеріалі знаки зарядів відповідних граней

електронного і діркового напівпровідникового матеріалу, таким чином, напрямки холлівських полів в них будуть протилежними. Це означає, що згідно знаку ефекту Холла у напівпровідниковому матеріалі експериментально можна визначити його тип провідності. Крім цього, дослідження ефекту Холла дозволяє кількісно визначити концентрацію і рухливість носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі.

З виразу (2.49) визначаємо сталу Холла

$$R_H = \frac{E_H}{jB} \quad . \tag{2.55}$$

Підставляючи значення густини струму $j = I / ab$ у напівпровідниковому матеріалі, I – повний струм через переріз напівпровідникового матеріалу ab, а також значення напруженості холлівського поля, яке дорівнює градієнту потенціала $\Delta U / a$ у напівпровідниковому матеріалі, отримаємо вираз

$$R_H = \frac{\Delta U \cdot b}{I \cdot B} \quad . \tag{2.56}$$

Аналіз виразу (2.56) показує, що сталу Холла у напівпровідниковому матеріалі можна визначити експериментальним шляхом, тому що всі величини, які визначають праву частину виразу (2.56), можна виміряти експериментально. З іншого боку, на основі виразу (2.54) можна визначити концентрацію носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі, якщо відомо значення змінної R_H.

За використання відомого виразу для електропровідності напівпровідникового матеріалу $\sigma = qn\mu$ і виразу (2.54) отримаємо формулу

$$R_H \cdot \sigma = \mu \quad , \tag{2.57}$$

тобто по відомих значеннях R_H і σ можна визначити рухливість носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі.

Отримані результати при розгляді ефекту Холла є приблизними, тому що рух носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі уздовж струму з однаковою швидкістю, яка дорівнює середній швидкості їх направленого руху, не є точним. В реальності, різні носії заряду мають не однакові швидкості руху

уздовж струму у напівпровідниковому матеріалі, причому їх розподіл по швидкостям є нерівномірним, він залежить від механізму розсіювання зарядів у напівпровідниковому матеріалі, а також від ступеня виродженості електричного заряду у напівпровідниковому матеріалі. Чисельник у виразі (2.54) має значення, яке відрізняється від одиниці, тому

$$R_H = \frac{A}{qn} \quad , \tag{2.58}$$

де A є величиною, яка залежить від характеру розподілу носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі по швидкостях, а також від механізму розсіювання носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі.

Ефект Холла має свої особливості у напівпровідниковому матеріалі із змішаною і власною провідностями, у яких існують носії заряду двох знаків – електрони і дірки. Відповідно до вище викладеного, при даному напрямку струму і при даному напрямку індукції магнітного поля у напівпровідниковому матеріалі, який перпендикулярний напрямку струму, носії заряду обох знаків відхиляються силою Лоренца в один і той же бік у напівпровідниковому матеріалі. Внаслідок цього, області напівпровідникового матеріалу, які збагачуються і збіднюються носіями заряду, отримають значно менші по величині електричні заряди у порівнянні з напівпровідниковим матеріалом з такою ж величиною електропровідності, але з одним типом носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі. Це пояснюється тим, що протилежні по знаку заряди носіїв у напівпровідниковому матеріалі в означених вище областях частково або повністю компенсують один одного. У цьому випадку електричне поле Холла значно слабше у порівнянні із домішковим напівпровідниковим матеріалом. Отже, можна констатувати, що у випадку напівпровідникового матеріалу із змішаною електропровідністю величина напруженості електричного поля Холла визначається різницею електричної і діркової складових струму у напівпровідниковому матеріалі, тоді як електропровідність визначається їхньою сумою.

Якщо концентрація або рухливість носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі одного типу переважає у напівпровіднику, то ці носії заряду, які накопичуються біля однієї з граней напівпровідникового матеріалу, створюють електричне поле, яке притягує носії другого типу заряду і відштовхує однойменні носії заряду у напівпровідниковому матеріалі. Накопичення носіїв заряду певного типу біля даної поверхні напівпровідникового матеріалу

продовжується до тих пір, поки електричне поле Холла не вирівняє обидва потоки, що відповідає стаціонарному стану системи у напівпровідниковому матеріалі.

У напівпровідниковому матеріалі із власним типом електропровідності концентрація електронів дорівнює концентрації дірок. Тому в цих напівпровідникових матеріалах знак ефекту Холла визначається різницею рухливостей носіїв заряду різних знаків. Якби у власному напівпровідниковому матеріалі рухливості електронів і дірок були рівними, то ефект Холла був би відсутнім, тому що заряди електронів і дірок у напівпровідниковому матеріалі, які накопичуються на протилежних гранях у напівпровідниковому матеріалі, повністю компенсували один одного.

2.4 Фізичний механізм вплив індукції індукції магнітного поля на електропровідність напівпровідникового матеріалу

Опір напівпровідникового матеріалу в значній мірі залежить від дії індукції магнітного поля. Це пов’язано з появою сили Лоренца, яка впливає на рух носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі, по якому проходить струм при дії індукції магнітного поля на нього. Розглянемо процес зміни опору у власному напівпровідниковому матеріалі. У такому напівпровідниковому матеріалі концентрації електронів і дірок рівні, тому якщо рівні величини їх рухливості, то електричне поле Холла не виникає. Отже, не виникає сила, яка б компенсувала дію сили Лоренца у напівпровідниковому матеріалі. Тому носії заряду у напівпровідниковому матеріалі обох знаків увесь час поки існує струм, продовжують відхиляться силою Лоренца від напрямку руху уздовж струму.

Якщо на напівпровідниковий матеріал не діє магнітне поле, то в ньому носії заряду за час вільного пробігу τ у середньому проходять уздовж струму прямолінійні відрізки шляху довжиною l. Якщо діє магнітне поле, то носії заряду у напівпровідниковому матеріалі за час τ пройдуть відрізки шляху, які являють собою дуги кіл тієї ж довжини l [7], які подано на рисунку 2.7. Як видно з рисунку 2.7, носії заряду при дії індукції магнітного поля на напівпровідниковий матеріал за час τ пройдуть шлях l' уздовж напрямку струму, причому відстань l' буде меншою за l і являє собою проекцію дуги кола довжиною l на напрямок струму у напівпровідниковому матеріалі. Тоді можна записати вираз

$$l' = r \cdot \sin\varphi \quad , \tag{2.59}$$

де r – радіус кривизни траєкторії носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі при дії індукції магнітного поля.

Шлях прольоту електронів у напівпровідниковому матеріалі визначається на основі того, що сила Лоренца завжди має напрямок, який є перпендикулярним до швидкості зарядженої частки у напівпровідниковому матеріалі, при цьому сила Лоренца змінює тільки напрямок швидкості, а не її величину, тобто вона є доцентровою у напівпровідниковому матеріалі.

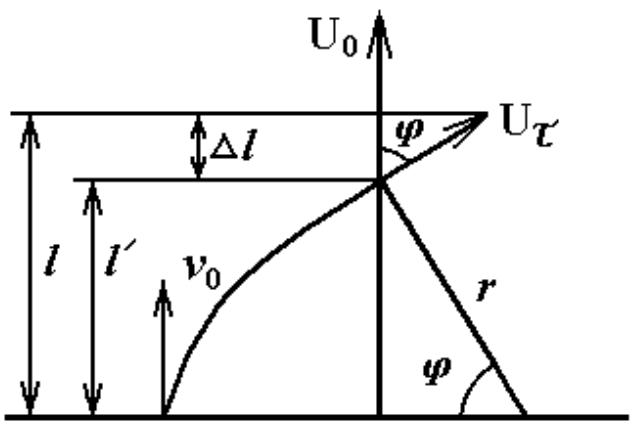


Рисунок 2.7 – Зміна траєкторії вільного руху носія заряду у напівпровідниковому матеріалі при дії індукції магнітного поля [7]

Таким чином, можна записати вираз

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \quad , \tag{2.60}$$

Радіус кривизни траєкторії зарядженої частки у напівпровідниковому матеріалі описується виразом

$$r = \frac{mv}{qB} \quad . \tag{2.61}$$

Кут φ, який дорівнює відношенню довжини дуги кола l до його радіуса r, є кутом відхилення частки у напівпровідниковому матеріалі від її початкового напрямку руху під дією сили Лоренца за час τ, або кут, який утворився між напрямками початкової швидкості v_0 і швидкості v_τ, яку має

частка у кінці відрізка часу τ у напівпровідниковому матеріалі. Таким чином, величина кута φ, якщо підставити (2.61), дорівнює

$$\varphi = \frac{l}{r} = \frac{lqB}{mv} \quad . \tag{2.62}$$

Таким чином під час дії індукції магнітного поля на напівпровідниковий матеріал, через який протікає струм, змінюється довжина вільного пробігу у напрямку струму, що приводить до зміни його питомої електропровідності у напівпровідниковому матеріалі

$$\sigma = qn\mu = \frac{q^2 nl}{2mv} \quad , \tag{2.63}$$

яка пропорційна довжині пробігу носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі. Якщо відсутня дія індукції магнітного поля на напівпровідниковий матеріал, довжина пробігу уздовж струму дорівнює l, то при дії індукції магнітного поля на напівпровідниковий матеріал вона зменшується до значення l', тому у цьому випадку електропровідність напівпровідникового матеріалу

$$\sigma' = \frac{q^2 nl'}{2mv} \quad . \tag{2.64}$$

Зміна питомої електропровідності у напівпровідниковому матеріалі під дією індукції магнітного поля визначається виразом [7]

$$\Delta\sigma = \sigma' - \sigma = \frac{qn^2}{2nv}(l' - l) \quad . \tag{2.65}$$

Відносна зміна електропровідності у напівпровідниковому матеріалі описується виразом

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{l' - l}{l} \quad . \tag{2.66}$$

Визначимо чисельник виразу (2.66)

$$l' - l = l - r \cdot \sin\varphi \quad . \tag{2.67}$$

Спочатку розкладемо $\sin\varphi$ у ряд Маклорена, залишивши при цьому перші чотири складові ряду

$$\sin\varphi = \sin 0 + \frac{1}{1!}\left(\frac{d\sin\varphi}{d\varphi}\right)_0 \varphi + \frac{1}{2!}\left(\frac{d^2\sin\varphi}{d\varphi^2}\right)_0 \varphi^2 + \frac{1}{3!}\left(\frac{d^3\sin\varphi}{d\varphi^3}\right)_0 \varphi^3 = \varphi - \frac{\varphi^3}{6} \tag{2.68}$$

Підставивши у вираз (2.67) вираз (2.62) і вираз (2.68), отримаємо формулу [7]

$$l' - l = l - r \cdot \sin\varphi = l - \frac{l}{\varphi}\left(\varphi - \frac{\varphi^3}{6}\right) = \frac{l\varphi^2}{6} \quad . \tag{2.69}$$

Таким чином, відносна зміна електропровідності у напівпровідниковому матеріалі при дії магнітного поля [7]

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{l' - l}{l} = -\frac{\varphi^2}{6} = -\frac{1}{6}\left(\frac{lqB}{mv}\right)^2 \quad . \tag{2.70}$$

Аналіз виразу (2.70) показує, що опір напівпровідникового матеріалу у магнітному полі зростає, причому відносне його зростання пропорційне квадрату індукції індукції магнітного поля у напівпровідниковому матеріалі.

Розглядаючи вплив індукції магнітного поля на напівпровідниковий матеріал, не враховувались розподіл носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі по швидкостях і механізм їх розсіювання. З врахуванням цих механізмів вираз (2.70) набуває виду [7]

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = K\left(\frac{lqB}{mv}\right)^2 \quad , \tag{2.71}$$

Коефіцієнт К залежить від характеру розподілу носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі по швидкостях і механізмах розсіювання.

У напівпровідниковому матеріалі із змінним типом провідності переважають носії заряду одного знаку, то при розташуванні його у магнітному

полі у напівпровідниковому матеріалі, яке перпендикулярне струму, у ньому виникає холлівське електричне поле, яке буде протидіяти відхиленню силою Лоренца переважаючих носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі і сприяти відхиленню носіїв заряду протилежного знаку, яких у напівпровідниковиму матеріалі значно менше.

Внаслідок цього наступить момент, починаючи з якого обидва потоки носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі у напрямку дії сили Лоренца будуть дорівнювати один одному. В даному випадку зміна опору у напівпровідниковому матеріалі буде меншою у порівнянні з ідеальним бездомішковим напівпровідниковим матеріалом, у якому концентрація носіїв заряду різних знаків однакова. Це пов’язано з дією електричного поля Холла, яке протидіє силі Лоренца, внаслідок чого відхилення переважної частини носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі магнітним полем є меншим у порівнянні з ідеальним бездомішковим напівпровідником.

Зауважимо, що при розташуванні напівпровідникового матеріалу із струмом у магнітному полі, яке перпендикулярне струму, відбувається зміна електропровідності напівпровідникового матеріалу і уздовж напрямку дії сили Лоренца, тобто в напрямку, який перпендикулярний струму. Дійсно, в даному напрямку внаслідок дії сили Лоренца зростає концентрація носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі. Але одночасно з цим процесом відбувається процес дифузії носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі у напрямку, протилежному напрямку дії сили Лоренца. В результаті дії обох факторів у напівпровідниковому матеріалі встановлюється певний постійний у часі градієнт концентрації носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі у напрямку дії сили Лоренца, а також градієнт електропровідності напівпровідникового матеріалу.

В домішкових напівпровідникових матеріалах, які мають носії заряду тільки одного знаку, відбувається зміна їх опору під дією індукції магнітного поля. Даний механізм обумовлений тим, що швидкості носіїв заряду у напівпровіднику, які направлені уздовж струму не однакові, а мають розподіл відповідно з законом розподілу Максвела у напівпровідниковому матеріалі. Дійсно, якби швидкості руху усіх носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі уздовж його напрямку були однакові, то накопичення їх біля однієї із граней напівпровідникового матеріалу внаслідок дії сили Лоренца і збіднення ними області напівпровідникового матеріалу, яка лежить на протилежній грані, відбувалась до тих пір, поки сила Лоренца не була б урівноважена направленою протилежно силою холлівського електричного поля. Відповідно, починаючи з

указаного моменту, носії заряду у напівпровідниковому матеріалі не отримували б нормального прискорення, тобто продовжували б рухатись уздовж струму без зіткнень. Довжина пробігу носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі залишалась би незмінною і опір напівпровідникового матеріалу залишався б постійним.

Рівновага сили Лоренца і сили холлівського електричного поля справедлива лише в тому випадку коли швидкість носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі має певну величину, яка дорівнює її середньому значенню. Це значить, що тільки ті електрони у напівпровідниковому матеріалі, швидкість яких уздовж струму дорівнює її середньому значенню, не будуть відхилятись при одночасній дії обох вказаних сил. Якщо направлена швидкість носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі менше її середнього значення, то переважною буде дія на них холлівського поля qE_H внаслідок чого вони будуть відхилятись від напрямку струму у бік дії сили qE_H у напівпровідниковому матеріалі. Проте в тих випадках, коли швидкість носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі перевищує її середнє значення, то носії заряду будуть відхилятись у напрямку дії сили Лоренца. В результаті цього довжина пробігу як у тих, так і в других носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі зменшиться, що приводить до зростання опору напівпровідникового матеріалу. Опір у домішкових напівпровідникових матеріалів в магнітному полі змінюється менше, ніж у напівпровідникових матеріалів із власною провідністю. В даному випадку дія холлівського поля частково компенсує дію сили Лоренца, тому траєкторія носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі скривлюється слабше, ніж у напівпровідникових матеріалах з власною провідністю, де холловське поле не виникає.

Відносна зміна електропровідності домішкових напівпровідникових матеріалів у магнітному полі [17]

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = K_1\left(\frac{lqB}{mv}\right)^2, \qquad (2.72)$$

де коефіцієнт $K_1 < K$, також залежить від характеру розподілу носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі по швидкостях і від механізму їх розсіювання.

Існують інші ефекти в напівпровідникових матеріалах, які викликані дією індукції магнітного поля. Дійсно, якщо носії заряду, які мають швидкість

направленого руху v_1, яка перевищує її середнє значення, то вони відхиляються у напрямку дії сили Лоренца. Дійшовши до приграничної області у напівпровідниковому матеріалі, вони передають свою надлишкову енергію кристалічній ґратці, в результаті чого температура даної області напівпровідникового матеріалу T_1 підвищується. Носії заряду у напівпровідниковому матеріалі, швидкість яких уздовж напрямку струму v_2 менше її середнього значення, відхиляються у протилежну сторону. Дійшовши до області напівпровідникового матеріалу, яка прилягає до протилежної його грані, вони поповнюють запас своєї енергії за рахунок енергії ґратки кристала. Температура T_2 цієї області зменшується і описується виразом (рисунок 2.8).

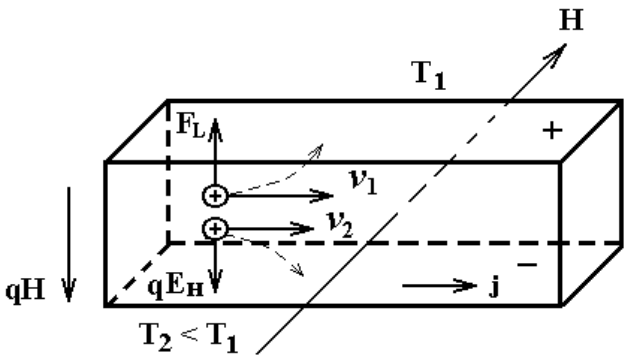


Рисунок 2.8 – Пояснення виникнення градієнта температури, який направлений перпендикулярно струму, у напівпровідниковому матеріалі із струмом, який розташований у поперечному магнітному полі

Таким чином, у напівпровідниковому матеріалі у напрямку дії сили Лоренца виникає температури, який зростає з часом до певного стаціонарного значення. Ця стаціонарна різниця температур у напівпровідниковому матеріалі протилежних граней кристала досягається тоді, коли потік теплоти, який викликаний даним процесом, компенсується протилежно направленим потоком, який обумовлений теплопровідністю.

Розглянуте вище явище виникнення градієнта температур у напівпровіднику з струмом, який розташований у поперечному магнітному полі, отримало назву ефекту Еттінсгаузена [14, 16, 17].

Друге явище, яке обумовлене тими ж причинами, отримало назву ефекту Нерста [14, 16, 17]. Суть його полягає в тому, що при проходженні струму у напівпровідниковому матеріалі, який розташований у поперечному магнітному полі, виникає градієнт температури, який має напрямок уздовж струму. Згідно формули (2.61), чим більша швидкість електрона у напівпровідниковому матеріалі, тим більша кривизна його траєкторії. Внаслідок цього електрони у

напівпровідниковому матеріалі, швидкості v_1 яких досить великі, на своєму шляху, який дорівнює довжині напівпровідника, не встигають відхилитися від напрямку руху уздовж струму на значний кут і рухаються уздовж напівпровідникового матеріалу по слабо скривлених траєкторіях. Отже, швидкі електрони накопичуються на тому кінці напівпровідникового матеріалу, до якого направлені швидкості їх упорядкованого руху. Там вони передають свою надлишкову енергію кристалічній ґратці напівпровідникового матеріалу, за рахунок якого цей кінець напівпровідникового матеріалу нагрівається. Повільні електрони у напівпровідниковому матеріалі, швидкості v_2 яких незначні, сильно затримуються магнітним полем, тому при входженні у напівпровідник відхиляються у сторону і залишаються на його другому кінці, де вони поповнюють свою енергію за рахунок енергії ґратки кристалу, що веде до охолодження цього кінця напівпровідника. У цьому випадку завдяки виникненню потоку теплоти у протилежному напрямку внаслідок теплопровідності у напівпровіднику встановлюється стаціонарний стан, при якому різниця температур $T_1 - T_2$ на кінцях напівпровідникового матеріалу залишається незмінною (рисунок 2.9) [17].

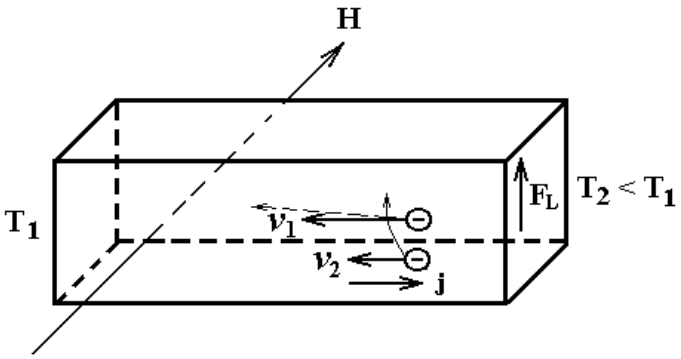


Рисунок 2.9 – Пояснення виникнення градієнта температури, який направлений уздовж струму, при розташуванні напівпровідникового матеріалу із струмом, у поперечному магнітному полі

Гальваномагнітні ефекти знайшли широке застосування у техніці для вимірювання постійних і змінних магнітних полів і безконтактного вимірювання струмів по їх полях, у пристроях обчислювальної техніки для виконання логічних операцій, для детектування, підсилення, модуляції, вимірювання потужності і різниці фаз, аналізу спектрів і багато інших задач мікроелектроніки [6].

2.5 Висновки до розділу

1. Розглянена методика вимірювання індукції магнітного поля, фізичний механізм взаємодії індукції магнітного поля з напівпровідниковим матеріалом, вплив індукції магнітного поля на властивості напівпровідникового матеріалу, ефект Холла.

2. Магнітні вимірювання знаходять практичне застосування при дослідженні властивостей матеріалів, випробуванні магнітних деталей і елементів, у магнітній дефектоскопії, при вивченні магнітних полів Землі, при вимірюванні і контролі магнітних полів в установках атомної і ядерної фізики та інше. Основними величинами, що характеризують магнітне поле, є магнітний потік, магнітна індукція і напруженість індукції магнітного поля.

3. Вимірювані магнітні величини зазвичай попередньо перетворюються в електричні, більш зручні для вимірювання. Параметричні сенсори магнітних величин в електричні будуються на основі явищ електромагнітної індукції, ядерного магнітного резонансу, гальваномагнітного і деяких інших.

3 РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ СЕНСОР ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

3.1 Елементи магнітореактивного ефекту у транзисторних структурах з від'ємним диференційним опором

Якщо напівпровідниковий матеріал, по якому протікає електричний струм помістити у магнітне поле, то в ньому виникають явища, які отримали назву гальваномагнітного ефекту. Цей ефект полягає у тому, що зменшується електропровідність напівпровідникового матеріалу у напрямку, який перпендикулярний полю і струму, виникає різниця потенціалів [6, 5, 4]. Гальваномагнітні явища виникають при одночасній дії на напівпровідниковий матеріал електричного поля і індукції магнітного поля.

Дія індукції магнітного поля на біполярні транзистори полягає у викривленні траєкторії інжектованих носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі транзистора, що викликає збільшення ефективної довжини бази біполярного транзистора і відхилення частини носіїв заряду від колектора біполярного транзистора [8, 9, 10]. Роль даного ефекту зростає із зменшенням ширини емітера і колектора біполярного транзистора, що забезпечує зростання магніточутливості біполярного транзистора. Найменша площина взаємного перекриття площини емітера і колектора біполярного транзистора, яка визначається глибиною дифузії домішок в дані області транзистора досягається у планарній конструкції магніточутливого біполярного транзистора, тому вона має найбільшу магніточутливість [9].

На рисунку 3.1 представлено схематичне зображення такого магніточутливого біполярного транзистора. У магнітному полі B з напрямком, який перпендикулярний до площини рисунка $\oplus B$, носії заряду в біполярному магніточутливому транзисторі відхиляються до поверхні бази транзистора. За таких умов, шлях до колектора біполярного магніточутливого транзистора зменшується, а при протилежному напрямку магнітного поля OB – зростає, що викликає зміну параметрів біполярного магніточутливого транзистора.

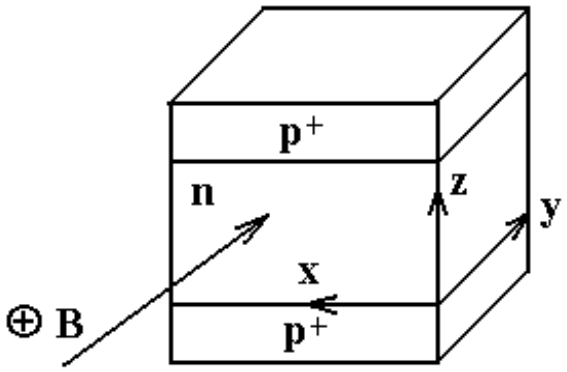


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення біполярного магніточутливого транзистора

Інтегральним параметром радіовимірювальних параметричний сенсорів індукції магнітного поля на основі біполярних транзисторів є його абсолютна магніточутливість, яка описується виразом

$$S_A = \frac{dF_0}{dB} = -\frac{F_0}{2C_{екв}(B)} \frac{dC_{екв}(B)}{dB}, \tag{3.1}$$

де $C_{екв}(B)$ – еквівалентна ємність коливального контуру радіовимірювального параметричного сенсора індукції магнітного поля; F_0 – частота генерації радіовимірювального параметричного сенсора індукції магнітного поля; B – величина індукції індукції магнітного поля.

Відносна чутливість радіовимірювального параметричного сенсора індукції магнітного поля визначається на основі рівняння (3.1)

$$S_{F_0} = \frac{1}{F_0} \frac{dF_0}{dB} = -\frac{1}{2C_{екв}(B)} \frac{dC_{екв}(B)}{dB} \ . \tag{3.2}$$

Аналіз виразу (3.1) та виразу (3.2) показує, що для досягнення максимальної магніточутливості радіовимірювального параметричного сенсора індукції магнітного поля необхідно отримати мінімальне значення еквівалентної ємності $C_{екв}(B)$, а також максимальну зміну її швидкості від магнітної індукції. Еквівалентна ємність коливального контуру радіовимірювального параметричного сенсора індукції магнітного поля залежить від дифузійної і бар’єрної ємностей біполярного магніточутливого

транзистора. В цьому випадку значну роль відіграє дифузійна ємність біполярного магніточутливого транзистора, оскільки вона зв'язана з концентрацією інжектованих носіїв заряду у базову область біполярного транзистора, на яку діє магнітне поле. Коефіцієнтом впливу індукції магнітного поля на розподіл концентрації інжектованих носіїв заряду біполярного магніточутливого транзистора є параметр анізотропії, який визначається виразом:

$$a = \left(\mu_n + \mu_p\right) BR(B), \tag{3.3}$$

де $R(B) \approx 1$ – Холл–фактор, який в незначній мірі залежить від індукції магнітного поля; μ_n, μ_p – рухливість електронів і дірок.

Розглянемо нелінійну системи диференціальних рівнянь, які описують поведінку носіїв заряду в базовій області магніточутливого біполярного транзистора під дією індукції магнітного поля. Використовуючі кінетичне рівняння Больцмана можна отримати густину струму в дифузійному наближенні, яка описується виразом [5]

$$\vec{j}_n(0) = \sigma_n \vec{E} + qD_n \nabla n \ , \tag{3.4}$$

де E – напруженість електричного поля; $\sigma_n = q\mu_n n$ – електрична провідність при $B = 0$; n – концентрація електронів; D_n – коефіцієнт дифузії електрона.

Під час дії індукції магнітного поля густина електричного струму в біполярному магніточутливому транзисторі описується виразом [5]

$$\vec{j}_n(B) = \vec{j}_n(0) - \mu_n^* \left[\vec{j}_n(B) \times \vec{B} \right], \tag{3.5}$$

де μ_n^* – холлівська рухливість електронів в біполярному магніточутливому транзисторі, яка пропорційна дрейфовій рухливості електронів μ_n, тобто $\mu_n^* = R_n \mu_n$; R_n – коефіцієнт розсіювання в біполярному магніточутливому транзисторі.

Величина R_n визначається зонною структурою напівпровідникового матеріалу в біполярному магніточутливому транзисторі і механізмами

розсіювання. У кремнію з провідністю n–типу та низькою концентрацією донорних домішкових атомів $R_n \approx 1{,}15$ за температури 20^{o} С.

