

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))
Кафедра радіотехніки
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:
РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ
ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-20м
спеціальність 172 – Телекомунікації та
радіотехніка освітня програма: Радіотехніка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Овчарук А.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор каф. РТ

Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2021 р.

Опонент: к.т.н., професор каф. ТКСТБ

Барась С.Т.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2021 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри РТ

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2021 р.

Вінницький національний технічний університет

Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем

Кафедра Радіотехніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань – 17 Електроніка та телекомунікації

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма – Радіотехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри РТ

д.т.н., професор О.В. Осадчук

“___” _____ 2021 року

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

Овчаруку Артему Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Радіовимірювальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора»

керівник роботи Осадчук Олександр Володимирович, д.т.н., професор, зав. каф. РТ

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “24” 09 2021 року № 277

2. Строк подання студентом роботи 20 грудня 2021 року.

3. Вихідні дані до роботи: Абсолютна чутливість активної складової повного опору знаходиться в діапазоні від 0,1 Ом/мТл до 0,25 Ом/мТл а реактивної до 10 Ом/мТл. Чутливість активної складової повного опору двоколекторного магнітотранзистора досягає 10 Ом/мТл реактивної – 6 Ом/мТл. Чутливість вимірювання магнітної індукції в діапазоні від –75 мТл до +75 мТл. Чутливість радіовимірювальних пристроїв на основі двоколекторних магнітотранзисторів до зміни кутового положення знаходиться в межах від 500 Гц⁰ до 1000 Гц⁰ в діапазоні кутів від 0⁰ до 360⁰.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити: Вступ. Сучасний стан розвитку пристроїв вимірювального контролю кутових положень. Метод вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливого транзистора. Розроблення радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора. Розроблення радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів. Економічна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Перелік посилань. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Магніторезистивний пристрій вимірювання магнітного поля; функціональна схема сенсора кута повороту серії AS5000; структурна схема методу вимірювального контролю кутових положень; принципова електрична схема радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора; схема електрична принципова радіовимірювального приладу контролю кутових положень; схема функціональних перетворень пристрою вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	д.т.н., професор Осадчук О.В.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Професор кафедри БЖДПБ, доцент, д.п.н., Дембіцька С.В.		
Економічна частина	доцент. каф. ЕПВМ к.е.н., Кавецький В.В.		

7. Дата видачі завдання _____ 2021 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел. Вибір, узгодження та затвердження теми МКР	03.09.2021-14.09.2021	
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	15.09.2021-21.09.2021	
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	22.09.2021-25.09.2021	
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	26.09. 2021-09.10. 2021	
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	10.10.2021-03.11. 2021	
6.	Розділ моделювання	04.11. 2021-12.11. 2021	
7.	Розробка графічної частини МКР	13.11. 2021-18.11. 2021	
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	19.11. 2021-24.11. 2021	
9.	Охорона праці (ОП)	25.11. 2021-30.11. 2021	
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	01.12. 2021-08.12. 2021	
11.	Нормоконтроль	09.12. 2021-12.12. 2021	
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	13.12. 2021-19.12. 2021	
13.	Захист МКР ЕК	20.12. 2021-23.12. 2021	

Студент

(підпис)

Овчарук А.О.

Керівник роботи

(підпис)

Осадчук О.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.38

Овчарук А.О. Радіовимірювальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора. Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2021. – 170с. На українській мові. Бібліогр.: 99 назв; Рисунок 87.

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено аналіз літературних джерел, показано, що існує велика кількість приладів вимірювального контролю кутових положень, які відрізняються як за фізичними принципами, так і за технічними характеристиками. Радіовимірювальні перетворювачі з частотним виходом дозволяють підвищити чутливість і зменшити похибки вимірювання фізичних величин, оскільки поєднують простоту і універсальність аналогових перетворювачів з точністю і завадостійкістю перетворювачів з кодовим виходом.

Розглянуто метод вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів, який відрізняється від існуючих безконтактним перетворенням кутового положення в частотний сигнал за допомогою радіовимірювальних перетворювачів з частотним виходом, у яких магніточутливі транзистори виконують роль чутливих перетворювачів та активних елементів. Теоретично встановлено і підтверджено залежність реактивних властивостей двоколекторних магнітотранзисторів від індукції магнітного поля, що дозволило використати їх для побудови автогенераторних пристроїв. Чутливість активної складової повного опору двоколекторного магнітотранзистора досягає $6,86 \text{ Ом/мТл}$, а реактивної – $5,67 \text{ Ом/мТл}$.

Розроблено структурну схему та програмне забезпечення радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливого транзистора. Проведено експериментальні дослідження радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень, які підтвердили справедливість розроблених математичних моделей приладу.

Розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера, яке реалізує алгоритм роботи радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливого транзистора.

Також у магістерській кваліфікаційній роботі проведено розрахунки економічної частини та розділу охорони праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: радіовимірювальний перетворювач, кутова величина, магніточутливість, двоколекторний магнітотранзистор, від'ємний опір, мікроконтролер.

ABSTRACT

Ovcharuk A.O. Radio measuring device for determining angular positions based on a magnetically sensitive transistor. Master's qualification work. - Vinnytsia: VNTU, 2021. - 170p. In Ukrainian language. Bibliogr. : 99 titles; Figure 87.

In the master's qualification work the analysis of literature sources is carried out, it is shown that there is a large number of devices of measuring control of angular positions which differ both on physical principles, and on technical characteristics. Radio transducers with frequency output allow to increase the sensitivity and reduce the errors of measurement of physical quantities, as they combine the simplicity and versatility of analog transducers with the accuracy and noise immunity of transducers with a code transducer.

The method of measuring control of angular positions on the basis of magnetically sensitive transistors is considered, which differs from the existing ones by contactless conversion of angular position into frequency signal by means of radio measuring transducers with frequency output, in which magnetically sensitive perform the role of sensitive transducers and active elements.

The dependence of the reactive properties of two-collector magnetotransistors on the induction of the magnetic field was theoretically established and confirmed, which allowed us to use them for the construction of autogenerator devices. The sensitivity of the active component of the impedance of a two-collector magnetotransistor reaches 6.86 Ohm / mT, and the reactive - 5.67 Ohm / mT.

The block diagram and software of the radio measuring device of measuring control of angular positions on the basis of the magnetically sensitive transistor are developed. Experimental researches of the radio measuring device of measuring control of angular positions which confirmed validity of the developed mathematical models of the device are carried out.

Software for a microcontroller has been developed, which implements the algorithm of operation of a radio measuring device for measuring control of angular positions on the basis of a magnetically sensitive transistor.

Also in the master's qualification work, calculations were made of the economic part and the section of labor protection and safety in emergency situations.

Keywords: radio transducer, angular magnitude, magnetic sensitivity, two-collector magnetotransistor, negative resistance, microcontroller.

ЗМІСТ

ВСТУП	81
1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ПРИСТРОЇВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ КУТОВИХ ПОЛОЖЕНЬ	12
1.1 Особливості об'єкта вимірювального контролю	12
1.2 Загальна характеристика пристроїв та методів вимірювального контролю кутових положень.....	17
1.3 Магніточутливі пристроїв для вимірювального контролю кутових положень.....	25
1.4 Висновки до розділу.....	31
2 МЕТОД ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ КУТОВИХ ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА	33
2.1 Теоретичні основи гальваномагнітних методів вимірювального контролю кута повороту.....	33
2.2 Метод вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів.....	40
2.3 Висновки до розділу.....	46
3 РОЗРОБЛЕННЯ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА КУТОВИХ ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА	47
3.1 Магнітореактивний ефект у двоколекторних магніточутливих транзисторах.....	47
3.2 Математична модель радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора.....	52
3.3 Чутливість радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора.....	63
3.4 Висновки до розділу.....	65
4 РОЗРОБЛЕННЯ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИЛАДУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ КУТОВИХ ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВИХ ТРАНЗИСТОРІВ	66
4.1 Розроблення структурної схеми радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень.....	66
4.2 Схемотехнічна та програмна реалізація засобів вимірювального контролю кутових положень.....	71
4.3 Оцінювання метрологічних характеристик пристрою вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів.....	81
4.4 Вибір параметрів при інженерному проектуванні радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів.....	86
4.5 Алгоритм вимірювального контролю кутових положень.....	89
4.6 Висновки до розділу.....	91
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	92
5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту	

науково-технічної розробки.....	93
5.2 Оцінювання рівня новизни розробки.....	96
5.3 Визначення рівня конкурентоспроможності розробки.....	100
5.4 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи.....	103
5.5 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором.....	116
5.6 Висновки до розділу.....	120
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	122
6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	122
6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	125
ВИСНОВКИ	136
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	138
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання.....	148
Додаток Б (обов'язковий) Магніторезистивний пристрій вимірювання магнітного поля	153
Додаток В (обов'язковий) Функціональна схема сенсора кута повороту серії AS5000	155
Додаток Д (обов'язковий) Структурне зображення магнітодіодів: <i>a</i> – з областю високої швидкості рекомбінації, <i>b</i> – торцева структура, <i>в</i> – планарна структура, <i>г</i> – із контактом у формі рівнобедреного трикутника.....	157
Додаток Е (обов'язковий) Структурна схема методу вимірювального контролю кутових положень.....	159
Додаток Ж (обов'язковий) Електрична схема радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора.....	161
Додаток К (обов'язковий) Блок-схема радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень з використанням розроблених автогенераторних пристроїв на основі двоколекторних магніточутливих транзисторів	163
Додаток Л (обов'язковий) Блок-схема радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень на основі двоколекторних магніточутливих транзисторів	165
Додаток М (обов'язковий) Принципова електрична схема радіовимірювального приладу контролю кутових положень	167
Додаток Н (обов'язковий) Схема функціональних перетворень пристрою вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів.....	169
Додаток О (довідниковий) Алгоритм проектування пристрою вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів.....	171

ВСТУП

Актуальність теми

Кутові положення підлягають вимірювальному контролю в багатьох галузях промисловості: в металообробці, ліфтовій техніці, фасувальних, пакувальних і розливних автоматах, в друкарській промисловості, випробувальних стендах, а також у роботах та інших машинах, що потребують точного визначення показників руху обертових частин. Пристрої вимірювання та вимірювального контролю кутових положень використовуються для забезпечення зворотного зв'язку між поворотними та статичними елементами сучасних систем точного переміщення, зокрема, в опорно-поворотних пристроях. Для таких засобів важливими є не лише висока роздільна здатність і точність, а й повторюваність позиціонування, низька інерційність, надійність та зручність монтажу.

На сьогодні більшість поворотних механізмів містять недорогі та прості за своєю конструкцією потенціометричні перетворювачі, які не забезпечують високу точність вимірювань кутових положень. З іншого боку, серед промислових засобів вимірювального контролю кутів найвищу точність мають фотоелектричні енкодери. Але їх основним недоліком є наявність механічного контакту сенсора й об'єкта, що обертається. Жорсткість з'єднання між контрольованим елементом (валом) та валом сенсора, а також власна частота коливання з'єднання обмежують смугу пропускання приладу, тобто і його швидкодію, і надійність керування 1.

Протягом останніх років інтерес користувачів від контактних вимірювачів змістився в бік безконтактних (зокрема, магнітних), оскільки їх швидкодія, термін служби і максимальна кількість циклів переміщення є набагато вищими. Інтенсивний розвиток техніки магнітних вимірювань пояснюється її перевагами, до яких належить безконтактне перетворення малих значень фізичних величин в електричні сигнали, можливість безконтактної комутації та повної електричної розв'язки вхідних і вихідних кіл апаратури, стійкість роботи приладів у газоподібних, рідких, агресивних, токсичних, а також забруднених і в'язких середовищах. Крім того, чутливі елементи можуть

бути встановлені таким чином, щоб сторонні магнітні поля входили до просторової складової магнітного поля, яка не вимірюється (для елементів Холла, наприклад, це паралельна складова) 2.

На ринку інформаційно вимірювальної техніки представлені пристрої вимірювального контролю кутових положень різних типів та конструкцій, проте важливу роль у цій галузі відіграють гальваномагнітні перетворювачі, тому що вони мають невеликі габарити, низьку ціну, споживають малу потужність та прості в експлуатації 3.

Перспективним напрямком в області вимірювального контролю кутових положень є використання фізичних явищ, що виникають у напівпровідниках при одночасній дії електричних і магнітних полів, для побудови засобів на основі багатоколекторних та багатостокових транзисторів. Протягом останніх десятиліть вітчизняними й зарубіжними науковцями представлені різні види реалізації магніточутливих транзисторів, проведені їх експериментальні дослідження, описані основні принципи роботи таких приладів 16–20. Однак математичні моделі біполярних магнітотранзисторів розроблені недостатньо, що значно ускладнює процес проектування та пошук методів підвищення точності засобів вимірювального контролю на їх основі. Крім того, аналіз ряду наукових робіт 8–14, 21–24 показує, що використання транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором та реактивних властивостей напівпровідникових приладів дозволяє підвищити чутливість перетворення і зменшити похибки вимірювання фізичних величин. При цьому з'являється можливість відмовитись від введення до складу систем вимірювального контролю аналогово-цифрових перетворювачів та підсилювальної апаратури. Проте постає проблема відсутності ґрунтовних досліджень реактивних властивостей багатоколекторних і багатостокових магніточутливих транзисторів.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є підвищення чутливості та точності вимірювання кутових положень за рахунок методу безконтактного перетворення кутового положення в частотний сигнал за допомогою радіовимірювального

перетворювача, у якому магніточутливий транзистор виконує роль чутливого і активного елемента.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання кутових положень.

Предметом дослідження є радіовимірювальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора.

Поставлена мета в магістерській кваліфікаційній роботі можлива за рахунок розв'язання наступних *задач*:

1. Провести аналіз методів і пристроїв визначення кутових положень та обґрунтувати переваги пристроїв на основі магніточутливих транзисторів.

2. Розглянути метод визначення кутових положень, який базується на безконтактному перетворенні кутового положення в частотний сигнал за допомогою радіовимірювального пристрою.

3. Розробити радіовимірювальний пристрій на основі магніточутливого транзистора, який би забезпечував перетворення індукції магнітного поля, у частотний сигнал з високою точністю та чутливістю визначення кутових положень.

Методи дослідження базуються на використанні рівнянь математичної фізики; основних положень теорії функції комплексної змінної для визначення функцій перетворення та рівнянь чутливості; теорії розрахунку нелінійних електричних кіл з використанням методу вузлових потенціалів для визначення повного опору; теорії вимірювань для оцінювання метрологічних характеристик запропонованого пристрою визначення кутових положень.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Розглянуто метод вимірювання кутових положень на основі магніточутливих транзисторів, який полягає в безконтактному перетворенні кутового положення в частотний сигнал за допомогою радіовимірювальних пристроїв, в яких магніточутливі транзистори виконують роль чутливих перетворювачів та активних елементів.

2. Розглянуто математичну модель радіовимірювального пристрою визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора, в якій

пов'язано частоту вихідного сигналу радіовимірювального перетворювача з кутовим положенням об'єкта.

Практичне значення одержаних результатів

1. Розроблено пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора, що дозволив підвищити чутливість та точність визначення кутових положень.

2. Розроблено математичну модель магніточутливого транзистора, яка може бути використана для інженерного розрахунку повного опору, функції перетворення, чутливості радіовимірювальних магніточутливих пристроїв.

3. Розроблено радіовимірювальний пристрій, який дозволив підвищити чутливість і зменшити похибку вимірювання кутового положення. Чутливість радіовимірювального пристрою на основі двостокового транзистора до зміни кутового положення знаходиться в межах від $559 \text{ Гц}/^\circ$ до $1174 \text{ Гц}/^\circ$ в діапазоні вимірюваних кутів від 0^0 до 360^0 .

Особистий внесок здобувача

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

1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ПРИСТРОЇВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ КУТОВИХ ПОЛОЖЕНЬ

На сьогодні для позиційного кутового вимірювального контролю широко використовуються прилади (перетворювачі кута повороту, кутові енкодери) на основі елементів Холла, фотоелектричні енкодери, трансформаторні перетворювачі, індуктивні пристрої тощо [1– 15], [16-45], 46. Основними вимогами до засобів вимірювального контролю кута повороту є висока чутливість, роздільна здатність та точність вимірювань, великий робочий кут, можливість регулювання рівня вихідного сигналу тощо [1, [15]. Аналіз стану розвитку методів і засобів вимірювального контролю кутових положень передбачає розгляд основних параметрів, метрологічних характеристик різних типів приладів, співставлення їх переваг та недоліків, враховуючи при цьому особливості об'єкта вимірювального контролю.