Отже, з урахуванням виразу (3.4) і виразу (3.5) нелінійна система диференційних рівнянь буде мати вид [11–13, 5]

$$\nabla \vec{j}_n - q\frac{\partial n}{\partial t} = q\frac{n-n_0}{\tau_n}, \tag{3.6}$$

$$\nabla \vec{j}_p + q\frac{\partial p}{\partial t} = -q\frac{p-p_0}{\tau_p}, \tag{3.7}$$

$$\vec{j}_n = \vec{j}_n^{\,0} - \mu_n^*\left[\vec{j}_n \times \vec{B}\right], \tag{3.8}$$

$$\vec{j}_p = \vec{j}_p^{\,0} + \mu_p^*\left[\vec{j}_p \times \vec{B}\right], \tag{3.9}$$

$$\vec{j}_n^{\,0} = \sigma_n \vec{E} + qD_n \nabla n \ , \tag{3.10}$$

$$\vec{j}_p^{\,0} = \sigma_p \vec{E} - qD_p \nabla p \ , \tag{3.11}$$

$$\vec{E} = -grad\left[\frac{q}{\varepsilon}(p-n+N)\right], \tag{3.12}$$

де N – сумарна концентрація домішкових атомів; ε – електрична проникність напівпровідника;

При підстановці виразу (3.8) та виразу (3.10) у формулу (3.6) отримаємо рівняння перенесення електронів у базовій області магніточутливого біполярного транзистора [14]

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \nabla^2 n + \frac{1}{q}\nabla(\sigma_n \vec{E}) - \nabla\left(\mu_n^*\left[\vec{j}_n \times \vec{B}\right]\right) - \frac{n-n_0}{\tau_n} \ . \tag{3.13}$$

Аналітичного розв’язку рівняння перенесення (3.13) не має, тому його можна розв’язати чисельним методом, або ввести умови, які дозволяють отримати аналітичний розв’язок. За дії слабих магнітних полів, за умови коли $\mu_n^* B$ і $\mu_p^* B \le 0{,}3$, вираз (3.13) можна розкласти у ряд по параметру слабої індукції магнітного поля [14]

$$\vec{j}_n(\vec{B}) = \left[\vec{j}_n(0) + \mu_n^* \left[\vec{B} \times \vec{j}_n(0) \right] + \mu_n^{*2} (\vec{B} \cdot \vec{j}_n(0)) \vec{B} \right] \left[1 + (\mu_n^* \vec{B})^2 \right]^{-1} . \qquad (3.14)$$

Вираз (3.14) враховує дію сили Лоренца як на дрейф носіїв заряду в магніточутливому біполярному транзисторі, так і на дифузію носіїв заряду. Дифузія в магніточутливому біполярному транзисторі відіграє важливу роль у випадку ефектів магнітоконцентрації або об'ємного заряду, які мають місце у магніточутливих діодах або при включенні в магніточутливого біполярного транзистора по діод ній схемі, де відбувається інжекція електронів і дірок в базову область. Якщо градієнтами концентрації в магніточутливому біполярному транзисторі знехтувати, то вираз (3.14) приймає вигляд [14]

$$\vec{j}_n(\vec{B}) = \sigma_{nB} \left[\vec{E} + \mu_n^* (\vec{B} \times \vec{E}) + \mu_n^* (\vec{B}\vec{E}) \vec{B} \right] , \qquad (3.15)$$

де

$$\sigma_{nB} = \sigma_n \left[1 + (\mu_n^* B)^2 \right]^{-1} .$$

Якщо вектор магнітної індукції $\vec{B}$ розташовано паралельно електричному полю в магніточутливому біполярному транзисторі, то $\left[\vec{B} \times \vec{E} \right] = 0$, звідки $j_n(\vec{B}) = \sigma_n \vec{E} = \vec{j}_n(0)$, тобто в ізотропних напівпровідникових матеріалах гальваномагнітний ефект відсутній. Якщо вектор магнітної індукції $\vec{B}$ перпендикулярний до електричного поля, то $(\vec{B} \cdot \vec{E}) = 0$, відповідно

$$\vec{j}_n(\vec{B}) = \sigma_{nB} \left[\vec{E} + \mu_n (\vec{B} \times \vec{E}) \right] . \qquad (3.16)$$

Вираз (3.16) описує поперечні гальваномагнітні ефекти в магніточутливому біполярному транзисторі у випадку, коли процесами дифузії можна знехтувати. Оскільки $\vec{B} = (0,0,B)$, $\vec{E} = (E_x, E_y, 0)$ і $\vec{j}_n(\vec{B}) = (j_{nx}, j_{ny}, 0)$, то вираз (3.16) прийме вид

$$j_{nx} = \sigma_{nB} (E_x - \mu_n^* B E_y) , \qquad (3.17)$$

$$j_{ny} = \sigma_{nB} (E_y + \mu_n^* B E_x) . \qquad (3.18)$$

Вираз (3.17) і вираз (3.18) розглядають для двох граничних випадків. Перший випадок відповідає холлівському полю, коли вважається, що струм в магніточутливому біполярному транзисторі протікає тільки в напрямку координати x, тобто $j_{ny} = 0$. Дана умова приблизно виконується у довгих магніточутливих біполярних транзисторах із струмовими контактами, які розташовані на малих торцях. При цьому виникає холлівське поле

$$E_y = -\mu_n^* B E_x = R_H j_{nx} B, \tag{3.19}$$

$$R_H = -\mu_n^* / \sigma_n, \tag{3.20}$$

де R_H – стала Холла.

Що призводить до повороту еквіпотенціальних ліній на кут Холла φ_H, який відповідає рівнянню

$$tg\,\varphi_H = E_y / E_x = -\mu_n^* B = \sigma_n R_H B\ . \tag{3.21}$$

А другий випадок відповідає відхиленню носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі і виникненню магнітоопору. В цьому випадку холлівське поле дорівнює нулю, тобто $E_y = 0$. Дана умова приблизно виконується у коротких зразках магніточутливих біполярних транзисторів з великою поперечною площею, у яких струмові електроди розташовані на великих торцях. Відхилення носіїв згідно з виразом (3.17) і виразом (3.18) визначається формулою

$$-j_{ny} / j_{nx} = \mu_n^* B = tg\,\varphi_H\ . \tag{3.22}$$

При великій довжині дрейфу у магніточутливих біполярних транзисторах виникає магніторезистивний ефект, який описується рівнянням

$$\frac{\sigma_{nB} - \sigma_n}{\sigma_n} = (\mu_n^* B)^2, \tag{3.23}$$

де σ_{nB} – провідність при дії індукції магнітного поля; σ_n – провідність зразка магніточутливого біполярного транзистора при $B = 0$.

Вирази (3.14) – (3.23) відповідають головним складовим розкладу по параметру слабого поля і зберігають відносну похибку порядку $(\mu_n^* B)^2$ [14]. Вираз (3.13) можна значно спростити, коли вважати, що магніточутливий біполярний транзистор працює у стаціонарних умовах $(dn/dt = 0)$, вектори електричного $\vec{E}$ і індукції магнітного поля $\vec{B}$ взаємно перпендикулярні, причому магнітне поле є слабим $(\mu_n^* B)^2 \le 0{,}1$, в базовій області магніточутливого біполярного транзистора існує низький рівень інжекції, коли концентрація інжектованих носіїв заряду в транзисторі значно менше від концентрації основних носіїв заряду, тоді можна записати вираз [15]

$$D_n\left[\frac{\partial^2 n}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 n}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 n}{\partial z^2}+2d_x\frac{\partial n}{\partial x}-2d_y\frac{\partial n}{\partial y}\right]-\frac{n-n_0}{\tau_n}=-\rho(x',y')\delta(x-x')\delta(y-y')\delta(z-z') \quad (3.24)$$

де n_0 – рівноважна концентрація електронів у базі; D_n, τ_n – дифузійна довжина і час життя інжектованих носіїв заряду; $\rho(x', y')$ – густина джерел заряду в області емітера; $\delta(x - x')$ – дельта–функція Дірака.

Координати базової області і області емітера магніточутливого біполярного транзистора лежать в границях

$$0 \le x \le l_x, \qquad 0 \le y \le l_y, \qquad 0 \le z \le l_z,$$
$$0 \le x' \le l_x, \qquad 0 \le y' \le l_y, \qquad 0 \le z' \le l_z.$$

Граничні умови рівняння перенесення (3.24) мають вигляд

$$n(x,y,l_z) = n(x,l_y,z) = n(x,0,z) = n(l_x,y,z) = n(0,y,z) = n_0 \ . \qquad (3.25)$$

Величини d_x і d_y зв'язані із значеннями електричного поля E_x у базі магніточутливого біполярного транзистора такими співвідношеннями

$$d_x = \frac{qE_x}{2kT} \ , \qquad d_y = a d_x \, , \qquad (3.26)$$

де k – стала Больцмана; q – заряд електрона; T – температура навколишнього середовища; $a = \mu_n^* B$ – параметр анізотропії.

Розв'язок виразу (3.24) можна отримати з використанням функції Гріна [16], але це досить складно з математичної точки зору, якщо врахувати дію змінної напруги на магніточутливий біполярний транзистор, яку можна спростити використовуючи розв'язок рівняння перенесення для одномірного випадку на змінному струмі, а дію індукції магнітного поля врахувати через зміну ефективної товщини бази магніточутливого біполярного транзистора. В цьому випадку похибка залежності інжектованих носіїв заряду магніточутливого біполярного транзистора від індукції магнітного поля не перевищує 2% [17]. Отже, використавши розв'язок рівняння перенесення для одномірного випадку на змінному струмі для магніточутливого біполярного транзистора, можна отримати аналітичну залежність

$$n_1(x,t) = \left(\frac{n_1(W,t) - n_1(0,t) e^{-\frac{W_0}{(1-(\mu_n^* B)^2/2) l_2}}}{e^{\frac{W_0}{(1-(\mu_n^* B)^2/2) l_1}} - e^{-\frac{W_0}{(1-(\mu_n^* B)^2/2) l_2}}} \right) e^{\frac{x}{l_1}} + \left(\frac{n_1(0,t) e^{\frac{W_0}{(1-(\mu_n^* B)^2/2) l_1}} - n_1(W,t)}{e^{\frac{W_0}{(1-(\mu_n^* B)^2/2) l_1}} - e^{-\frac{W_0}{(1-(\mu_n^* B)^2/2) l_2}}} \right) e^{-\frac{x}{l_2}}, \quad (3.27)$$

де W_0 – товщина бази магніточутливого біполярного транзистора без дії індукції магнітного поля.

Формула (3.27) дозволяє визначити повний опір базової області магніточутливого біполярного транзистора, проте до повного опору базової області магніточутливого біполярного транзистора необхідно додати дифузійну і бар'єрну ємності транзистора, а також врахувати паразитні пасивні елементи корпусу і виводів, тому для отримання повного опору на електродах емітер–колектор магніточутливого біполярного транзистора необхідно використати нелінійну еквівалентну схему з врахуванням залежності її складових елементів від дії індукції магнітного поля.

Отже, з врахуванням виразу (3.27) отримана аналітична залежність повного опору на електродах емітер–колектор магніточутливого біполярного транзистора, яка описується рівнянням

$$Z_{EK} = \left[U_2 \left(A_1 A_2 \left(A_4 - j\frac{1}{\omega C_{bc}(B)} \right) + \frac{A_1}{\omega^2 C_{bc}^2(B)} - A_3^2 \left(A_4 - j\frac{1}{\omega C_{bc}(B)} \right) + j\frac{2A_3 R_b(B)}{\omega C_{bc}(B)} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - A_2 R_b^2(B) \right) \right] \Bigg/ \left[A_1 \left(U_2 - I_{p1} A_5 \right) \left(A_4 - j\frac{1}{\omega C_{bc}(B)} \right) + j\frac{A_1 \left(j\frac{I_{p1}}{\omega C_{bc}(B)} - A_4 I_{p2} \right)}{\omega C_{bc}(B)} + \right.$$

$$+ j\frac{R_b(B)\left(U_1 - I_{p1}\left(\frac{1}{j\omega C_{be}(B)} + R_b(B) \right) \right)}{\omega C_{bc}(B)} - A_3 R_b(B)\left(j\frac{I_{p1}}{\omega C_{bc}(B)} - A_4 I_{p2} \right) - R_b^2(B)\left(U_2 - I_{p1} A_5 \right) -$$

$$\left. - \left(A_4 - j\frac{1}{\omega C_{bc}(B)} \right) A_3 \left(U_1 - I_{p1}\left(R_b(B) - j\frac{1}{\omega C_{be}(B)} \right) \right) \right] , \qquad (3.28)$$

де

$$A_1 = Z_{R1} + R_b' + j\omega L_b + R_b(B) - j\frac{1}{\omega C_{be}(B)} + R_e(B) + R_e' + j\omega L_e ,$$

$$A_2 = R_c(B) + R_c' + j\omega L_c - j\frac{1}{\omega C_{bc}(B)} - j\frac{1}{\omega C_{be}(B)} + R_e(B) + R_e' + j\omega L_e ,$$

$$A_3 = R_e(B) + R_e' + j\omega L_e - j\frac{1}{\omega C_{be}(B)} , \quad A_4 = R_b(B) - j\frac{1}{\omega C_{bx}(B)} ,$$

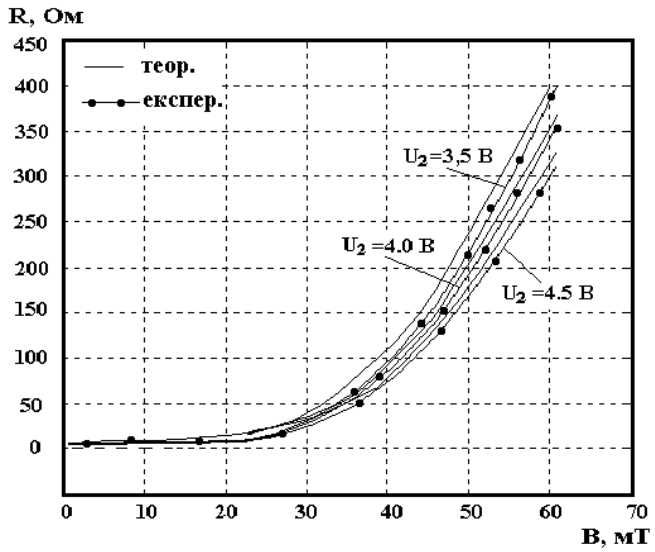
$$A_5 = -j\frac{1}{\omega C_{bc}(B)} - j\frac{1}{\omega C_{be}(B)} ,$$

$$I_{p1} = I_{be2}(B) + I_{be1}(B) / \beta_F(B) + (I_{be1}(B) - I_{bc1}(B)) / Q_b - I_{bc2}(B) - I_{bc1}(B) / \beta_R(B) ,$$

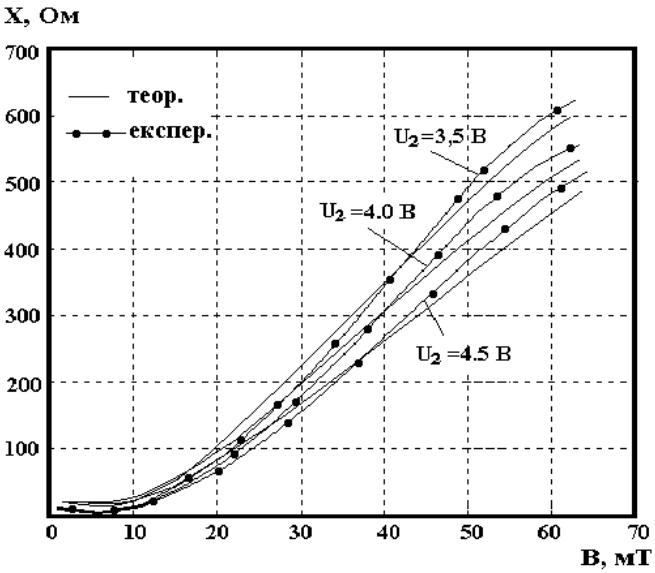
$$I_{p2} = I_{bc2}(B) + I_{bc1}(B) / \beta_R(B) - (I_{be1}(B) - I_{bc1}(B)) / Q_b - I_{be1}(B) / \beta_F(B) - I_{be2}(B) ,$$

де U_1 – напруга база–емітер магніточутливого біполярного транзистора; U_2 – напруга колектор–емітер магніточутливого біполярного транзистора.

На основі рівняння (3.28) отримані графічнф залежності активної (а) і реактивної (б) складових повного опору магніточутливого біполярного транзистора (рисунок 3.2 а,б) від дії магнітної індукції. Абсолютна чутливість реактивної складової магніточутливого біполярного транзистора від дії магнітної індукції складає 12,5 Ом/мТ, що підтверджує перспективу використання магнітореактивних ефектів в біполярних транзисторах для розробки радіовимірювальних параметричний сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом [18].



а)



б)

Рисунок 3.2 – Теоретичні та експериментальні залежності активної (а) та реактивної (б) складових повного магніточутливого біполярного транзистора від дії індукції магнітного поля

3.2 Радіовимірювальний параметричний сенсор магнітного поля на ефекті Холла

Ефект Холла спостерігається у ряді напівпровідникових матеріалів, він не дуже сильно проявляється в провідниках, так що всі серійні сенсори магнітного поля на ефекті Холла виготовляються з напівпровідникового матеріалу. Рисунок 3.3 пояснює їхній принцип дії та наведена в додатку Ж. У випадку коли тонка пластина напівпровідникового матеріалу, товщиною h, поміщається в магнітне поле B, а струм I тече уздовж такої пластиниї так, що електричне

поле складає прямий кут з магнітним полем, то на бічних торцях пластини виникає напруга. Значення напруги Холла в розімкнутому ланцюзі визначається формулою [1]

$$V_0 = R_H IB / h, \tag{3.29}$$

де R_H –постійна Холла для напівпровідникового матеріалу і описується виразом

$$R_H = \left[nq\right]^{-1}, \tag{3.30}$$

де n – концентрація електронів у напівпровідниковому матеріалі. У напівпровіднику концентрація носіїв заряду складає $n = 10^{22}$ м$^{-3}$, що майже в 107 разів менше ніж у провідниках, так що з виразу (3.29) і виразу (3.30) видно, що у напівпровідниковому матеріалі напруга Холла відповідно більша. Ефективна довжина l і ширина W холлівскої пластини повинні бути такими, щоб виконувалась умова $l / W = 2 \div 3$, оскільки для менших значень цього відношення напруга Холла у напівпровідниковому матеріалі буде менше, ніж по виразу (3.29). Пластина напівпровідникового матеріалу повинна бути якомога тонша (малі h).

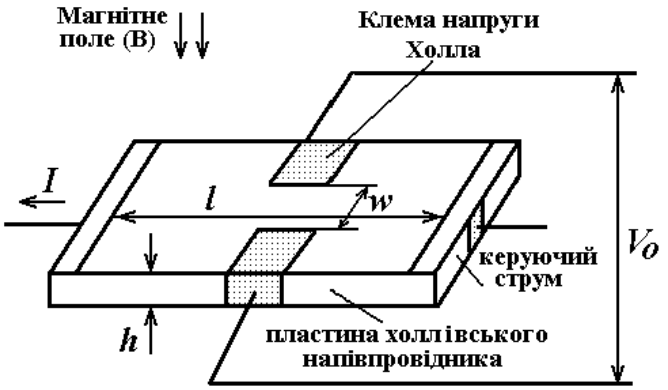


Рисунок 3.3 – Параметричний сенсор на ефекті Холла

Напівпровідникові матеріали, які використовуються для параметричних сенсорів Холла, повинні мати високу рухливість електронів і широку заборонену зону. В основному використовуються два напівпровідникові матеріали це арсенід індію і фосфід–арсенід індію. Легований арсенід індію має електронну концентрацію в діапазоні (5 – 7)·10^6 см$^{-3}$ та рухливість носіїв заряду при кімнатній температурі приблизно 20000 см^2/В·с, а також постійну

Холла – 100 $см^3$/°С. Фосфід–арсенід індію має приблизно в два рази меншу рухливість носіїв заряду, але набагато ширшу заборонену зону і тому може працювати при вищих температурах. Антимонід індію також іноді використовується для параметричних сенсорів Холла, але він має високий температурний коефіцієнт R_H, який складає 2 %/°С [31].

Напівпровідниковий матеріал з якого виготовляється параметричний сенсор Холла по одній із трьох технологій. У першому методі пластина напівпровідника відрізається від бруска напівпровідникового матеріалу і травиться до одержання товщини 5 – 100 мкм. Потім вона приклеюється до підкладки товщиною 1 – 2 мкм епоксидною смолою, що заповнює тріщини і забезпечує достатньо гарний відвід тепла. У другому методі напівпровідниковий матеріал осаджується з парів на підкладку товщиною 2 – 3 мкм. Цей прилад зручний для використання при дуже низьких і дуже високих температурах. У третьому варіанті шар арсеніду галію товщиною близько 10 мкм вирощується методом епітаксії з газової фази напівізолюючого арсеніду галію. При цьому виходить параметричний сенсор Холла з високою стабільністю і низьким температурним коефіцієнтом, який застосовується для прецизійних вимірювань.

Підкладка для пластин Холла повинна бути твердою при малій товщині, а також мати високий питомий опір напівпровідникового матеріалу, високу теплопровідність, щоб відводити тепло, яке утворюється в параметричному сенсорі Холла. Температурні коефіцієнти розширення підкладки параметричного сенсора Холла і холлівської пластини повинні бути близькими. У вимірювальних пристроях на ефекті Холла найчастіше використовуються берилій та алюміній.

Електричний контакт може бути припаяний до пластини Холла, хоча найчастіше метал напилюється на напівпровідник, а потім сплавляється з ним при нагріванні. Електричні контакти розташовуються уздовж торців параметричного сенсора Холла, так що лінії струму будуть паралельними прямими. Матеріал який використовується для контактів Холла, має більш високу провідність, чим напівпровідниковий матеріал параметричного сенсора Холла, що викликає скривлення ліній струму поблизу холловских електродів і приводить до нелінійності відношення між величинами B і V_0 в співвідношенні (3.29). Нелінійність параметричного сенсора Холла можна зменшити, якщо довжина електрода буде складати менш 10% довжини холлівської пластини, чи якщо сенсор Холла буде навантажений лінеризуючим опором R_L.

Але цей підхід зменшує чутливість S параметричного сенсора Холла, що визначається виразом [1]

$$S = V_0 \left[IB \right]^{-1}. \tag{3.31}$$

Постійна Холла R_H змінюється зі зміною температури і напруженості індукції магнітного поля, однак ці зміни незначні для полів аж до значень магнітного поля 15 Т (5 Т для антимоніду індію). Параметричний сенсор Холла не боїться сильних магнітних полів, але з ростом поля збільшується його внутрішній опір, так що керуючий струм повинен підтримуватись нижче граничного значення, щоб уникнути руйнування параметричного сенсора Холла. Напруга Холла зменшується з навантаженням, а оптимальна лінійність досягається при значенні навантажувального опору R_L, який приводиться в специфікації приладу.

Як результат процесів, використовуваних при виготовленні параметричного сенсора Холла, на холлівську напругу накладається мала резистивна складова. При B=0 напруга визначається як $R_0 I$, де I – керуючий струм, R_0 резистивна нульова компонента сенсора Холла. Напруга, обумовлена R_0, може бути компенсована в параметричному сенсорі Холла за допомогою зовнішнього ланцюга. Провідники від холлівських електродів утворюють індуктивну петлю площею A_0, що не може бути цілком компенсована. Якщо магнітний потік змінюється зі швидкістю dB/dt, то навіть при нульовому керуючому струмі I параметричного сенсора Холла у петлі буде індукуватись напруга

$$E = A_0 dB/dt, \tag{3.32}$$

де A_0 – індуктивний нульовий компонент параметричного сенсора Холла, а E, як правило, має значення 500 мкВ при полі, рівному 1 Т і частоті 50 Гц.

3.3 Виведення функції перетворення і рівняння чутливості радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля на біполярно-польовій транзисторній структурі з сенсором Холла

Чутливими до магнітного поля елементами в радіовимірювальних параметричних сенсорах виступають магніторезистори, сенсори Холла, магнітодіоди, біполярні і польові магнітотранзистори. Одним із перспективних

напрямків у розробці параметричних сенсорів магнітного поля є використання залежності реактивних властивостей і від'ємного диференційного опору транзисторних структур від впливу індукції магнітного поля і створення на цій основі радіовимірювальних сенсорів магнітного поля з частотним виходом [6, 49, 50, 51]. У радіовимірювальних перетворювачах такого типу відбувається перетворення індукції магнітного поля у частотний вихідний сигнал, що дозволяє створювати вимірювальні перетворювачі за інтегральною технологією і дає можливість підвищити точність, чутливість і швидкодію, розширити діапазон вимірюваних величин, покращити надійність та завадозахищеність.

Схема радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом представлена на рисунку 3.4 та наведена в додатку К. Даний радіовимірювальний сенсор являє собою гібридну інтегральну схему, яка складається з біполярного та польового транзисторів, резисторів R_1–R_6, та конденсвторів C_1–C_4, що дозволяє створити вимірювальний автогенераторний пристрій, вихідна частота якого залежить від зміни індукції магнітного поля. Коливальний контур радіовимірювального сенсора створений на основі еквівалентної ємності повного опору на електродах стоку польового транзистора VT2 і емітера біполярного транзистора VT1.

Розрахунок основних параметрів радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля можливо зробити на основі еквівалентних схем, тому розглянемо нелінійну еквівалентну схему параметричного сенсора магнітного поля, яка містить елементи, що залежать від дії індукції магнітного поля (рисунок 3.5). Для зручності математичних розрахунків перетворимо еквівалентну схему (рисунок 3.5) на більш компактну (рисунок 3.6).

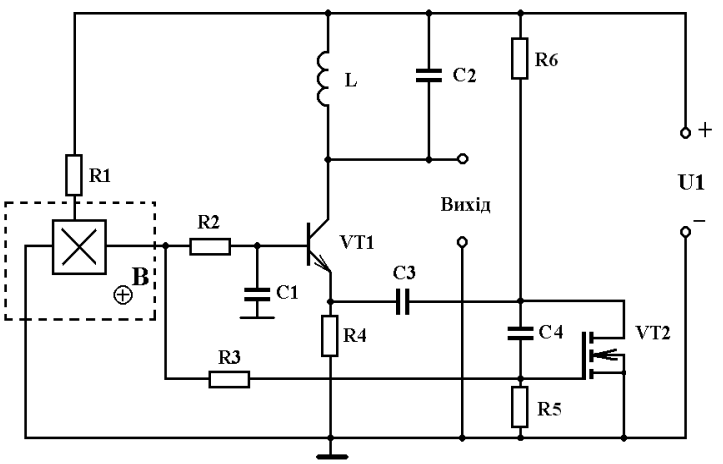


Рисунок 3.4 – Схема радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля

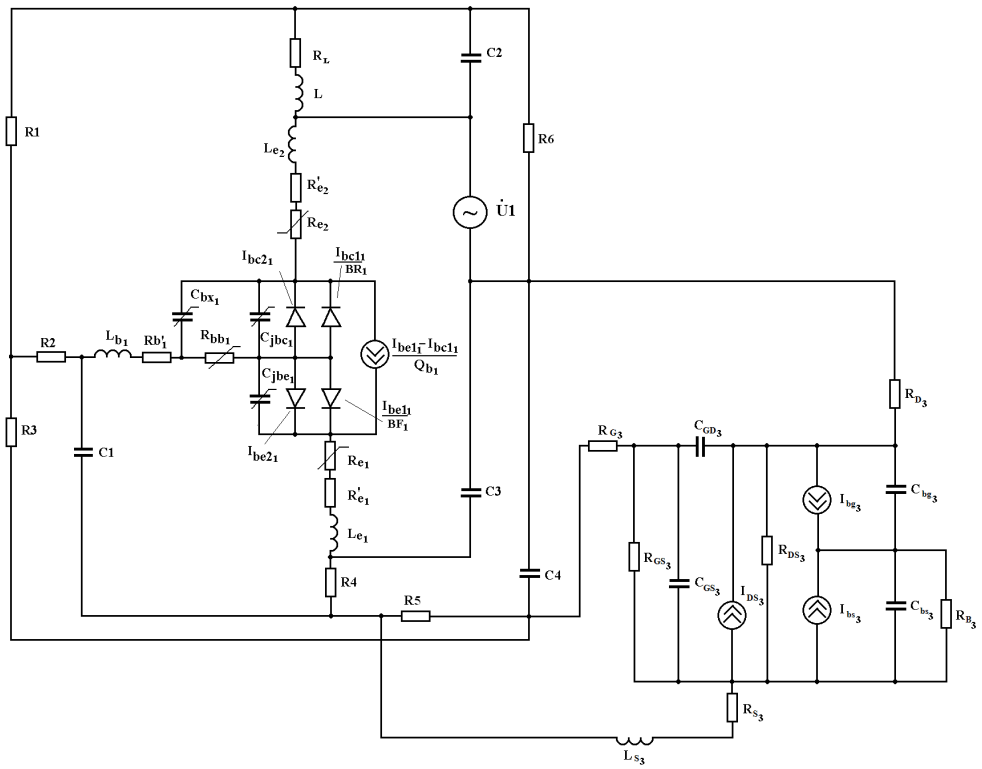


Рисунок 3.5 – Еквівалентна схема радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля

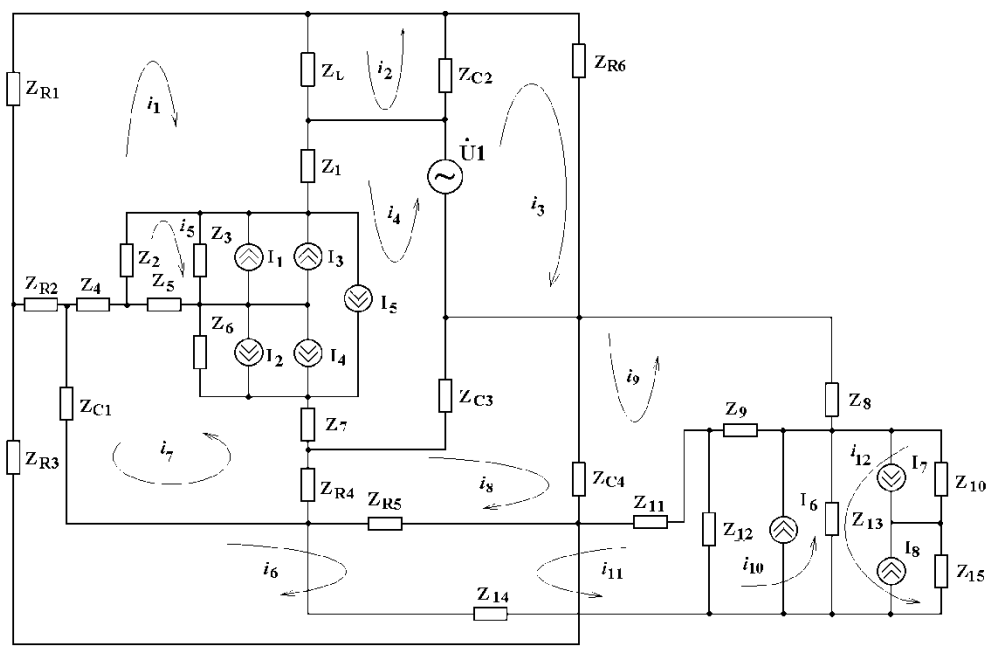


Рисунок 3.6 – Перетворена еквівалентна схема радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля

Розроблена система рівнянь Кірхгофа для перетвореної еквівалентної схеми радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля, згідно з рисунком 3.6, має вигляд

$$\begin{cases} 0=(Z_{R1}+Z_L+Z_1+Z_2+Z_4+Z_{R2})i_1+Z_Li_2+Z_1i_4+Z_2(I_1+I_3- \\ -I_5-i_5)+Z_4i_7-Z_{R2}i_6; \\ 0=(Z_L+Z_{C2})i_2+Z_Li_1+Z_{C2}i_2; \\ \dot{U}_1=(Z_{C2}+Z_{R6})i_3+Z_{C2}i_2; \\ \dot{U}_1=(Z_1+Z_3+Z_6+Z_7+Z_{C3})i_4+Z_1i_1+Z_3(i_5+I_1+I_3-I_2-I_4-I_5)+ \\ +Z_6(I_1+I_3-I_2-I_4-I_5-i_7)-Z_7i_7+Z_{C3}i_8; \\ 0=(Z_2+Z_3+Z_5)i_5+Z_2(I_5-I_1-I_3-i_1)+Z_3(I_1+I_3-I_5+i_4)+Z_5i_7; \\ 0=(Z_{R2}+Z_{C1}+Z_{R5}+Z_{R3})i_6+Z_{C1}i_7-Z_{R2}i_1-Z_{R5}i_8; \\ 0=(Z_4+Z_5+Z_6+Z_7+Z_{R4}+Z_{C1})i_7+Z_4i_1+Z_5i_5+ \\ +Z_6(I_2+I_4+I_5-i_4)-Z_7i_4+Z_{R4}i_8+Z_{C1}i_6; \\ 0=(Z_{C3}+Z_{C4}+Z_{R5}+Z_{R4})i_8+Z_{C3}i_4-Z_{C4}i_9+Z_{R5}(i_{11}-i_6)+Z_{R4}i_7; \\ 0=(Z_{C4}+Z_{11}+Z_9+Z_8)i_9+Z_{C4}i_8-Z_{11}i_{11}+Z_9(i_{10}+I_6+I_7-I_8); \\ 0=(Z_9+Z_{13}+Z_{12})i_{10}+Z_{12}(I_6-i_{11})+Z_9(I_6-I_7+I_8-i_9)+ \\ +Z_{13}(I_7-I_8-I_6-i_{12}); \\ 0=(Z_{R5}+Z_{11}+Z_{12}+Z_{14})i_{11}+Z_{R5}i_8-Z_{11}i_9+Z_{12}(i_{10}+I_6); \\ 0=(Z_{10}+Z_{13}+Z_{15})i_{12}+Z_{10}(I_9-I_8-I_6)+Z_{13}(I_6-I_7+I_8-i_{10})+ \\ +Z_{15}(I_7-I_8-I_6). \end{cases} \qquad (3.33)$$

В системі рівнянь Кірхгофа (3.33) використано наступні скорочення

$$I_1=I_{bc2};\quad I_2=I_{be2};\quad I_3=I_{bc1}/\beta_R;\quad I_4=I_{be1}/\beta_F;$$

$$I_5=(I_{be1}-I_{bc1})/Q;\quad I_6=I_{DS3};\quad I_7=I_{BG3};\quad I_8=I_{BS3};$$

$$Z_{R1}=R_1;\quad Z_{R2}=R_2;\quad Z_{R3}=R_3;\quad Z_{R4}=R_4;$$

$$Z_{R5}=R_5;\quad Z_{R6}=R_6;\quad Z_L=R_L+j\omega L;\quad Z_{C1}=-j/\omega C_1;$$

$$Z_{C2}=-j/\omega C_2;\quad Z_{C3}=-j/\omega C_3;\quad Z_{C4}=-j/\omega C_4;\quad Z_1=R_c^{'}+R_c+j\omega L_c;$$

$$Z_2=-j/\omega C_{bx}^{'};\quad Z_3=-j/\omega C_{jbc};\quad Z_4=R_b^{'}+j\omega L_b;\quad Z_5=R_{bb};$$

$$Z_6=-j/\omega C_{jbe};\quad Z_7=R_e^{'}+R_e+j\omega L_e;\quad Z_8=R_{D1};\quad Z_9=-j/(\omega C_{GD1});$$

$$Z_{10}=-j/(\omega C_{BD1});\quad Z_{11}=R_{G1};\quad Z_{12}=\frac{R_{GS1}}{1+\omega^2R_{GS1}^2C_{GS1}^2}-j\frac{R_{GS1}^2\omega C_{GS1}}{1+\omega^2R_{GS1}^2C_{GS1}^2};$$

$$Z_{13}=R_{DS1};\quad Z_{14}=R_{S1}+j\omega L_{S1};\quad Z_{15}=\frac{R_{B1}}{1+\omega^2R_{B1}^2C_{BS1}^2}-j\frac{R_{B1}^2\omega C_{BS1}}{1+\omega^2R_{B1}^2C_{BS1}^2}.$$

Значення параметрів елементів нелінійної еквівалентної схеми радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля (див рисунок 3.5) для

теоретичних розрахунків отримано з робіт [52, 53, 54, 55]. Розв'язання системи нелінійних рівнянь (3.33) проведено чисельним методом на персональному комп'ютері в середовищі Matlab 9.1.

Перейдемо до розрахунку функції перетворення радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля, тобто залежності частоти генерації від індукції магнітного поля. Для цих цілей скористаємося нелінійною еквівалентною схемою радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля (рисунок 3.5). Виходячи із цієї схеми і теорії стійкості Ляпунова [56], одержимо функцію перетворення

$$F_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{C_{be}(B)+C_{bc}(B)}{C_{bc}(B)C_{be}(B)L}}\ . \tag{3.34}$$

Чутливість радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля визначається на основі виразу (3.34). Теоретична і експериментальна залежності частоти генерації радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля від магнітної індукції представлені на рисунку 3.7. Залежність чутливості радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля від зміни магнітної індукції наведена на рисунку 3.8. Розходження теоретичних і експериментальних досліджень складає не більше ±3 %.

$$S_B = \frac{1}{4}\left(\frac{\left(\frac{\partial C_{be}(B)}{\partial B}+\frac{\partial C_{bc}(B)}{\partial B}\right)\left(C_{bc}(B)+C_{be}(B)\right)}{C_{bc}(B)C_{be}(B)L} - \frac{\left(\frac{\partial C_{be}(B)}{\partial B}\right)\left(C_{bc}(B)+C_{be}(B)\right)}{C_{be}^2(B)C_{bc}(B)L} - \right.$$
$$\left. - \frac{\left(\frac{\partial C_{bc}(B)}{\partial B}\right)\left(C_{bc}(B)+C_{be}(B)\right)}{C_{be}(B)C_{bc}^2(B)L}\right) \Bigg/ \left(\pi\sqrt{\frac{C_{bc}(B)+C_{be}(B)}{C_{bc}(B)C_{be}(B)L}}\right). \tag{3.35}$$

де $C_{be}(B)$, $C_{bc}(B)$ – складові ємності коливального контура радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля, які визначаються ємнісною складовою повного опору на електродах стік-емітер транзисторів VT1 і VT2 радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля; L – індуктивність коливального контура радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля.

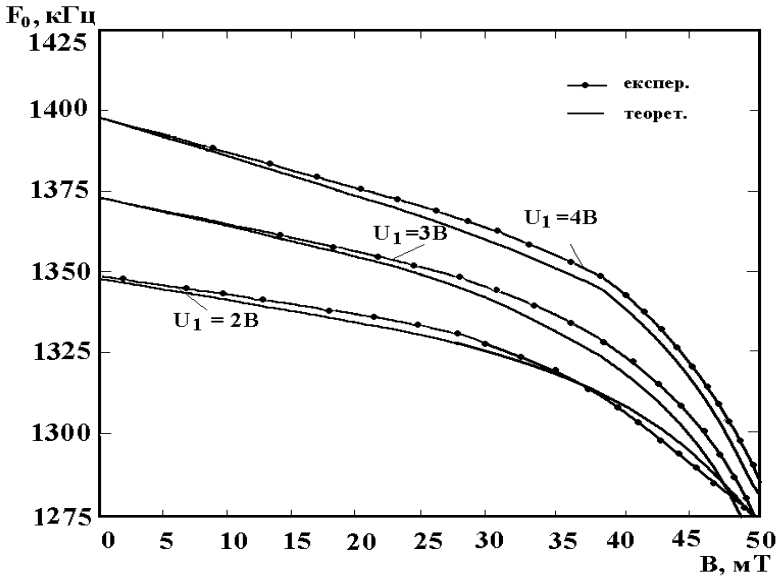


Рисунок 3.7 – Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля від зміни магнітної індукції

Експериментальні дослідження проводились за стандартною методикою [55]. Величина магнітної індукції вимірювались за допомогою приладу типу DT-3G. Найбільша чутливість радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля лежить у діапазоні від 1 мТл до 60 мТл і складає 1000…1550 Гц/мТл.

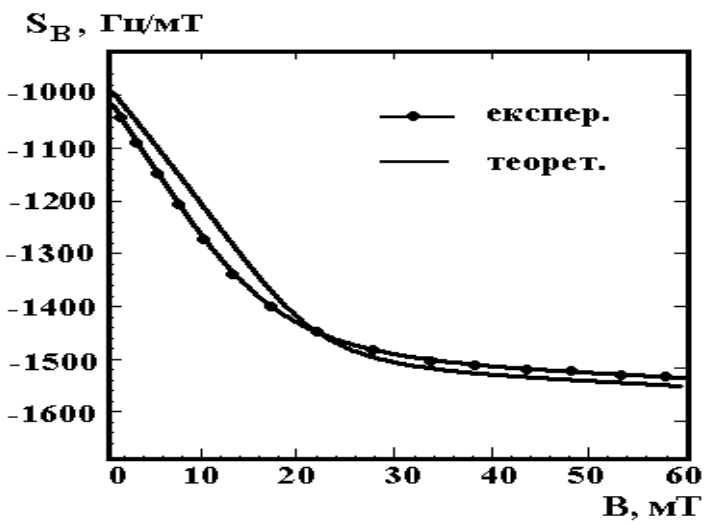


Рисунок 3.8 – Залежність чутливості радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля від зміни магнітної індукції

3.4 Радіовимірювальний сенсор індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом

Радіовимірювальний сенсор індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом, який містить параметричний сенсор Холла і джерело постійної напруги, в нього введено чотири біполярні транзистори, чотири резистори і два конденсатора, причому колектор першого біполярного транзистора з'єднаний з базою другого біполярного транзистора і першим виводом першого резистора, а другий вивід першого резистора підключений до першого виводу четвертого резистора, другого виводу третього резистора і першого виводу другого конденсатора, першого полюса джерела постійної напруги і колектора четвертого біполярного транзистора, емітер якого з'єднаний з першим виводом першого конденсатора, першою вихідним контактом, першим виводом другого резистора і колектором другого біполярного транзистора, а емітер другого біполярного транзистора, емітер першого біполярного транзистора, емітер третього біполярного транзистора, другий вихідний контакт, четвертий вивід параметричного сенсора Холла, другий вивід другого конденсатора і від'ємний полюс джерела постійної напруги підключені до загальної шини, причому перший вивід третього резистора підключений до бази четвертого біполярного транзистора, першого виводу параметричного сенсора Холла і другого виводу першого конденсатора, а другий вивід параметричного сенсора Холла з'єднаний з другим виводом четвертого резистора, а база першого біполярного транзистора з'єднана з базою третього біполярного транзистора і його колектором.

Параметричний параметричний сенсор належить до області контрольно–вимірювальної техніки і може бути використаний як сенсор вимірювання магнітної індукції в різноманітних пристроях автоматичного керування.

Відомий параметричний сенсор для вимірювання магнітної індукції на основі польового магніто–транзистора. Його конструкція складається з польового транзистора з ізольованим затвором, в каналі якого існують додаткові бокові омічні контакти, з яких знімається електро-рушійна сила Холла. Їх розташування складає (0,8–0,9) довжини каналу. При розташуванні польового магніточутливого транзистора у поперечному магнітному полі в його каналі виникає електричне поле Холла.

Недоліком такого параметричного сенсора Холла є мала чутливість і точність вимірювання магнітної індукції. Це пов'язано з тим, що при малих значеннях магнггної індукції зміна струму стоку є незначною.

За прототип обрано параметричний сенсор для вимірювання магнітної індукції, який використовує ефект Холла. Конструктивно він складається з напівпровідникової пластини, яка має прямокутну форму. На кінцях прямокутної напівпровідникової пластини виготовлені омічні контакти, до яких підключається джерело постійної напруги для забезпечення проходженню струму через пластину. На бокових гранях прямокутної напівпровідникової пластини зроблені також другі омічні контакти, з яких знімається напруга Холла. Під дією струму I і магнітної індукції B, вектори яких взаємоперпендикулярні, на обкладинках елемента виникає напруга Холла Uн. Величина цієї напруги залежить від геометрії (довжини l і товщини D) елемента, струму I, коефіцієнта Холла Rн і магнітної індукції B:

$$U_H = \frac{R_H \cdot I \cdot B}{D} \tag{3.36}$$

Матеріалом для виготовлення параметричного сенсора Холла слугує кремній, арсенід–індію (InAs) і антимонід Індію (InSb). Параметричний сенсор Холла з арсеніду–індію, наприклад, при магнітній індукції B=1 Т і струмі 0,1 А має вихідну напругу 0,5 В.

Недоліком такого параметричного сенсора Холла є мала чутливість і точність вимірювь особливо в області малих значень індукції магнітного поля, тому що при цьому необхідно значно підвищувати струм який протікає через параметричний сенсор Холла.

В основу винаходу поставлена задача створення радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом, в якому за рахунок введення нових блоків і зв'язків між ними досягається перетворення магнітної індукції в частоту, що підвищує чутливість і точність вимірювання магнітної індукції.

На рисунку 3.9 представлено та наведено в додатку Л схему радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом. Радіовимірювальний сенсор індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом

містить біполярні транзистори 1, 3, 4, 7 резистори 2, 5, 8, 10, конденсатори 6, 11, параметричний сенсор Холла 9 і джерело постійної напруги 11. Біполярні транзистори 1, 3, 4 створюють ємнісний елемент коливального контуру параметричного сенсора. Резистори 2, 5, 8, 10 забезпечують режим живлення радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом за допомогою джерела постійної напруги 11. Біполярний транзистор 7, разом із RC – колом на основі конденсатора 6 і резистора 8 утворюють індуктивний елемент коливального контуру. Конденсатор 11 захищає джерело постійної напруги 12 від дії змінного струму. Вихід радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом, утворений колектором біполярного транзистора 3 і загальною шиною.

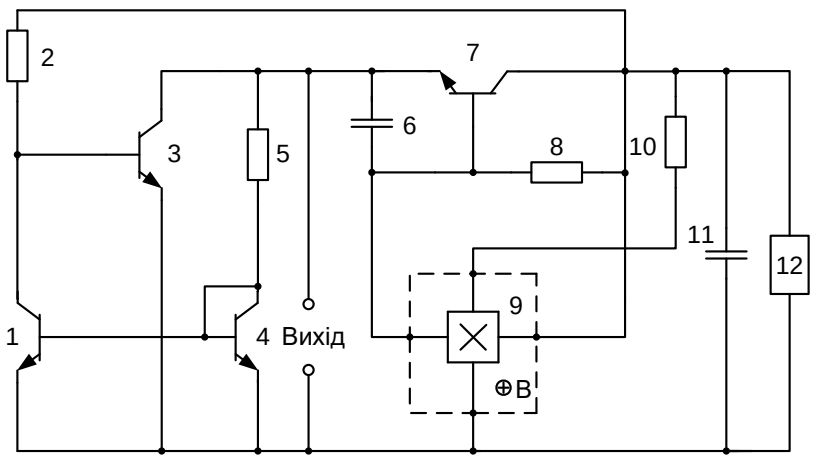


Рисунок 3.9 – Радіовимірювальний сенсор індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом

Радіовимірювальний сенсор індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом працює наступним чином. В початковий момент часу магнітна індукція не діє на параметричний сенсор Холла 9. Підвищенням напруги джерела постійної напруги 12 до величини, коли на електродах колектор–емітер біполярного транзистора 3 виникає від'ємний диференційний опір, який приводить до виникнення електричних коливань в коливальному контурі, який утворений паралельним включенням повного опору з ємнісною складовою на електродах колектор–емітер біполярного транзистора 3 та повного опору з індуктивною складовою на електродах емітер–колектор біполярного

транзистора 7. Резистори 2 і 5 здійснюють живлення біполярних транзисторів 1, 3 і 4, а резистори 8 і 10 здійснюють живлення з постійної напруги параметричного сенсора Холла 9. Електричне коло з конденсатора 11 та резистора 8 здійснює регулювання величини індуктивності активного індуктивного елемента на основі біполярного транзисторі 7. Конденсатор 11 запобігає проходженню змінного струму через джерело постійної напруги 11. При наступній дії магнітної індукції на параметричний сенсор Холла 9 змінюється його холлівська різниця потенціалів на його першому і третьому контактах, що викликає зміну індуктивної складової повного опору на електродах емітер–колектор біполярного транзистора 7, що викликає зміну резонансної частоти коливального контуру радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом.

Використання запропонованого радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом суттєво підвищує чутливість і точність вимірювання інформативного параметру за рахунок використання ємнісного елемента коливального контуру на основі першого, другого і третього біполярних транзисторів, та індуктивного елемента коливального контуру на основі четвертого біполярного транзистора із послідовним колом з першого конденсатора і третього резистора. При дії магнітної індукції на параметричний сенсор Холла змінюється його холлівська різниця потенціалів на першому і третьому контактах, що приводить до зміни індуктивності на електродах емітер–колектор четвертого біполярного транзистора, а це викликає зміну частоти коливального контуру. Лінеаризація функції перетворення відбувається за рахунок вибору постійної напруги живлення.

Для того, щоб точніше дослідити параметри радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом на дію індукції магнітного поля перейдемо до його еквівалентної схеми, яка враховує теоретичні і експерементальні залежності ємнісної складової, активного і реактивного опорів авто генераторного пристрою перетворення від індукції магнітного поля.

Для аналізу залежності активної індуктивності радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом від дії індукції магнітного поля скористаємося спрощеною формулою, яка має вигляд [17]

$$L=\left[\frac{R\dot{\alpha}\left(r_б-R\dot{\alpha}\right)-\frac{R^3\dot{\alpha}}{r_K}+\frac{1}{(\omega C)^2}+\frac{R^2}{r_K}\left(r_б-R\dot{\alpha}\right)}{\omega^2 C\left[\left(r_б-R\dot{\alpha}\right)^2+\left(1/\omega C\right)^2\right]}-\frac{1}{\omega^2 C}\right], \qquad (3.37)$$

де $r_б$, r_K – опір бази і колектора; $\dot{\alpha}$ – комплексний коефіцієнт передачі по струму у схемі із загальною базою транзистора VT3; ω – кругова робоча частота; R, C – зовнішній опір і зовнішня ємність.

Дана формула отримана за умови, що $r_K >> R$, $R >> r_б$, $r_б >> r_e$. У рівнянні (3.37) необхідно також враховувати комплексний характер коефіцієнта $\dot{\alpha}$.

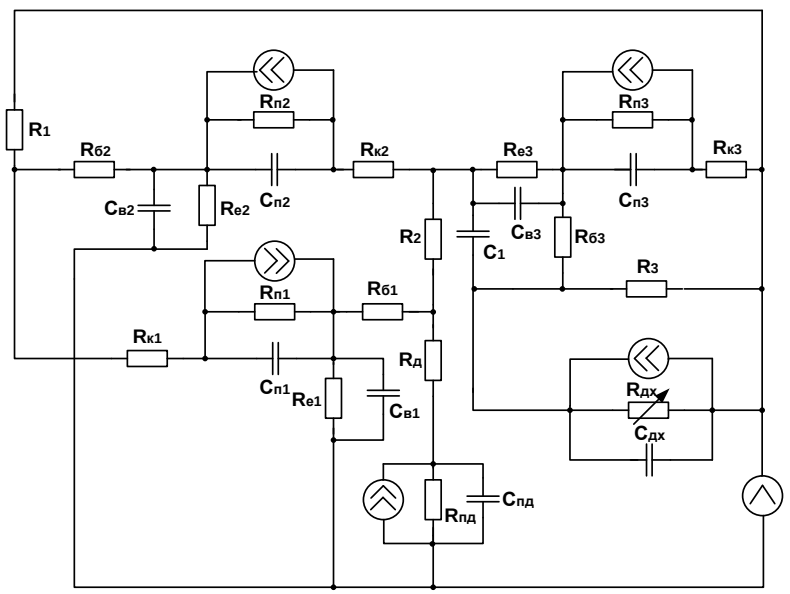


Рисунок 3.10 – Еквівалентна схема радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом

Добротність індуктивного елементу радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом визначається формулою

$$Q=\frac{\frac{R\dot{a}}{wC}\left(r_б-R\dot{a}\right)-\frac{R^3\dot{a}}{r_K wC}+\frac{1}{(wC)^3}+\frac{R^2}{r_K wC}\left(r_б-R\dot{a}\right)-\frac{1}{wC}\left[\left(r_б-R\dot{a}\right)^2+\left(\frac{1}{wC}\right)^2\right]}{R\left[\left(r_б-R\dot{a}\right)^2+\left(\frac{1}{wC}\right)^2\right]+\left(\frac{1}{wC}\right)^2\left(r_б-R\dot{a}\right)-\frac{R^2}{r_K}\left[\left(r_б-R\dot{a}\right)^2+\left(\frac{1}{wC}\right)^2\right]-\frac{R^2}{r_K(wC)^2}-\frac{R^3\dot{a}}{r_K}\left(r_б-R\dot{a}\right)-\frac{R\dot{a}}{(wC)^2}} \quad (3.38)$$

Аналіз виразу (3.37) і виразу (3.38) показує, що вплив на індуктивність і добротність радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом визначається через теоретичні і експерементальні залежності коефіцієнта $\dot{\alpha}$, опору бази $r_б$ і опору колектора r_K від магнітної індукції.

Для зручності розрахунків перетворимо схему радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом у більш компактну форму і розставимо стуми по контурам (рисунок 3.11)

Система рівнянь Кіргофа згідно рис. 3.11

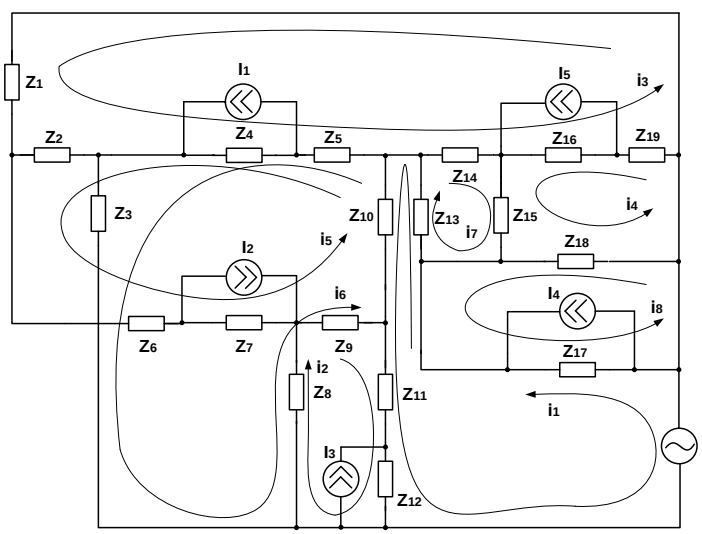


Рисунок 3.11 – Перетворена еквівалентна схема радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом

$$
\left.
\begin{aligned}
&\dot{U}_1 = (Z_{17} + Z_{13} + Z_{10} + Z_{11} + Z_{12})\cdot i_1 - Z_{17}\cdot i_8 - Z_{17}\cdot I_4 + Z_{13}\cdot i_7 - Z_{10}\cdot(i_5 + i_6) + \\
&+ i_2\cdot(Z_{11}+Z_{12}) + Z_{12}\cdot I_3 \\
&0 = (Z_8 + Z_9 + Z_{11} + Z_{12})\cdot i_2 + i_6\cdot(Z_8+Z_9) + Z_9\cdot i_5 + i_1\cdot(Z_{11}+Z_{12}) - Z_{12}\cdot I_3 \\
&0 = (Z_1 + Z_2 + Z_4 + Z_5 + Z_{14} + Z_{16} + Z_{19})\cdot i_3 - Z_2\cdot i_5 - Z_4\cdot(i_5 + i_6 + I_1) - \\
&- Z_5\cdot(i_5 + i_6) + Z_{14}\cdot i_7 - Z_{16}\cdot(i_4 + i_5) - Z_{19}\cdot i_4 \\
&0 = (Z_{19} + Z_{16} + Z_{15} + Z_{18})\cdot i_4 - Z_{19}\cdot i_3 - Z_{16}\cdot i_3 + Z_{15}\cdot i_7 - Z_{18}\cdot(i_8 - I_4) \\
&0 = (Z_5 + Z_4 + Z_2 + Z_6 + Z_7 + Z_6)\cdot i_5 - Z_5\cdot(i_3 + i_6) - Z_4\cdot(i_3 + i_6 + I_1) - Z_2\cdot i_3 + \\
&+ Z_7\cdot I_2 - Z_9\cdot(i_6 - i_2) - Z_{10}\cdot(i_6 + i_1) \\
&0 = (Z_5 + Z_4 + Z_3 + Z_8)\cdot i_6 - Z_5\cdot(i_3 + i_5) - Z_4\cdot(i_5 + i_3 + I_1) - Z_8\cdot i_2 + Z_9\cdot(i_5 - i_2) - \\
&- Z_{10}\cdot(i_5 + i_1) \\
&0 = (Z_{13} + Z_{14} + Z_{15})\cdot i_7 + Z_{13}\cdot i_1 + Z_{14}\cdot i_3 + Z_{15}\cdot i_4 \\
&0 = (Z_{18} + Z_{17})\cdot i_8 - Z_{18}\cdot(i_4 - I_4) - Z_{17}\cdot(i_1 + I_4)
\end{aligned}
\right\} \qquad (3.39)
$$

де $Z_1 = R_1$, $Z_2 = R_2$, $Z_3 = \dfrac{R_{e2}}{1 + w^2\cdot R_{e2}^2\cdot C_{в2}^2} - j\cdot\dfrac{R_{e2}\cdot w\cdot C_{в2}}{1 + w^2\cdot R_{e2}^2\cdot C_{в2}^2}$

$Z_4 = \dfrac{R_{п2}}{1 + w^2\cdot R_{п2}^2\cdot C_{п2}^2} - j\cdot\dfrac{R_{п2}\cdot w\cdot C_{п2}}{1 + w^2\cdot R_{п2}^2\cdot C_{п2}^2}$, $Z_5 = R_{к2}$, $Z_6 = R_{к1}$,

$Z_7 = \dfrac{R_{п1}}{1 + w^2\cdot R_{п1}^2\cdot C_{п1}^2} - j\cdot\dfrac{R_{п1}\cdot w\cdot C_{п1}}{1 + w^2\cdot R_{п1}^2\cdot C_{п1}^2}$, $Z_8 = \dfrac{R_{e1}}{1 + w^2\cdot R_{e1}^2\cdot C_{в1}^2} - j\cdot\dfrac{R_{e1}\cdot w\cdot C_{в1}}{1 + w^2\cdot R_{e1}^2\cdot C_{в1}^2}$,

$Z_9 = R_{б1}$, $Z_{10} = R_2$, $Z_{11} = R_{д1}$, $Z_{12} = R_{пд}$, $Z_{13} = -j\cdot\dfrac{1}{w\cdot C_1}$,

$Z_{14} = \dfrac{R_{e3}}{1 + w^2\cdot R_{e3}^2\cdot C_{в3}^2} - j\cdot\dfrac{R_{e3}\cdot w\cdot C_{в3}}{1 + w^2\cdot R_{e3}^2\cdot C_{в3}^2}$,

$Z_{15} = R_{б3}$, $Z_{16} = \dfrac{R_{п3}}{1 + w^2\cdot R_{п3}^2\cdot C_{п3}^2} - j\cdot\dfrac{R_{п3}\cdot w\cdot C_{п3}}{1 + w^2\cdot R_{п3}^2\cdot C_{п3}^2}$, $Z_{17} = \dfrac{R_{дх}}{1 + w^2\cdot R_{дх}^2\cdot C_{дх}^2} -$

$- j\cdot\dfrac{R_{дх}\cdot w\cdot C_{дх}}{1 + w^2\cdot R_{дх}^2\cdot C_{дх}^2}$.