1.1 Особливості об'єкта вимірювального контролю

Опорно-поворотні пристрої входять до складу багатьох технічних систем та засобів (радіолокаційних станцій (РЛС), екскаваторів, підйомних кранів, зварювальних позиціонерів, вітрогенераторів, систем водопідготовки, лісових машин, медичного обладнання, гірського обладнання, позиціонерів антен, сонячних батарей, дзеркал сонячних теплових електростанцій, локаторів відслідковування тощо). Опорно-поворотні пристрої РЛС здійснюють підвіску антенної системи та наведення її променя на об'єкт (для вимірювання кутових координат), тобто забезпечують зміну азимутального кута та кута елевації. Поворотний пристрій розташовують безпосередньо в антенній системі. Якщо в РЛС вимірюваним параметром є кут α_1 (рис. 1.1), важливим є значення похибки $\Delta\alpha_1$ [47]. Оскільки $\alpha_1 = \arctg(x/y)$, то похибка вимірювання положення об'єкта

$$\Delta l_1 = \frac{\Delta \alpha_1}{1/\sqrt{x^2 + y^2}} = D \Delta \alpha_1, \quad (1.1)$$

де D – відстань до об'єкта.

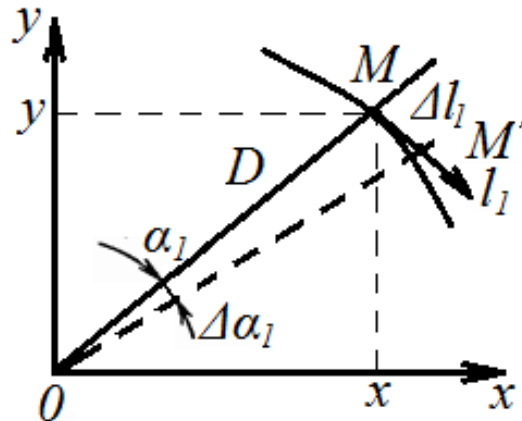


Рисунок 1.1 – Зв'язок похибки вимірювання положення об'єкта (Δl_1) і похибки вимірювання кута ($\Delta \alpha_1$)

Відповідно, середньоквадратичне відхилення $\sigma_{l_1} = D \sigma_{\alpha_1}$. Якщо проведено калібрування для зменшення похибок через недосконалість апаратури, а також похибок, обумовлених зовнішніми завадами та умовами поширення, то σ_{α_1} зменшується до значення $\sigma_{\alpha_1 \min}$, обумовленого власними шумами каналу вимірювача кута.

Конструкція опорно-поворотного пристрою повинна забезпечувати спрямування антени з точністю не гірше однієї десятої ширини діаграми спрямованості. Точність позиціонування поворотних пристроїв залежить від точності вимірювання системою миттєвого кутового положення та від мінімального кута, на який може повернутися вихідний вал пристрою. Похибка вимірювання кутового положення опорно-поворотного пристрою визначається власною похибкою сенсорів зворотного зв'язку за кутом, а також похибкою механічної передачі, яка з'єднує вал сенсора кутового положення з конструктивними елементами опорно-поворотного пристрою [48].

На рис. 1.2 показано один із варіантів встановлення системи керування опорно-поворотним пристроєм [49]. У цій конструкції на поворотному пристрої розташовані два блоки, кожен з яких виконує контроль кута та керування приводом механізму, що змінює відповідний кут спрямування антени (кут азимута чи елевації).

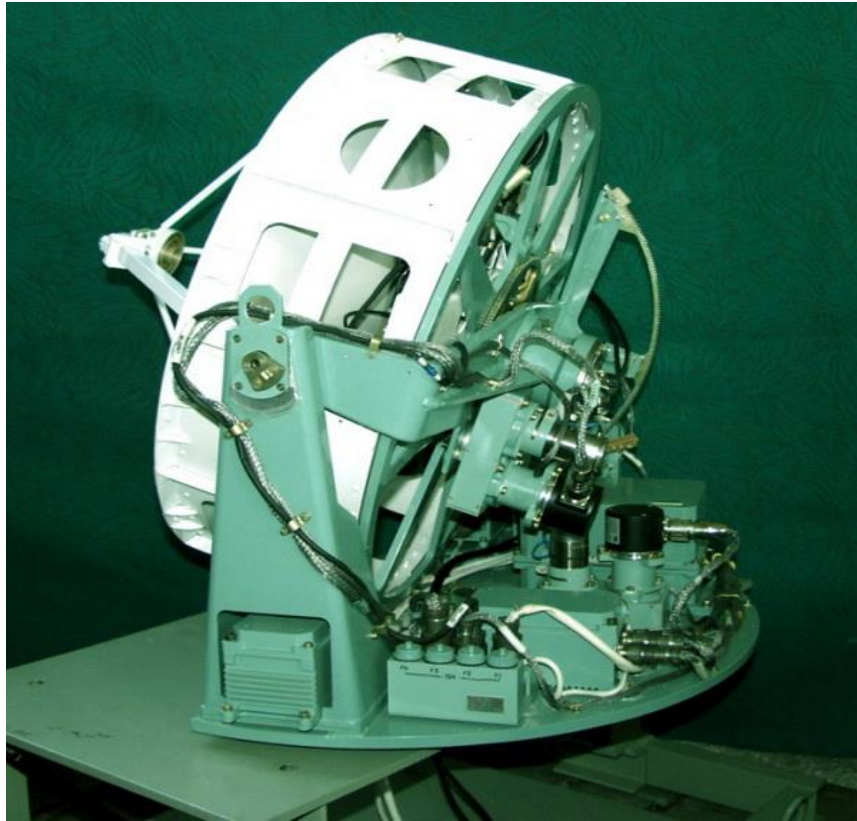


Рисунок 1.2 – Опорно-поворотний пристрій із системою керування

Для вимірювання кута повороту осі в блоці використовується магнітний кутовий енкодер AS5040 [50]. Невеликий поворотний магніт AS5000-MA6H1 розташовується безпосередньо над мікросхемою. Вал поворотного магніту блока керування з'єднаний із відповідною віссю поворотного пристрою за допомогою муфти з'єднання, а плата блока закріплена на корпусі поворотного пристрою. Потенційна точність даної системи позиціонування обмежена значенням похибки кутового енкодера (роздільна здатність – $0,35^\circ$, інтегральна нелінійність при оптимальному позиціонуванні магніту не перевищує $0,9^\circ$).

Складова похибки, пов'язана із наявністю механічної передачі, набуває великих значень, якщо конструктивно сенсор зворотного зв'язку не може бути

встановлений безпосередньо в осі наведення (через використання обертальних контактних з'єднувачів, обертальних хвилеводних переходів, прокладання джгутів електричних зв'язків до елементів системи керування). Наприклад, у пристрої [48] перетворювачі кутових положень опорно-поворотного пристрою встановлені в редукторах приводів наведення. Можливість зменшення цієї складової похибки полягає в її алгоритмічній компенсації за допомогою введення поправок.

Запропонований у [48] метод полягає у проведенні вимірювального контролю похибки вимірювання штатного сенсора кутового положення (одночасно з контролем похибки наведення опорно-поворотного пристрою за допомогою технологічного сенсора, який встановлюється безпосередньо в осі наведення опорно-поворотного пристрою, на якому зМДНтовані всі елементи керування та конструктивні елементи (крім обертальних коаксіальних з'єднувачів та хвилеводних переходів, які встановлюються останніми).

У роботі авторами [49] запропоновано проводити калібрування кутового положення опорно-поворотного пристрою за допомогою зовнішнього сенсора. Для цього вихідний вал поворотного пристрою встановлюють у деяке положення, яке вважається нульовим (0°), підключають зовнішній сенсор кута повороту (відкалібрований). Сенсор потрібно налаштувати (або встановити нуль, або зафіксувати поправку). Після МДНтажу зовнішнього сенсора виконують серію вимірювань кута повороту за мінімальної швидкості обертання привода опорно-поворотного пристрою з одночасним збереженням даних із внутрішнього сенсора. Отримані дані дозволяють побудувати залежність похибки встановлення кутового положення від значення кута і ввести поправки до сигналу штатного сенсора.

Параметри зовнішнього пристрою вимірювального контролю кутового положення повинні задовольняти вимоги до кутового діапазону і допустимих значень похибки позиціювання опорно-поворотного пристрою. Параметри деяких опорно-поворотних пристрів наведено в табл. 1.1.

Проблемою при контролі кутових положень опорно-поворотних пристроїв є те, що наявні прецизійні пристрої вимірювального контролю потребують лабораторних умов їх використання і високих матеріальних затрат. Інші методи базуються на використанні промислових кутових вимірювачів, які не забезпечують високу вірогідність вимірювального контролю. Зокрема, на сьогодні поширеними елементами зворотного зв'язку є потенціометри 51. У сучасних роботах використовуються малогабаритні плівкові потенціометри з підвищеним ресурсом. Наприклад, лінійність потенціометрів 971RPS фірми Wabash [52] $\pm 2\%$, чутливість – від $0,873\%/^\circ$ до $0,973\%/^\circ$, температурний коефіцієнт $\pm 600\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ($\pm 0,06\%/^\circ\text{C}$), ресурс роботи 5 млн. циклів. Проте потенціометри мають низьку точність, чутливі до дії вібрації та пилу.

Фотоелектричні прилади [45] вимірювального контролю кутових положень здатні забезпечити роздільну здатність вимірювання, яка складає тисячні долі градуса. Використання муфти з'єднання знижує точність системи за недостатньо жорстокої фіксації. Щоб позбутися зазначених недоліків, слід використовувати енкодери безконтактного типу.

Точність кутових сенсорів на базі ефекту Холла обмежена через високий рівень власних шумів та температурну залежність параметрів (похибка вимірювання кутових положень з використанням стандартних елементів Холла знаходиться в межах від $0,5^\circ$ до $2,5^\circ$ [16]. Крім того, необхідні безконтактні пристрої вимірювального контролю з великим значенням робочого кута повороту (найчастіше – від 200° до 360°), що доступний у оптичних і контактних елементів.

Таблиця 1.1 – Параметри опорно-поворотних пристроїв

Модель	Кутовий діапазон, °		Швидкість обертання, °/с	Похибка позиціонування, °
	за азимутом	за елевацією		
WR-ARP-ELAZ-100	0–360	0–180	5	0,5
AEP-300	0–360	-95–95	1–20 (азимут) 1–10 (елевація)	0,2
ARP-100D-285	-180–180	–	1–40	0,1
BigRAS	0–360	0–180	3–6	0,5

Зазначені проблеми потребують, в першу чергу, більш ґрунтового аналізу наявних засобів вимірювання та вимірювального контролю кутових положень.

1.2 Загальна характеристика пристроїв та методів вимірювального контролю кутових положень

Усі відомі на сьогодні методи та пристрої вимірювального контролю кутових положень базуються на використанні кутових енкодерів – пристроїв, призначених для перетворення кута повороту обертового об'єкта (валу) в електричні сигнали, що дозволяють визначити його кутове положення. На рис. 1.3 наведена класифікація засобів вимірювального контролю кутових положень. За класифікаційні ознаки вибрано принцип зчитування кутових положень, спосіб отримання інформації, діапазон вимірюваних кутів та фізичний принцип роботи засобів вимірювального контролю кутових положень.



Рисунок 1.3 – Класифікація засобів вимірювального контролю кутових положень

Інкrementальні енкодери перетворюють механічне обертання валу в послідовний імпульсний цифровий код. Недоліком таких енкодерів є те, що вони втрачають своє положення при вимкненні живлення. Основною характеристикою абсолютних енкодерів є кількість унікальних кодів на оберт. Тому вони не потребують додаткової електроніки для підрахунку й оброблення даних і зберігають позицію при вимкненні живлення [46].

Схематичне зображення растрового приладу [53] наведено на рис. 1.4. Він містить радіальний растр 1, головку зчитування 2, налаштувальне коло 3, нанесене на спільний з растром носій, вимірювальну головку 4, блок 5

оцифрування і масштабування вихідного сигналу, блок 6 формування поточної кутової координати, блок пам'яті 7, блок 8 корекції результату вимірювання.

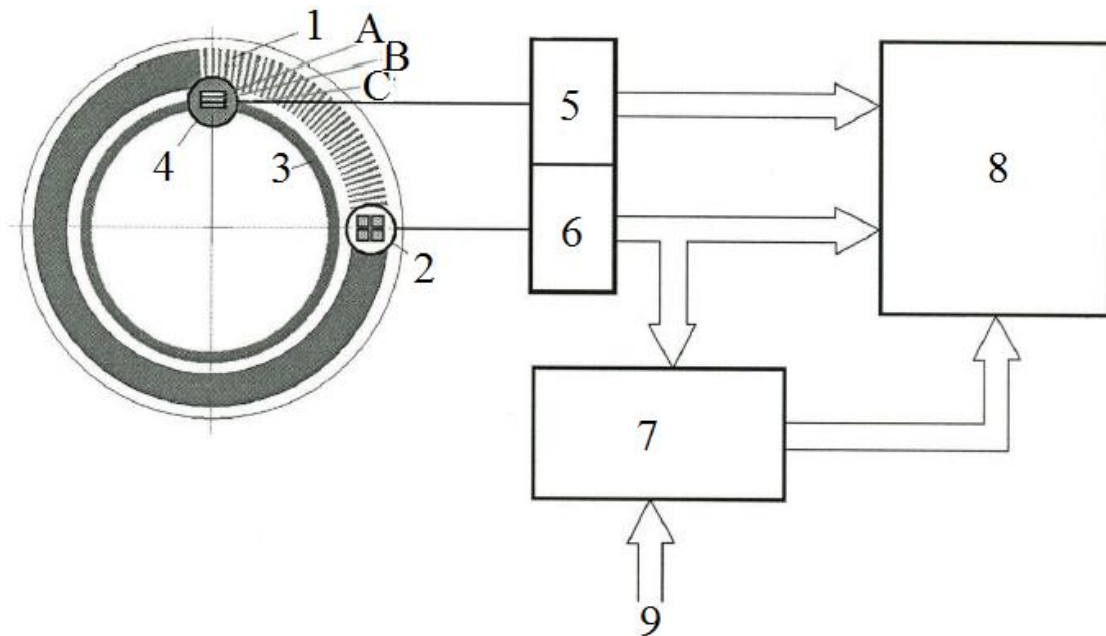


Рисунок 1.4 – Структурна схема растрового енкодера [53]

Просторову нестабільність положення растра при його обертанні, обумовлену неточністю з'єднання його з валом і биттям підшипників, вимірюють одночасно з кутом повороту за допомогою додаткової головки. Проте на точність такого приладу суттєво впливає неспіввісність установлення радіального растра на вал і точність виконання растра. Переваги та недоліки методів кутових вимірювань, а також особливості конструкції приладів, які є їх реалізацією, потребують більш детального розгляду.

1.2.1 Механічні та потенціометричні енкодери

Механічні кутові енкодери з послідовним виходом містять диск з діелектрика з нанесеними опуклими провідними ділянками. Зчитування абсолютного кута повороту диска у механічних системах виконується лінійкою перемикачів або контактів. Основним недоліком є «дрижання» контактів.

Зазвичай вал потенціометричного енкодера (рис. 1.5) здійснює один повний або неповний оберт.

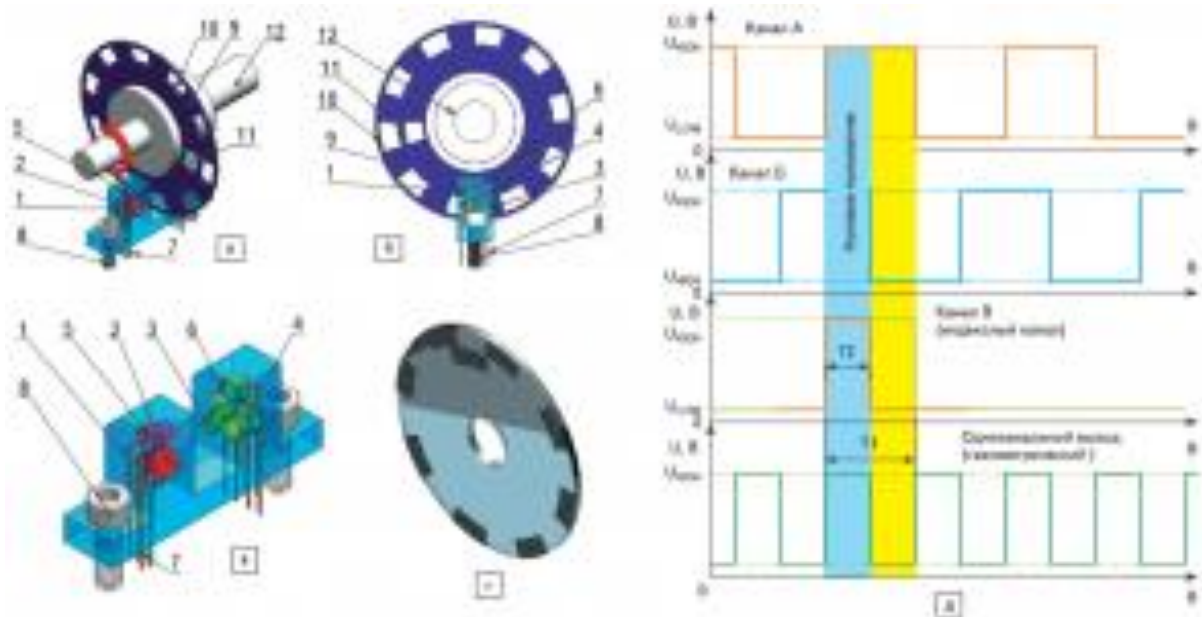


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення кутового потенціометра 52

На рис. 1.5 (товстоплівковий сенсор у діапазоні $0-360^\circ$), введені позначення: 1 – ковзний контакт, 2 – резистивна доріжка, 3 – контактна доріжка, ϕ – вимірюваний кут. Чутливість потенціометричних енкодерів складає від $0,5\% / ^\circ$ до $1,1\% / ^\circ$, нелінійність $\pm 2\%$ (від напруги живлення) 52.