$I_1 = I_{бк2}$, $I_2 = I_{бк1}$, $I_3 = I_д$, $I_4 = I_{дх}$, $I_5 = I_{бк3}$.

Для розрахунків основних параметрів радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом скористаємося високопродуктивною системою для технічних розрахунків Matlab 9.1. Лістинг програми знаходиться в додатку Р. Після проведення математичного моделювання були отриманні необхідні данні в графічній формі (рисунки 3.13 – 3.19)

Для отримання експериментальних результатів були використанні наступні основні прилади: міліамперметр DT9208, частотомір ATTEN– F2700C, вольтметр UT804, прилад вимірювання магнітної індукції DT–3G, блок живлення UTP3305, радіовимірювальний сенсор індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом. Структурна схема макету для експерементальних досліджень зображена на рис. 3.12 та наведена в додатку М.

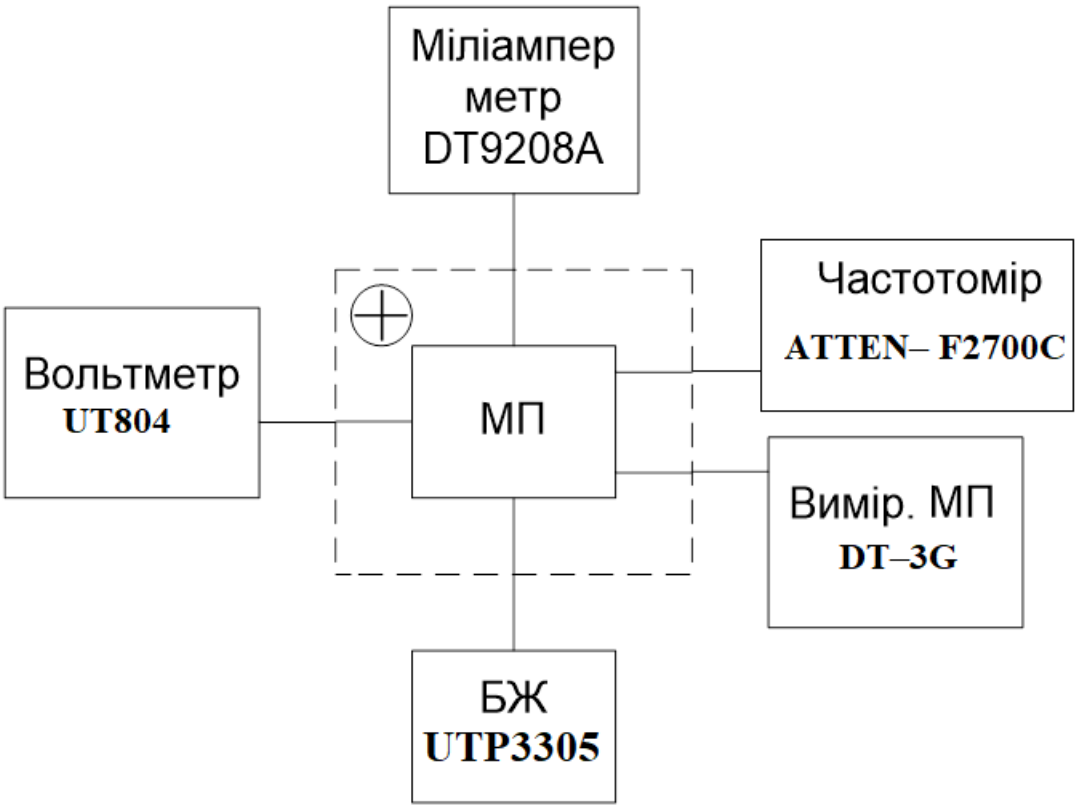


Рисунок 3.12 – Структурна схема макету для експерементальних досліджень

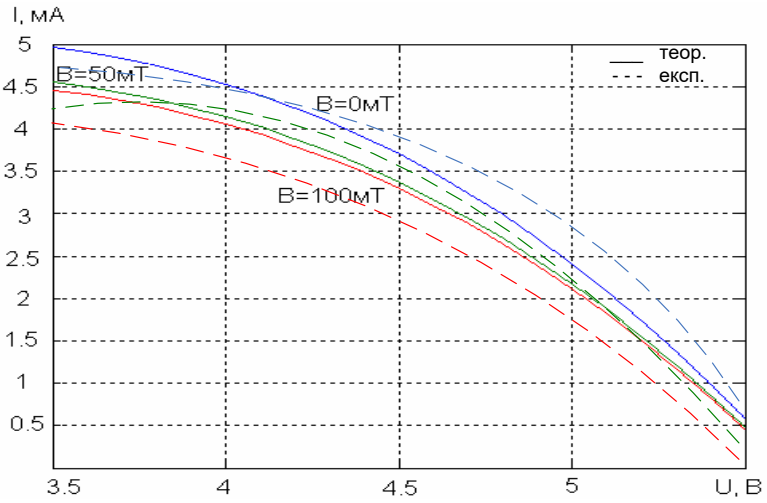


Рисунок 3.13 – Теоретичні і експериментальні залежності спадаючої ділянки ВАХ радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом

На рисунку 3.13 зображена та наведено в додатку Н спадаюча ділянка ВАХ радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом з від'ємним диференційним опором, коли зростання напруги приводить до спаду струму. В цей момент виникають електричні коливання в контурі, який утворений паралельним включенням повного опору з ємнісною складовою та повного опору з індуктивною складовою.

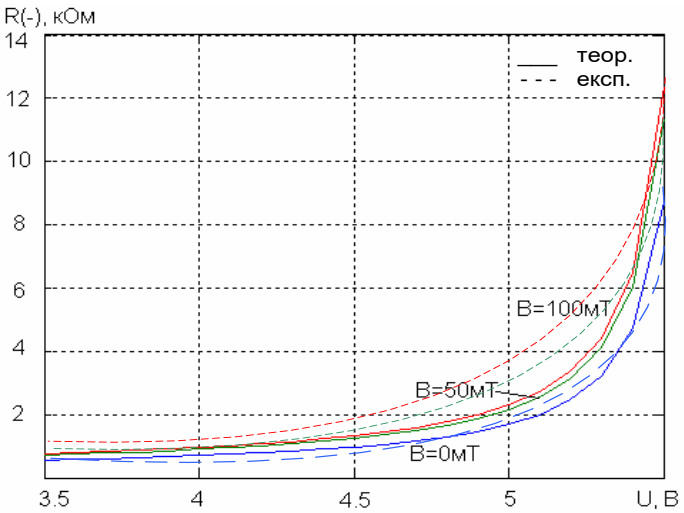


Рисунок 3.14 – Теоретичні і експериментальні залежності активного опору радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом від напруги живлення

На рисунку 3.14 подана та наведено в додатку П залежність активної складової опору від напруги живлення радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом. Як видно із графіка, найбільшу зміну активна складова набуває за напругою живлення 5 В. Залежність реактивної складової від зміни напруги живлення радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом подано на рисунку 3.15.

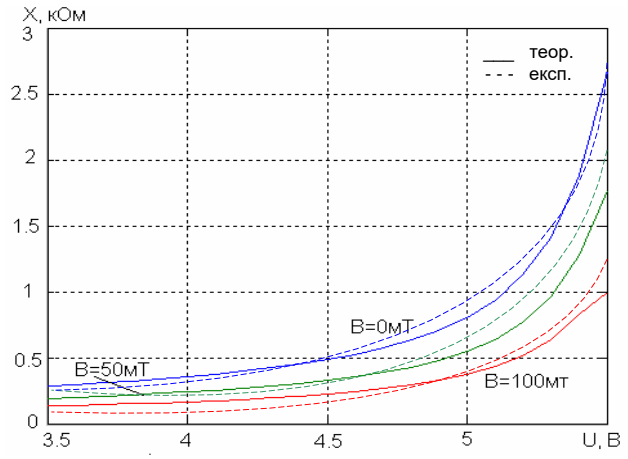


Рисунок 3.15 – Теоретичні і експериментальні залежності реактивної складової повного опору радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом від напруги живлення

Як видно із графіка, в діапазоні напруг від 5 В до 5,5 В існує різке збільшення активної складової повного опору радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом від напруги, живлення, подальше зростання напруги живлення від 3,5 В до 5 В приводить до незначного, майже лінійного збільшення активної складової повного опору.

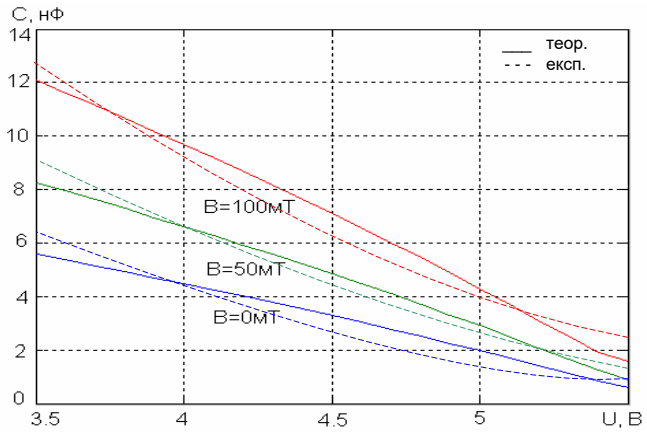


Рисунок 3.16 – Теоретичні і експериментальні залежності еквівалентної ємності контуру радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом від напруги живлення

На рисунку 3.16 представлено теоретичну залежність еквівалентної ємності контуру радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом, яка майже лінійно спадає від зростання напруги живлення. Експеременальні графіки дають більш нелінійну залежність. Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом від напруги живлення зображенні на рис. 3.17.

Частоту генерації, тобто функцію перетворення радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом можна знайти за формулою

$$F = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{[D_1 - L_{екв} \cdot C_{к1}] + \sqrt{[D_1 - L_{екв} \cdot C_{к1}]^2 + 4 \cdot L_{екв} \cdot C_{к1} \cdot (C_x(B) \cdot R_x(B))^2}}{2 \cdot L_{екв} \cdot C_{к1} \cdot (C_x(B) \cdot R_x(B))}} \qquad (3.40)$$

$$D_1 = R_x{}^2(B) \cdot C_x(B) \cdot C_{к1} + (C_x(B) \cdot R_x(B))^2$$

Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом від магнітної індукції зображенні на рис. 3.18.

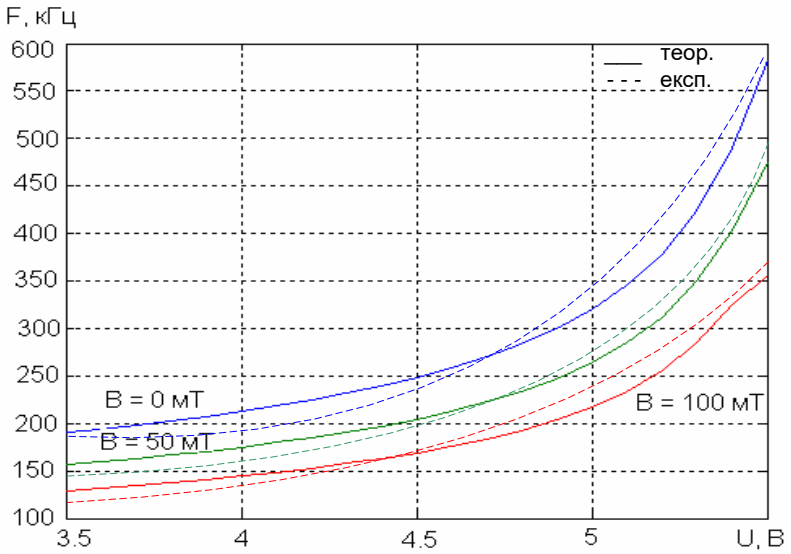


Рисунок 3.17 – Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом від напруги живлення

Для напруги живлення 3.5 В теоретична залежність частоти генерації радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом змінюється від 583 кГц до 357 кГц в залежності від магнітної індукції. Для напруги 4,5 В частота генерації радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом змінюється від 248 кГц до 169 кГц. Для напруги 4,5 В частота генерації радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом змінюється від 190 кГц до 129 кГц. Магнітна індукція змінюється від 0 мТ до 100 мТ.

З графіка видно, що вищій напрузі живлення радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом відповідає більша частота генерації.

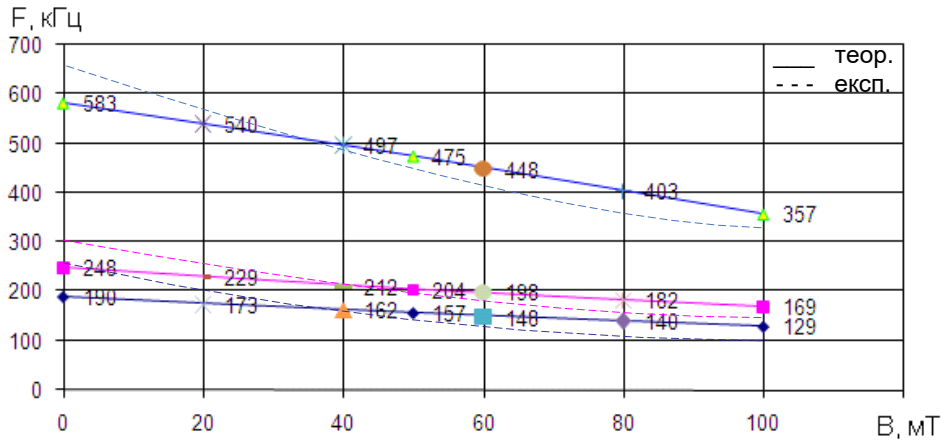


Рисунок 3.18 – Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом від магнітної індукції

Чутливість радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом знаходиться за формулою 3.41.

$$S_B = \frac{\sqrt{2}}{8}((2\cdot R_x\cdot(B)\cdot C_x\cdot(B)\cdot\left(C_{к1}\cdot\frac{dR_x}{dB}\cdot(B)\right)+R_x(B)^2\cdot\left(\frac{dC_x}{dB}\cdot(B)\right)\cdot C_{к1}+$$
$$+2\cdot C_x\cdot(B)\cdot R_x\cdot(B)^2\cdot\left(\frac{dC_x}{dB}\cdot(B)\right)+2\cdot C_x\cdot(B)^2\cdot R_x\cdot(B)\cdot\left(\frac{dR_x}{dB}\cdot(B)\right)+\frac{1}{2}\cdot$$
$$\cdot(2\cdot\left(R_x\cdot(B)^2\cdot C_x\cdot(B)\cdot C_{к1}+C_x\cdot(B)^2\cdot R_x\cdot(B)^2-L_{екв}\cdot C_{к1}\right)\cdot(2\cdot R_x\cdot(B)\cdot C_x\cdot$$
$$\cdot(B)\cdot C_{к1}\cdot\left(\frac{dR_x}{dB}\cdot(B)\right)+R_x\cdot(B)^2\cdot\left(\frac{dC_x}{dB}\cdot(B)\right)\cdot C_{к1}+2\cdot C_x\cdot(B)\cdot R_x\cdot(B)^2\cdot$$
$$\cdot\left(\frac{dC_x}{dB}\cdot(B)\right)2\cdot C_x\cdot(B)^2\cdot R_x\cdot(B)\cdot\left(\frac{dR_x}{dB}\cdot(B)\right))+8\cdot L_{екв}\cdot C_{к1}\cdot C_x\cdot(B)\cdot R_x\cdot(B)^2\cdot$$
$$\cdot\left(\frac{dC_x}{dB}\cdot(B)\right)+8\cdot L_{екв}\cdot C_{к1}\cdot C_x\cdot(B)^2\cdot R_x\cdot(B)\cdot\left(\frac{dR_x}{dB}\cdot(B)\right))/\sqrt{R_x\cdot(B)^2\cdot C_x\cdot(B)\cdot}$$
$$\cdot\sqrt{C_{к1}+C_x\cdot(B)^2\cdot R_x\cdot(B)^2-L_{екв}\cdot C_{к1})^2+4\cdot L_{екв}\cdot C_{к1}\cdot C_x\cdot(B)^2\cdot R_x\cdot(B)^2)}/(L_{екв}\cdot$$
$$\cdot C_{к1}\cdot C_x\cdot(B)^2\cdot R_x\cdot(B)^2)-2\cdot(R_x\cdot(B)^2\cdot C_x\cdot(B)^2\cdot C_{к1}+C_x\cdot(B)^2\cdot R_x\cdot(B)^2)-L_{екв}\cdot$$
$$\cdot C_{к1}+\sqrt{(R_x(B)^2\cdot C_x\cdot(B)\cdot C_{к1}+C_x\cdot(B)^2\cdot R_x(B)^2-L_{екв}\cdot C_{к1})^2+4\cdot L_{екв}\cdot C_{к1}}\cdot$$
$$\sqrt{\cdot C_x(B)^2\cdot R_x(B)^2}\cdot\left(\frac{dC_x}{dB}\cdot(B)\right)/(L_{екв}\cdot C_{к1}\cdot C_x\cdot(B)^3\cdot R_x\cdot(B)^2)-2\cdot(R_x\cdot(B)^2\cdot C_x\cdot$$
$$\cdot(B)\cdot C_{к1}+C_x\cdot(B)^2\cdot$$
$$\cdot R_x\cdot(B)^2-L_{екв}\cdot C_{к1}+\sqrt{(R_x(B)^2\cdot C_x\cdot(B)\cdot C_{к1}+C_x\cdot(B)^2\cdot R_x(B)^2-L_{екв}\cdot C_{к1})^2+4\cdot L_{екв}}\cdot$$
$$\cdot\sqrt{C_{к1}\cdot C_x(B)^2\cdot R_x(B)^2}\cdot\left(\frac{dR_x}{dB}\cdot(B)\right)/(L_{екв}\cdot C_{к1}\cdot C_x\cdot(B)^2\cdot R_x\cdot(B)^3))/(\pi\cdot sqrt((R_x\cdot \quad (3.41)$$
$$\cdot(B)^2\cdot C_x\cdot(B)\cdot C_{к1}$$

Залежність чутливості радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом від магнітної індукції зображена на рисунку 3.19. З графіка видно, що від 0 мТ до 75 мТ чутливість радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом змінюється незначно, а від 75 мТ до 100 мТ ця залежність проявляється сильніше.

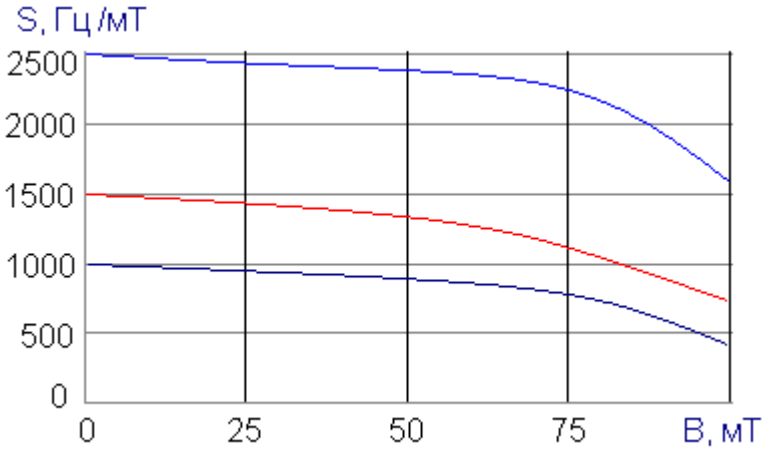


Рисунок 3.19 – Залежність чутливості радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом від магнітної індукції

3.5 Висновки до розділу

В даному розділі розглядається магнітореактивний ефект, та досліджуються радіовимірювальні сенсори індукції магнітного поля з частотним виходом на ефекті Холла. Принцип дії параметричного сенсора Холла полягає в тому, що коли тонка пластина напівпровідника поміщується в магнітне поле, а струм тече уздовж неї так, що електричне поле складає прямий кут з магнітним полем, то на бічних торцях пластини виникає напруга.

Радіовимірювальний сенсор індукції магнітного поля з частотним виходом належить до області контрольно–вимірювальної техніки і може бути використаний як сенсор вимірювання магнітної індукції в різноманітних пристроях автоматичного керування. Він належить до типу магнітних параметричних сенсорів, в яких використовуються транзисторні структури з ві'ємним диференційним опором.

Розроблена експериментальна установка для дослідження параметрів радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля. Проведено експериментальні дослідження радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом.

Чутливість радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля на основі біполярного та польового транзисторів з чутливим елементом на основі сенсора Холла у діапазоні від 1 мТл до 60 мТл складає 1000…1550 Гц/мТл. А для радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом чутливість складає 2000…2500 Гц/мТл.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Таблиця 4.1-Основні техніко-економічні показники аналога і нової розробки

Показники	Одиниці виміру	Аналог	Прилад, що проектується	Відношення параметрів
Напруга живлення	В	12	3,3-9	2
Кількість виконуваних функцій	шт.	1	2	2
Маса	кг	0,5	0,15	3
Термін безвідмовної роботи	год.	10000	12 000	1,2
Швидкість та легкість налаштування	бали	4	8	2

4.1 Оцінка наукового, технічного та економічного рівня НДДКР

Проаналізуємо рівень науково-дослідної роботи яка пов’язана з дослідженням радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом. Виходячи з відповідних вимог НТП, доцільно орієнтуватися на час проведення НДДКР 2 роки і менше (+2), при чому технічні показники результатів плануються на на рівні кращих світових зразків (0); наявність можливості отримання авторських свідоцтв на винахід - впевненість в отриманні авторських свідоцтв (+2); а строк окупності витрат 3-4 роки (+2).

В таблиці 4.2 наведено критерії та бальна оцінка для визначення наукового та технічного рівня науково-дослідної роботи

Таблиця 4.2 – Критерії та бальна оцінка для визначення наукового, технічного та економічного рівня науково-дослідної роботи

Критерії оцінки	Шкала критеріїв	Індекс оцінки
Час, необхідний для проведення НДР	2 роки і менше 3 роки 4 роки 5-6 років 7 років і більше	+2 +1 0 -1 -2
Технічні показники результатів розробки	Вище рівня кращих світових зразків На рівні кращих світових зразків Нижче рівня кращих світових зразків	+2 0 -2

Продовження таблиці 4.2 – Критерії та бальна оцінка для визначення наукового, технічного та економічного рівня науково-дослідної роботи

Можливості отримання авторських свідоцтв на винахід	Впевненість в отриманні авторських свідоцтв Часткові можливості Можливості немає	+2 0 -1
Строк окупності витрат	2 роки і менше 3-4 роки 5 років 6-7 років 8 років і більше	+3 +2 0 -1 -2

В таблиці 4.3 наведено можливі результати оцінки теми НДДКР.

Таблиця 4.3 – Можливі результати оцінки теми НДДКР

Сума індексів	Оцінка теми
Позитивна(+)	Розробка є досить перспективною
Задовільна(0)	Розробка перспективна
Негативна(-)	Розробка не перспективна

Проаналізувавши дані таблиць 4.2 та 4.3, та підрахувавши загальну суму балів (+2+0+2+2=+6), робимо висновок, що дана науково-дослідна робота з дослідження радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом є досить перспективною.

4.1.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Метою проведення технологічного аудиту є оцінювання комерційного потенціалу результатів НДДКР. В результаті оцінювання можна зробити висновок щодо напрямів (особливостей) організації подальшого впровадження результатів з врахуванням встановленого рейтингу.

Рекомендується здійснювати оцінювання комерційного потенціалу розробки за 12-ма критеріями, наведеними в таблиці 4.4. [64]

Таблиця 4.4 - Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри-терій	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздат ність продукту в реаль-них умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в ана-логів	Технічні та споживчі вла-стивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатацій ні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційн і витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатацій ні витрати на рівні експлуа-таційних ви-трат аналогів	Експлуатацій ні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має пози-тивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою

7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витрачати значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використову- ються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років

12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь- які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки зведемо до таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 - Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії	експерт		
	1	2	3
	Бали, виставлені експертами:		
1. Технічна здійсненність концепції	3	4	3
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	4	3	4
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	2	2	2
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	4	5	4
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	2	2	3
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	4	1	2
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	2	2	3
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	3	3	2
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	3	3	3
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	2	2	2
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	3	4	3
12. Практична здійсненність (розробка документів)	3	3	3
Сума балів	35	34	34
Середньоарифметична сума балів СБ	**34,3**		

За даними таблиці 4.5 зробимо висновок щодо рівня комерційного потенціалу дослідження. При цьому доцільно користуватися рекомендаціями, наведеними в таблиці 4.6. [64].

Таблиця 4.6 - Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів СБ , розрахована на основі	Рівень комерційного потенціалу розробки
0 - 10	Низький
11 - 20	Нижче середнього
21 - 30	Середній
31 - 40	Вище середнього
41 - 48	Високий

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки становить 34,3 бала, що, згідно таблиці 4.6, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

4.1.2 Оцінювання рівня новизни розробки

Виводячи на ринок новинку виробник вважає, що тієї новизни, якою наділений новий товар є достатньо для того, щоб він був сприйнятий споживачем як новий. Але це не завжди так, в силу того, що споживач і виробник неоднозначно визначать її рівень новизни.

Саме визначення рівня і ступеня інтегральної новизни товару є найбільш актуальним, оскільки її рівень визначає ступінь однакового позитивного сприйняття новизни товару як виробником, так і споживачем, а отже і ринком в цілому, а це, у свою чергу, є гарантією того, що новинка знайде своє місце на ринку, користуватиметься попитом у споживачів і забезпечить відшкодування витрат, зазнаних товаровиробником під час розроблення та виробництва інноваційного продукту [66].

Рівень новизни нової продукції пропонується розраховувати експертним методом шляхом протиставлення нової продукції та її аналогів, що існують в даний час на ринку, за чинниками що визначають її значення, в системі «краще-гірше». Рівень новизни пропонується встановлювати відносно рівня аналога (або товару, що досить близький до аналога).

Для визначення *i*-го виду новизни, застосуємо чинники, які впливають на її рівень. Кожен чинник *i*-го виду новизни розраховуємо в балах. Більша

кількість набраних балів свідчить про більший рівень новизни. Для оцінювання рівня новизни використаємо думки експертів, які встановлюють визначені бали відповідним чинникам. Бал відповідності проставляється в діапазоні від (-5 – значно гірше аналога до +5 – значно краще аналога). Результати попереднього оцінювання зведемо до відповідного листа оцінювання (таблиця 4.7).

Таблиця 4.7 – Лист оцінювання рівня новизни

Види та чинники		Бали та експерти		
		Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3
1		*2*	*3*	*4*
Споживча новизна	Питома вага 0,27	Максимальний бал $Б_{i\,MAX}$		25
1. Зміна поведінкових звичок споживача		3	3	3
2. Ступінь задоволення потреб і запитів		1	2	2
3. Спосіб задоволення потреби		3	3	3
4. Формування нової потреби		1	1	1
5. Формування нового споживача		2	3	2
Середній бал експертів $Б_{i\,отр}$		11		
Товарна новизна	Питома вага 0,19	Максимальний бал $Б_{i\,MAX}$		30
1. Параметричні зміни показників продукції				
1.1. Якісні		4	4	4
1.2. Технічні		3	3	3
1.3. Економічні		2	1	2
1.4. Сервісні		4	5	4
2. Якість продукції по відношенню до конкурентів		4	4	4
3. Функціональні зміни		5	4	4
Середній бал експертів $Б_{i\,отр}$		21		
Виробнича новизна	Питома вага 0,037	Максимальний бал $Б_{i\,MAX}$		25
1. Рівень унікальності товару для підприємства		5	5	5
2. Рівень унікальності для галузі		1	1	1
3. Рівень унікальності товару для країни		1	0	2
4. Зміна виробничої системи		4	4	4
5. Відносно існуючого асортименту		3	3	4
Середній бал експертів $Б_{i\,отр}$		14		
Прогресивна новизна	Питома вага 0,167	Максимальний бал $Б_{i\,MAX}$		25
1. Зміна технології виготовлення		4	4	4
2. Рівень застосування нових компонентів і матеріалів		1	2	1

Продовження таблиці 4.7 – Лист оцінювання рівня новизни

3. Зміна технологічного принципу дії виробу		1	2	1
4. Зміна конструктивного виконання		3	4	3
5. Рівень застосування інновацій		2	2	2
Середній бал експертів $Б_{i\ отр}$		12		
Ринкова новизна	Питома вага 0,11	Максимальний бал $Б_{i\ MAX}$		20
1. Новий виріб на новому ринку		0	0	0
2. Новий виріб на відомому ринку		1	1	1
3. Модернізований виріб		2	2	2
4. Нова модель		1	2	2
Середній бал експертів $Б_{i\ отр}$		5		
Екологічна новизна	Питома вага 0,038	Максимальний бал $Б_{i\ MAX}$		20
1. Рівень екологічної чистоти технології виробництва		3	3	2
2. Рівень впровадження мало- та безвідходних технологій		4	4	3
3. Рівень екологічно небезпечних режимів експлуатації продукції		1	1	1
4. Рівень забруднення навколишнього середовища		0	0	0
Середній бал експертів $Б_{i\ отр}$		7		
Соціальна новизна	Питома вага 0,038	Максимальний бал $Б_{i\ MAX}$		20
1. Використання нового товару приводить до покращення стану здоров’я нації		1	1	1
2. Використання нового товару приводить до зростання доходів населення		1	2	2
3. Виробництво нового товару приводить до збільшення (зменшення) кількості робочих місць на підприємстві		4	5	4
4. Виробництво нового товару приводить до підвищення кваліфікації персоналу		2	3	2
Середній бал експертів $Б_{i\ отр}$		9		
Маркетингова новизна	Питома вага 0,15	Максимальний бал $Б_{i\ MAX}$		20
1. Нові методи маркетингових досліджень		1	2	1
2. Вживання нових стратегій сегментації ринку		2	2	2
3. Вибір нової маркетингової стратегії обхвату і розвитку цільового сегмента		2	3	2
4. Побудова нових каналів збуту		2	3	2
Середній бал експертів $Б_{i\ отр}$		8		

Значення *i*-го виду новизни пропонується розрахуємо за формулою [66]

$$I_i = \frac{Б_{i\,отр}}{Б_{i\,MAX}}, \tag{4.1}$$

де $Б_{i\ отр}$ – отримана кількість балів за шкалою оцінок чинників, що визначають *i*-й вид новизни;

$Б_{i\ MAX}$ – максимальна кількість балів, що може бути отримана за *i*-м видом новизни.

Загальний рівень інтегральної новизни розраховується шляхом перемноження отриманого значення *i*-го виду новизни на її вагомість, причому вагомість *i*-го виду новизни визначається експертним методом, за формулою [66]

$$N_{інт} = \sum_{i}^{n} W_i \cdot I_i, \tag{4.2}$$

де $N_{інт}$ – рівень інтегральної (сукупної) новизни;

W_i – вагомість (питома вага) *i*-го виду новизни;

n – загальна кількість видів новизни.

$$N_{інт} = (0{,}27*11/25)+(0{,}19*21/30)+0{,}037*14/25)+(0{,}167*12/25)+(0{,}11*5/20)+ (0{,}038*7/20)+(0{,}038*9/20)+(0{,}15*8/20) = 0{,}47$$

Отримане значення інтегрального рівня новизни зіставляємо зі шкалою, що наведена в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Рівні новизни нового товару та їхня характеристика

Рівні новизни товару	Значення інтегральної новизни	Характеристика товару	Вид нового товару
Найвища	1,00	Абсолютно новий товар	Новий товар, що наділений ознаками інноваційності (інноваційний товар)
Висока	0,8…0,99	Товар, який не має аналогів	
Значуща	0,6…0,79	Принципова зміна споживчих властивостей товару	
Достатня	0,4…0,59	Принципова технологічна модифікація товару	
Незначна	0,2…0,39	Кардинальна зміна параметрів	Новий товар
Помилкова	0,00…0,19	Малоістотна модифікація	

Згідно таблиці 4.8 розробка відповідає рівню - новий товар, що наділений ознаками інноваційності (інноваційний товар), а значення інтегральної новизни 0,47, що є принципова технологічна модифікація товару.

4.1.3 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості для нового рішення

В процесі дослідження необхідно розглянути основні технічні показники, пристрою, що може бути спроектований в результаті проведення дослідження радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом. Ці показники по-різному впливають на загальну якість проектної розробки.

Узагальнений коефіцієнт якості ($B_н$) для нового технічного рішення розрахуємо за формулою [65]

$$B_н = \sum_{i=1}^{k} \alpha_i \cdot \beta_i \,, \tag{4.3}$$

де k – кількість найбільш важливих технічних показників, які впливають на якість нового технічного рішення;

α_i – коефіцієнт, який враховує питому вагу *i-го* технічного показника в загальній якості розробки. Коефіцієнт α_i визначається експертним шляхом і при цьому має виконуватись умова $\sum_{i=1}^{k} \alpha_i = 1$;

β_i – відносне значення *i-го* технічного показника якості нової розробки.

Відносні значення β_i для різних випадків розраховують за такими формулами:

- для показників, зростання яких вказує на підвищення в лінійній залежності якості нової розробки

$$\beta_i = \frac{I_{ні}}{I_{ai}} \,, \tag{4.4}$$

де $I_{ні}$ та $I_{на}$ – чисельні значення конкретного *i*-го технічного показника якості відповідно для нової розробки та аналога;

- для показників, зростання яких вказує на погіршення в лінійній залежності якості нової розробки

$$\beta_i = \frac{I_{ai}}{I_{ні}} \,. \tag{4.5}$$

Використовуючи наведені залежності можемо проаналізувати та порівняти техніко-економічні характеристики аналогу та майбутньої розробки на основі отриманих наявних та проектних показників, а результати порівняння зведемо до таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Порівняння основних параметрів пристрою що проектується та аналога

Показники (параметри)	Одиниця вимірю-вання	Аналог	Проектований пристрій	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
Напруга живлення	В	12	3,3-9	2	0,1
Кількість виконуваних функцій	шт.	1	2	2	0,35
Маса	кг	0,5	0,15	3	0,3
Термін безвідмовної роботи	год.	10000	12 000	1,2	0,1
Швидкість та легкість налаштування	бали	4	8	2	0,15

Узагальнений коефіцієнт якості ($B_н$) для нового технічного рішення складе

$$B_н = \sum_{i=1}^{k} \alpha_i \cdot \beta_i = 2*0,1+2*0,35+3*0,3+1,2*0,1+2*0,15 = 2,22.$$

Отже за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, проектований компонент переважає існуючі аналоги приблизно в 2,22 рази.

Висновки

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки становить 34,3 балів, що свідчить про комерційну важливість проведення даних

досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього). При оцінюванні за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, удосконалений пристрій переважає існуючі аналоги приблизно в 2,22 рази. Отже можна зробити висновок про доцільність проведення НДДКР з дослідження та розробки радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом**.**

4.2 Розрахунок витрат на проведення НДДКР з дослідження радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом

В техніко-економічному обґрунтуванні представленому в першому розділі даної магістерської кваліфікаційної роботи було приблизно обґрунтовано доцільність проведення НДДКР. Тому в даному розділі будуть проведені більш детальні розрахунки витрат на проведення НДДКР стосовно дослідження радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом.

Для економічного розрахунку проведення НДДКР потрібно скласти кошторис витрат, який передбачає розрахунок визначених основних статей витрат.

Основна заробітна плата дослідників та розробників, яка розраховується за формулою [64]

$$З_о = \frac{M}{T_р} \cdot t \quad , \tag{4.6}$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (дослідника), грн.;
$T_р$ – число робочих днів в місяці, 21 дн;
t – число днів роботи розробника (дослідника).
Проведені розрахунки зводимо до таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 – Основна заробітна плата дослідників та розробників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
1. Керівник проекту	10320,00	491,43	42	20640,00
2. Науковий співробітник	10000,00	476,19	21	10000,00

Продовження таблиці 4.10 – Основна заробітна плата дослідників та розробників

3. Інженер-метролог	9450,00	450,00	21	9450,00
4. Аналітик	9550,00	454,76	6	2728,57
5. Інженер-конструктор електронних компонентів	9450,00	450,00	36	16200,00
Разом				59018,57

Витрати на основну заробітну плату працівників (Зр), що здійснюють підготовку робочих місць необхідних для дослідження радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом, підготовку та формування баз даних, підготовку та монтаж обладнання, макетів, виготовлення дослідних зразків тощо, розраховуються на основі норм часу, які необхідні для виконання даної роботи, за формулою [64]

$$З_р = \sum_{1}^{n} t_i \cdot С_i \cdot К_с \quad , \qquad (4.7)$$

де t_i - норма часу (трудомісткість) на виконання конкретної роботи, годин;
n - число робіт по видах та розрядах;
$К_с$ - коефіцієнт співвідношень, який установлений в даний час Генеральною тарифною угодою між Урядом України і профспілками, $К_с$ = 1,75;
Ci - погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує відповідну роботу, грн./год.
$С_i$ визначається за формулою [64]

$$С_i = \frac{М_м \cdot К_i}{Т_р \cdot Т_{зм}}, \qquad (4.8)$$

де, $М_н$ – прожитковий мінімум працездатної особи, грн., $М_н$ = 2197,00 грн.;
$К_i$ - тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду;
$Т_р$ - число робочих днів в місяці, $Т_р$ = 21 дн;
$Т_{зм}$ - тривалість зміни, $Т_{зм}$ = 8 годин.
Проведені розрахунки винесемо до таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Витрати на основну заробітну плату працівників

Найменування робіт	Трудомісткість нормо-годин	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн.	Величина оплати, грн.
1. Наладка макетної схеми	3,4	3	1,35	30,90	105,04
2. Випробування схеми	6,2	5	1,7	38,91	241,21
3. Виготовлення плати	8,8	5	1,7	38,91	342,37
4. Виготовлення корпусу	16,2	3	1,35	30,90	500,50
5. Монтаж плати	2,4	5	1,7	38,91	93,37
6. Складання пристрою	5,5	4	1,7	38,91	213,98
Разом					1496,48

Додаткова заробітна плата розробників, дослідників та працівників, які приймали участь в дослідженнях та розробці НДДКР розраховується як 10% від основної заробітної плати розробників та працівників

$$З_д = З_о *\cdot 10 / 100\% , \quad (4.9)$$

$$З_д = (59018,57+ 1496,48) *\cdot 10 / 100 \% = 6051,50 \text{ (грн.)}.$$

Нарахування на заробітну плату дослідників та працівників.

Згідно діючого законодавства нарахування на заробітну плату складають 22% від суми основної та додаткової заробітної плати

$$Н_з = (З_о + З_д) \cdot * 22\% / 100\% , \quad (4.10)$$

$$Н_з = (59018,57+ 1496,48+ 6051,50) * 22\% / 100\% = 14644,64 \text{ (грн.)}$$

Витрати на матеріали на даному етапі проведення НДДКР пов’язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп’ютерної техніки та створення експериментальних блоків і компонентів, тому дані витрати формуються на основі як офісних витратних матеріалів так і обмеженого переліку матеріалів.

Витрати на матеріали, що були використані при проведенні досліджень, розраховуються по кожному виду матеріалів за формулою [64]

$$M = \sum_{1}^{n} H_i \cdot Ц_i \cdot K_i \quad , \qquad (4.11)$$

де, - H_i - витрати матеріалу *і*-го найменування, кг;
$Ц_i$ - вартість матеріалу *і*-го найменування, грн./кг.;
K_i - коефіцієнт транспортних витрат, $К_і$ = 1,1;
n - кількість видів матеріалів,
Проведені розрахунки зводимо до таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 – Витрати на основні матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Одиниця виміру	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість витраченого матеріалу, грн.
1.Склотекстоліт СТФ 2 – 1.5	кг	115,00	0,1	11,50
2.Хлорне залізо	кг	235,00	0,05	11,75
3.Дріт монтажний	кг	82,00	0,05	4,10
4.Лак УР-231	кг	368,00	0,05	18,40
5.Спирт етиловий	кг	90,00	0,25	22,50
6.Припій ПОС-61	кг	610,00	0,03	18,30
*7.*Флюс БС-2	кг	135,00	0,01	1,35
8. Кабель силовий	кг	165,00	0,21	34,65
9. Дріт монтажний	кг	210,00	0,09	18,90
10. Папір канцелярський	уп.	89,00	4	356,00
11. Компакт-диски	шт.	12,00	3	36,00
12. Канцелярські товари	компл.	130,00	4	520,00
13. Офісне начиння	комплект	175,00	2	350,00
Всього				1403,45

З врахуванням транспортних витрат вартість матеріалів складе

*М = 1403,45 * 1,1 = 1543,80 (грн.).*

Витрати на комплектуючі (основне обладнання, емулятори, моделі, комплектуючі макетів), що були використані при дослідженні радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом, розраховуються за формулою

$$\text{Н} = \sum_{1}^{n} \text{Н}_\text{і} \cdot \text{Ц}_\text{і} \cdot \text{К}_\text{і} \ , \qquad (4.12)$$

де: *Нi* - кількість комплектуючих *i*-го виду, шт.;
Цi - покупна ціна комплектуючих *i*-го виду, грн.;
$К_i$ - коефіцієнт транспортних витрат, $\text{К}_\text{і} = 1{,}10$;
n - кількість видів матеріалів.
Проведені розрахунки зводимо до таблиці 4.13.

Таблиця 4.13 – Витрати на комплектуючі для формування компонентів для НДДКР

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн.	Сума, грн.
Конденсатори	0	0,00	0,00
SMD 0805	5	1,20	6,00
SMD AVX B,C, D	2	3,75	7,50
Резистори	0	0,00	0,00
SMD 0805	16	0,15	2,40
Мікросхеми	0	0,00	0,00
74HC00C	2	3,00	6,00
Транзистори	0	0,00	0,00
BF998	3	1,50	4,50
BC847	7	0,50	3,50
BC857	7	0,50	3,50
BSS201	2	2,56	5,12
Сенсор Холла	2	12,75	25,50
Всього			64,02

Витрати на комплектуючі з урахуванням транспортних витрат складають

$$\text{Н} = 64{,}02 \ *\cdot \ 1{,}10 = 70{,}42 \text{ (грн.)}$$

Амортизація обладнання для проведення досліджень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню можуть бути розраховані з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою

$$A_{обл} = \frac{Ц_б}{T_в} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.13)$$

де $Ц_б$ – балансова вартість обладнання, приміщень тощо, які використовувались для розробки нового технічного рішення, грн.;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, приміщень під час розробки, місяців;

$T_в$ – строк корисного використання обладнання, приміщень тощо, років.

Проведені розрахунки необхідно звести до таблиці 4.14.

Таблиця 4.14 - Величина амортизаційних відрахувань

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, міс.	Величина амортиза-ційних відрахувань, грн
Обчислювальний комплекс та комп'ю-теризована система проектування	38500,00	5	2	1283,33
Вимірювальний комплекс метро-логічної системи	12300,00	5	2	410,00
Осцилограф	7800,00	4	2	325,00
Частотомір	6400,00	4	2	266,67
Монтажне обладнання	6800,00	4	2	283,33
Лабораторія досліджень	310000,00	25	2	2066,67
Всього				4635,00

Витрати на силову електроенергію на проведення досліджень розраховують за формулою [64]

$$В_е = В \cdot П \cdot Ф \cdot К_п, \quad (4.14)$$

де, *В* – вартість 1 кВт-години електроенергії, *В* = 2,91 грн./кВт –година;
П – встановлена потужність обладнання, кВт.;
Ф – фактична кількість годин роботи обладнання, годин. ;
$К_п$ – коефіцієнт використання потужності.
Всі проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.15.

Таблиця 4.15 – Витрати на електроенергію при проведенні досліджень

Найменування обладнання	Кількість годин роботи обладнання, год.	Встановлена потужність, кВт	Коефіцієнт використання потужності	Величина оплати
Обчислювальний комплекс та комп'ютеризована система проектування	320	0,25	0,95	221,16
Вимірювальний комплекс метрологічної системи	180	0,56	0,95	278,66
Осцилограф	100	0,16	0,95	44,23
Частотомір	150	0,25	0,95	103,67
Монтажне обладнання	12	1,2	0,95	39,81
Всього				687,53

Інші витрати охоплюють: загальновиробничі витрати, адміністративні витрати, витрати на відрядження, матеріали, окремі непередбачені витрати, зв’язок, витрати на інтернет-послуги тощо.

Інші витрати доцільно приймати як 200...300% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників. Величина інших витрат складе

$$I = (59018,57 + 1496,48) * 250\% / 100\% = 151287,62 \text{ (грн.)}$$

Загальні витрати на проведення науково-дослідної роботи.

Сума всіх попередніх статей витрат дає загальні витрати на проведення науково-дослідної роботи

В =59018,57+1496,48+6051,50+14644,64+1403,45+70,42+4635,00+687,53+
+151287,62=239295,22 (грн.)

Загальна (повна) вартість всієї НДДКР визначається за формулою

$$B_{заг} = \frac{B}{\alpha}, \tag{4.15}$$

де α - частка витрат, які безпосередньо здійснює виконавець даної НДДКР, у відносних одиницях.

$B_{заг} = \frac{B}{\alpha} = \frac{239295,00}{1} = 239295,00$, грн.

Прогнозування загальних витрат ЗВ на виконання та впровадження результатів виконаної НДДКР здійснюється за формулою

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\beta}, \tag{4.16}$$

де β - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання даної НДДКР (від 0,1… до 0,9).

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\beta} = \frac{239295,00}{0,95} = 251889,00, \text{ (грн.)}.$$

4.2.1 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації результатів розробки

В умовах ринку узагальнюючим позитивним результатом, що його отримує підприємство (організація) від впровадження результатів тієї чи іншої розробки, є збільшення чистого прибутку підприємства (організації). Зростання чистого прибутку ми можемо оцінити у теперішній вартості грошей.

Саме зростання чистого прибутку забезпечить підприємству (організації) надходження додаткових коштів, які дозволять покращити фінансові результати діяльності та виплатити кредити (якщо вони потрібні для впровадження результатів розробки).

При проведенні даної розробки не можливо прямо оцінити зростання чистого прибутку підприємства від впровадження результатів наукової

розробки. У цьому випадку збільшення чистого прибутку підприємства для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки, розраховується за формулою

$$\Delta П_i = \sum (\Delta Ц_0 \cdot N + Ц_0 \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot (1 - \frac{\upsilon}{100}) \ , \qquad (4.17)$$

де $\Delta Ц_o$ - покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році. Зазвичай таким показником може бути ціна одиниці нової розробки;

N - основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки;

ΔN - покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки;

$Ц_o$ - основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки;

n - кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки;

λ - коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. У 2020 р. ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт λ = 0,8333.

ρ - коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. Рекомендується приймати р = 0,2...0,3;

υ - ставка податку на прибуток. У 2020 році υ =18%.

В результаті впровадження результатів наукової розробки покращується якість нашої розробки, що дозволяє підвищити ціну її реалізації на 75 грн. Кількість одиниць реалізованої продукції також збільшиться: протягом першого року - на 200 шт., протягом другого року - ще на 300 шт., протягом третього року - ще на 400 шт., а протягом четвертого року – на 100 шт. Орієнтовно: реалізація аналогічного пристрою до впровадження результатів наукової розробки складала 3000 шт., а її ціна – 4200,00 грн.

Спрогнозуємо збільшення чистого прибутку підприємства від впровадження результатів наукової розробки у кожному році відносно базового.

Збільшення чистого прибутку підприємства протягом першого року складе

$$\Delta П_1 = \left[75 \cdot 3000 + (4200 + 75) \cdot 200\right] \cdot 0,8333 \cdot 0,25 \cdot (1 - \frac{18}{100}) = 184493,00 \,(\text{грн.}).$$

Збільшення чистого прибутку підприємства протягом другого року (відносно базового року, тобто року до впровадження результатів наукової розробки) складе

$$\Delta П_2 = \left[75 \cdot 3000 + (4200 + 75) \cdot (200 + 300)\right] \cdot 0,8333 \cdot 0,25 \cdot (1 - \frac{18}{100}) = 403578,00 \,(\text{грн.}).$$

Збільшення чистого прибутку підприємства протягом третього року (відносно базового року, тобто року до впровадження результатів наукової розробки) складе

$$\Delta П_3 = \left[75 \cdot 3000 + (4200 + 75) \cdot (200 + 300 + 400)\right] \cdot 0,8333 \cdot 0,25 \cdot (1 - \frac{18}{100}) = 695691,00 \,(\text{грн.}).$$

Збільшення чистого прибутку підприємства протягом четвертого року (відносно базового року, тобто року до впровадження результатів наукової розробки) складе:

$$\Delta П_4 = \left[75 \cdot 3000 + (4200 + 75) \cdot (200 + 300 + 400 + 100)\right] \cdot 0,8333 \cdot$$
$$\cdot 0,25 \cdot (1 - \frac{18}{100}) = 768719,00 \quad (\text{грн.}).$$

4.2.2 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності

Основними показниками, які визначають доцільність фінансування наукової розробки певним інвестором, є абсолютна і відносна ефективність вкладених інвестицій та термін їх окупності.

Розрахунок ефективності вкладених інвестицій передбачає проведення таких робіт:

1. Розраховують теперішню вартість інвестицій, що вкладаються в наукову розробку. Такою вартістю ми можемо вважати прогнозовану величину загальних витрат ЗВ=251889,00 грн. на виконання та впровадження результатів НДДКР.
2. Розраховують очікуване збільшення прибутку, що його отримає підприємство (організація) від впровадження результатів наукової розробки, для кожного із років, починаючи з першого року впровадження.

3. Для спрощення подальших розрахунків будують вісь часу, на яку наносять всі платежі (інвестиції та прибутки), що мають місце під час виконання науково-дослідної роботи та впровадження її результатів.

Платежі показуються у ті терміни, коли вони здійснюються.

Проведемо відповідні розрахунки.

У першому році підприємство отримає збільшення чистого прибутку на **184493** грн. відносно базового року.

У другому році - збільшення чистого прибутку на **403578** грн. (відносно базового року).

У третьому році - збільшення чистого прибутку на **695691** грн. (відносно базового року),

У четвертому - на **768719** грн. (відносно базового року).

Тоді рисунок, що характеризує рух платежів (інвестицій та додаткових прибутків) буде мати вигляд, наведений на рис.

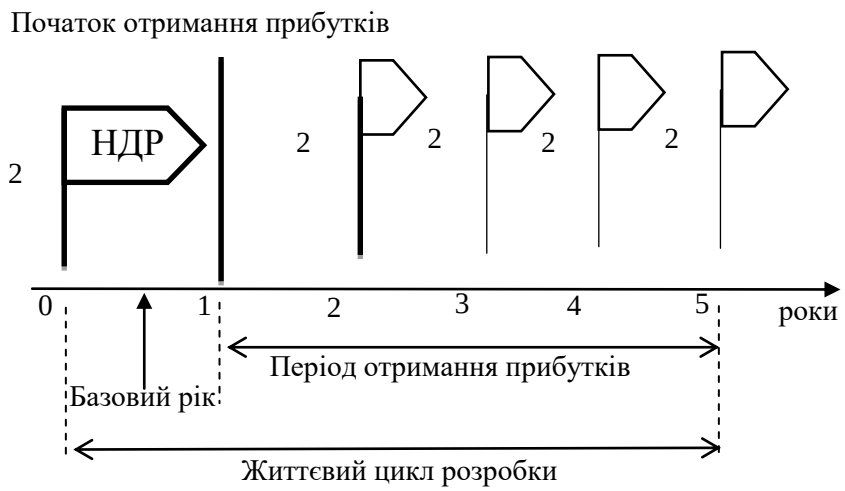


Рисунок 4.1 - Вісь часу з фіксацією платежів, що мають місце під час розробки та впровадження результатів НДДКР

4. Розраховують абсолютну ефективність вкладених інвестицій $E_{абс}$. Для цього використаємо формулу [64]

$$E_{абс} = (ПП - PV), \qquad (4.18)$$

де *ПП* - приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство (організація) від реалізації результатів наукової розробки, грн;
PV - теперішня вартість інвестицій *PV = ЗВ*, грн.

У свою чергу, приведена вартість всіх чистих прибутків *ПП* розраховується за формулою

$$ПП = \sum_{1}^{T} \frac{\Delta П_i}{(1+\tau)^t}, \qquad (4.19)$$

де *ΔП* - збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДДКР, грн;
T - період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої НДДКР, роки;
τ - ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,12;
t - період часу (в роках) від моменту отримання чистого прибутку до точки „0".

$$ПП = \frac{184493,00}{(1+0,12)^2} + \frac{403578,00}{(1+0,12)^3} + \frac{695691,00}{(1+0,12)^4} + \frac{768719,00}{(1+0,12)^5} =$$
$$= 147076,00 + 287258,00 + 442124,00 + 436191,00 = 1312651,00 \text{ (грн.).}$$

Розрахуємо абсолютну ефективність інвестицій, вкладених у реалізацію проекту. Отримаємо

$$E_{абс} = (1312651,00 - 251890,00) = 1060761,00 \text{ (грн.).}$$

Оскільки $E_{абс} > 0$, то вкладання коштів на виконання та впровадження результатів НДДКР може бути доцільним.

Результат від проведення наукових досліджень та їх впровадження принесе прибуток, але це також ще не свідчить про те, що інвестор буде зацікавлений у фінансуванні даного проекту (роботи).

Розрахуємо відносну (щорічну) ефективність вкладених в наукову розробку інвестицій $E_в$. Для цього використаємо формулу

$$E_в = \sqrt[T]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1, \qquad (4.20)$$

де $E_{абс}$ - абсолютна ефективність вкладених інвестицій, грн;
PV - теперішня вартість інвестицій *PV* = *ЗВ*, грн;

T - життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_в = \sqrt[T]{1+\frac{E_{абс}}{PV}} - 1 = \sqrt[5]{1+\frac{1060761,00}{251890,00}} - 1 = 0,39.$$

Розраховану величину $E_в$ порівнюємо з мінімальною ставкою дисконтування, яка визначає ту мінімальну дохідність, нижче за яку інвестиції вкладатися не будуть. У загальному вигляді мінімальна (бар'єрна) ставка дисконтування визначається за формулою

$$\tau = d + f, \tag{4.21}$$

де d - середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2020 році в Україні (0,08...0,12);
f - показник, що характеризує ризикованість вкладень (0,05...0,1).

$$\tau = d + f = 0,1 + 0,1 = 0,2.$$

Розрахуємо термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій.

Термін окупності вкладених у реалізацію наукового пректу інвестицій $T_{ок}$ можна розрахувати за формулою

$$T_{ок} = \frac{1}{E_в}.$$

$$T_{ок} = \frac{1}{E_в} = \frac{1}{0,39} = 2,56 \text{ (року)}.$$

Якщо $T_{ок}$ < 3...5-ти років, то фінансування даної наукової розробки в принципі є доцільним.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Захист працівників під час трудового процесу від небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які справляють негативний вплив на життя, здоров'я та працездатність людини, гарантування належних умов праці є важливими аспектами охорони праці, як складової безпеки життєдіяльності.

У даному розділі наводиться аналіз небезпечних, шкідливих [67] та уражаючих для людини та навколишнього середовища чинників, що виникають під час проведення дослідження радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом. Тут висвітлюються, зокрема, технічні рішення з виробничої санітарії та гігієни праці, визначення допустимого часу перебування в зоні дії магнітної складової ЕМВ, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження, безпека в надзвичайних ситуаціях.

5.1 Гігієна праці та виробнича санітарія

5.1.1 Склад повітря робочої зони та мікроклімат

Визначаємо для приміщення для проведення дослідження радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іб.

Відповідно до [68] допустимі параметри температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у робочій зоні для теплого та холодного періодів року приведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Допустимі показники мікроклімату в приміщенні

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С для робочих місць		Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
		постійних	непостійних		
Холодний	Іб	20-24	17-25	75	≤0,2
Теплий		21-28	19-30	60 при 27°С	0,1-0,3

При опроміненні менше 25% поверхні тіла працівника, допустима інтенсивність теплового опромінення сладає 100 Вт/м^2.

Повітря робочої зони не повинно містити шкідливих речовин з концентраціями вище гранично допустимих концентрацій (ГДК) в повітрі робочої зони і підлягає систематичному контролю з метою запобігання можливості перевищення ГДК, значення яких для роботи з ЕОМ наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин [70]

Назва шкідливої речовини	ГДК, мг/м^3	Агрегатний стан	Клас небезпеки
Озон	0,1	Пара	4
Оксиди азоту	5	Пара	2
Пил	4	Аерозоль	2

При роботі з ЕОМ джерелом зараження повітря є також іонізація молекул речовин, що містяться у повітрі. Рівні додатних та від'ємних іонів повинні відповідати [70] та наведені у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Число іонів в 1 см^3 повітря приміщення при роботі на ЕОМ

Рівні	Мінімально необхідні	Оптимальні	Максимально допустимі
позитивний	400	1500-3000	50000
негативний	600	3000-5000	50000

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату та складу повітря робочої зони запропоновано такі заходи:

1) в приміщенні має бути встановлена система опалення для холодного і кондиціонування для теплого періодів року;

2) застосування вентиляції, яка видаляє забруднення або нагріте повітря з приміщення, а також за допомогою неї контролюється швидкість руху повітря і вологість.

5.1.2 Виробниче освітлення

Для створення раціональних гігієнічних умов на робочих місцях великі вимоги пред'являються щодо якісних та кількісних параметрів освітлення.

З точки зору задач зорової роботи в приміщенні, де проводиться робота з дослідження радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом, згідно [69] визначаємо, що вони відносяться до IV розряду зорових робіт. Приймаємо контраст об'єкта з фоном – середній, а характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд зорових робіт *в*.

Нормативні значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) і мінімальні значення освітленості для штучного освітлення приведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Нормативні значення коефіцієнта природного освітлення і мінімальні освітленості для штучного освітлення

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість для штучного освітлення, лк			КПО для бокового освітлення, %	
						комбіноване		загальне	Природного	Суміщеного
						всього	у т. ч. від загального			
Середньої точності	0,5-1	IV	в	середній	середній	400	200	200	1,5	0,9

Оскільки приміщення розташоване у м. Вінниця (друга група забезпеченості природним світлом), а вікна розташовані за азимутом 135°, то для таких обставин КЕО визначатиметься за виразом [69, 70]

$$e_N = e_н m_N \ [\%], \qquad (5.1)$$

де $e_н$ – табличне значення КЕО для бокового освітлення, %;
m_N – коефіцієнт світлового клімату;
N – порядковий номер групи забезпеченості природним світлом.