Більшість потенціометрів мають такі недоліки: значна механічне навантаження, висока похибка вимірювання опору, механічний контакт з об'єктом, низька швидкодія, нестійкість до впливу навколишнього середовища. З часом резистивна пластина стирається і з'являються мертві зони, в яких або взагалі зникає контакт, або проявляється підвищена нестабільність показів.

1.2.2 Електромагнітний контроль кутових положень

Головним елементом електромагнітного сенсора положення є індуктивний чутливий елемент з рухомим магнітопроводом (сердечником). Інформативним параметром є індуктивність чутливого елемента або наведена в

його обмотках ЕРС індукції. У першому випадку електромагнітний сенсор є індуктивним, у другому – індукційним (трансформаторним).

Індуктивні перетворювачі кутових положень мають високу завадостійкість, тривалий термін служби, високий динамічний діапазон, здатні забезпечувати вимірювання в діапазоні кутів 360° , високу лінійність вихідної характеристики, температурний діапазон до $200\text{--}500^\circ\text{C}$, широкий частотний діапазон тощо. Проте структура сенсорного елемента досить складна, а для підвищення точності потрібно збільшувати кількість обмоток. На роботу таких приладів впливають електромагнітні поля, недоліком є також чутливість до вологи.

Трансформаторні прилади нечутливі до вібрації, вологості, забруднення, їх вихідна характеристика не залежить від швидкості переміщення сердечника, також перевагами є малий вихідний імпеданс, можливість використання диференційних схем. Однак такі енкодери мають великі габарити, високу вартість, нелінійність, температурну залежність, кутовий діапазон менше 120° ($\pm 60^\circ$), а вихідні сигнали потрібно випрямляти і демодулювати [54].

1.2.3 Ємнісні енкодери як пристрої контролю кутових положень

Побудова ємнісних енкодерів базується на пропорційній значенню вимірюваного кута зміні властивостей діелектричного матеріалу, геометрії взаємного розташування обкладок або відстані між ними. Також важливим питанням є вимірювання сигналу конденсаторного сенсора. На рис. 1.6, а показано схему перетворювача «імпеданс – напруга» [55]. Але при підвищенні чутливості зменшується діапазон вимірювання та лінійність пристрою.

Німецька фірма Analog Microelectronics розробила сімейство аналогових мікросхем, що працюють за принципом вимірювання відношення ємності до опорної (рис. 1.6, б). Ці прилади забезпечують лінійність функції перетворення в широкому діапазоні ємності ($10\text{ нФ} - 2\text{ нФ}$ за можливої зміни ємності від 5%

до 100%). Прилади, що працюють за ємнісним методом, мають високу чутливість на рівні первинних перетворювачів (до $5 \cdot 10^{-18} \Phi$), малий час спрацювання, високу температурну стабільність. Однак вони чутливі до електромагнітних завад, вологи, провідних середовищ (змінюють діелектричну проникність), мають низький рівень первинного вихідного сигналу.



a



б

Рисунок 1.6 – Зображення перетворювача «імпеданс – напруга» (*a*) та ємнісного сенсора CAV424 Analog Microelectronics до інтерфейсу (*б*)

1.2.4 Фотоелектричні енкодери

Фотоелектричні енкодери містять жорстко закріплений співвісний з валом скляний диск з прецизійною оптичною шкалою. При обертанні об'єкта оптрон зчитує інформацію, а електронна схема перетворює її в послідовність дискретних імпульсів. На рис. 1.7 наведено принципову схему

фотоелектричного пристрою 15, де використано такі позначення: 1 – захисна діафрагма; 2 – інфрачервоні діоди; 3 – фотодіодна матриця; 1 – вал енодера; 2 – шкала енодера; 3 – голівка зчитування; 4 – підшипник енодера; 5 – муфта з'єднання; 6 – вал контрольованого елемента; 7, 9 – підшипники контрольованого елемента; 8 – контрольований елемент.



Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд фотоелектричного енодера з поворотною віссю

Контрольований елемент закріплений на валу, встановленому на двох підшипниках. Кутовий енодер з вбудованим підшипником з'єднаний з валом, а його голівка зчитування встановлена на нерухомому елементі конструкції. Щоб енодер міг відслідковувати кутове положення виконавчого елемента, конструкція муфти з'єднання повинна забезпечувати передавання швидкості без спотворень, відстань між сусідніми масштабними штрихами має бути сталою вздовж всієї шкали енодера, а голівка зчитування повинна бути жорстко встановлена на нерухомій частині конструкції [15].

Використання муфти з'єднання знижує точність системи в сукупності з такими впливами як люфт, деформації кручення валу і кутова неузгодженість.

Оптрони можуть працювати в колах як постійного, так і змінного струму, їх верхня робоча частота при оптимізації для високочастотного передавання

досягає сотень мегагерц. Однак промислові фотоелектричні енкодери характеризуються невеликою тривалістю роботи, інерційністю, чутливістю до вібрацій та підвищених температур (вище 80°C не працюють).

1.2.5 Магнітні методи та пристрої вимірювального контролю кутових положень

Методи магнітного вимірювального контролю кутових положень базуються на використанні ефектів Холла та Гауса, гігантського та анізотропного магніторезистивних ефектів, магнітострикційних ефектів тощо—5, [16].

Магнітокеровані перетворювачі використовують для вимірювань постійні магніти, жорстко зв'язані з валом. Поширеними є два типи магнітних систем: двополюсні та багатопольсні, процес виготовлення яких є значно складнішим. Підвищення їх роздільної здатності досягається за рахунок збільшення кількості полюсних пар. Однак технологічні похибки при промислових масштабах виробництва, розкид параметрів магнітного поля обмежують можливість збільшення роздільної здатності багатопольсних систем.

Типовими параметрами класичних сенсорів Холла є: чутливість порядку декількох $\text{мкВ}/^{\circ}$, ефективний кут від 90° до 120° , нелінійність 3% (з урахуванням температурної чутливості), підвищена чутливість до механічних та магнітних допусків [16]. Однією з основних переваг магнітних приладів є те, що магнітне поле може проникати через всі немагнітні матеріали без втрати точності. І перетворювачі, і навколишні об'єкти за необхідності покривають інертними матеріалами, що не впливають на магнітні поля. У порівнянні із фотоелектричними приладами, магнітні перетворювачі мають більш просту конструкцію, вищу надійність, споживають менше енергії, однак поступаються їм за точністю.

1.3 Магніточутливі пристроїв для вимірювального контролю кутових положень

Серед магніточутливих пристроїв для позиційного вимірювального контролю найбільшу роль відіграють гальваномагнітні перетворювачі (магніторезистори, магнітодіоди, магніотранзистори і т. д.), які при достатній для багатьох промислових застосувань точності мають невеликі габарити, низьку ціну, споживають малу потужність та прості в експлуатації. На сьогодні відомо велику кількість гальваномагнітних пристроїв, які відрізняються за діапазоном магнітної індукції, чутливістю, класом точності, вихідним сигналом тощо. Тому для вибору типу сенсорних елементів засобів вимірювального контролю кутових положень потрібно розглянути параметри відомих магніточутливих приладів 3.

1.3.1 Магніторезистивні прилади

Магніторезистори умовно поділяють на монолітні (підкладка з магніточутливим елементом із антиМДНіду індію (*InSb*), його сполук чи арсеніду індію (*InAs*), опір якого збільшується при дії магнітного поля за рахунок ефекту Гауса [57]) та плівкові (на основі феромагнітних плівок). Такі перетворювачі пропонують провідні виробники сенсорної техніки: Philips, Honeywell, HL-Planartechnik і т.д. [56], [58]. На рис. 1.8 зображено схему магніторезистивного магнітометра [59] та наведено в додатку Б, який придатний для вимірювання в чотирьох діапазонах (2 мкТл , 20 мкТл , 200 мкТл , 2000 мкТл). Два підсилювачі використовуються для зміни діапазону і калібрування. Роботу магнітометра на базі сенсора KMZ10В було випробувано для позиційного вимірювального контролю. Недоліком магніторезисторів є нелінійність функції перетворення при малих магнітних полях. Тому потрібні додаткові схеми для калібрування, компенсації впливу паразитних полів, виправлення помилок тощо.

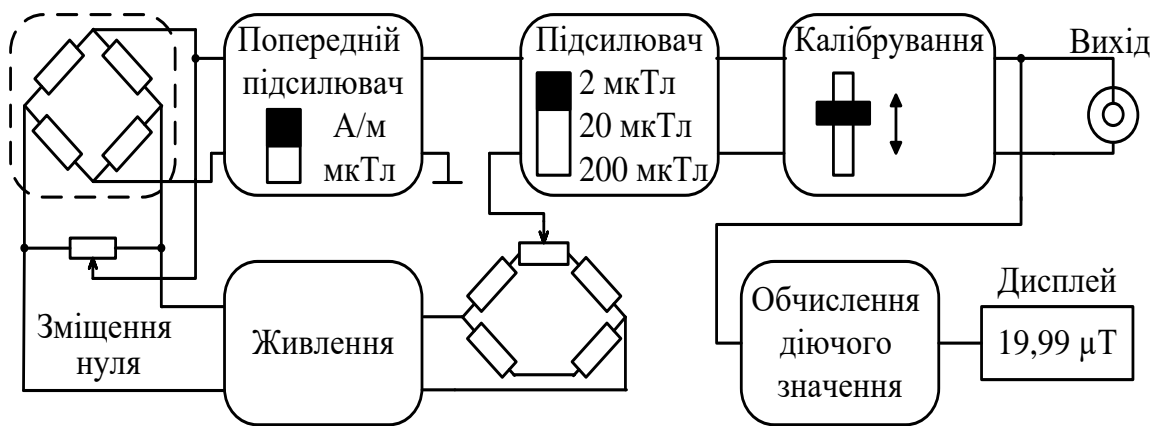


Рисунок 1.8 – Схема магніторезистивного пристрою вимірювання магнітного поля

До магніторезистивних належать також перетворювачі, які базуються на явищах анізотропного (АМР) та гігантського (ГМР) магніторезистивного ефекту. Вони визначають напрям магнітного поля, що змінює своє положення відносно сенсора. Первинний перетворювач чутливий до магнітного поля лише в площині xu , однак неточність суміщення осей магніту і сенсора обумовлює появу додаткової похибки вимірювання внаслідок впливу z -складової [56].

1.3.2 Перетворювачі Холла

Робота елементів Холла базується на ефекті Холла, який полягає в виникненні поперечної різниці потенціалів при проходженні електричного струму в поперечному до нього магнітному полі. Конструктивно перетворювачі Холла виконуються як у вигляді дискретних елементів, так і у вигляді напівпровідникових структур. Одним із варіантів сенсорів кута повороту на ефекті Холла є прилади, у яких сенсорний масив елементів інтегрований разом з електронними схемами на одному кристалі [60]. При взаємодії з магнітом, що обертається, сенсор визначає його кутове положення. Проте максимальна роздільна здатність таких приладів складає 4096 позицій на 360° , що значно менше, ніж роздільна здатність

фотоелектричних приладів. У роботі [61] розглядаються магнітні енкодери фірми «Austriamicrosystems» (рис. 1.9) та наведена в додатку В.

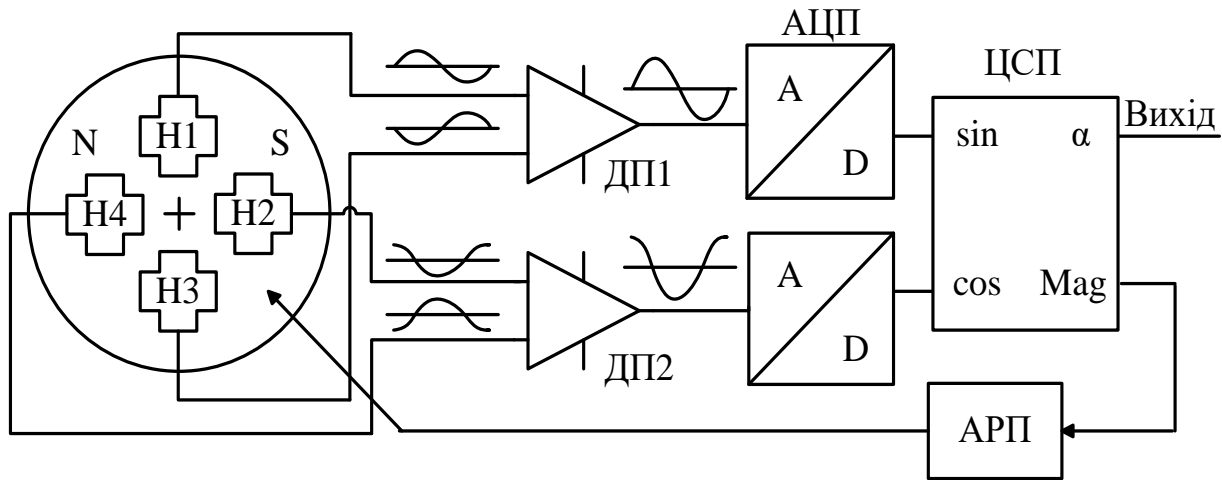


Рисунок 1.9 – Структурна схема сенсора кута повороту серії AS5000 [61]

У цьому варіанті при невеликих зсувах магніту в горизонтальній площині падіння сигналу на одному сенсорі Холла компенсується зростанням сигналу на протилежному, діапазон вимірювання складає 360° .

На елементах Холла Н1–Н4, розташованих на кристалі по колу радіусом $1,1\text{ мм}$, фіксується значення магнітного поля. Сигнали з елементів Н1 і Н3 визначають вектор синуса, а сигнал з елементів Н2 і Н4 – вектор косинуса. Сигнал від елементів Холла надходить на диференційні підсилювачі ДП1 і ДП2, перетворюється до цифрового вигляду, а в цифровому сигнальному процесорі (ЦСП) за векторами проводиться розрахунок абсолютного кута повороту (α) і магнітного поля (Mag). Модуль автоматичного регулювання підсилення (АРП) дозволяє компенсувати зміну значення сигналу з елементів Холла при зміні температури або відстані [61].

На ринку сенсорної техніки наявні й інші перетворювачі такого типу [50], [62]. Відсутність рухомих частин в системі вимірювання кута повороту забезпечує високу надійність. Проте точність холлівських перетворювачів обмежена через великий розкид їх параметрів, високу залишкову напругу,

залежність чутливості, опору і коефіцієнта Холла від температури, відносно низький рівень вихідного сигналу.

1.3.3 Магнітодіодні прилади

Магніточутливі діоди від звичайних відрізняються тим, що магнітодіод (рис. 1.10) та наведена в додатку Д, виготовляється з високоомного напівпровідникового матеріалу, провідність якого близька до власної, ширина бази d у кілька разів більша за дифузійну довжину пробігу носіїв L .

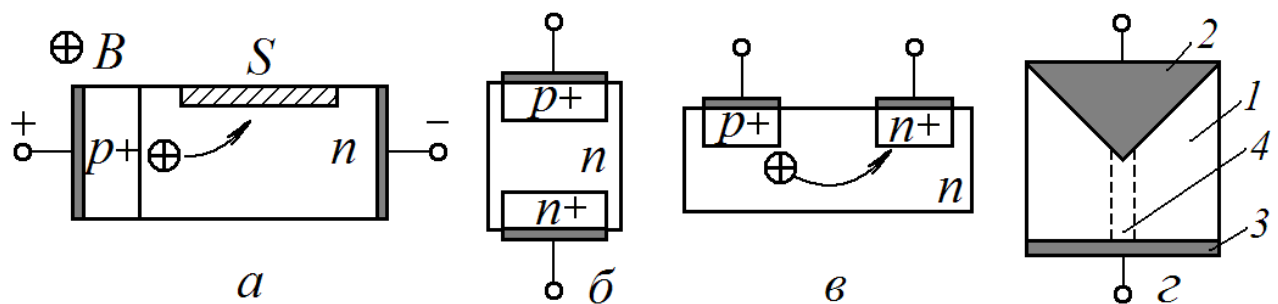


Рисунок 1.10 – Структурне зображення магнітодіодів:

a – з областю високої швидкості рекомбінації, b – торцева структура, c – планарна структура, d – із контактом у формі рівнобедреного трикутника

Магнітодіод [33], конструкція якого представлена на рис. 1.10, d (1 – пластина із напівпровідникового матеріалу, 2, 3 – контакти; 4 – шнур високої густини струму), містить пластину з напівпровідникового матеріалу з S-подібною вольт-амперною характеристикою. Для підвищення чутливості до магнітного поля, один з контактів виконаний у виді рівнобедреного трикутника.

Перевагою магнітодіодів є висока магнітна чутливість за низької напруги джерела живлення (ефект магнітоопору за рахунок зміни рівня інжекції підсилюється в сотні разів). Основними недоліками вважається висока нелінійність енергетичної характеристики чутливості, яка залежить від напрямку прикладеного магнітного поля, відносно низька чутливість до малих магнітних

полів, залежність параметрів приладу від температури [33].