За відомими значеннями одержимо нормовані значення КПО для бокового та суміщеного освітлення:

$$e_{N.\,б} = 1,5 \cdot 0,85 = 1,28 \ (\%);$$

$$e_{N.\,с} = 0,9 \cdot 0,85 = 0,77 \ (\%).$$

Для забезпечення нормативних значень параметрів освітлення передбачено такі заходи:

1) при недостатньому природному освітлені в світлий час доби доповнення штучним за допомогою газорозрядних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення;

2) застосування штучного освітлення у темний час доби.

5.1.3 Виробничі віброакустичні коливання

Зважаючи на те, що при використанні пристроїв крім усього іншого устаткування застосовується обладнання, робота якого генерує шум та вібрацію, необхідно передбачити захист від шуму та вібрації.

Визначено, що приміщення, де відбувається робота з дослідження радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом може містити робочі місця із шумом та вібрацією, що спричиняється рухомими елементами ЕОМ.

З метою попередження травмування працівників під дією шуму він підпадає під нормування. Головним документом з питань промислового шуму, що діє в нашій країні, є [71], у відповідності з яким нормовані рівні звукового тиску, рівні звуку та еквівалентні рівні шуму на робочих місцях в промислових приміщеннях не повинні перевищувати значень, що наведено у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Нормовані рівні шуму і еквівалентні рівні звуку

Рівні звукового тиску в дБ в октавних полосах з середньо-геометричними частотами, Гц									Рівні звуку і еквівалентні рівні звуку, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Норми виробничих вібрацій наведені в таблиці 5.6 для локальної вібрації.

Таблиця 5.6 – Нормовані рівні вібрації [72]

Гранично допустимі рівні віброприскорення, дБ, в октавних полосах з середньо-геометричними частотами, Гц								Коректовані рівні віброприскорення, дБА
8	16	31,5	63	125	250	500	1000	
73	73	79	85	91	97	103	109	76

З метою покращення віброакустичного клімату у приміщенні запропоновано такі заходи:

1) оздоблення стін спеціальними перфорованими плитами, панелями з метою шумопоглинання;

2) контроль рівня шуму та вібрації не менше 1 разу на рік.

5.1.4 Виробничі випромінювання

Проведений аналіз умов праці показав, що приміщення, в якому проводиться робота з дослідження може містити електромагнітні випромінювання.

Гранично допустимі рівні електромагнітних полів наведені в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Гранично допустимі значення електромагнітних полів на робочих місцях згідно [80]

Параметри та одиниці вимірювання	Граничні значення в діапазонах частот					
	1-10 кГц	10-60 кГц	0,06-3 МГц	3-30 МГц	30-50 МГц	50-300 МГц
$E_{ГД}$, В/м	1000	700	500	300	80	
$ЕН_{Егд}$, $(В/м)^2 \cdot год$	120000	40000	20000	7000	800	
$H_{ГД}$, А/м	75	57	50	–	3,0	–
$ЕН_{Нгд}$, $(А/м)^2 \cdot год$	675	390	200	–	0,72	–

З метою забезпечення захисту і досягнення нормованих рівнів випромінювань потрібно застосовувати екранні фільтри та інші засоби захисту, що пройшли випробування в акредитованих лабораторіях і мають щорічний гігієнічний сертифікат. Також можна використати захист часом.

Визначимо допустимий час перебування в зоні дії магнітної складової електромагнітного випромінювання, якщо фактична напруженість магнітного поля $H_ф$ = 20 А/м.

Допустимий час перебування в зоні дії електричної складової електромагнітного випромінювання визначається за формулою

$$T_Д = \frac{EH_{Нгд}}{H_ф^2} \text{ [год]}, \qquad (5.2)$$

де $EH_{Нгд}$ – гранично допустиме енергетичне навантаження на організм протягом робочого дня, $(А/м)^2 \cdot год$;

$EH_ф$ – фактична напруженість магнітного поля, В/м.

Для діапазону частот 0,06…3 МГц вибираємо $EH_{Нгд} = 200$ $(А/м)^2 \cdot год$.

Підставляючи відомі значення у формулу (5.2), одержимо:

$$T_Д = \frac{200}{20^2} = 0{,}5 \text{ (год)}.$$

Таким чином, час перебування працівника в зоні дії магнітної складової електромагнітного випромінювання не повинен перевищувати 0,5 год.

5.2 Промислова та пожежна безпека під час проведення дослідження

Сучасний етап розвитку техніки, автоматизації розробок та досліджень характеризується широким використанням на робочому місці ЕОМ. Велика кількість прикладних програм перетворює ЕОМ на основне знаряддя праці радіоінженера.

5.2.1 Безпека щодо організації робочих місць

Оснащені відеодисплейним терміналом робочі місця повинні розташовуватись на відстані не менше як 1,5 м від стіни з віконними прорізами, від інших стін – на відстані 1 м, одне від одного на віддалі не менше як 1,5 м. При розміщенні робочих місць необхідно виключити ймовірність прямого засвічування екрану джерелом природного освітлення. Робоче місце раціонально розташовувати таким чином, щоб природне освітлення знаходилось збоку, бажано зліва [73].

Розташовувати відеодисплейний термінал на робочому місці необхідно так, щоб поверхня екрана повинна знаходитись на віддалі 0,4-0,7 м від органів зору працівника. Висота робочої поверхні столу при виконанні роботи сидячи має налаштовуватись у діапазоні 0,68-0,8 м. Робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 0,6 м, шириною не менше як 0,5 м, глибиною на рівні колін не менше 0,45 м та на рівні витягнутої ноги не менше як 0,65 м [74].

5.2.2 Електробезпека

У середині приміщення, в якому проводиться робота з дослідження радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом, особливу увагу потрібно надати уникненню небезпеки ураження електричним струмом. Згідно [75] дане приміщення відноситься до приміщень із підвищеною небезпекою ураження електричним струмом в наслідок наявності значної (понад 75 %) відносної вологості. Тому безпека експлуатації електрообладнання повинна гарантуватись комплексом заходів, що передбачають використання ізоляції струмоведучих частин, захисного заземлення, захисних блокувань та ін [76].

5.2.3 Пожежна безпека

Згідно [77] приміщення, в якому проводиться робота з дослідження радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом, відноситься до категорії пожежної небезпеки В. Дане приміщення відноситься до 2-го ступеня вогнестійкості, в якому приміщення знаходяться в будівлі з несучими та огороджувальними конструкціями з природних або штучних кам’яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів.

Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій приміщення, що розглядається наведені в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Мінімальні межі вогнестійкості приміщення [77]

Ступінь вогнестійкості будівлі	Стіни				Колони	Східчасті майданчики	Плити та інші несучі конструкції	Елементи покриття	
	Несучі та східчасті клітки	Самонесучі	Зовнішні несучі	Перегородки				Плити, прогони	Балки, ферми
2	REI 120 М0	REI 60 М0	E 15 М0	EI 15 М0	R 120 М0	R 60 М0	REI 45 М0	REI 15 М0	R 30 М0

Примітка. R – втрати несучої здатності; E – втрати цілісності; I – втрати теплоізолювальної спроможності; M – показник здатності будівельної конструкції поширювати вогонь (межа поширення вогню); М0 – межа поширення вогню дорівнює 0 см.

В таблиці 5.9 приведено протипожежні норми проектування будівель і споруд.

Таблиця 5.9 – Протипожежні норми проектування будівель і споруд [79]

Об'єм приміщення, тис. $м^3$	Категорія пожежної небезпеки	Ступінь вогнестійкості	Відстань, м, при щільності людського потоку в загальному проході, осіб/$м^2$			Кількість людей на 1 м ширини евакуаційного виходу	Протипожежні розриви, м, при ступені їх вогнестійкості			Найбільша кількість поверхів	Площа поверху в межах пожежного відсіку, $м^2$, для кількості поверхів		
			до 1	2-3	4-5		I,II	III	IV,V		1	2	3 і більше
до 15	В	2	100	60	40	110	9	9	12	8	не обмежується		

Вибираємо, що приміщення, в якому проводиться робота з дослідження, має бути обладнане двома вогнегасниками, пожежним щитом, ємністю з піском [78].

5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля в умовах надзвичайних ситуацій

Одним із завданням цивільного захисту є забезпечення стійкості роботи приладів і електронного обладнання в умовах надзвичайних ситуацій і небезпек, а також розробка і реалізація відповідних заходів щодо створення засобів захисту від загрозливих чинників надзвичайних ситуацій. Виконання цього завдання особливо гостро стоїть у воєнний час, для апаратури подвійного застосування, при впливах радіації, ЕМІ, вибухової хвилі тощо.

В умовах надзвичайних ситуацій, надзвичайного та воєнного стану радіовимірювальні засоби відіграють особливу роль для підприємства, установи та організації в управлінні яких є засоби виробництва зброї використовуються для попередження, локалізації та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, оповіщення населення, проведення мобілізації,

забезпечення потреб національної безпеки, оборони, охорони правопорядку тощо.

Вплив різних загрозливих чинників надзвичайних ситуацій може загрожувати роботі радіовимірювальних сенсорів і цим вплинути на безпеку систем в складі яких вони застосовуються. В радіовимірювальних сенсорів застосовуються елементи, до складу яких входять: метали, неорганічні матеріали, провідники органічні сполуки, діелектрики, смоли тощо. Вважається, що серед них метали найбільш чутливі до впливу іонізуючих випромінювань.

Проходячи через елементи РЕА, потік гамма-випромінювань створює в них вільні носії електричних зарядів, який призводить до спрацьовування пристрою. При великих дозах випромінювання втрачають працездатність комплектуючі елементи систем радіоелектроніки і електроавтоматики. В транзисторах змінюється обернений струм і коефіцієнт підсилення, у конденсаторах знижуються напруги пробою та опір стікання, змінюється провідність і внутрішній нагрів; руйнується електрична ізоляція дротів з полімерних матеріалів. В органічних діелектричних матеріалах змінюються електрична провідність, діелектрична проникність і тангенс кута втрат. Неорганічні матеріали менш чутливі до впливу іонізуючих випромінювань.

Найбільш уразливі від ЕМІ радіоелектронні системи управління і сигналізації. ЕМІ ушкоджує напівпровідникові прилади, резистори, конденсатори, а також іншу апаратуру та електронні системи. Слід також пам’ятати, що механічний захист апаратури не захищає від впливу ЕМІ. Апаратура може бути знищена навіть знаходячись у надійних спорудах. Тому є необхідність провести дослідження по стійкості роботи радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля в умовах впливу цих двох факторів.

5.3.1 Дослідження стійкості роботи радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля в умовах дії іонізуючих випромінювань

За критерій стійкості роботи радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля приймають такі максимальні значення рівня радіації, або дози опромінення, при яких сенсор буде ще працювати з потрібною якістю.

Дослідження стійкості радіовимірювальних сенсорів ведеться у такій послідовності:

1. Проаналізуємо наявну в приладі елементну базу.
2. По табличним даним довідників для кожного елементу визначимо $Д_{гр}$, які занесемо до таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 Експозиційні дози радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля

Елементна база	Діелектричні матеріали	*Дгрі (Р)*	*Дгр (Р)*
Блок живлення	Транзистор КП350 Б	10^4	10^4
	Мікросхема ML700IGM	10^5	
	Конденсатор керамічний	10^6	
Блок перетворення	Елемент NXP H788	10^4	
	Конденсатори	10^7	
	Кварцовий резонатор ТХС	10^{10}	

3. По мінімальному значенню $Д_{гр}$ визначимо границю стійкості роботи апаратури у цілому в нашому випадку $Д_{гр}=10^4$ Р.
Врахувавши рівень захищеності апаратури

$$Д_{гр.к}=Д_{гр}\cdot К_{посл.}=10^4\cdot 4 = 4\cdot 10^4 \text{ (Р)}.$$

4. Визначається час нормального функціонування пристрою в заражені зоні за формулою

$$t_к=t_р+t_п=6248+1=6249 \text{ (год)}.$$

Можлива доза опромінення при використанні пристрою на зараженій території визначається за формулою

$$Д_М = \frac{2\cdot P_1\cdot(\sqrt{t_к}-\sqrt{t_п})}{K_{осл}}\cdot \text{ (Р)},$$

де $t_к$, $t_п$ – час початку і кінця знаходження приладу в іонізуючих випромінюваннях, год;

P_1 – рівень радіації через одну годину після зараження, Р/год.

Тоді

$$Д_М = \frac{2\cdot 3{,}3\cdot(\sqrt{6145}-\sqrt{1})}{4} = 127{,}7\ Р.\cdot$$

Допустимий час стійкої роботи

$$t_k = t_д = \left(\frac{Д_{гр.\min} \cdot K_{посл} + 2 \cdot p_{1.\max} \cdot \sqrt{t_п}}{2 p_{1.\max}} \right)^2 = \left(\frac{10^4 \cdot 4 + 2 \cdot 3{,}3 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 3{,}3} \right)^2 = 10^8 \ год.$$

Отже, порівнявши $Д_{гр}$ та $Д_м$ можна зробити висновок: радіовимірювальні сенсори індукції магнітного поля можуть надійно працювати на зараженій території, в приміщенні з коефіцієнтом ослаблення $К_{осл}$=4, так як границя стійкості роботи сенсорів перевищує його можливу дозу опромінення.

5.3.2 Дослідження стійкості роботи радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля в умовах впливу електромагнітного імпульсу

За критерій стійкості електронних систем або їх окремих елементів до впливу ЕМІ вважають коефіцієнт безпеки, що визначається відношенням гранично допустимої напруги до наведеної, тобто створеної ЕМІ в провіднику

$$К_Б = 20\lg \frac{Uд}{Uв(г)} \geq 40[дБ],$$

де $U_д$ - допустиме коливання напруги живлення ($U_ж$ = 5 В ±5%);

$U_{в(г)}$ - напруга наведена за рахунок електромагнітного імпульсу у вертикальних чи горизонтальних струмопровідних частинах.

Початковими даними для дослідження стійкості є вертикальна складова напруженості електромагнітного поля

$$Е_в = 7{,}21 \ (кВ/м).$$

Послідовність оцінки:

Визначається горизонтальна складова напруженості електромагнітного поля

$$Е_г = 10^{-3} \cdot Е_в = 10^{-3} \cdot 7{,}21 = 7{,}21 \ (В/м).$$

Визначаються максимальні довжини струмопровідних частин: $l_в$=1,84м, $l_г$=1,7м. Напруги наведення в вертикальних і горизонтальних струмопровідних частинах

$$U_{В1} = Е_Г \cdot l_В = 7{,}21 \cdot 1{,}84 = 13{,}266 \ (В),$$

$$U_{Г1} = E_{В1} \cdot l_{Г} = 7{,}21 \cdot 1{,}7 \cdot 10^{3} = 12{,}257 \cdot 10^{3}\ (В).$$

Допустиме коливання напруги живлення

$$U_{Д} = U_{Ж} + \frac{U_{Ж} \cdot N}{100} = 5 + \frac{5}{100} \cdot 5 = 5{,}25\ (В);$$

де N - відсоток відхилення.
По формулі (5.2) визначаємо коефіцієнти безпеки

$$K_{БВ1} = 20 \cdot \lg \frac{U_{Д}}{U_{В1}} = 20 \cdot \lg \frac{5{,}25}{3{,}6} = 3{,}27 \le 40\ (дБ);$$

$$K_{БГ1} = 20 \cdot \lg \frac{U_{Д}}{U_{Г1}} = 20 \cdot \lg \frac{5{,}25}{2{,}4 \cdot 10^{-3}} = 66{,}79 \ge 40\ (дБ);$$

В нашому випадку $K_{БВ1} <$ 40 дБ, отже апаратура нестійка до впливу електромагнітного імпульсу, і потрібно вжити заходи по підвищенню її надійності, а саме забезпечити екранування пристрою.

5.3.3 Розробка заходів по підвищенню стійкості радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля в умовах надзвичайних ситуацій

При імпульсному впливі іонізуючих випромінювань, крім перерахованих способів використовують: застосування схем, мало критичних до змін електричних параметрів; зниження напруги живлення на аноді і збільшення від'ємної напруги зсуву сіток газорозрядних приладів; застосування пристроїв, які містять додаткові радіотехнічні схеми на період впливу радіації; збільшення відстані між елементами, які знаходяться під навантаженням і інші.

Для захисту від іонізуючого випромінювання можуть використовуватись алюмінієві сплави, леговані лантаноїдами чи рідкоземельними елементами, сплави на основі тугоплавких і рідкоземельних елементів і багатошарові матеріали. Для боротьби з впливом іонізуючого випромінювання можна використати і захисні покриття.

Для захисту від ЕМІ проведемо розрахунок захисного екрану Для цього визначаємо необхідне перехідне гасіння енергії електромагнітного поля екраном (А, дБ). У якості екрану використовуємо корпус пристрою який виконаний із сталі

$$A = 5{,}02 \cdot \mathrm{t} \cdot \sqrt{\mathrm{f}}\ (\text{дБ}),$$

де *t*- товщина стінки екрану;
f – частота f=15000 Гц.
Знаходимо товщину екрану

$$\mathrm{t} = \frac{36{,}7}{5{,}02 \cdot \sqrt{15000}} = 0.06\ (\text{см}).$$

Необхідне перехідне гасіння енергії

$$А_{необ}=40\text{-}К_{БВ1}=40\text{-}3{,}3=36{,}7\ (\text{дБ}).$$

Враховуючи конструктивну особливість пристрою, а саме те що його корпус виготовлено зі сталі, встановлення додаткового екранування не є доцільним так як функцію екрана виконує корпус товщиною 1 мм.
Тоді перехідне гасіння енергії яке буде чинити сталевий екран

$$А=5{,}2\ 0{,}1\ \sqrt{15000}=63{,}6\ (\text{дБ});$$

Також для захисту від ЕМІ використовують і інші заходи по захисту, такі як та стільникові металічні конструкції для повітрозбірників та вентиляційних отворів, струмопровідні сітки, контактні пружинні прокладки, що розміщуються по периметру дверей і люків. Для захисту від проникнення електромагнітного імпульсу через кабельні вводи використовуються волоконно-оптичні системи зв’язку.

Отже нами досліджена стійкість роботи радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля в умовах дії іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу і одержано наступні результати, що радіовимірювальні сенсори можуть надійно працювати на території зараженій іонізуючим випромінюванням до граничної експозиційної дози в 127,7 Р, а також стійко переносити електромагнітний імпульс напруженістю 7,21 кВ/м, за умови використання екрануючого пристрою.

Висновки до розділу

В результаті написання даного розділу було розглянуто такі питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення допустимого часу перебування в зоні дії магнітної складової ЕМВ, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом, безпека у надзвичайних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена теоретичному та експериментальному дослідженню радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля на основі транзисторних структур з від'ємним диференційним опором та частотним вихідним сигналом.

В роботі проводиться літературний огляд параметричних сенсорів індукції магнітного поля, в якому розглянуті різноманітні параметричні сенсори індукції магнітного поля; розглянуті два напрямки створення параметричних сенсорів індукції магнітного поля, одним із яких є розбудова параметричних сенсорів з вихідним амплітудним сигналом, а другий – створення параметричних сенсорів з частотним вихідним сигналом. На даному етапі розглянуті наступні питання: методика вимірювання індукції магнітного поля, фізичний механізм взаємодії індукції магнітного поля з напівпровідниками, вплив індукції магнітного поля на властивості напівпровідників та на електропровідність напівпровідників, ефект Холла.

В третьому розділі висвітлюється магнітореактивний ефект, проводиться виведення функції перетворення і рівняння чутливості радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом. Частотний принцип роботи радіовимірювального параметричного сенсора індукції магнітного поля має ряд переваг перед амплітудним, які полягають у високій завадостійкості, що приводить до високої точності вимірювання, а також високе значення вихідного частотного сигналу, що перевищує декілька вольт. Вимірювальні прилади з частотним вихідним сигналом дозволяють відмовитись від аналого–цифрового перетворення і подальшого підсилення вихідного сигналу, що значно здешевлює системи вимірювання і контролю. Використання реактивних властивостей транзисторних структур, які залежать від дії індукції магнітного поля разом з від'ємним опором дозволяє будувати мікроелектронні частотні параметричний сенсори, які легко узгоджуються з мікропроцесорними пристроями обробки сигналів.

В роботі представлені принципи дії та конструкції сучасних радіовимірювальних параметричних сенсорів індукції магнітного поля, а також подальший напрямок їх розвитку на основі мікроелектронної технології та частотного принципу роботи.

В економічній частині згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки становить 34,3 балів, що свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу

розробки вище середнього). При оцінюванні за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, удосконалений пристрій переважає існуючі аналоги приблизно в 2,22 рази. Отже можна зробити висновок про доцільність проведення НДДКР з дослідження та розробки радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом**.**

В розділі охорони праці було розглянуто такі питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення допустимого часу перебування в зоні дії магнітної складової ЕМВ, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом, безпека у надзвичайних ситуаціях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гаряинов С. А. Перспективы использования полупроводниковых приборов и устройств с отрицательным сопротивлением в интегральных схемах. / С. А. Гаряинов // Сб. статей: Полупроводниковая электроника в технике связи. Под ред. И. Ф. Николаевского. 1986. – Вып. 26. – 80 с.
2. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / За ред. З. Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2002. – 475 с.
3. Пат. №6,278,271 B1 US, МКИ GOIR 33/07.Three dimensional magnetic field sensor: Пат. №6, 278, 271 B1 US, МКИ GOIR 33/07/C. / Schott. – Заявлено 29.03.99. Опубл. 12.01.2001. – 5 с.
4. Пат. №6,742,270 B2 US, МКИ G01C 17/26. Luminescent indication compass: Пат. №6,742,270 B2 US, МКИ G01C 17/26/Kao-Hsing Chih. Заявлено 16.09.2002; Опубл. 1.06.2004. – 6 с.
5. Большакова И. А. Функционально интегрированный магнитометрический преобразователь / И. А. Большакова, Р. Л. Голяка // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2000. – № 4. – С. 40 – 42.
6. Добринска Н. И. Датчика Холла (холлотроны) на основе арсенида галлия / Н. И. Добринска, Ц. П. Михайлова, И. Б. Велчев // Микроэлектроника. – 1991. – Т.20. – Вып.2. – С. 183 – 188.
7. Ameличев В. В. Датчики Холла на МОН-структурах / В. В. Ameличев, А. И. Галушков, Ю. Н. Миргородский и др. // Микроэлектроника. – 2000. – Т.29. – № 1. – С. 48 – 58.
8. Викулин И. М. Гальваномагнитные приборы / И. М. Викулин, Л. Ф. Викулина, В. И. Стафеев. – М.: Радио и связь, 1983. – 104 с.
9. Кордич С. Интегральные кремниевые датчики магнитного поля / С. Кордич // Sensors & Actuators. – 1986. – № 10. – P. 34–78.
10. Егиазарян Г. А. Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение / Г. А. Егиазарян, В. И. Стафеев. – М.: Радио и Связь, 1987. – 88 с.
11. Викулин И.М. Двухколекторные магнитотранзисторы / И. М. Викулин, М. А. Глауберман, Г. А. Егиазарян и др. // ПиСУ. – 1981. – №10. – С. 34 – 35.
12. Пат. № 2055419A1 Росія, МКИ H 01 L 29/82. Магниточувствительный биполярный транзистор: Пат. № 2055419A1 Россия / А. И. Галушков, А. Н. Сауров, Ю. А. Чаплычин // Заявлено 25.01.1994; Опубл. 27.02.1996. – 4 с.
13. Ameличев В.В. Интегральные датчики магнитного поля / В. В. Ameличев, А. И. Галушков, Ф.Г. Зубенко, Ю. А. Чаплыгин // Электронная промышленность. – 1992. – № 3. – С. 58 – 59.
14. Коноплев Б. Г. Сенсор магнитного поля на основе карбида кремния / Б. Г. Коноплев, И. Е. Лысенко // Известия вузов. Электроника. – 2001. – № 4. – С.78–82.
15. с базой в кармане / Р. Д. Тихонов // Датчики и системы. – 2004. – № 12. – С. 42–47.
16. Пат. 7408 УКРАЇНА, МКІ H 01 L 29/82. Мікроелектронний сенсор магнітної індукції / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк (УКРАЇНА). –

№20041510196; Заявлено 13.12.2004; Опубл. 15.06.2005, Бюл. №6. – 4 с.
17. Пат. 7409 УКРАЇНА, МКІ H 01 L 29/82. Частотний магнітний сенсор / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк (УКРАЇНА). – №20041510197; Заявлено 13.12.2004; Опубл. 15.06.2005, Бюл. №6. – 4 с.
18. Балтес Г. П. Интегральные полупроводниковые датчики магнитного поля / Г. П. Балтес, Р. С. Попович // ТИИЭР. – 1986. – Т. 74. – №8. – С. 60–90.
19. Гуменюк С. В. Интегральные полупроводниковые магниточувствительные датчики / С. В. Гуменюк, Б. И. Подлепецкий // Зарубежная электронная техника. – 1989. – №12(343). – С. 3–47.
20. Виглеб Т. Датчики / Т. Виглеб. – М.: Мир, 1989. – 196 с.
21. Schaumburg H. Sensoren / H. Schaumburg. – B.G. – Stuttgart: Teubner, 1992. – T. 3. – 583 p.
22. Викулин И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
23. Викулин И. М. Магниточувствительные транзисторы / И. М. Викулин, Л. Ф. Викулина, В. И. Стафеев // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35. – Вып. 1. – С. 3–10.
24. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 1999. – 275 с.
25. Осадчук В. С. Елементи теорії магнітореактивного ефекту в біполярних чутливих елементах для частотних магнітних перетворювачів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Збірник наукових праць. – Хмельницький: ТУП. – 2002. – Вип. №9. – Т.1. – С. 62–67.
26. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля / За редакцією З. Ю. Готри. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2001. – 412 с.
27. Глауберман М.А. Исследование магниточувствительности транзисторных структур с диффузионным переносом инжектированных носителей / М.А. Глауберман, В.В. Егоров, В.В. Козел, Н.А. Канищева // ФТП. – 2003. – том 37, вып. 1. – С. 32–36.
28. Серьезнов А. Н. Полупроводниковые аналоги реактивности / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, О. Н. Негоденко, В. П. Путилин. – М.: Знание, 1990. – 62 с.
29. Пат. №2092933 Российской Федерации, МКИ H01L 29/82. Полупроводниковый датчик магнитного поля / В. С. Осадчук, Е. В. Осадчук, А. В. Осадчук. – №95114069; Заявлено 8.08.1995; Опубл. 10.10.1997. – Бюл. №28. – 3 с.
30. Осадчук О. В. Дослідження магнітного перетворювача на основі польової транзисторної структури з від’ємним опором / О. В. Осадчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – №4. – С. 76–80.
31. Осадчук О. В. Математична модель магнітного перетворювача на основі транзисторної структури з від’ємним опором / О. В. Осадчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1998. – №3. – С. 59–63.
32. Пат. №40239 А України, МКИ G01R 33/06. Мікроелектронний пристрій для

виміру магнітної індукції / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – №2000106041; Заявлено 26.10.2000; Опубл. 16.07.2001, Бюл. №6. – 2 с.
33. Осадчук В. С. Математична модель частотного магнітного перетворювача на основі польових транзисторів з керувальним p-n переходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – №2. – С. 77–81.
34. Гаряинов С. А. Негатроника / С. А. Гаряинов, А. Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, Н. А. Филинюк. – Новосибирск: Наука, 1995. – 320 с.
35. Осадчук В. С. Радиоизмерительный преобразователь магнитного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2010. – №3. – С. 76–78.
36. Осадчук В. С. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. Г. Вербицький. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. – 196 с.
37. Осадчук В. С. Методы построения микроэлектронных радиоизмерительных преобразователей с частотным принципом работы / В. С. Осадчук, А. В. Осадчук // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2004. – №3. – С. 26–33.
38. Osadchuk V. S. The Magneticreactive Effect in Transistors for Construction Transducers of Magnetic Field / V. S. Osadchuk, A. V. Osadchuk // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija. – 2011. – №3(109). – P.119–122.
39. Osadchuk V. S. The Microelectronic Radiomeasuring Transducers of Magnetic Field with a Frequency Output / V. S. Osadchuk, A. V. Osadchuk // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija. – 2011. – №4(110). – P. 67–70.
40. Осадчук В. С. Огляд магнітних сенсорів на основі магнітодіодного ефекту / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Мартинюк В. В., Стовбчата О. П. // Материали за 7-а международна научна практична конференция, «Бъдещите изледвания», – 2011. 17.02.2011 – 25.02.2011. Том 15. Технология. Математика. – София. Болгария. «Бял ГРАД БГ» ООД. – С. 28-32.
41. Осадчук В. С. Сенсори магнітного поля на основі польових транзисторів / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Мартинюк В. В., Стовбчата О. П. // Materialy VII Miedzynarodowej Naukowi – Praktycznej Konferencji "Naukowa Mysl Informacyjnej Powieki - 2011". Volume 15. Techniczne nauki. 07-15 marca 2011. –Przemysl: Nauka i studia. – P. 38–42.
42. Осадчук В. С. Напівпровідникові прилади з від'ємним опором : навчальний посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 162 с.
43. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 2. Модели компонент аналоговых устройств / В.Д. Разевиг. – М.: Радио и связь, 1992. –72 с. Потемкин В. Г. Система инженерных и научных расчетов Matlab 5.x / В. Г. Потемкин // В двух томах. Том 1. – М.: Диалог-МИФИ, 1999. –366с.
44. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О.В. Осадчук. – Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2000. – 303 с.
45. Осадчук О.В. Мікроелектронний частотний магнітний перетворювач з

активним індуктивним елементом / О.В. Осадчук // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Автоматика, вимірювання та керування. – 2001. – №420. – С. 66–72.
46. Каяцкас А. А. Основы радиоэлектроники / А. А. Каяцкас. – М.: Высшая школа, 1988. – 464 с.
47. Новицкий П.В. Цифровые приборы с частотными датчиками / П.В. Новицкий, В.Г. Кноринг, В.С. Гутников. – Л.: Энергия, 1970. – 424 с.
48. Осадчук В.С. Радіовимірювальний перетворювач магнітного поля на основі сенсора Холла / Осадчук В.С., Осадчук О. В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – №4. – С. 179-182.
49. Осадчук О.В. Магнітний мікроелектронний частотний перетворювач / Осадчук О.В., Осадчук Я.О. // Збірник тез доповідей Міжнародної конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах ВКДТС-2011», 18-20 жовтня 2011, м. Вінниця. – С. 64.
50. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В2-х книгах. Кн.1 / С Зи. – М: Мир, 1984. – 456 с.
51. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Росадо. – М.: Высшая школа, 1991. – 351 с.
52. Патент на корисну модель №62367 України, МПК G01 R 33/06. Вимірювач магнітного поля з частотним виходом / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Стовбчата О.П. // Заявка № u201101298; Заяв. 07.02.2011; Опубл. 25.08.11 Бюл.16. – 5 с.
53. Осадчук В.С. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором. Монографія / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Семенов А.О., Коваль К.О. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 336 с. ISBN 978-966-641-405-5. – 5 с.
54. Осадчук В.С. Дослідження повного опору магніточутливого тиристора / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Мартинюк В.В., Стовбчата О.П. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький, №1, 2011. – С. 107–110. – 5 с.
55. Осадчук В. С. Радиоизмерительный преобразователь магнитного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – №3. – 2010. – С.76–78.
56. Осадчук В. С. Перетворювач магнітного поля з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Стобчата // Вісник Хмельницького національного університету. Серія – Технічні науки. – 2011. – №5. – С. 149–154.
57. Мікроелектронні сигнальні перетворювачі теплових сенсорів потоку : монографія / [З. Ю. Готра, С. В. Павлов, О. В. Осадчук та ін.]. – Вінниця: ВНТУ, 2012 . – 240 с.
58. Осадчук В.С. Сенсор магнітного поля на основі двоколекторного магнітотранзистора / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Мартинюк В.В. // Оптико-електронні інформаційно-енергетич-ні технології. – 2006. – №1(11). – С. 160–164.
59. Osadchuk V.S. Radiomeasurement Transducer to Magnetic Induction with Frequency Output / Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. // The International Conference

"Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunication and Computer Science" TCSET 2006, Lviv-Slavske, 2006. – P. 490–492.
60. Осадчук В.С. Дослідження мікроелектронного частотного перетворювача магнітного поля / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Мартинюк В.В. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2006. – №2, Том 1. – С. 139–143.
61. Осадчук В.С. Напівпровідникові перетворювачі інформації / В. С. Осадчук, О. В.Осадчук. – Вінниця: ВНТУ, 2004. – 208 с.
62. Осадчук В.С. Мікроелектронний частотний перетворювач магнітної індукції із елементом Холла / Осадчук В.С., Осадчук О.В. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – №2. Том 1. Технічні науки. – С. 208–211.
63. PSPICE User's guide / MicroSim Corporation. La Cadena Drive, Laguna Hills, 1989. – 450 p.
64. Методичні вказівки до виконання студентами-магістрантами наукового напрямку економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. В.О. Козловський – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 22 с.
65. Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – Вінниця : ВДТУ, 2003. – 75с.
66. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепа – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с.
67. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
68. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
69. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
70. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
71. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
72. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.
73. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
74. Методичні вказівки до опрацювання розділу "Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях" в дипломних проектах і роботах студентів спеціальностей, що пов'язані з функціональною електронікою, автоматизацією та управлінням / Уклад. О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 64 с.
75. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К. : Держнаглядохоронпраці, 1998. – 382 с.
76. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
77. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.

78. НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.
79. СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.
80. ДСанПіН 3.3.6-096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів.

Додаток А
(обов`язковий)
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри РТ ВНТУ,
докт.техн.наук, професор
О.В. Осадчук
”_26_” __09_____ 2020 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ СЕНСОР ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ
08–36.МКР.008.00.000 ТЗ

Керівник роботи
к.техн.наук, доцент
_____ Осадчук Я.О.

Виконавець: ст. гр. РТ–19м
_____ Маюн В.Ю.

Вінниця–2020

1. ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету № 214 “25 ” 09 2020 року та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: “03” вересня 2020 р.

Дата закінчення: “10” грудня 2020 р

2. МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є покращення чутливості та точності, частотного параметричного сенсора індукції магнітного поля, який є технологічно сумісним з новітньою радіотехнічною мікроелектронною елементною базою.

Задачами дослідження є:

1) проаналізувати існуючі параметричні сенсори індукції магнітного поля та обґрунтувати переваги сенсорів індукції індукції магнітного поля з частотним виходним сигналом по відношенню до амплітудних сенсорів індукції індукції магнітного поля;

2) удосконалити математичну модель частотного параметричного сенсора індукції індукції магнітного поля на основі біполярних транзисторів з чутливим елементом Холла, та здійснити їх аналіз;

3) отримати аналітичні залежності функції перетворення та рівняння чутливості параметричного сенсора індукції магнітного поля з частотним вихідним сигналом на основі біполярних транзисторів та розглянути можливість їх застосування при розв’язанні прикладних задач.

Об’єкт дослідження – процеси перетворення індукції магнітного поля в частоту в параметричному сенсорі індукції магнітного поля на основі біполярних транзисторів з елементом Холла.

Предмет дослідження – параметри радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним вихідним сигналом такі як точність та чутливість.

Методи дослідження: метод контурних струмів використано для аналізу функції перетворення та рівняння чутливості; методи лінійної та нелінійної оптимізації використано для визначення параметрів сенсора індукції магнітного поля з частотним вихідним сигналом та оцінювання метрологічних характеристик.

3 ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

1. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / За ред. З. Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2002. – 475 с.
2. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений: Пер. с англ. / Ф. Мейзда. – М.: Мир, 1990. – 535 с.
3. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О.В. Осадчук. – Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2000. – 303 с.
4. Осадчук В.С. Напівпровідникові перетворювачі інформації / В. С. Осадчук, О. В.Осадчук. – Вінниця: ВНТУ, 2004. – 208 с.
5. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 1999. – 275 с.
6. Осадчук В.С. Мікроелектронний частотний перетворювач магнітної індукції із елементом Холла / Осадчук В.С., Осадчук О.В. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – №2. Том 1. Технічні науки. – С. 208–211.
7. Осадчук В. С. Напівпровідникові прилади з від'ємним опором : навчальний посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 162 с.
8. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 1. / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 196 с.
9. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 2 / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 184 с.
10. Козловський В. О. Інноваційний менеджмент : Навчальний посібник / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 210 с.
11. Методичні вказівки до опрацювання розділу "Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях" в дипломних проектах і роботах студентів спеціальностей, що пов'язані з функціональною електронікою, автоматизацією та управлінням / Уклад. О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 64 с.
12. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К. : Держнаглядохоронпраці, 1998. – 382 с.
13. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
14. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
15. НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.
16. СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.

4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра радіотехніки, студент групи РТ–19м Маюн В.Ю.

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

5.1 Основними вимогами є:

- удосконалення методу вимірювання індукції індукції магнітного поля;
- розробка аналітичних виразів для розрахунку параметрів вимірювання індукції індукції магнітного поля;
- удосконалення математичної моделі процесів, що перебігають в радіовимірювальних сенсорах індукції магнітного поля з частотним виходом під дією індукції індукції магнітного поля.

5.2 Технічні вимоги

– Напруга живлення радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом 5±0.5 В;

– Струм споживання 1,5…25 мА;

– Напруга живлення вузлів параметричний сенсора + 3,5…5,5 В;

– Споживана потужність − 0,3 Вт;

– Частота генерації − 100…3500 кГц;

– Діапазон вимірювання магнітної індукції − 0...500 мТ;

5.3 Кліматичні умови

Забезпечити стабільну роботу параметричний сенсора за умов його експлуатації в температурному діапазоні 20°С...+80 °С і відносній вологості повітря до 100% та тиску – 700 – 800 мм. рт. ст.

5.4 Конструктивні вимоги

5.5 Радіовимірювальний сенсор індукції магнітного поля з частотним виходом виконується у вигляді окремого функціонального блоку, та з’єднується за допомогою роз’ємів з іншими пристроями.

5.6 Маса параметричний сенсора не повинна перевищувати – 0,01 кг.

5.7 Час напрацювання на відмову не менше 5000 год. Для збільшення середнього часу напрацювання на відмову необхідно використати комплектуючі з малою інтенсивністю відмови, а також зменшити загальну кількість окремих елементів

5.8 Тип виробництва – багатосерійне.

5.9 Варіант виконання – переносний.

5.10 Вимоги до рівня уніфікації та стандартизації

При розробці параметричний сенсора слід максимально використовувати стандартні і уніфіковані деталі.

5.11 Термін служби параметричного сенсора, не менші 45000 годин.

5.12 Показник безвідмовності, не менше 15000 годин.

6. ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	03.09.2020	14.09.2020	Проведено огляд літературних джерел. Вибрана тема	Узгодження теми МКР по кафедрі
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	15.09.2020	21.09.2020	Аналіз літературних джерел. Підготовлений матеріал основних розділів	Вступ
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	21.09.2020	25.09.2020	Розроблене ТЗ	Наказ ВНТУ про затвердження теми Додаток А
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	26.09. 2020	09.10. 2020	Проведений аналіз. Розроблені схеми пристрою	Вступ Розділ 1-2 Звіт по переддипломній практиці
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	10.10.2020	25.10. 2020	Проведені розрахунки та дослідження	Розділ 3
6.	Розділ моделювання	26.10. 2020	04.11. 2020	Проведено моделювання	Результати моделювання
7.	Розробка графічної частини МКР	05.11. 2020	15.11. 2020	Плакати. Структурні та електричні схеми	Графічна частина
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	16.11. 2020	19.11. 2020	Економічна частина	Розділ 4
9.	Охорона праці (ОП)	19.11. 2020	22.11. 2020	Частина БЖД	Розділ 5
10	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	23.11. 2020	29.11. 2020	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
11.	Нормоконтроль	30.11. 2020	01.12. 2020	Підпис нормоконтроля	Оформлена ПЗ та графічна частина
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	02.12. 2020	04.12. 2020	Позитивні відзиви	Відзив. Рецензія
13.	Захист МКР ЕК	11.12. 2020	14.12. 2020	Позитивний захист	Протокол ЕК

7 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи будуть розроблені:

– принципові схеми радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом;

– математична модель радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом;

– функція перетворення та рівняння чутливості радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом;

– експериментальні дослідження радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом;

– розділ безпеки життедіяльності;

– рекомендації щодо подальшого використання розроблених радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом.

8 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬСЯ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.

9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

10. ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання досліджень повинна містити:

– нову структуру радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом;

–нову принципову електричну схему радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом;

–рекомендації що до подальшого використання радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом.

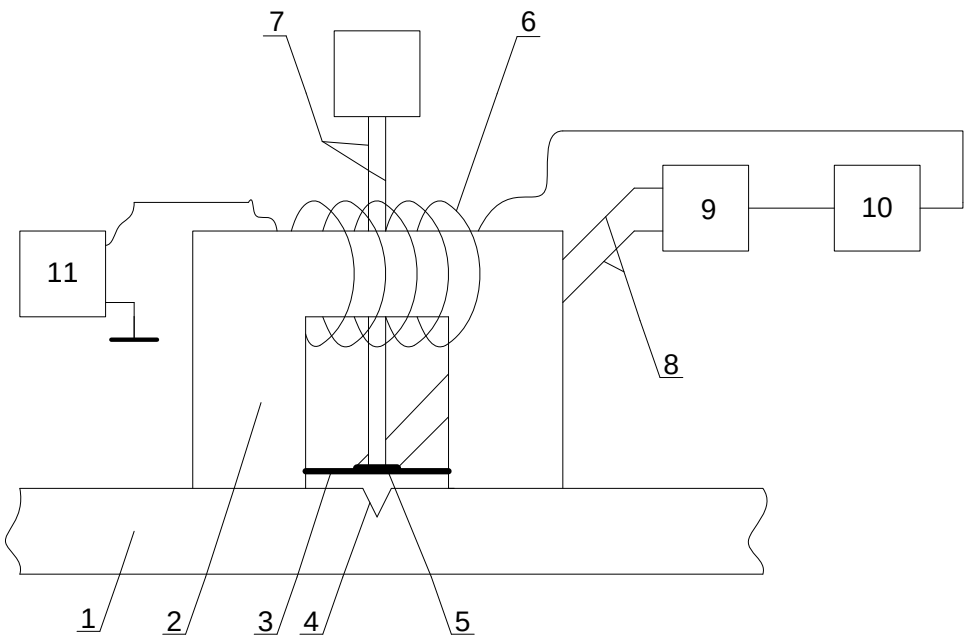
11. ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв`язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

Додаток Б
(обов’язковий)

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ СЕНСОР ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

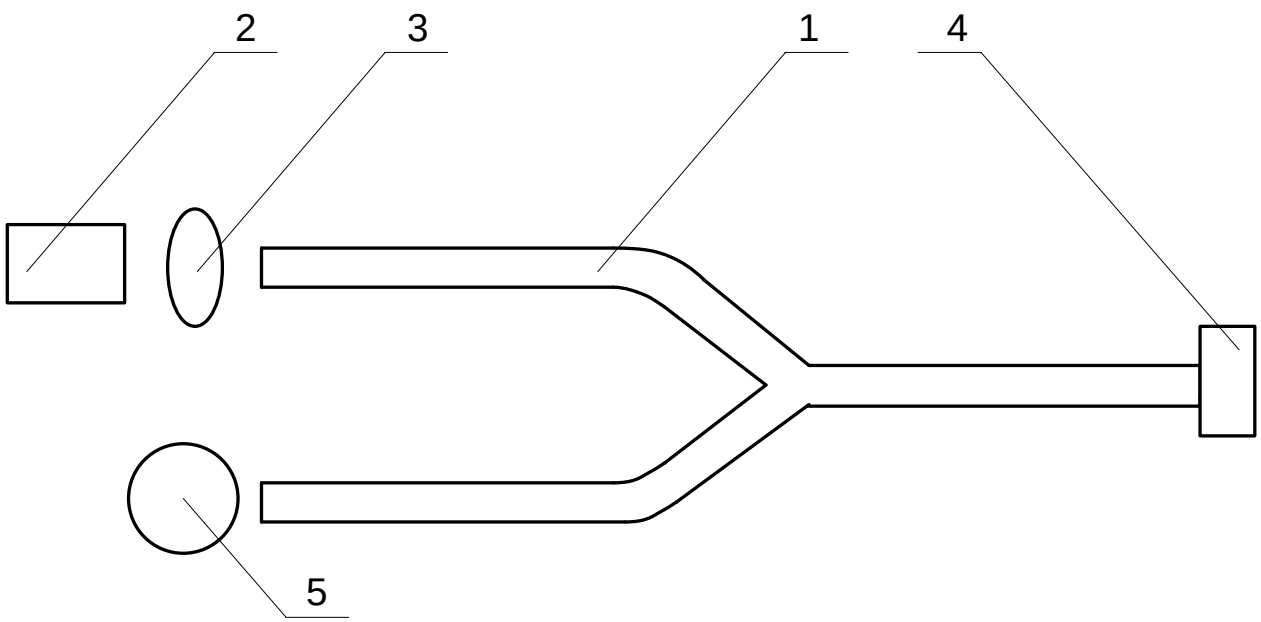
Параметричний сенсор для вимірювання напруженості індукції магнітного поля


7
6
9
10
11
8
1
2
3
4
5

Додаток В
(обов’язковий)

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ СЕНСОР ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

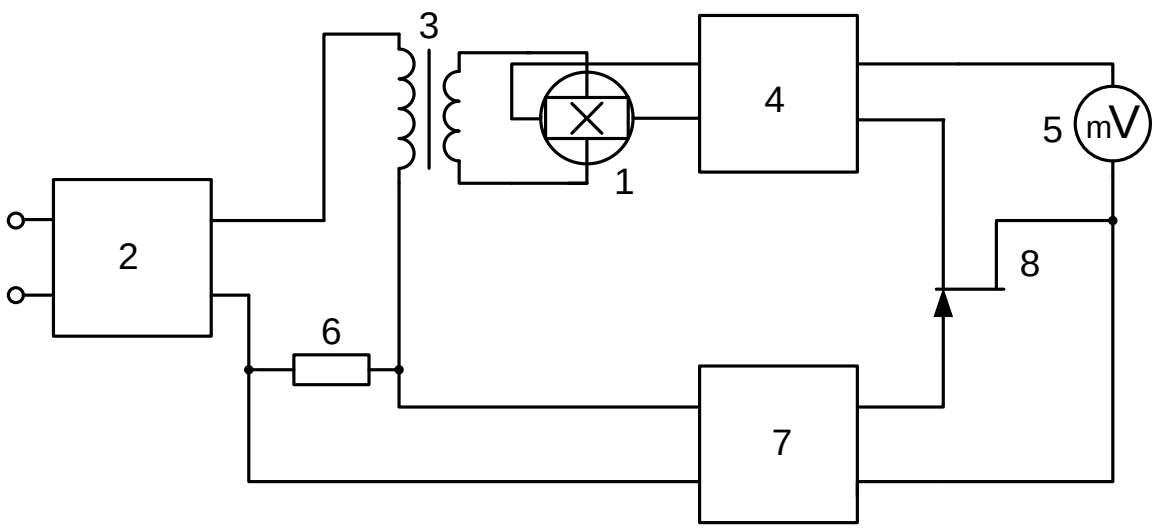
Оптична схема сенсора індукції магнітного поля


2
3
1
4
5

Додаток Д
(обов’язковий)

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ СЕНСОР ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

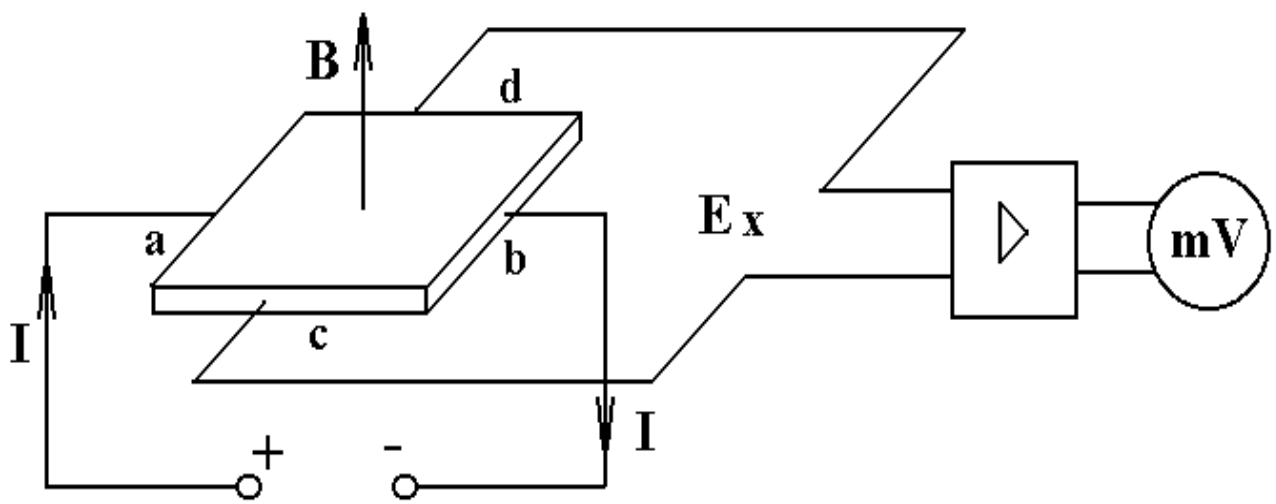
Структурна схема мілітесламетра


3
4
5
mV
1
2
8
6
7

Додаток Е
(обов’язковий)

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ СЕНСОР ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

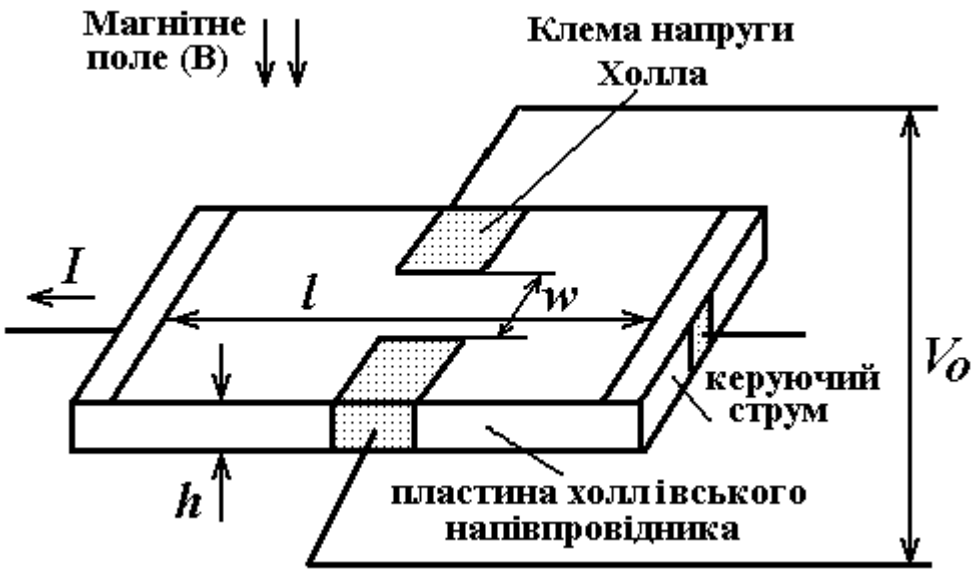
Схема вимірювання магнітної індукції


B
d
a
b
c
I
E x
mV
+
-
I

Додаток Ж
(обов’язковий)

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ СЕНСОР ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

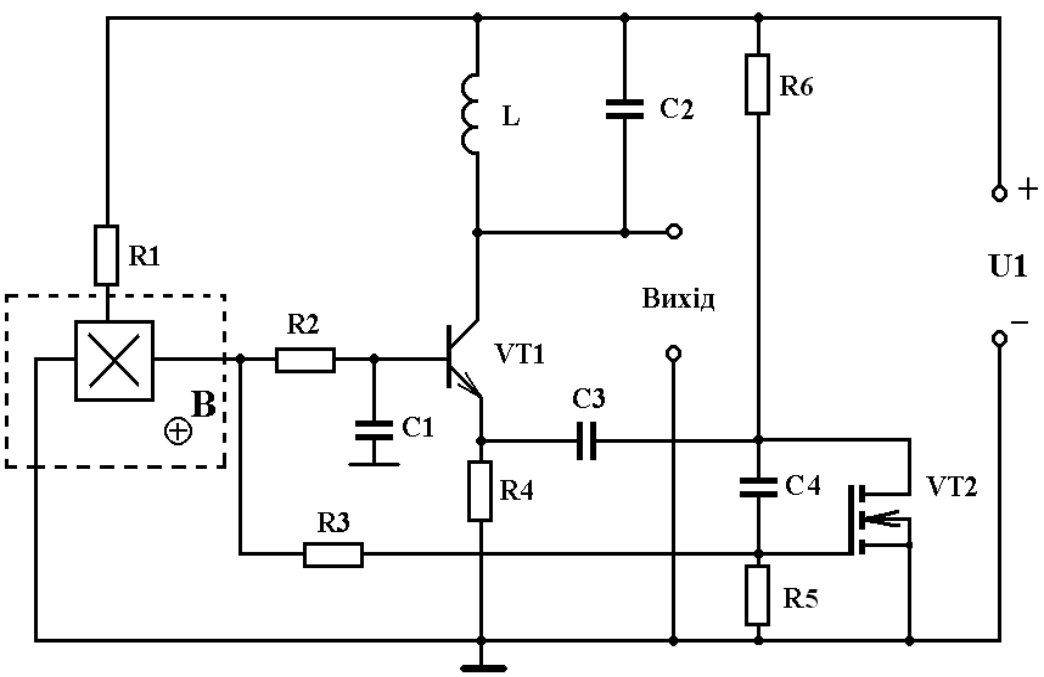
Параметричний сенсор на ефекті Холла


Магнітне
поле (B)
Клема напруги
Холла
I
l
w
керуючий
струм
Vo
h
пластина холлівського
напівпровідника

Додаток К
(обов’язковий)

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ СЕНСОР ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

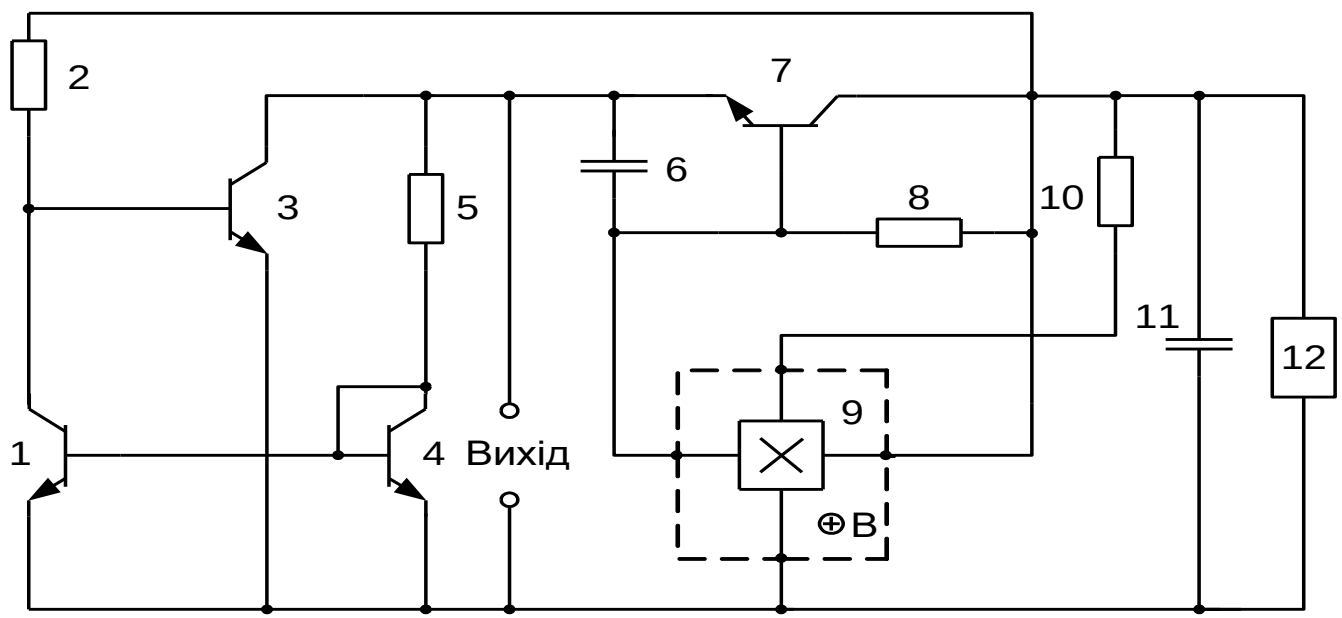
Схема радіовимірювального сенсора індукції
магнітного поля


L
C2
R6
+
U1
–
R1
Вихід
R2
VT1
B
C3
C1
R4
C4
VT2
R3
R5

Додаток Л
(обов’язковий)

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ СЕНСОР ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

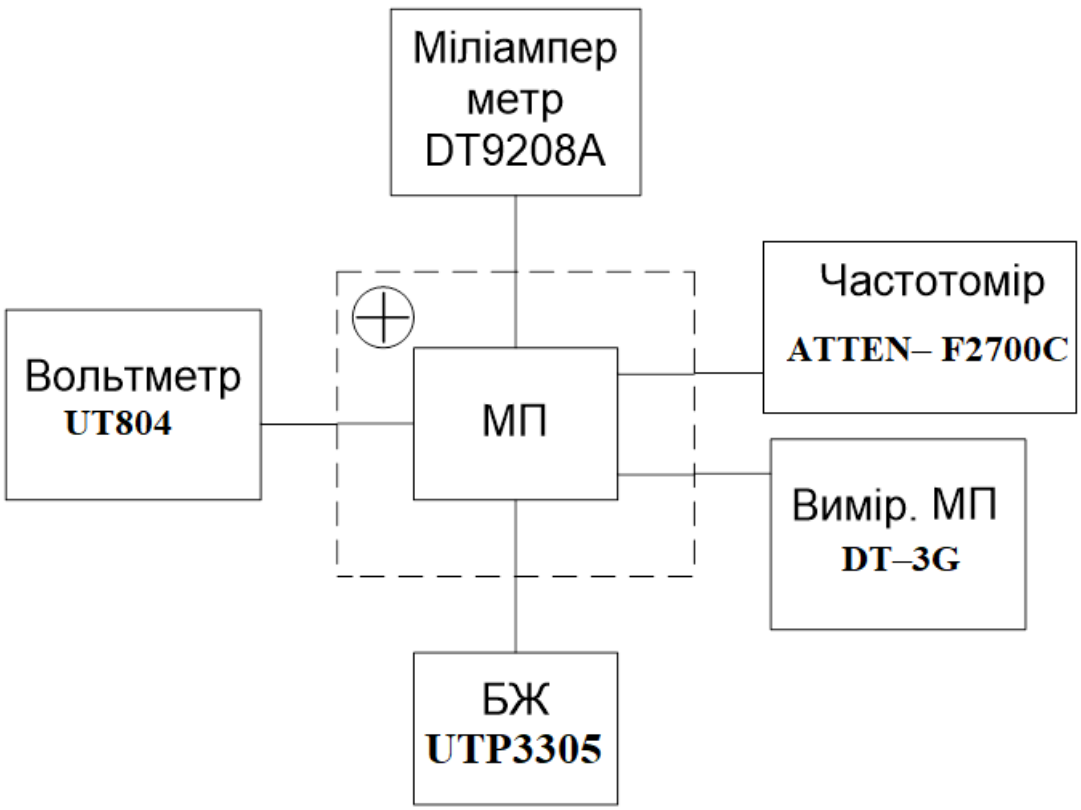
Радіовимірювальний сенсор індукції магнітного поля з частотним виходом на основі трьох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом


2
7
6
3
5
8
10
11
12
1
4
Вихід
9
⊕B

Додаток М
(обов’язковий)

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ СЕНСОР ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

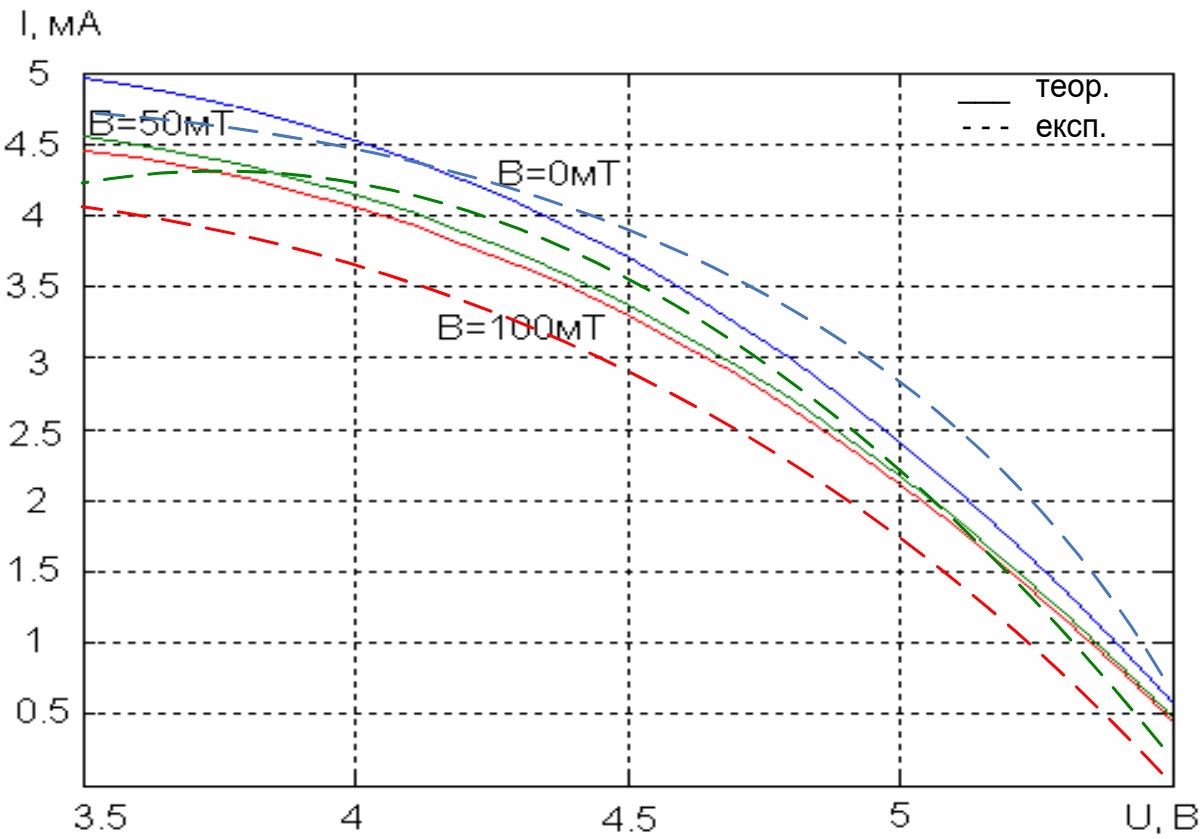
Структурна схема макету для експериментальних досліджень


Міліампер
метр
DT9208A
Частотомір
ATTEN– F2700C
Вольтметр
UT804
МП
Вимір. МП
DT–3G
БЖ
UTP3305

Додаток Н
(обов’язковий)

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ СЕНСОР ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

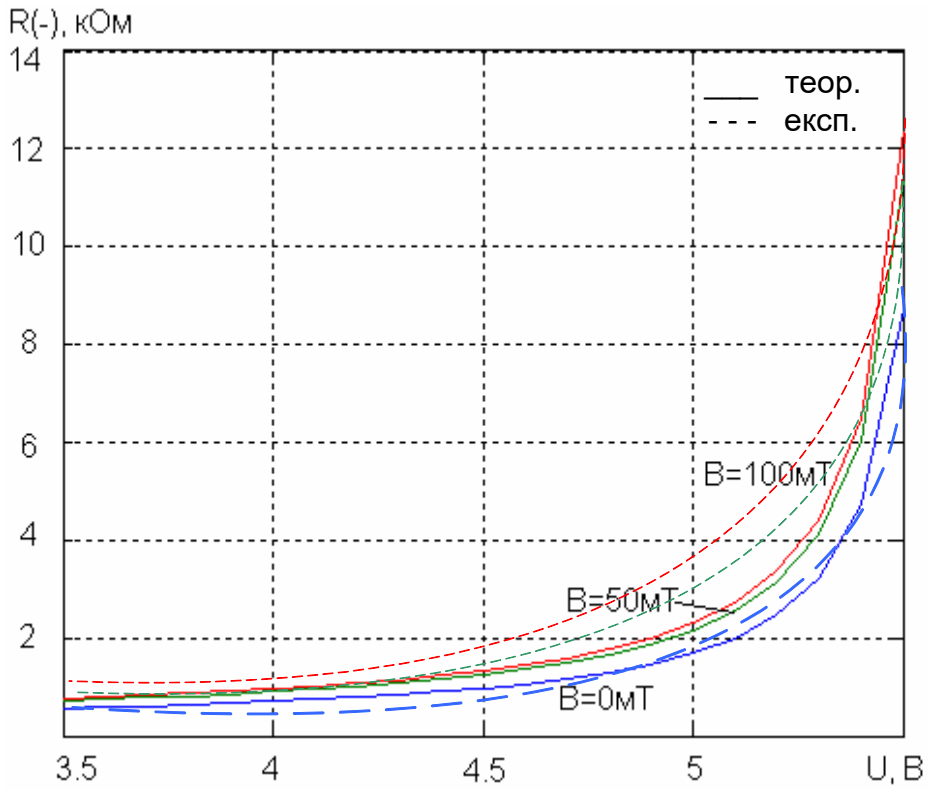
Теоретичні і експериментальні залежності спадаючої ділянки ВАХ радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом


I, мА
5
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
3.5
4
4.5
5
U, В
теор.
експ.
B=50мТ
B=0мТ
B=100мТ

Додаток П
(обов’язковий)

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ СЕНСОР ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

Теоретичні і експериментальні залежності активного опору радіовимірювального сенсора індукції магнітного поля з частотним виходом від напруги живлення


R(-), кОм
14
12
10
8
6
4
2
3.5
4
4.5
5
U, В
теор.
експ.
B=100мТ
B=50мТ
B=0мТ

Додаток Р
(довідниковий)
Програма моделювання радіовимірювальних сенсорів індукції магнітного поля з частотним виходом в середовищі Matlab 9.1.

```
clear all
%
% Розрахунок повного опору структури
 на основі транзисторних структур з від'ємним
опором
%
% константи
i=sqrt(–1);
R1=1000;
Rz1=2e6;
Rzpar1=0.2;
Lz1=0.9e–9;
Rci1=700e3;
Czc1=0.3e–9;
Rc1=2;
Rcpar1=0.2;
Lc1=0.12e–9;
Cpc1=0.5e–12;
C1=0.085e–12;
RS1=10;
C2=0.017e–12;
RS2=10;
Czi1=0.3e–9;
Rp1=100e3;
Cpi1=0.5e–12;
Ri1=2;
Ripar1=0.2;
Li1=0.12e–9;
%
Ri2=Ri1;
Ripar2=Ripar1;
Li2=Li1;
Rp2=Rp1;
Cpi2=Cpi1;
RS3=RS1;
C3=C1;
Czi2=Czi1;
RS4=RS2;
C4=C2;
Rci2=Rci1;
Cpc2=Cpc1;
Czc2=Czc1;
Rz2=Rz1;
Rzpar2=Rzpar1;
Lz2=Lz1;
a(9,9)=Z17+Z20+Z22;
a(9,10)=–Z17;
a(9,11)=–Z22;
a(9,12)=0;
a(9,13)=0;
a(9,14)=0;
a(9,15)=0;
a(9,16)=0;
a(9,17)=0;
a(9,18)=0;
a(9,19)=0;
a(9,20)=0;
a(9,21)=0;
a(9,22)=0;
a(10,1)=–(Z12+Z13);
a(10,2)=0;
a(10,3)=–Z5;
a(10,4)=0;
a(10,5)=Z11;
a(10,6)=0;
a(10,7)=0;
a(10,8)=0;
a(10,9)=–Z17;
a(10,10)=Z4+Z5+Z11+Z12+Z13+Z17+Z23
;
a(10,11)=–Z23;
a(10,12)=0;
a(10,13)=0;
a(10,14)=0;
a(10,15)=0;
a(10,16)=0;
a(10,17)=0;
a(10,18)=0;
a(10,19)=0;
a(10,20)=0;
a(10,21)=0;
a(10,22)=0;
a(11,1)=–Z24;
a(11,2)=0;
a(11,3)=0;
a(11,4)=0;
a(11,5)=0;
a(11,6)=0;
a(11,7)=0;
a(11,8)=0;
```

```
        %
        Rcc=Ri1;
        C5=C2;
        RS5=RS2;
        Cpc3=Cpc1;
        Rc3=Rc1;
        Rcpar3=Rcpar1;
        Lc3=Lc1;
        Rci3=Rci1;
        Cti=30e–12;
        Ctc=5e–12;
        %
        Rz4=Rz1;
        Rzpar4=Rzpar1;
        Lz4=Lz1;
        Czi4=Czi1;
        Ri4=Ri1;
        Rci4=Rci1;
        Czc4=Czc1;
        Cpi4=Cpi1;
        C6=C2;
        C7=C1;
        RS6=RS2;
        RS7=RS1;
        Cpc4=Cpc1;
        C8=2.3e–9;
        Rp4=Rp1;
        R2=25000;
        Rc4=Rc1;
        Rcpar4=Rcpar1;
        Lc4=Lc1;
        C9=.95e–10;
        f=100000;
        w=2pif;
        L=125e–6
        %
        Z1=R1+Rz1+Rzpar1+iwLz1;
        Z2=Rci1;
        Z3=1(iwCzc1);
        Z4=Rc1+Rcpar1+iwLc1;
        Z5=1(iwCpc1);
        Z6=1(iwC1);
        Z7=RS1;
        Z8=1(iwC2);
        Z9=RS2;
        Z10=1(iwCzi1);
        Z11=Rp1(1+w^2Rp1^2Cpi1^2)–
i(Rp1^2wCpi1)(1+w^2Rp1^2Cpi1^2);
        Z12=Ri1+Ripar1+iwLi1;
        Z13=Ri2+Ripar2+iwLi2;
        Z14=Rp2(1+w^2Rp2^2Cpi2^2)–
i(Rp2^2wCpi2)(1+w^2Rp2^2Cpi2^2);
        a(11,9)=–Z22;
        a(11,10)=–Z23;
        a(11,11)=Zc9+Z44+Z42+Z23+Z22+Z24+Z
29+Zsum;
        a(11,12)=0;
        a(11,13)=–Z29;
        a(11,14)=Zsum;
        a(11,15)=0;
        a(11,16)=Z42;
        a(11,17)=0;
        a(11,18)=0;
        a(11,19)=0;
        a(11,20)=0;
        a(11,21)=–Z44;
        a(11,22)=Zc9;
        a(12,1)=–(Z25+Z26);
        a(12,2)=0;
        a(12,3)=0;
        a(12,4)=0;
        a(12,5)=0;
        a(12,6)=0;
        a(12,7)=0;
        a(12,8)=0;
        a(12,9)=0;
        a(12,10)=0;
        a(12,11)=0;
        a(12,12)=Z25+Z26;
        a(12,13)=0;
        a(12,14)=0;
        a(12,15)=0;
        a(12,16)=0;
        a(12,17)=0;
        a(12,18)=0;
        a(12,19)=0;
        a(12,20)=0;
        a(12,21)=0;
        a(12,22)=0;
        a(13,1)=–Z28;
        a(13,2)=0;
        a(13,3)=0;
        a(13,4)=0;
        a(13,5)=0;
        a(13,6)=0;
        a(13,7)=0;
        a(13,8)=0;
        a(13,9)=0;
        a(13,10)=0;
        a(13,11)=–Z29;
        a(13,12)=0;
        a(13,13)=Z29+Z28+Z30;
        a(13,14)=Z30;
        a(13,15)=0;
```

```
Z15=RS3;
Z16=1(iwC3);
Z17=1(iwCzi2);
Z18=RS4;
Z19=1(iwC4);
Z20=Rci2;
Z21=1(iwCpc2);
Z22=1(iwCzc2);
Z23=Rz2+Rzpar2+iwLz2;
Z24=Rcc;
Z25=1(iwC5);
Z26=RS5–i(wCpc3);
Z27=Rc3+Rcpar3+iwLc3;
Z28=Rci3;
Z29=1(iwCti);
Z30=1(iwCtc);
Z31=Rz4+Rzpar4+iwLz4;
Z32=Ri4;
Z33=1(iwCzi4);
Z34=Rci4;
Z35=1(iwCzc4);
Z36=1(iwCpi4);
Z37=1(iwC6);
Z38=1(iwC7);
Z39=RS6;
Z40=RS7;
Z41=1(iwCpc4);
Z42=1(iwC8);
Z43=Rp4;
Z44=R2;
Z45=Rc4+Rcpar4+iwLc4;
Zc9=1(iwC9);
%
vto=–.05;
vto1=.5;
vto2=.5;
beta=5e–9;
beta1=5e–12;
beta2=5e–12;
lam=1.65;
%
u1=2.5;
u2=3.5;
du=0.1;
j=1;
n=.95;
uz2=1.25;
Cw=[0.002346e–9  0.2361e–9  0.2378e–9
0.2396e–9  0.2416e–9
    0.02438e–9  0.2464e–9 0.2493e–9  0.2528e–9
1.2570e–9  1.2624e–8
    0.2699e–9  1.2824e–9  1.3288e–9 1.38e–9];
```

```
a(13,17)=0;
a(13,18)=0;
a(13,19)=0;
a(13,20)=0;
a(13,21)=0;
a(13,22)=0;
a(14,1)=Z27;
a(14,2)=0;
a(14,3)=0;
a(14,4)=0;
a(14,5)=0;
a(14,6)=0;
a(14,7)=0;
a(14,8)=0;
a(14,9)=0;
a(14,10)=0;
a(14,11)=Zsum;
a(14,12)=0;
a(14,13)=Z30;
a(14,14)=Z30+Z27+Zsum;
a(14,15)=0;
a(14,16)=0;
a(14,17)=0;
a(14,18)=0;
a(14,19)=0;
a(14,20)=0;
a(14,21)=0;
a(14,22)=0;
a(15,1)=0;
a(15,2)=0;
a(15,3)=0;
a(15,4)=0;
a(15,5)=0;
a(15,6)=0;
a(15,7)=0;
a(15,8)=0;
a(15,9)=0;
a(15,10)=0;
a(15,11)=0;
a(15,12)=0;
a(15,13)=0;
a(15,14)=0;
a(15,15)=Z31+Z32+Z33;
a(15,16)=Z32;
a(15,17)=0;
a(15,18)=–Z33;
a(15,19)=0;
a(15,20)=0;
a(15,21)=0;
a(15,22)=0;
a(16,1)=0;
a(16,2)=0;
```

```
for uz1=u1duu2,
 uz1=uz1;
 xi=1;
  for Tw=1515,
  if uz1.5
      I2=1.75e–18(exp(uz1(0.026n))–1);
      I3=1.55e–18(exp(uz1(0.026n))–1);
      I4=I3;
      I5=I2;
      I8=I5;
      I9=I2;
      I11=I3;
     else
       I2=1.75e–19(exp((0.7)(0.026n))–1);
       I3=.55e–19(exp((0.7)(0.026n))–1);
       I4=I3;
       I5=I2;
       I8=I5;
       I9=I2;
       I11=I3;
      end
    vgs=uz1–0.2;
    if vgs–vto0
      I1=0;
      I6=0;
      I7=0;
      I10=0;
    end
    if vgs–vto.2
      I1=beta(1+lamuz1)(uz1–vto)^2;
      I6=beta1(1+lamuz1)(uz1–vto1)^2;
      I7=beta2(1+lamuz1)(uz1–vto2)^2;
      I10=beta2(1+lamuz1)(uz1–vto)^2;
    else
    I1=beta(1+lamuz1)uz1(2(uz2–vto)–uz1);
    I6=beta1(1+lamuz1)uz1(2(vgs–vto1)–uz1);
    I7=beta2(1+lamuz1)uz1(2(vgs–vto2)–uz1);
    I10=beta1(1+lamuz1)uz1(2(uz2–vto)–uz1);
   end
%
CC1(xi,j)=Cw(Tw);
Zsum=1(iwCw(Tw));
a(1,1)=Z1+Z10+Z12+Z13+Z14+Z21+Z24+Z28+Z25+
Z26+Z27;
a(1,2)=Z10;
a(1,3)=0;
a(1,4)=0;
a(1,5)=0;
a(1,6)=–Z14;
a(1,7)=0;
a(1,8)=Z21;
a(1,9)=0;
a(16,3)=0;
a(16,4)=0;
a(16,5)=0;
a(16,6)=0;
a(16,7)=0;
a(16,8)=0;
a(16,9)=0;
a(16,10)=0;
a(16,11)=Z42;
a(16,12)=0;
a(16,13)=0;
a(16,14)=0;
a(16,15)=Z32;
a(16,16)=Z32+Z36+Z43+Z42;
a(16,17)=Z36;
a(16,18)=0;
a(16,19)=0;
a(16,20)=0;
a(16,21)=Z43;
a(16,22)=0;
a(17,1)=0;
a(17,2)=0;
a(17,3)=0;
a(17,4)=0;
a(17,5)=0;
a(17,6)=0;
a(17,7)=0;
a(17,8)=0;
a(17,9)=0;
a(17,10)=0;
a(17,11)=0;
a(17,12)=0;
a(17,13)=0;
a(17,14)=0;
a(17,15)=0;
a(17,16)=Z36;
a(17,17)=Z36+Z39+Z37;
a(17,18)=0;
a(17,19)=–(Z39+Z37);
a(18,1)=0;
a(18,2)=0;
a(18,3)=0;
a(18,4)=0;
a(18,5)=0;
a(18,6)=0;
a(18,7)=0;
a(18,8)=0;
a(18,9)=0;
a(18,10)=0;
a(18,11)=0;
a(18,12)=0;
a(18,13)=0;
```

```
a(1,10)=–(Z12+Z13);
a(1,11)=–Z24;
a(1,12)=–(Z25+Z26);
a(1,13)=–Z28;
a(1,14)=Z27;
a(1,15)=0;
a(1,16)=0;
a(1,17)=0;
a(1,18)=0;
a(1,19)=0;
a(1,20)=0;
a(1,21)=0;
a(1,22)=0;
a(2,1)=Z10;
a(2,2)=Z3+Z2+Z10;
a(2,3)=0;
a(2,4)=Z2;
a(2,5)=0;
a(2,6)=0;
a(2,7)=0;
a(2,8)=0;
a(2,9)=0;
a(2,10)=0;
a(2,11)=0;
a(2,12)=0;
a(2,13)=0;
a(2,14)=0;
a(2,15)=0;
a(2,16)=0;
a(2,17)=0;
a(2,18)=0;
a(2,19)=0;
a(2,20)=0;
a(2,21)=0;
a(2,22)=0;
a(3,1)=0;
a(3,2)=0;
a(3,3)=Z5+Z6+Z7;
a(3,4)=–(Z6+Z7);
a(3,5)=0;
a(3,6)=0;
a(3,7)=0;
a(3,8)=0;
a(3,9)=0;
a(3,10)=–Z5;
a(3,11)=0;
a(3,12)=0;
a(3,13)=0;
a(3,14)=0;
a(3,15)=0;
a(3,16)=0;
a(3,17)=0;
a(18,14)=0;
a(18,15)=–Z33;
a(18,16)=0;
a(18,17)=0;
a(18,18)=Z33+Z34+Z35;
a(18,19)=–Z34;
a(18,20)=0;
a(18,21)=0;
a(18,22)=0;
a(19,1)=0;
a(19,2)=0;
a(19,3)=0;
a(19,4)=0;
a(19,5)=0;
a(19,6)=0;
a(19,7)=0;
a(19,8)=0;
a(19,9)=0;
a(19,10)=0;
a(19,11)=0;
a(19,12)=0;
a(19,13)=0;
a(19,14)=0;
a(19,15)=0;
a(19,16)=0;
a(19,17)=–(Z37+Z39);
a(19,18)=–Z34;
a(19,19)=Z34+Z37+Z39+Z40+Z38;
a(19,20)=–(Z40+Z38);
a(19,21)=0;
a(19,22)=0;
a(20,1)=0;
a(20,2)=0;
a(20,3)=0;
a(22,4)=0;
a(20,5)=0;
a(20,6)=0;
a(20,7)=0;
a(20,8)=0;
a(20,9)=0;
a(20,10)=0;
a(20,11)=0;
a(20,12)=0;
a(20,13)=0;
a(20,14)=0;
a(20,15)=0;
a(20,16)=0;
a(20,17)=0;
a(20,18)=0;
a(20,19)=–(Z38+Z40);
a(20,20)=Z38+Z40+Z41;
a(20,21)=–Z41;
```

```
a(3,18)=0;
a(3,19)=0;
a(3,20)=0;
a(3,21)=0;
a(3,22)=0;
a(4,1)=0;
a(4,2)=Z2;
a(4,3)=–(Z6+Z7);
a(4,4)=Z2+Z6+Z7+Z9+Z8;
a(4,5)=Z9+Z8;
a(4,6)=0;
a(4,7)=0;
a(4,8)=0;
a(4,9)=0;
a(4,10)=0;
a(4,11)=0;
a(4,12)=0;
a(4,13)=0;
a(4,14)=0;
a(4,15)=0;
a(4,16)=0;
a(4,17)=0;
a(4,18)=0;
a(4,19)=0;
a(4,20)=0;
a(4,21)=0;
a(4,22)=0;
a(5,1)=0;
a(5,2)=0;
a(5,3)=0;
a(5,4)=Z8+Z9;
a(5,5)=Z8+Z9+Z11;
a(5,6)=0;
a(5,7)=0;
a(5,8)=0;
a(5,9)=0;
a(5,10)=Z11;
a(5,11)=0;
a(5,12)=0;
a(5,13)=0;
a(5,14)=0;
a(5,15)=0;
a(5,16)=0;
a(5,17)=0;
a(5,18)=0;
a(5,19)=0;
a(5,20)=0;
a(5,21)=0;
a(5,22)=0;
a(6,1)=–Z14;
a(6,2)=0;
a(6,3)=0;
a(20,22)=0;
a(21,1)=0;
a(21,2)=0;
a(21,3)=0;
a(21,4)=0;
a(21,5)=0;
a(21,6)=0;
a(21,7)=0;
a(21,8)=0;
a(21,9)=0;
a(21,10)=0;
a(21,11)=–Z44;
a(21,12)=0;
a(21,13)=0;
a(21,14)=0;
a(21,15)=0;
a(21,16)=Z43;
a(21,17)=0;
a(21,18)=0;
a(21,19)=0;
a(21,20)=–Z41;
a(21,21)=Z45+Z41+Z43+Z44;
a(21,22)=0;
a(22,1)=0;
a(22,2)=0;
a(22,3)=0;
a(22,4)=Z2;
a(22,5)=0;
a(22,6)=0;
a(22,7)=0;
a(22,8)=0;
a(22,9)=0;
a(22,10)=0;
a(22,11)=Zc9;
a(22,12)=0;
a(22,13)=0;
a(22,14)=0;
a(22,15)=0;
a(22,16)=0;
a(22,17)=0;
a(22,18)=0;
a(22,19)=0;
a(22,20)=0;
a(22,21)=0;
a(22,22)=Zc9;
%
b(1,1)=–uz2–
(Z1+Z10+Z12+Z13+Z14+Z21+
Z24+Z28+Z25+Z26+Z27)(I7+I8)–Z28I7–
Z25I8;
b(2,1)=(Z3+Z2+Z10)I1+Z2I1;
b(3,1)=–(Z5+Z6+Z7)I2–Z6I2;
```

```
a(6,4)=0;
a(6,5)=0;
a(6,6)=Z14+Z15+Z16;
a(6,7)=Z15+Z16;
a(6,8)=0;
a(6,9)=0;
a(6,10)=0;
a(6,11)=0;
a(6,12)=0;
a(6,13)=0;
a(6,14)=0;
a(6,15)=0;
a(6,16)=0;
a(6,17)=0;
a(6,18)=0;
a(6,19)=0;
a(6,20)=0;
a(6,21)=0;
a(6,22)=0;
a(7,1)=0;
a(7,2)=0;
a(7,3)=0;
a(7,4)=0;
a(7,5)=0;
a(7,6)=Z15+Z16;
a(7,7)=Z15+Z16+Z20+Z19+Z18;
a(7,8)=–(Z19+Z18);
a(7,9)=Z20;
a(7,10)=0; a(7,11)=0;
a(7,12)=0; a(7,13)=0;
a(7,14)=0; a(7,15)=0;
a(7,16)=0; a(7,17)=0;
a(7,18)=0; a(7,19)=0;
a(7,20)=0; a(7,21)=0;
a(7,22)=0;
a(8,1)=Z21;
a(8,2)=0; a(8,3)=0;
a(8,4)=0; a(8,5)=0;
a(8,6)=0;
a(8,7)=–(Z18+Z19);
a(8,8)=Z18+Z19+Z21;
a(8,9)=0;
a(8,10)=0;
a(8,11)=0;
a(8,12)=0;
a(8,13)=0;
a(8,14)=0;
a(8,15)=0;
a(8,16)=0;
a(8,17)=0;
a(8,18)=0;
a(8,19)=0;
```

```
b(4,1)=–(Z2+Z6+Z7+Z9+Z8)(I3–I1–
I2)+Z2I1+Z6I2–Z8I3;
b(5,1)=–(Z8+Z9+Z11)I3–Z8I3;
b(6,1)=–(Z14+Z15+Z16)I4–Z16I4;
b(7,1)=–(Z16+Z15+Z18+Z19+Z20)(–
I6+I4–I5)–Z16I4+Z19I5+Z20I6;
b(8,1)=–(Z18+Z19+Z21)I5–Z19I5;
b(9,1)=(Z17+Z20+Z22)I6+Z20I6;
b(10,1)=0;
b(11,1)=0;
b(12,1)=(Z25+Z26)I8+Z25I8;
b(13,1)=(Z29+Z28+Z30)I7+Z28I7;
b(14,1)=0;
b(15,1)=0;
b(16,1)=0;
b(17,1)=(Z36+Z39+Z37)I9+Z37I9;
b(18,1)=–(Z33+Z34+Z35)I10–Z34I10;
b(19,1)=–(Z34+Z37+Z39+Z40+Z38)(I9–
I10–I11)+Z34I10–Z37I9+Z38I11;
b(20,1)=–(Z38+Z40+Z41)I11–Z38I11;
b(21,1)=0;
b(22,1)=–uz1;
%
    I=ab;
    Z=uz1I(22);
    II(xi,j)=I(22);
    MR(xi,j)=real(Z);
    MX(xi,j)=imag(Z);
    MC(xi,j)=1(wimag(Z));
    MF(xi,j)=1(2pisqrt(1(wimag(Z))L));
      xi=xi+1;
  end
    j=j+1;
end
clc
uz1=u1duu2;
figure (1)
plot(uz1, II)
%axis([0 6 0 0.02])
grid on
%zoom on
figure (2)
plot(uz1, MR)
%axis([1.8 3.6 0 10000])
grid on
%zoom on
figure (3)
plot(uz1, MX)
%axis([1.8 3.8 –1.2e4 0])
grid on
figure (4)
plot(uz1, MC)
```

```
a(8,20)=0;
a(8,21)=0;
a(8,22)=0;
a(9,1)=0;
a(9,2)=0;
a(9,3)=0;
a(9,4)=0;
a(9,5)=0;
a(9,6)=0;
a(9,7)=Z20;
a(9,8)=0;
```

```
grid on
figure (5)
plot(uz1, MF)
grid on
zoom on
end
```