1.3.4 Біполярні магнітотранзистори

Дія магнітного поля на звичайні біполярні транзистори виявляється у викривленні траєкторії інжектованих носіїв заряду, що приводить до збільшення ефективної довжини бази та відхилення частини носіїв від колектора 3, 6. Роль останнього ефекту збільшується зі зменшенням ширини емітера та колектора, тому латеральна конструкція виявляє найбільшу магніточутливість. Двоколекторний магнітотранзистор (ДКМТ) – це звичайний біполярний транзистор, колектор якого розділений на дві частини (рис. 1.11).

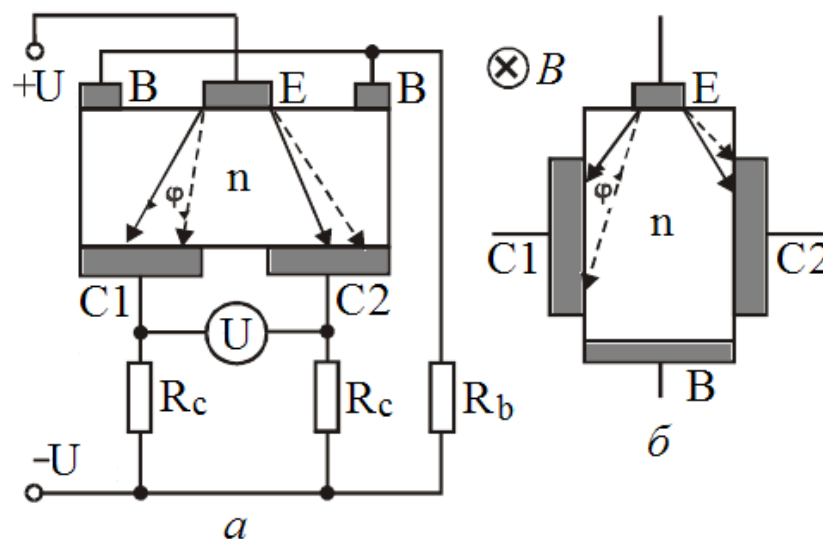


Рисунок 1.11 – Структура двоколекторних магнітотранзисторів:

a – горизонтальний ДКМТ; *б* – ДКМТ з вертикальними колекторами

У поперечному магнітному полі відбувається перерозподіл інжектованих носіїв заряду між колекторами. Це приводить до зміни напруги між колекторами, причому зі зростанням магнітного поля вона збільшується.

Ефект зміни ефективної товщини бази протилежний ефекту перерозподілу носіїв заряду і призводить до зменшення магнітної чутливості

ДКМТ. Цей недолік усувається у ДКМТ з вертикальними колекторами (рис. 1.11, б) (омічний контакт до бази та емітер розташовані по різні боки від колекторів). Магнітне поле зменшує ефективну товщину бази, якщо струм другого колектора збільшується, і навпаки [34].

ДКМТ характеризуються лінійною залежністю вихідного сигналу від напруженості магнітного поля в широкому діапазоні значень магнітної індукції і високою чутливістю, оскільки вони є балансними приладами. За тих самих робочих струмів чутливість ДКМТ на два-три порядки вища, ніж чутливість сенсорів Холла.

Висока чутливість і лінійність характеристики за малих значень магнітної індукції дозволяють використовувати магнітотранзистори як перетворювачі слабких магнітних полів. У великих магнітних полях чутливість зменшується за рахунок того, що всі носії вже перерозподілені.

1.3.5 Порівняння гальваномагнітних приладів

Крім розглянутих вище гальваномагнітних приладів, до цього класу відносять також магнітотиристиори, магнітосимістори, гальваномагніто-рекомбінаційні (ГМР) елементи та складні інтегральні структури, що базуються на магніторезистивному та холлівському ефектах 5.

Параметри розглянутих гальваномагнітних приладів наведені в таб. 1.2.

Магніточутливі тиристиори та симістори використовуються і як керовані перемикачі, і як вимірювачі магнітного поля, забезпечуючи при цьому струми від десятків міліампер до сотень ампер 25, 26.

Однак через невисоку абсолютну чутливість дискретні магнітотиристиори не знайшли широкого застосування. ГМР перетворювачі базуються на зміні середньої концентрації носіїв заряду під дією магнітного поля, що проявляється в провідниках, які мають поверхні з різною швидкістю рекомбінації носіїв

зарядів. Основними недоліками є вплив температури, шумів та контактів, складність виготовлення.

Оскільки кожен із гальваномагнітних приладів має переваги за одними характеристиками і недоліки за іншими, проведено порівняння їх параметрів, важливих для вибору магніточутливого елементу.

Таблиця 1.2 – Порівняння гальваномагнітних елементів

Тип приладу	Нелінійність, %	Струм, мА	Діапазон робочих частот, Гц	Чутливість, мВ/мТл	Діапазон вимірювань, Тл
Магніторезистори	1	2,5	$0-10^2$	біля 0,1 (МДНолітні), 5–32(плівкові)	$10^{-2}-1$ (МДНолітні), $10^{-10}-3 \cdot 10^{-2}$ (плівкові)
Елементи Холла	1	0,5	$0-10^6$	0,0056–6,4	$10^{-4}-2 \cdot 10^{-2}$, $10^{-7}-2 \cdot 10^{-1}$ (польові)
Магнітодіоди	0,5	1	$0-10^8$	до 30	$10^{-6}-1$
Біполярні магніотранзистори	0,3	4–10	$0-10^9$	біля 40 (1колектор), до500 (ДКМТ)	$10^{-6}-0,5$
Польові магніотранзистори	0,3	$5 \cdot 10^{-7}-$ 0,3	$0-10^9$	до 400 (двос- токові)	$10^{-6}-0,5$
Магніотиристри, магнітосимістри	0,3	10	$0-10^5$	10–100	$10^{-5}-10$
ГМР перетворювачі	0,4	10	$0-10^4$	16–80	$5 \cdot 10^{-7}-1$

1.4 Висновки до розділу

1. На підставі проведеного аналізу літературних джерел, показано, що існує велика кількість приладів вимірювального контролю кутових положень, які відрізняються як за фізичними принципами, так і за технічними характеристиками. Наприклад, наявні на ринку сенсорної техніки механічні та потенціометричні прилади мають низьку точність, малий термін служби і

обмежену кількість циклів переміщення, а використання муфти з'єднання погіршує технічні параметри фотоелектричних приладів. Виходячи з принципу їх роботи, магнітні кутові енкодери дозволяють отримати високу роздільну здатність, вони мають невеликі габарити, низьку ціну, споживають малу потужність та прості в експлуатації. Однак недоліками є обмежений діапазон вимірювання кутів, або ж доповнення пристрою складними конструкціями для розширення діапазону. Крім того, більшість магнітних приладів базуються на використанні елементів Холла та магніторезисторів. З іншого боку, для зменшення частоти появи помилок у процесі вимірювального контролю потрібно підвищувати чутливість і зменшувати похибки вимірювання кутових положень.

2. Серед перетворювачів магнітного поля найбільш перспективними є магнітотранзистори. Біполярні двоколекторні магнітотранзистори характеризуються високою чутливістю в області слабких полів (до $500 \text{ мВ} / \text{мТл}$), однак при використанні в аналогових схемах недоліком є великі значення керувальних струмів та високий рівень шумів.

3. Радіовимірювальні перетворювачі з частотним виходом дозволяють підвищити чутливість і зменшити похибки вимірювання фізичних величин, оскільки поєднують простоту і універсальність аналогових перетворювачів з точністю і завадостійкістю перетворювачів з кодовим виходом.

2 МЕТОД ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ КУТОВИХ ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА

Методи вимірювального контролю куткових положень з використанням зміни значень просторових складових вектора індукції магнітного поля, створеного рухомим магнітом, досліджуються вже кілька десятиків років. Однак перетворювачі, що є практичною реалізацією таких методів, мають обмежений кутівий діапазон, низьку роздільну здатність, їх точність суттєво залежить від температури тощо [1, 2, 64]. Це обумовлює перспективність розроблення безконтактного методу вимірювального контролю куткових положень із підвищеною вірогідністю в діапазоні вимірювання 360° .

Тому цей розділ присвячено дослідженню теорії гальваномагнітних методів вимірювального контролю куткових положень та розробці нового методу на основі магніточутливих транзисторів, який відрізняється від існуючих безконтактним перетворенням кутового положення в синусний та косинусний частотні сигнали за допомогою автогенераторних пристроїв, у яких магніточутливі транзистори виконують роль і чутливих перетворювачів, і активних елементів; вимірюванням і подальшим обробленням отриманих частотно-модульованих сигналів мікроконтролерними засобами.

2.1 Теоретичні основи гальваномагнітних методів вимірювального контролю кута повороту

Відомі на сьогодні гальваномагнітні методи вимірювального контролю куткових положень базуються на вимірюванні магнітного поля постійного магніту (пов'язаного з об'єктом вимірювального контролю) за допомогою одного чи декількох первинних перетворювачів (найчастіше це елементи Холла або магніторезистори) й обробці аналогового сигналу з використанням підсилювачів, аналогово-цифрових перетворювачів тощо. Найпростіша система

вимірювання кута являє собою елемент Холла і розташований над ним діаметрально намагнічений магніт. Обертання валу з встановленим на ньому магнітом викликає зміну магнітної індукції над елементом Холла, а за значенням магнітної індукції робиться висновок про кут повороту валу [60]. Такий спосіб визначення кута простий в реалізації, однак він має ряд недоліків: нестабільність магнітного поля магніту, зміна значення і фази магнітного поля в результаті вертикального або горизонтального зміщення магніту або чутливого елемента тощо. Для детального аналізу основ даного класу методів вимірювального контролю слід, в першу чергу, розглянути розподіл магнітного поля діаметрально намагніченого постійного магніту.

2.1.1 Моделювання розподілу поля діаметрально намагніченого постійного магніту

Поведінку зарядів в електромагнітних полях описують рівняння Максвелла, які дають можливість пояснити велику кількість явищ, в тому числі й магнітну взаємодію. У випадку, що розглядається, зручно використати рівняння Максвелла у диференціальній формі [60]:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad (2.4)$$

де $\vec{J} (A/m^2)$ та $\rho (Кл/м^3)$ – густина струму й об'ємна густина зарядів джерела, відповідно; $\vec{E} (В/м)$ і $\vec{D} (Кл/м^2)$ – напруженість та індукція

електричного поля; \vec{H} (А/м) і \vec{B} (Тл) – напруженість та індукція магнітного поля.

Напруженість та індукція є векторними величинами, які залежать від просторових координат і часу:

$$\vec{B} = B_x(x, y, z, t)\hat{x} + B_y(x, y, z, t)\hat{y} + B_z(x, y, z, t)\hat{z}. \quad (2.5)$$

Виходячи із виразу (2.5), чотири силових характеристики електромагнітного поля описуються системою рівнянь із дванадцятьма невідомими. Однак ці рівняння не є незалежними, зокрема в результаті підстановки (2.1) у (2.4) маємо

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \quad (2.6)$$

Також рівняння Максвелла потрібно доповнити співвідношеннями між силовими характеристиками електромагнітного поля:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}), \quad (2.7)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P}, \quad (2.8)$$

де \vec{M} (А/м) – вектор намагнічення; \vec{P} (Кл/м²) – вектор поляризації;
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Тл·м/А) – магнітна стала; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ (Ф/м) – діелектрична стала.

На основі виразу (2.8) можна знайти густину струму зміщення як

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}. \quad (2.9)$$

Для стаціонарних, лінійних, однорідних та ізотропних середовищ співвідношення між силовими характеристиками мають вигляд:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (2.10)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad (2.11)$$

де μ і ε – магнітна сприйнятливість і діелектрична проникність середовища, відповідно.

Як відомо, густина струму та напруженість електричного поля пов'язані співвідношенням

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (2.12)$$

де σ (См·м) – провідність.

Оскільки величини μ , ε та σ нелінійного, неоднорідного чи анізотропного матеріалу залежать від силових характеристик поля, то рівняння (2.10 – 2.12) записуються як.

$$\vec{B} = \mu(\vec{H})\vec{H}, \quad (2.13)$$

$$\vec{D} = \varepsilon(\vec{E})\vec{E}, \quad (2.14)$$

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E})\vec{E}. \quad (2.15)$$

Для нелінійних матеріалів величини μ , ε та σ залежать від нелінійності, для неоднорідних – від координати, а для анізотропних – від напрямку.

Розрахунок розподілу поля постійного магніту базується на використанні виразів (2.5), (2.13) – (2.15), а також теоретичних міркувань, наведених у 65. Радіальна складова визначається як

$$B_r(r, \phi, z) = \frac{\mu_0 M_s R}{2N_\phi} \sum_{n=0}^{N_\phi} \sum_{k=1}^2 (-1)^{(k+1)} S_\phi(n) \cos(\phi'(n)) \times \quad (2.16)$$

$$\times [r - R \cos(\phi - \phi'(n))] I(r, \theta, z; R, \phi'(n), z_k),$$

де N_ϕ – кількість членів за методом Сімпсона, тобто

$$\phi'(n) = \frac{n}{N_\phi} 2\pi \quad (n=0, 1, 2, \dots, N_\phi),$$

а

$$S_\phi(n) = \begin{cases} \frac{1}{3} & (n=0), \\ \frac{4}{3} & (n=1, 3, 5, \dots), \\ \frac{2}{3} & (n=2, 4, 6, \dots), \\ \frac{1}{3} & (n=N_\phi). \end{cases}$$

Функція I у виразі (2.16) визначається як

$$I \equiv \begin{cases} \frac{(z - z_k)g(r, \phi, z; r', \phi', z_k)}{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\phi - \phi')}, & \text{якщо } r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\phi - \phi') \neq 0, \\ \frac{-1}{2(z - z_k)^2}, & \text{якщо } r = r', \cos(\phi - \phi') = 1, z \neq z_k, \end{cases} \quad (2.17)$$

де

$$g(r, \phi, z; r', \phi', z') = \frac{1}{\sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\phi - \phi') + (z - z')^2}}.$$

Як бачимо із (2.17), аналітичний вигляд функції I залежить від співвідношення між координатами точки поля (r, ϕ, z) та початкової точки (r', ϕ', z') .

Тангенціальна (азимутальна) складова задається виразом

$$B_\phi(r, \phi, z) = \frac{\mu_0 M_s R^2}{2N_\phi} \sum_{n=0}^{N_\phi} \sum_{k=1}^2 (-1)^{(k+1)} S_\phi(n) \cos(\phi'(n)) \times \times \sin(\phi - \phi'(n)) I(r, \phi, z; R, \phi'(n), z_k). \quad (2.18)$$

Аксіальну складову магнітної індукції можна розрахувати за виразом

$$B_z(r, \phi, z) = \frac{\mu_0 M_s R}{2N_\phi} \sum_{n=0}^{N_\phi} S_\phi(n) \sum_{k=1}^2 (-1)^k \cos(\phi'(n)) g(r, \phi, z; R, \phi'(n), z_k). \quad (2.19)$$

Варто зауважити, що вирази (2.16), (2.18), (2.19) отримані за наступних припущень:

- постійний магніт має сталу, однорідну та ізотропну магнітну проникність, значення якої близьке до проникності повітря (практично можна справджується для рідкоземельних магнітів);
- немає спотворення від магнітного поля, створеного сторонніми ферромагнітними елементами;
- поле намагнічення в постійному магнітному матеріалі є однорідним і сталим.

На рис. 2.1 показано результати моделювання залежностей радіальної, тангенціальної та аксіальної складових магнітної індукції поля від кута повороту постійного магніту з діаметральним намагніченням (радіус $R = 6 \text{ мм}$, висота $h = 6 \text{ мм}$, намагнічення $M_s = 2,4 \cdot 10^5 \text{ А/м}$) на відстані $r = 3 \text{ мм}$ від центра магніту та $z = 2 \text{ мм}$ від поверхні магніту.

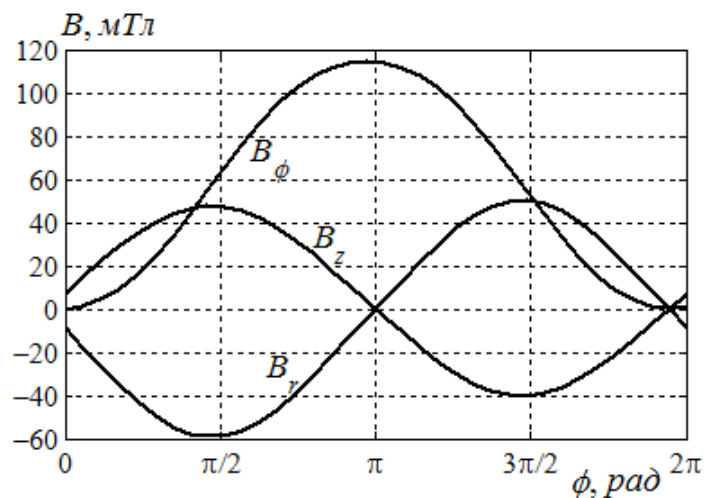


Рисунок 2.1 – Залежності радіальної (B_r), тангенціальної (B_ϕ) та аксіальної (B_z) складових магнітної індукції від кутової координати

Наведені на рис. 2.1 графіки підтверджують, що просторові складові магнітної індукції лінійно пов'язані з кутовою координатою лише у вузькому діапазоні її значень (діапазон відрізняється для кожної складової), характер залежностей близький до синусоїди.

Комп'ютерне моделювання проведено з використанням програмного пакету для науково-технічних розрахунків MatLab, оскільки даний пакет програм дає можливість отримувати як аналітичні вирази на основі розв'язку систем рівнянь, так і будувати графічні характеристики на основі заданих аналітичних залежностей та відомих значень констант і змінних.

Багатостокові та багатоклекторні магнітотранзистори чутливі до складової магнітного поля, яка перпендикулярна до площини сенсора, тому слід розглядати аксіальну складову магнітного поля.

Просторовий розподіл аксіальної складової поля постійного магніту із діаметральним намагніченням наведено на рис. 2.2 (вектор намагнічення постійного магніту спрямований по осі y).

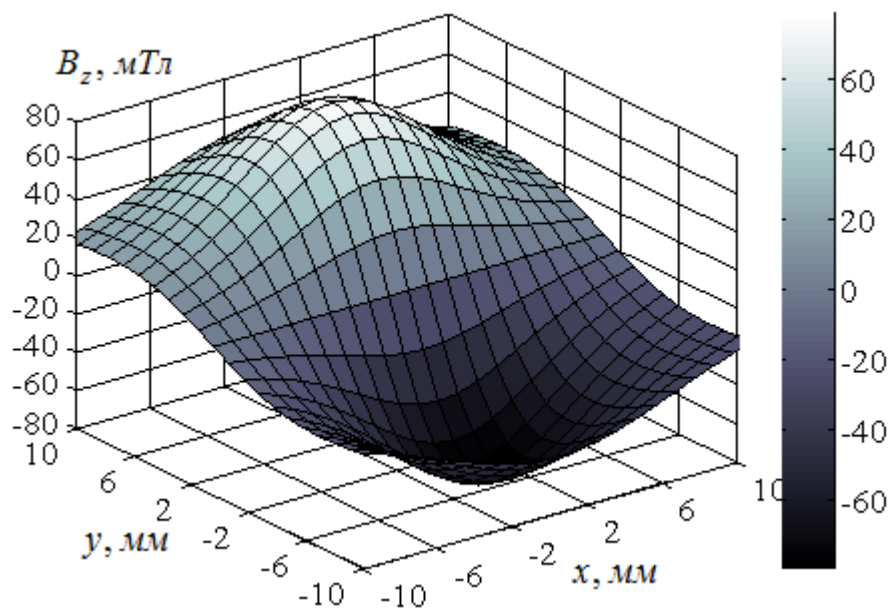


Рисунок 2.2 – Просторовий розподіл аксіальної складової магнітної індукції

При зміні кутової координати ϕ в циліндричній системі координат від 0 до 2π ($z = z_1$, $r = r_1$) магнітна індукція $B_z(r_1, \phi, z_1)$ набуває тих самих значень, що й магнітна індукція $B_z(r_1, 0, z_1)$ при обертанні постійного магніту відносно нерухомої системи чутливих елементів, тобто у виразі для магнітної індукції можна замінити кутову координату ϕ на фазовий зсув φ магнітного поля від нульової мітки. Тому отримані результати моделювання підтверджують можливість використання індукції поля постійного діаметрально намагніченого магніту як інформативного параметра для вимірювання кутового положення валу.

Вираз (2.19) дає можливість врахувати вплив геометричних розмірів та магнітних параметрів постійного магніту на значення аксіальної складової магнітної індукції, однак він складний для використання в інженерних розрахунках при побудові засобів вимірювального контролю кутових положень.

2.2 Метод вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів

При розробленні засобів вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів з використанням автогенераторних пристроїв потрібні дещо інші підходи, ніж при роботі з аналоговими вимірювачами. Це пов'язано з тим, що вихідним інформативним параметром радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора є частота [44].

Суть методу полягає у [44]:

1) створенні за допомогою постійного магніту з діаметральним намагніченням магнітного поля, просторовий розподіл якого залежить від кута повороту контрольованого об'єкта (валу);

2) визначенні точок вимірювального контролю кутового положення і допустимого відхилення;

3) перетворенні індукції магнітного поля у двох (або чотирьох) точках, кутовий зсув між якими складає 90^0 , тобто синусної та косинусної складових магнітної індукції, у частотні сигнали за допомогою автогенераторних пристроїв на основі магніточутливих транзисторів (за фіксованого кутового положення досліджуваного об'єкта);

4) вимірюванні отриманих частот за допомогою мікроконтролерних засобів;

5) обчисленні кутового положення на основі вимірних частот та функції перетворення, що обирається із врахуванням температури навколишнього середовища;

б) порівнянні обчислених кутових положень із значеннями точок вимірювального контролю для отримання результату вимірювального контролю.

На рис. 2.3 зображена структурна схема методу вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів та наведена в додатку Е. Схематично показано постійний магніт, що обертається. Його слід встановлювати співвісно з валом, кут повороту якого потрібно вимірювального контролювати. Це дозволяє отримати синусні та косинусні складові індукції магнітного поля, розташувавши магніточутливі елементи на однакові відстані від центра магніту і з кутовим зсувом 90^0 .

Частота генерації автогенераторних пристроїв на основі магніточутливих транзисторів однозначно залежить від магнітної індукції, тобто за відсутності дії магнітного поля на виходах автогенераторів присутній сигнал деякої частоти f_0 , яка залежить від параметрів елементів схеми, вибору робочої точки, температури тощо. При поміщенні магніточутливого елемента в магнітне поле вихідна частота радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора зменшується або збільшується, залежно від

напрямку магнітної поля, оскільки відбувається зміна електрофізичних параметрів магніточутливих транзисторів.

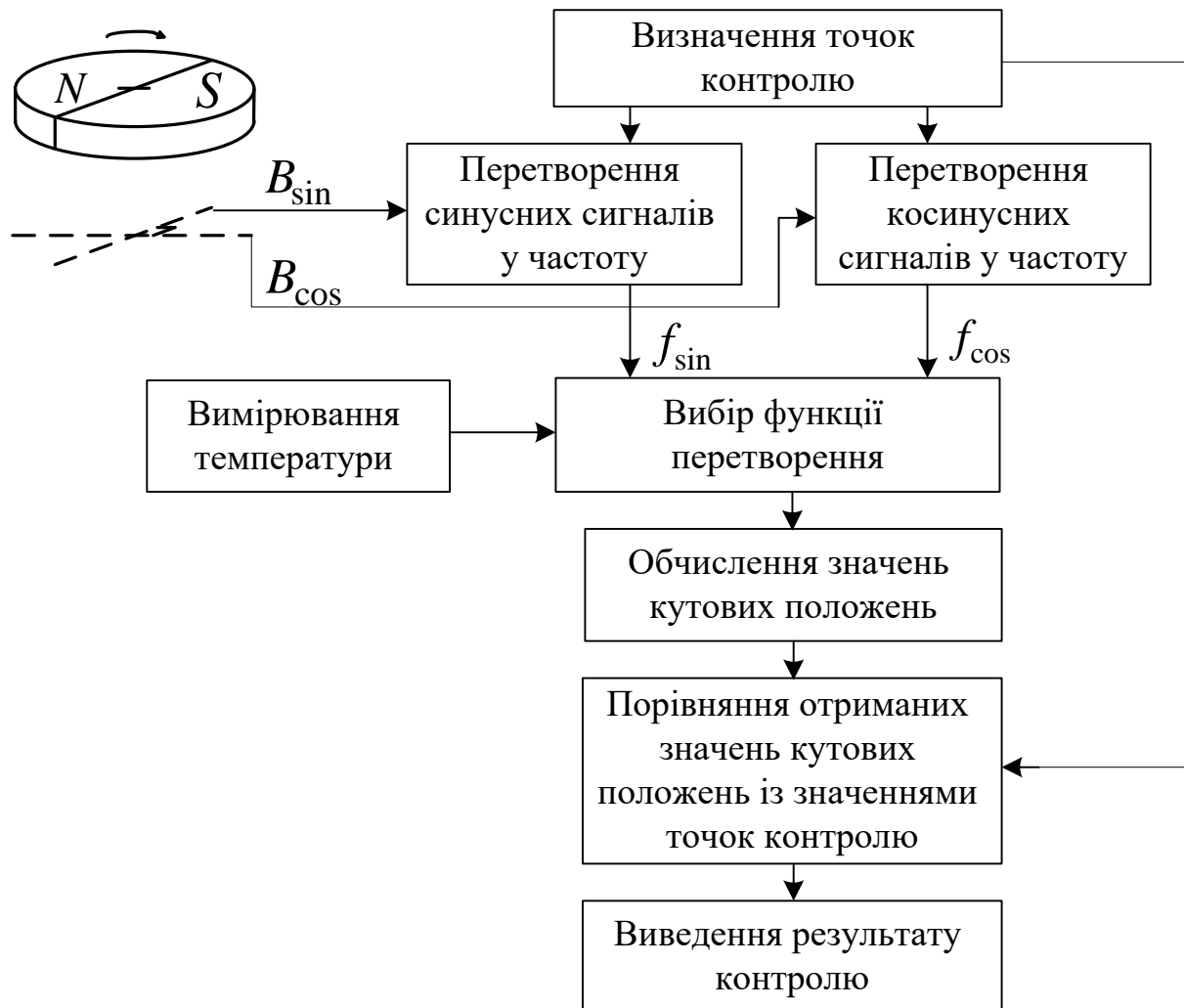


Рисунок 2.3 – Структурна схема методу вимірювального контролю кутових положень

Таким чином, при використанні, наприклад, системи із двох чутливих елементів на виході автогенераторних пристроїв матимемо сигнали, частоти яких

$$f_{\sin} = f(B_{\sin}) = f_0 + \Delta f(B_{\sin}), \quad (2.20)$$

$$f_{\cos} = f(B_{\cos}) = f_0 + \Delta f(B_{\cos}), \quad (2.21)$$

де $\Delta f(B_{\sin})$, $\Delta f(B_{\cos})$ – зміна частот генерації внаслідок дії синусної та косинусної складових магнітного поля, причому ця зміна може бути як додатною, так і від’ємною.

На сьогодні відомо досить велику кількість методів вимірювання частоти f_x (періоду T_x). Для цифрового вимірювання (метод електронного, або дискретного рахунку) гарМДНічну напругу слід спочатку перетворити в послідовність імпульсів такої самої частоти, причому передні фронти цих імпульсів повинні збігатися з моментами переходу вимірюваного сигналу через нульове значення на осі часу за його наростання.

Вимірювання частоти за методом дискретного рахунку передбачає заповнення каліброваного інтервалу часу Δt_k (часових воріт) імпульсами вимірюваної частоти f_x .

Якщо протягом часу Δt_k нараховано m імпульсів, то середнє значення вимірюваної частоти за час Δt_k складає:

$$f_x = \frac{m}{\Delta t_k}. \quad (2.22)$$

Такий метод називають методом часових воріт. Існує також модифікація даного методу, відповідно до якої протягом заданого інтервалу часу проводять підрахунок імпульсів двох частот: вимірюваної та зразкової, значення якої відоме. Тоді середнє значення частоти розраховують як

$$f_x = F_{zp} \cdot \frac{m}{n}, \quad (2.23)$$

де f_{zp} – зразкова частота; n – кількість імпульсів зразкової частоти (обов’язковою умовою є виконання нерівності $f_{zp} > 2f_x$).

Цифрові частотоміри зручні в експлуатації, мають широкий діапазон вимірюваних частот (від декількох герц до сотень мегагерц) і дозволяють отримати результат вимірювання з високою точністю (відносна похибка вимірювання частоти $10^{-6} \dots 10^{-9}$). Оскільки такі вимірювальні прилади є багатофункціональними, то залежно від режиму їх роботи можна проводити вимірювання не тільки частоти, а й відношення двох частот, інтервалів часу тощо 68.

Проте одним із найсуттєвіших недоліків при використанні методу часових воріт в області низьких частот є похибка дискретизації (абсолютні похибки дискретизації початку і кінця інтервалу), обумовлена випадковою появою строб-імпульсу щодо імпульсів, які підраховуються. Цей недолік усувають одним із відомих способів:

- 1) збільшення тривалості часових воріт Δt_k ;
- 2) застосування помножувачів частоти;
- 3) синхронізація фронту часових воріт з імпульсом, що задає початок періоду $T_x = 1/f_x$, а також вимірювання дробової частини відношення $\Delta t_k/T_x$ (апаратна реалізація цього способу порівняно складна);
- 4) перехід від вимірювання частоти синусоїдального сигналу до вимірювання його періоду.

З урахуванням швидкодії доцільно вибрати четвертий варіант підвищення точності вимірювання частот на виходах автогенераторних пристроїв – перехід від методу прямого до методу зворотного рахунку. Вимірювання періоду принципово не відрізняється від вимірювання частоти: вимірюваний період T_x заповнюють імпульсами зразкової частоти f_{zp} (частоти кварцового генератора) 68. При вимірюванні періоду гарМДНічної напруги похибка дискретизації значно менша, ніж при вимірюванні частоти. Вона тим менша, чим більший період T_x і чим більша частота f_{zp} .

Якщо функцію перетворення автогенераторних пристроїв на основі магніточутливих транзисторів вважати лінійною, то при розрахунку кута повороту можна користуватися формулами (2.20) та (2.21), підставляючи замість деякого сигналу X значення частот f на виходах автогенераторних пристроїв. Проте в більшості випадків потрібно враховувати нелінійність функції перетворення, тобто спочатку обчислювати значення синусної та косинусної складових магнітної індукції за відомою функцією перетворення, а вже потім використовувати, залежно від типу системи чутливих елементів.

Значення частоти на виході автогенераторних пристроїв залежить не тільки від кутового положення магніту, а й від відстані, температури тощо. Це питання потребує більш детального дослідження. Зокрема, для врахування впливу температури на процес вимірювального контролю потрібно дослідити характеристики автогенераторних пристроїв у широкому діапазоні температур, а під час вимірювального контролю обирати функцію перетворення залежно від вимірюваного значення температури.

Після обчислення значення магнітної індукції слід провести аналіз знаків синусних та косинусних складових, для отримання складової a_φ формул (2.22) та (2.23), і розрахувати значення кутового положення. Використання функції арктангенса, доповненого складовою a_φ , надає можливість лінеаризувати статичну характеристику вимірювального каналу кутових положень.

Контроль кутових положень за запропонованим методом передбачає також порівняння отриманого значення кута із деякою нормою. Якщо потрібно вимірювального контролювати кілька кутових положень (визначено кілька кутових міток), то потрібно зберігати значення кута, відхилення від найближчої точки вимірювального контролю та порядковий номер цієї точки.

Отже, в загальному розглянуто особливості запропонованого методу вимірювального контролю кутових положень. Але детальне дослідження методу і засобів вимірювального контролю кутових положень потребує, в

першу чергу, розроблення автогенераторних пристроїв на основі магніточутливих транзисторів.

2.3 Висновки до розділу

1. Розглянуто метод вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів, який відрізняється від існуючих безконтактним перетворенням кутового положення в частотний сигнал за допомогою радіовимірювальних перетворювачів з частотним виходом, у яких магніточутливі транзистори виконують роль чутливих перетворювачів та активних елементів.

2. Представлено аналітичні вирази, які описують розподіл магнітного поля постійного діаметрально намагніченого магніту та залежність аксіальної складової магнітної індукції від кутового положення.

3 РОЗРОБЛЕННЯ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА КУТОВИХ ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА

Для підвищення точності та чутливості вимірювального контролю куткових положень за рахунок використання розглянутого в попередньому розділі методу радіовимірювальні перетворювачі куткових положень на основі магніточутливого транзистора повинні мати високу чутливість і малі значення похибок перетворення куткового положення у частоту змінної напруги.

З метою аналізу роботи радіовимірювального перетворювача куткових положень на основі магніточутливого транзистора слід розробити математичні моделі, які б дали можливість отримати вольт-амперні характеристики пристроїв, залежності активної та реактивної складових повного опору, вихідної частоти й чутливості від дії магнітного поля та режимів живлення схеми.

3.1 Магнітореактивний ефект у двоколекторних магніточутливих транзисторах

Математичні моделі статичних характеристик біполярних магнітотранзисторів розроблені на сьогодні більш детально у порівнянні з моделями МДН-магнітотранзисторів. Зокрема, двоколекторні магніточутливі транзистори досліджено у [6, 16].

Аналітичні вирази залежностей параметрів двоколекторного транзистора від магнітної індукції наведено у [23]. Омичний опір базової області залежить від дії магнітного поля згідно виразу:

$$R_B = R_{B0} (1 + c\mu_p^2 B^2), \quad (3.1)$$

де R_{B0} – опір базової області без дії магнітного поля.

Залежність опору емітерної області та дифузійної ємності від магнітної індукції:

$$R_E = \frac{kT(1 + c\mu_p^2 B^2)}{qI_0 \exp(qU_{E0}/kT)}; \quad (3.2)$$

$$C_E = \frac{qI_0 \tau_p \exp(qU_{E0}/kT)}{kT(1 + c\mu_p^2 B^2)}, \quad (3.3)$$

де I_0 – зворотний струм емітерного $p-n$ переходу;

U_{E0} – постійна напруга на емітерному переході магніточутливого транзистора;

τ_p – час життя дірок.

Ємність колекторного переходу описується виразом

$$C_C = S \left(\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2U_C \mu_p \rho_0 (1 + c\mu_p^2 B^2)} \right)^{1/2}, \quad (3.4)$$

де S – площа колекторного переходу;

ρ_0 – питомий опір базової області;

U_C – зворотна напруга колекторного переходу;

ε , ε_0 – діелектрична проникність напівпровідникового матеріалу базової області й вакууму, відповідно.

Залежність коефіцієнта передавання струму в схемі із загальною базою в області низьких частот від дії магнітного поля:

$$\alpha = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_0}{L_p (1 + c\mu_p^2 B^2)} \right)^2. \quad (3.5)$$

При роботі двоколекторного магнітотранзистора в області вищих частот потрібно розглядати комплексний коефіцієнт передавання струму

$$\dot{\alpha} = \alpha_1 + j\alpha_2 = \frac{\alpha_0}{1+(f/f_\alpha)^2} + j \frac{\alpha_0 f / f_\alpha}{1+(f/f_\alpha)^2}, \quad (3.6)$$

де f_α та f – гранична і робоча частоти транзистора, відповідно

Залежність реактивних властивостей двоколекторного магнітотранзистора від магнітного поля частково досліджена у роботах 10, 12, 22, 23. Однак при використанні нелінійних еквівалентних схем з'являється принципова можливість більш точного математичного опису магнітореактивного ефекту у двоколекторних магнітотранзисторах [71].

З метою дослідження повного опору на електродах колектор – емітер (наприклад, перший колектор) магнітотранзистора розроблені моделі на основі еквівалентних схем та аналітичних виразів залежностей параметрів їх елементів від магнітної індукції.

Нелінійна еквівалентна схема двоколекторного магніточутливого транзистора наведена на рис. 3.1. В еквівалентній схемі використані наступні позначення: R_{C1} і R_{C2} – опори першого та другого колектора; R_{B1} і R_{B2} – опори першої та другої бази; R_{B1B2} – опір між першою та другою базами; R_{E1} і R_{E2} – опори емітера; C_{bc1} і C_{bc2} – ємності переходів перша база – перший колектор та друга база – другий колектор; C_{bx1} і C_{bx2} – ємності між зовнішнім виводом першої бази та першого колектора, другої бази та другого колектора, відповідно; C_{be1} і C_{be2} – ємності переходів перша база – емітер та друга база – емітер; I_{BE1} та I_{BE2} – струми перша база – емітер і друга база – емітер; I_{BC1} та I_{BC2} – струми перша база – перший колектор і друга база – другий колектор; I_{T1} та I_{T2} – струми перший колектор – емітер і другий колектор – емітер.

Нелінійна еквівалентна схема (рис. 3.1) перетворена до зручного для розрахунку повного опору двоколекторного магніточутливого транзистора вигляду.

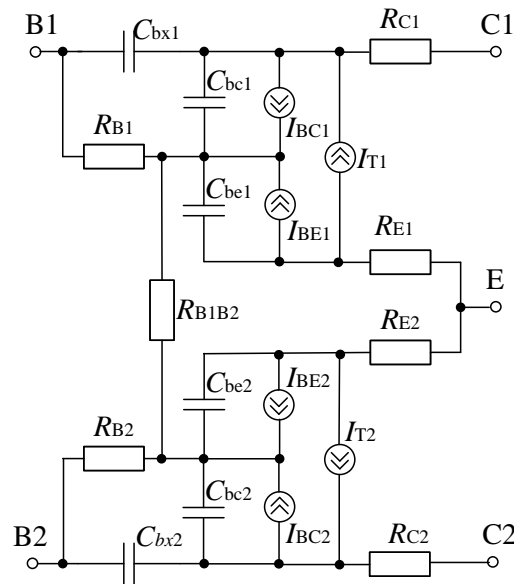


Рисунок 3.1 – Нелінійна еквівалентна схема двоколекторного магніточутливого транзистора

На основі нелінійної еквівалентної схеми з врахуванням дії магнітного поля отримано аналітичний вираз для повного опору двоколекторного магніточутливого транзистора, який має вигляд

$$\begin{aligned}
 Z = & U_{CE1} y_1^{-1} \left[U_{CE1} + y_4 y_{15}^{-1} y_{17}^{-1} \left(-U_{BE1} y_2 - U_{CE1} y_1 + I_{T1} - I_{BC1} \right) y_{15} y_4^{-1} - \right. \\
 & - \left. \left((I_{T1} + I_{BE1}) y_5 (y_5 + y_6)^{-1} + I_{BC1} + I_{BE1} - U_{BE1} y_3 \right) \left(1 + y_{10}^2 y_{15}^{-1} y_{16}^{-1} \right) - \right. \\
 & - \left. (I_{T2} + I_{BE2}) y_8 y_{10} y_{16}^{-1} (y_7 + y_8)^{-1} + (I_{BC2} + I_{BE2} - U_{BE2} y_9) y_{10} y_{16}^{-1} - \right. \\
 & \left. - (U_{BE2} y_{12} + U_{CE2} y_{13} - I_{T2} + I_{BC2}) y_{10} y_{11} y_{14}^{-1} y_{16}^{-1} \right]^{-1}, \quad (3.7)
 \end{aligned}$$

де використано такі позначення: $y_1 = 1/R_{C1}$, $y_2 = j\omega C_{bx1}$, $y_3 = 1/R_{B1}$,

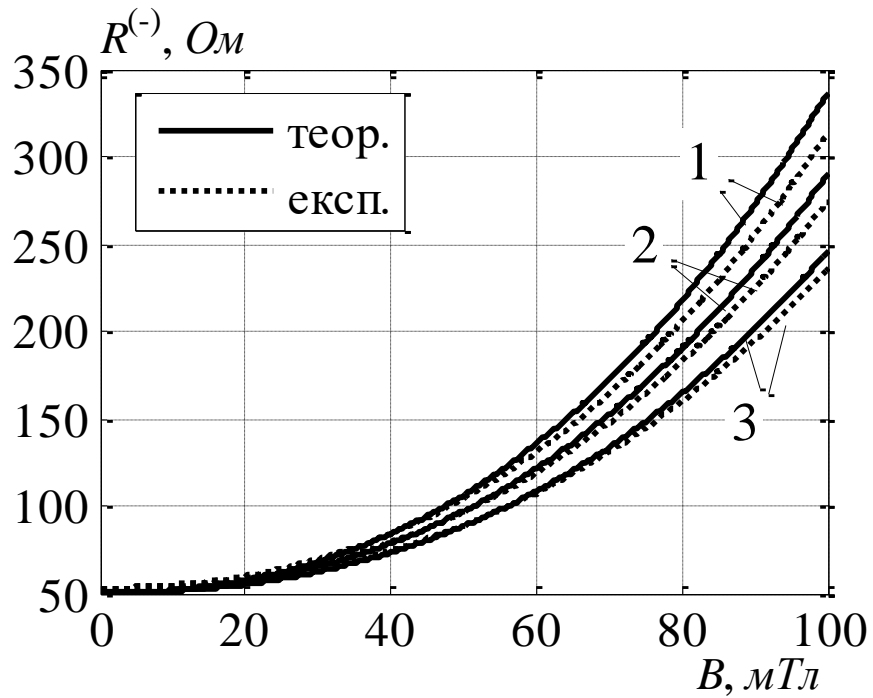
$y_4 = j\omega C_{bc1}$, $y_5 = j\omega C_{be1}$, $y_6 = 1/R_{E1}$, $y_7 = 1/R_{E2}$, $y_8 = j\omega C_{be2}$,

$y_9 = 1/R_{B2}$, $y_{10} = 1/(R_{B1B2})$, $y_{11} = j\omega C_{bc2}$, $y_{12} = j\omega C_{bx2}$, $y_{13} = 1/R_{C2}$,

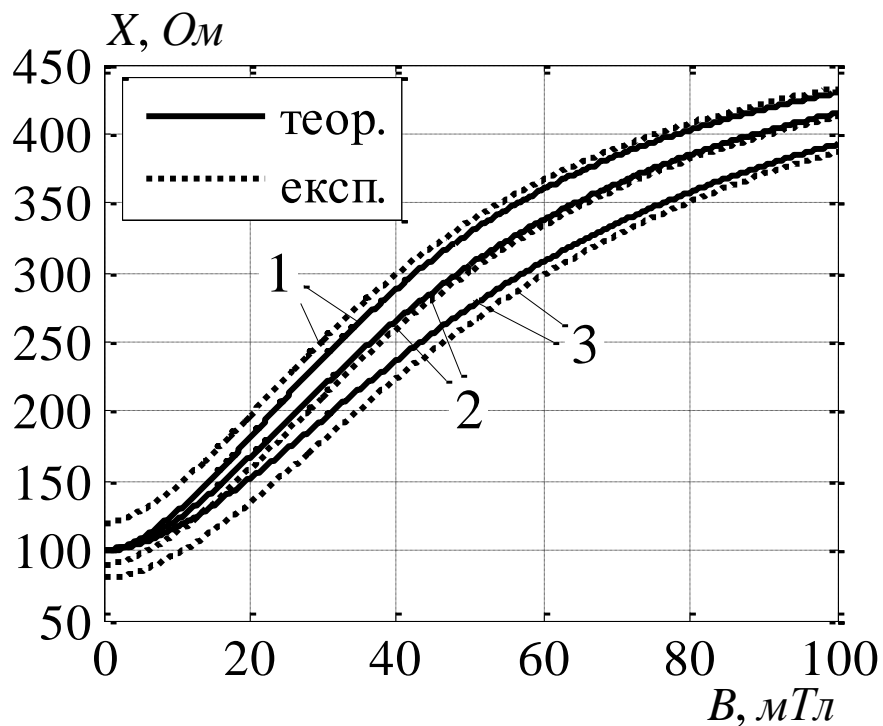
$y_{14} = y_{11} + y_{12} + y_{13}$, $y_{15} = y_3 + y_4 + y_5 + y_{10} - y_5^2 / (y_5 + y_6)$,

$$y_{16} = y_8 + y_9 + y_{10} + y_{11} - \frac{y_8^2}{y_7 + y_8} - \frac{y_{10}^2}{y_{15}} - \frac{y_{11}^2}{y_{14}}, \quad y_{17} = y_1 + y_2 + y_4 - \frac{y_4^2}{y_{15}} - \frac{y_4^2 y_{10}^2}{y_{15}^2 y_{16}}.$$

Згідно з (3.7) розраховані активна та реактивна складові повного опору двоколекторного магнітотранзистора при зміні магнітної індукції (рис. 3.2).



a



б

Рисунок 3.2 – Залежності активної (а) та реактивної (б) складових повного опору двоколекторного магніточутливого транзистора від індукції магнітного поля за напруг на колекторах $U_{CE1,2} = 2\text{ В}$ і напруги на базі: 1 – $U_{BE} = 1,6\text{ В}$; 2

$$- U_{BE} = 2\text{ В}; 3 - U_{BE} = 2,4\text{ В}$$

Чутливість активної складової досягає 7 Ом/мТл , реактивної – $5,2 \text{ Ом/мТл}$, що підтверджує можливість використання магнітореактивного ефекту в двоколекторних магніточутливих транзисторах для розроблення радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора

3.2 Математична модель радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора

Електрична схема радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора показана на рис. 3.3 та наведена в додатку Ж. Його магніточутливість обумовлена магнітореактивним ефектом, що впливає на вихідну частоту автогенератора, оскільки магнітотранзистор складає основу ємнісної складової коливального контуру.

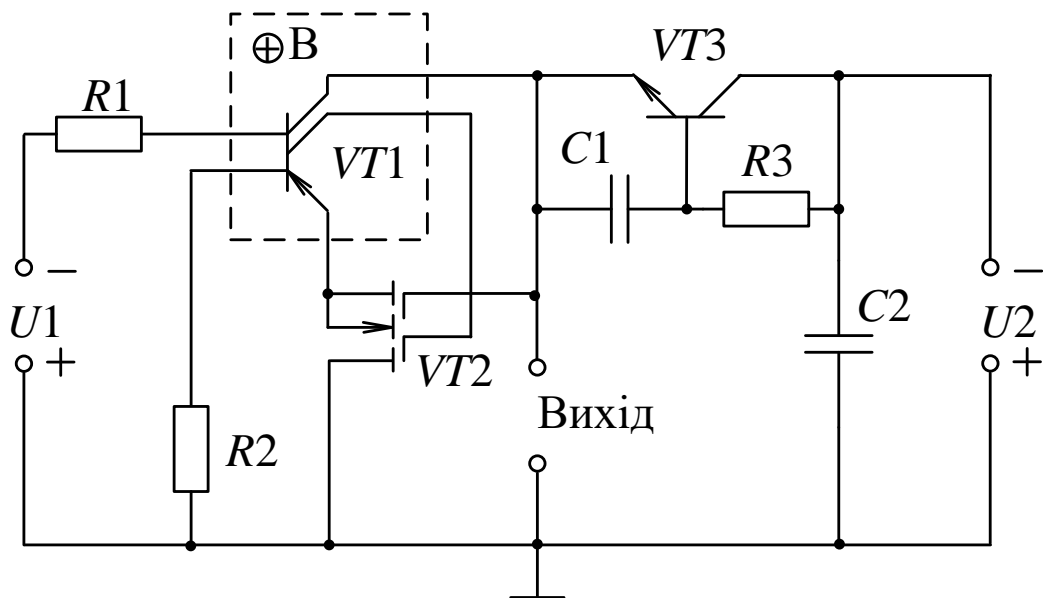


Рисунок 3.3 – Принципова електрична схема радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора

Пристрій працює наступним чином. В початковий момент часу магнітне поле не діє на двоколекторний магніточутливий транзистор VT_1 . Підвищенням

напруги першого U_1 і другого U_2 джерел постійної напруги, які виконують роль напруги керування і напруги живлення, відповідно, досягається таке їх значення, що на електродах перший колектор двоколекторного магнітотранзистора VT_1 і стік двозатворного МДН-транзистора VT_2 виникає від'ємний опір, який приводить до виникнення електричних коливань в контурі, який утворений паралельним включенням повного опору з ємнісною складовою на електродах перший колектор двоколекторного магнітотранзистора VT_1 і стік двозатворного МДН-транзистора VT_2 та повного опору з індуктивною складовою на електродах емітер – колектор біполярного транзистора VT_3 . За рахунок вибору постійної напруги живлення здійснюється лінеаризація функції перетворення радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора. Резистори R_1 та R_2 визначають режими живлення двоколекторного магнітотранзистора VT_1 та двозатворного МДН-транзистора VT_2 від джерел постійної напруги U_1 і U_2 . Ємність C_1 і резистор R_3 утворюють електричне коло з необхідним фазовим зсувом для здійснення повного опору з індуктивною складовою на електродах емітер – колектор біполярного транзистора VT_3 , тобто визначають індуктивність та добротність активного індуктивного елемента на основі біполярного транзистора VT_3 . Використання активного індуктивного елемента дозволяє виготовляти генераторний пристрій повністю в інтегральному вигляді та забезпечує можливість електричного регулювання індуктивності та добротності в широких діапазонах за рахунок зміни режиму електричного живлення. Друга ємність C_2 запобігає проходженню змінного струму через друге джерело постійної напруги U_2 . При наступній дії магнітного поля на двоколекторний магнітотранзистор VT_1 змінюється різниця напруга між його першим та другим колекторами, що викликає зміну ємнісної складової повного опору на електродах перший колектор двоколекторного магнітотранзистора VT_1 і стік двозатворного МДН-транзистора VT_2 , а це, в свою чергу, викликає зміну резонансної частоти коливального контуру, тобто відбувається модуляція

вихідного сигналу радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора індукцією магнітного поля.

Розроблена еквівалентна схема пристрою для постійного струму з урахуванням запропонованої моделі двоколекторного магнітотранзистора (див. рис. 3.1). Для опису параметрів транзистора $VT2$ введено такі позначення: R_{G1} і R_{G2} – опори першого та другого затворів; R_{GS1} і R_{GS2} – опори перший затвор – витік і другий затвор – витік; R_{DS1} і R_{DS2} , R_{D1S2} – опори стік – витік; R_{BB1} – опір підкладки; R_{D2} – опір стоку; R_{S1} – опір витоку; I_{BS1} – струм підкладка – витік; I_{BD1} та I_{BD2} – струми підкладка – стік; I_{DS1} та I_{DS2} – струми стік – витік. Транзистор $VT3$ поданий у вигляді послідовного з'єднання еквівалентного опору $R_{L\text{ екв}}$ та джерела струму $I_{L\text{ екв}}$.

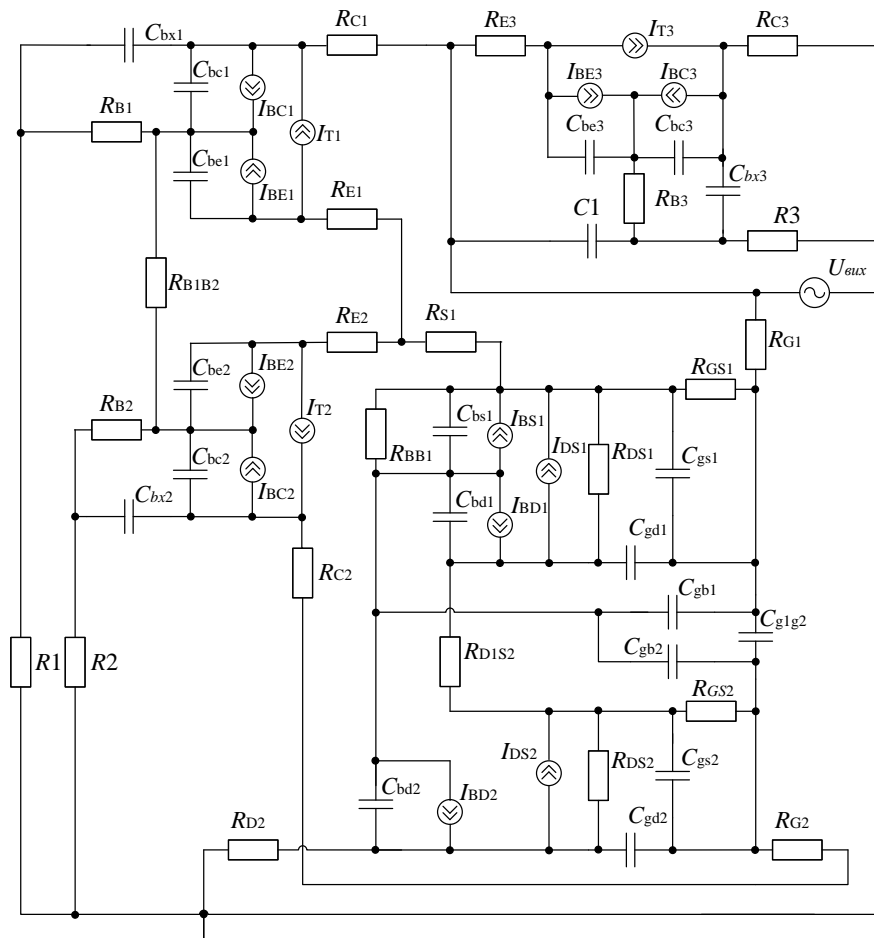


Рисунок 3.4 – Еквівалентна схема радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора для змінного струму

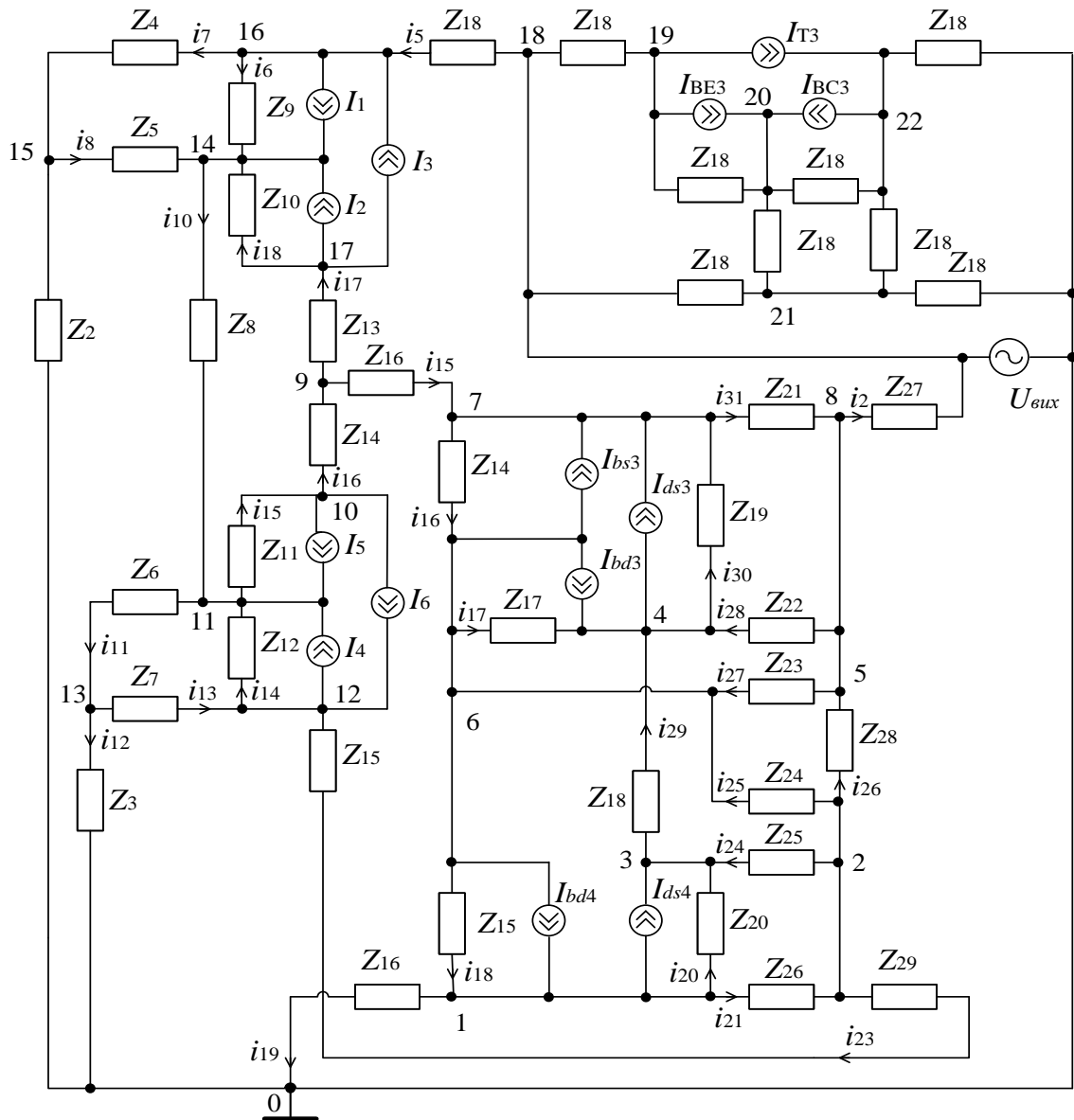


Рисунок 3.5 – Перетворена еквівалентна схема радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора для змінного струму

При розробці радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора, основою якого є автогенератор електричних коливань, важливим є визначення спадаючої ділянки ВАХ (ділянки з від'ємним диференційним опором) для правильного вибору робочої точки, тобто вибору оптимального режиму роботи та коефіцієнта корисної дії.

На основі еквівалентної схеми радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора отримано вираз для струму в колі живлення:

$$I_{жс} = I_5 y_1 y_{20}^{-1} - U_2 y_1 (1 + y_1 y_{20}^{-1}), \quad (3.8)$$

де використано такі позначення:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{BD2} - I_{DS2}, \quad I_2 = I_{DS2} + I_{T2} - I_{BC2} + I_1 y_7 / y_{16}, \quad I_3 = I_{BD1} - I_{DS1} + I_2 y_5 / y_{17}, \\ I_4 &= I_{DS1} - I_{BD2} - I_{BD1} - I_{BE2} - I_{T2} - I_{BE1} - I_{T1} + I_3 y_4 / y_{18}, \quad I_5 = I_{T1} - I_{BC1} + I_4 y_3 / y_{19}, \\ y_1 &= \frac{R_{C3} + R_{B3} + R_5}{(R_{B3} + R_5)(R_{C3} + R_{E3}) + R_{C3} + R_{E3}}, \quad y_2 = \frac{1}{R_{C1}}, \quad y_3 = \frac{1}{R_{G1} + R_{GS1}}, \quad y_4 = \frac{1}{R_{DS1}}, \\ y_5 &= \frac{1}{R_{DIS1}}, \quad y_6 = \frac{1}{R_{G1} + R_{GS1} + R_{C2}}, \quad y_7 = \frac{1}{R_{DS2}}, \quad y_8 = \frac{1}{R_{D2}}, \quad y_9 = \frac{1}{R_{BB2}}, \quad y_{10} = \frac{1}{R_{S1}}, \\ y_{11} &= \frac{1}{R_{E1}}, \quad y_{12} = \frac{1}{R_{E2}}, \quad y_{13} = \frac{1}{R_{B2} + R_2}, \quad y_{14} = \frac{1}{R_{B1B2}}, \quad y_{15} = \frac{1}{R_{B1} + R_1}, \quad y_{16} = y_7 + y_8, \\ y_{17} &= y_5 + y_7 - \frac{y_7^2}{y_{16}}, \quad y_{18} = y_4 + y_5 - \frac{y_5^2}{y_{17}}, \quad y_{19} = y_3 + y_4 - \frac{y_4^2}{y_{18}}, \quad y_{20} = y_1 + y_3 - \frac{y_3^2}{y_{19}}. \end{aligned}$$

Графічні представлення ВАХ радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора наведено на рис. 3.6. Як бачимо, на зростаючій ділянці ВАХ сила струму відрізняється несуттєво. Спадна ділянка ВАХ визначає діапазон утворення генерації коливальних у транзисторній структурі з від'ємним диференціальним опором. Робоча точка обирається посередині спадної ділянки ВАХ.

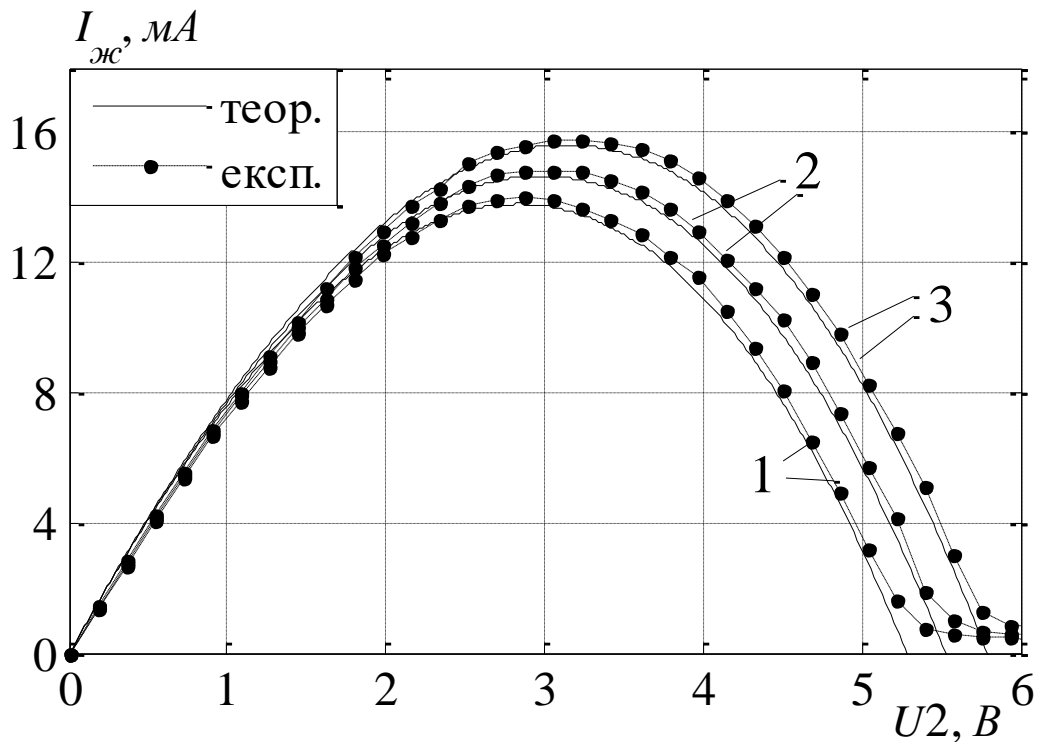


Рисунок 3.6 – ВАХ радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора за напруг керування:

1 – 1,2 В; 2 – 1,4 В; 3 – 1,6 В

При збільшенні напруги керування ділянка від'ємного диференційного опору розширюється: за напруги керування 1,2 В від'ємний диференційний опір існує в діапазоні напруги живлення 3–5,1 В, а за напруги керування 1,6 В – в діапазоні 3,2– 5,8 В. З іншого боку, при подальшому збільшенні напруги керування середина ділянки з від'ємним диференціальним опором зміщується в напрямку вищих напруг живлення. Тому доцільно вибрати напругу керування 1,6 В.

Функція перетворення та чутливість є основними характеристиками радіовимірювальних частотних перетворювачів 26. Їх розрахунок передбачає розроблення математичної моделі на основі залежностей параметрів елементів еквівалентної схеми автогенератора для змінного струму від магнітної індукції. Для опису параметрів транзистора VT2 при роботі в колі змінного струму

введено такі позначення: C_{gb1} і C_{gb2} – ємності перший затвор – підкладка і другий затвор – підкладка; C_{gd1} і C_{gd2} – ємності перший затвор – стік і другий затвор – стік; C_{gs1} і C_{gs2} – ємності перший затвор – витік і другий затвор – витік; C_{bs1} – ємність підкладка – витік; C_{bd1} і C_{bd2} – ємності підкладка – стік; C_{g1g2} – ємність між першим та другим затвором; для транзистора $VT3$: R_{B3} , R_{C3} , R_{E3} – опори бази, колектора та емітера, відповідно; C_{bx3} – ємність між зовнішнім виводом бази та колектора; C_{bc3} – ємність переходу база – колектор; C_{be3} – ємність переходу база – емітер; I_{BC3} , I_{BE3} та I_{T3} – струми база – колектор, база – емітер і колектор – емітер.

Розрахунок індуктивності та добротності елемента на основі біполярного транзистора з фазозсувним колом проведено за методикою, яка описана в роботі [8].

Функція перетворення радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора розраховується за виразом

$$f_0 = \frac{R_{emp}(B)}{L_{екв}} \sqrt{\frac{R_0^{(-)}(B)C_{екв}(B)}{L_{екв}} - 1}, \quad (3.9)$$

при чому

$$R_{emp.}(B) = R_{emp.0} + 2 \left(R_{B0} + \frac{kT}{qI_0} e^{\frac{qU_{E0}}{kT}} \right) c\mu_p^2 B^2;$$

$$R_{emp.0} = R1 + R2 + R3 + (R_{B1} + R_{B2} + R_{E1} + R_{E2})_{B=0} + R_{B1B2} + R_{C1} + R_{C2} +$$

$$+ R_{S3} + R_{BB3} + R_{DS3} + R_{DS4} + R_{D3S4} + R_{D4} + R_{G3} + R_{G4} + R_{B3} + R_{C3} +$$

$$+ R_{E3} + R_{(C1)} + R_{(C2)}.$$

Теоретична та експериментальна функція перетворення наведені на рис. 3.7.

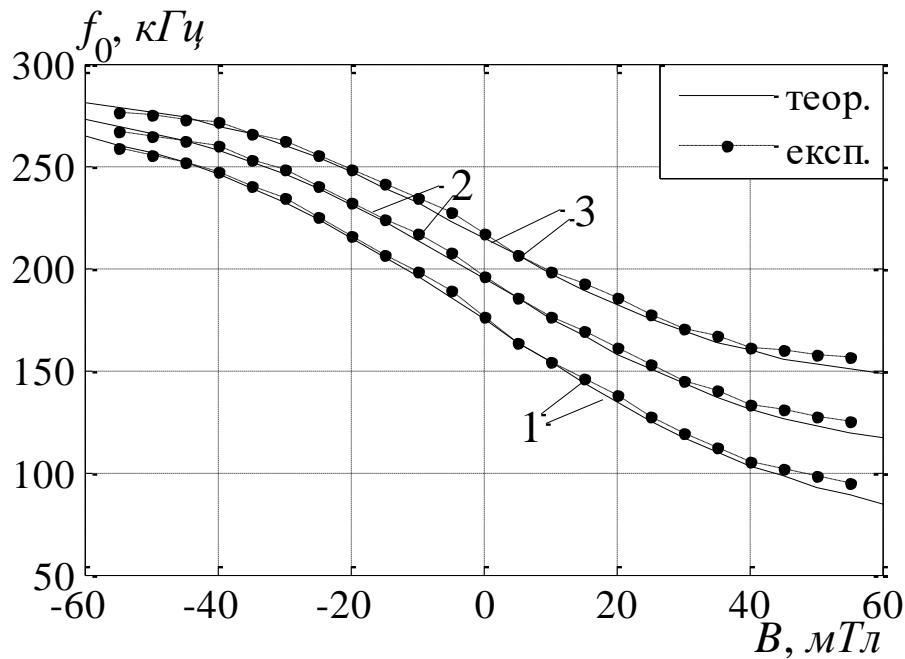


Рисунок 3.7 – Теоретична та експериментальна функція перетворення радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора за напруги керування $U1 = 1,6 \text{ В}$ і напруги живлення: 1 – $U2 = 4,6 \text{ В}$; 2 – $U2 = 5 \text{ В}$; 3 – $U2 = 5,4 \text{ В}$

Резонансна частота коливального контуру за напруги керування $1,6 \text{ В}$ та напруги живлення 5 В внаслідок дії магнітного поля індукцією від мінус 60 мТл до 60 мТл змінюється від $267,4 \text{ кГц}$ до $125,5 \text{ кГц}$.

Чутливість розробленого радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора:

$$S_B^{F_0} = \frac{\partial F_0}{\partial B} = \frac{4 \left(R_{B0} + \frac{kT}{qI_0} e^{\frac{qU_{E0}}{kT}} \right) c\mu_p^2 B}{L_{екв}} \sqrt{\frac{R_{\delta}^{(-)}(B)C_{екв}(B)}{L_{екв}} - 1} + \frac{R_{гмп}(B)R_{\delta}^{(-)}(B)}{L_{екв}^2} \times (3.10)$$

$$\times \left(C_{екв}(B) \frac{\partial R_{\delta}^{(-)}(B)}{\partial B} + \frac{R_{\delta}^{(-)}(B)}{2} \cdot \frac{\partial C_{екв}(B)}{\partial B} \right) \Big/ \sqrt{\frac{R_{\delta}^{(-)}(B)C_{екв}(B)}{L_{екв}} - 1}.$$

На рис. 3.8 представлено залежність чутливості, розрахованої за виразом (3.10) від індукції магнітного поля.

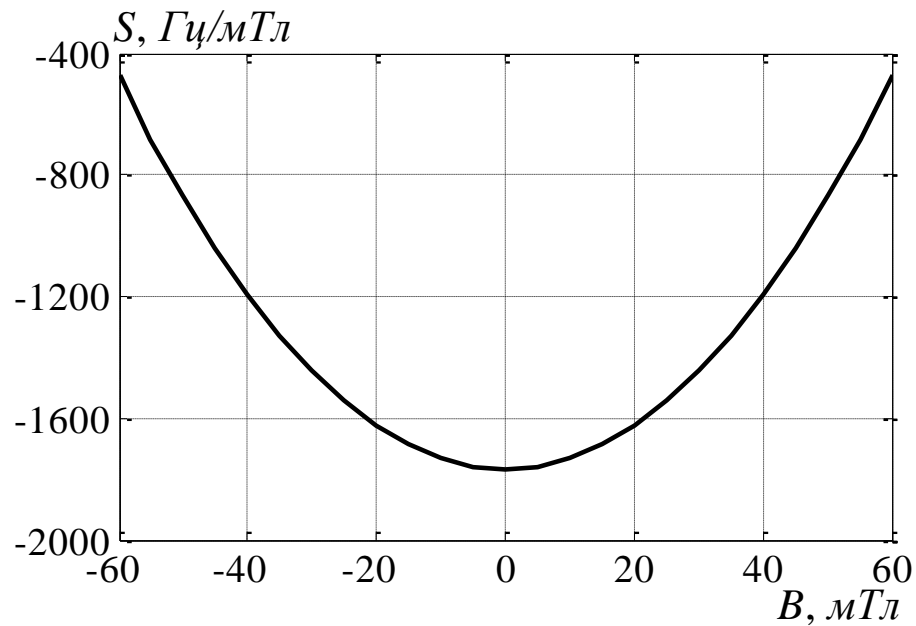


Рисунок 3.8 – Залежність чутливості радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора від магнітної індукції

Чутливість розробленого радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора знаходиться в діапазоні від 470 Гц/мТл до 1770 Гц/мТл , якщо значення модуля індукції магнітного поля не перевищує 60 мТл .

На вихідну частоту радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора впливає не лише магнітне поле, а й інші величини. Найбільші похибки вимірювання вносить вплив температури і зміни напруги живлення на процес генерації. Результати дослідження залежності частоти генерації від напруги живлення і температури.

Проведено моделювання радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора за допомогою програми PSpice пакету прикладних програм OrCAD Family Release 9.2. Змодельована схема, отримані вольт-амперні та температурні характеристики наведено на рис. 3.9 – 3.12. Результати схемотехнічного моделювання збігаються з

результатами розрахунку на основі запропонованої математичної моделі та експериментальних досліджень.

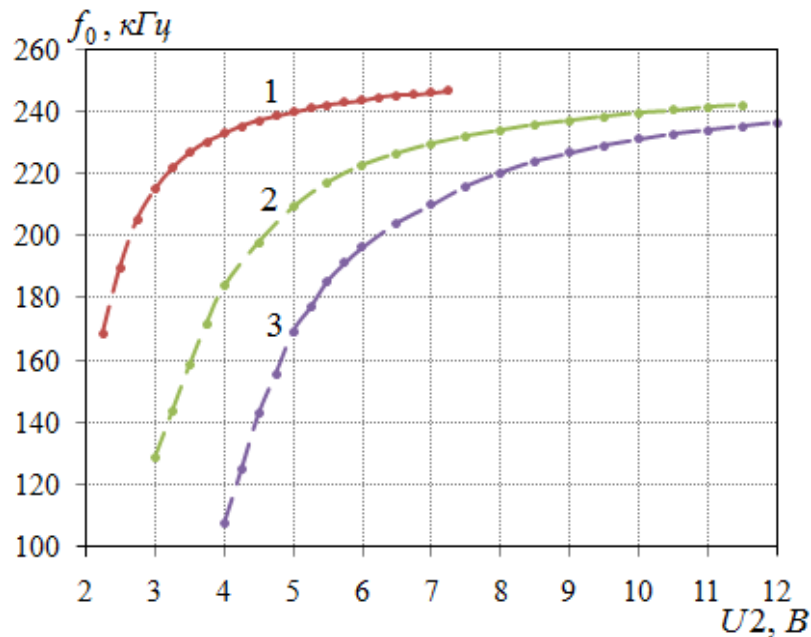


Рисунок 3.9 – Залежність частоти радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора від напруги живлення за напруги керування: 1 – $U_1 = 1,3 \text{ В}$; 2 – $U_1 = 1,6 \text{ В}$; 3 – $U_1 = 1,9 \text{ В}$

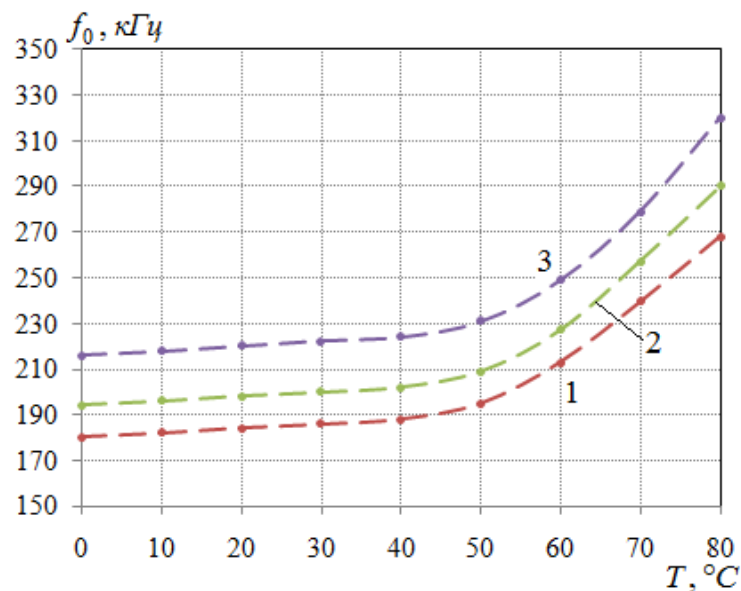


Рисунок 3.10 – Залежність частоти радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора від температури за напруги керування $U_1 = 1,6 \text{ В}$ і напруги живлення: 1 – $U_2 = 4,6 \text{ В}$; 2 – $U_2 = 5 \text{ В}$; 3 – $U_2 = 5,4 \text{ В}$

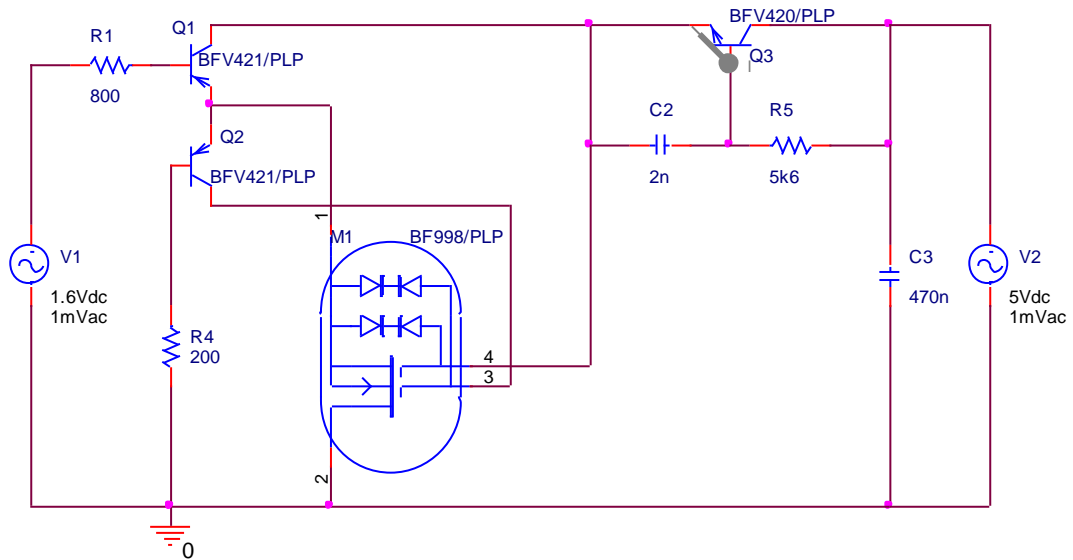


Рисунок 3.11 – Схема радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора у програмі OrCAD Capture 9.2

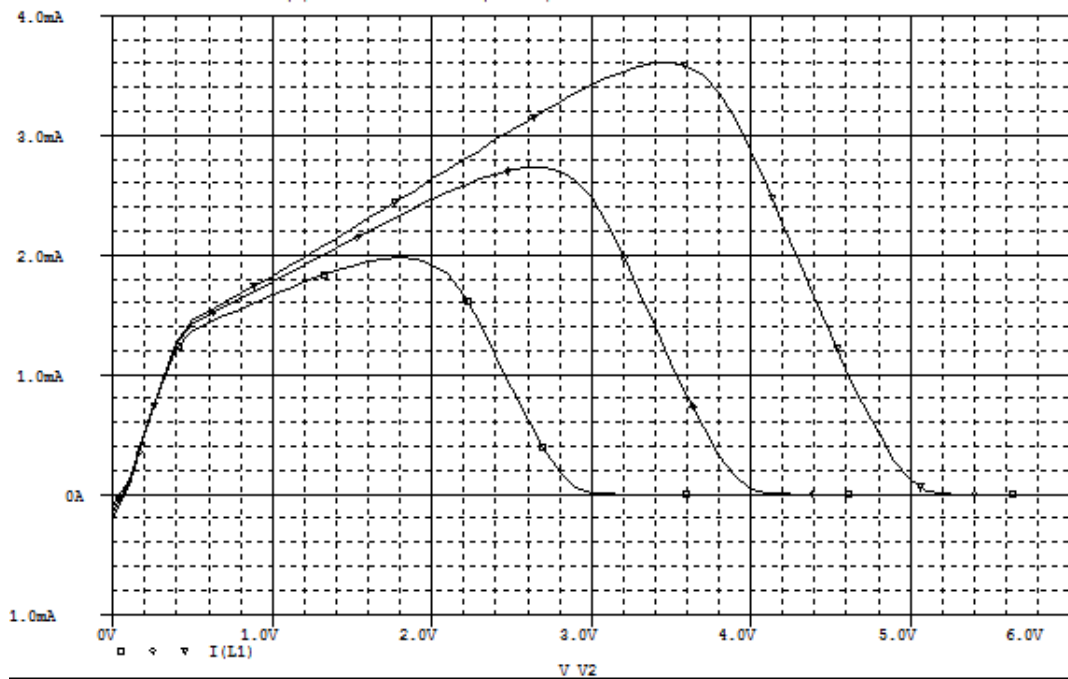


Рисунок 3.12 – Вольт-амперні характеристики радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора у програмі OrCAD Capture 9.2

Використовуючи вираз (3.9), розраховано значення тривалості перехідного процесу в радіовимірювальному перетворювачі кутових положень

на основі магніточутливого транзистора, що складає 5,1 мкс. Отримані значення тривалості перехідного процесу дають змогу оцінити інерційність автогенераторних пристроїв, що можна використати при розрахунку динамічних похибок вимірювання кутових положень за запропонованим методом.

3.3 Чутливість радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора

Чутливість аналогових вимірювальних перетворювачів розраховується як зміна вихідної напруги при зміні вхідної величини, тоді як інформативним параметром вихідного сигналу автогенераторних пристроїв є частота. Ця особливість ускладнює порівняння чутливості розроблених пристроїв із відомими. Тому доцільно скористатися поняттям розрядності вихідного коду, що застосовується для оцінювання чутливості цифрових засобів вимірювань.

Наприклад, магнітний енкодер AS5048 [62] має розрядність вихідного коду 14 біт, тобто 16384 точки на повний оберт, або $0,0219^\circ/LSB$ (*LSB – Least Significant Bit*, одиниця молодшого розряду).

Залежності чутливості автогенераторних пристроїв на основі двоколекторних магніточутливих транзисторів, що здійснюють перетворення синусної та косинусної складових магнітної індукції у частотні сигнали, від кутового положення наведена на рис. 3.13. Чутливість розрахована із врахуванням залежностей магнітної індукції від кутового положення і частоти генерації від магнітної індукції.

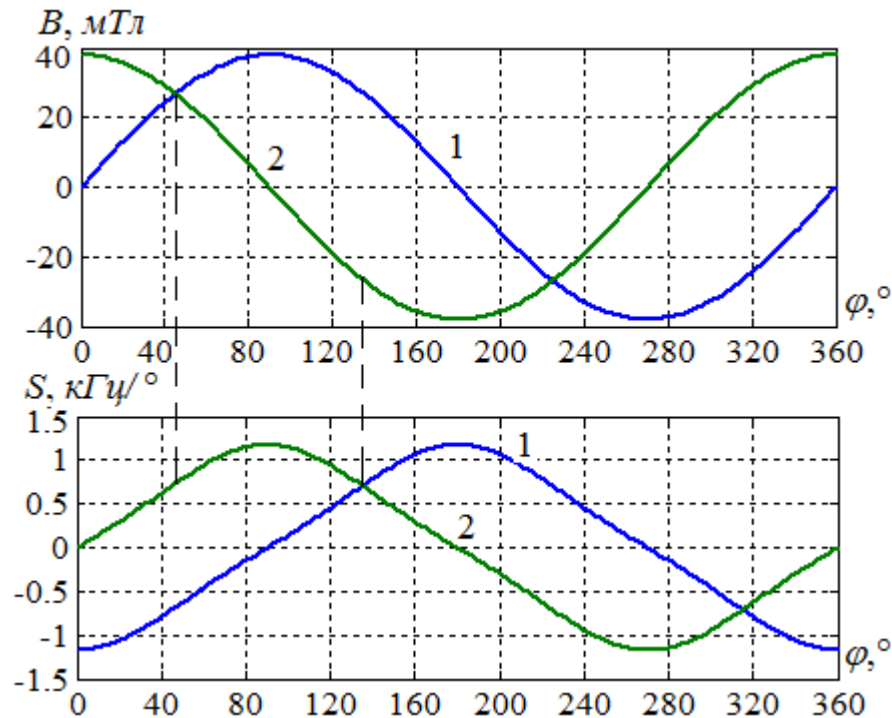


Рисунок 3.13 – Залежність чутливості радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора на основі двоколекторного магнітотранзистора від кутового положення:

1 – синусна складова, 2 – косинусна складова

Оскільки при розрахунку значення кутового положення за запропонованим методом використовується функція арктангенса, то основну роль відіграє чутливість на ділянці лінійної залежності магнітної індукції від кута, (на рис. 3.19 виділена одна з таких ділянок штриховими лініями).

Чутливість перетворення кутового положення в частоту за допомогою автогенераторних пристроїв на основі двоколекторних магнітотранзисторів змінюється від $710 \text{ Гц}/^\circ$ до $1174 \text{ Гц}/^\circ$ на лінійній ділянці магнітної індукції. При цьому не враховано вплив іншої складової магнітної індукції, чутливість якої нижча, але також впливає на вихідне значення кутового положення.

Середня чутливість радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора на основі двоколекторного магнітотранзистора складає $940 \text{ Гц}/^\circ$, тому, приймаючи за одиницю

молодшого розряду 10 Гц , отримаємо 33840 точок на один оберт, що у два рази більше, ніж у сенсора, розглянутого вище.

3.4 Висновки до розділу

Теоретично встановлено і підтверджено залежність реактивних властивостей двоколекторних магнітотранзисторів від індукції магнітного поля, що дозволило використати їх для побудови автогенераторних пристроїв. Чутливість активної складової повного опору двостокового транзистора складає Абсолютна чутливість активної складової повного опору знаходиться в діапазоні від $0,13 \text{ Ом/мТл}$ до $0,23 \text{ Ом/мТл}$, а реактивної – до 5 Ом/мТл . Чутливість активної складової повного опору двоколекторного магнітотранзистора досягає 7 Ом/мТл , реактивної – $5,2 \text{ Ом/мТл}$. Отримані результати підтверджують можливість використання магнітореактивного ефекту в магніточутливих транзисторах для розроблення автогенераторних пристроїв, чутливих до дії магнітного поля.

4 РОЗРОБЛЕННЯ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИЛАДУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ КУТОВИХ ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Здійснення запропонованого методу вимірювального контролю передбачає використання наведених у попередніх розділах результатів теоретичних та експериментальних досліджень для побудови радіовимірювальних перетворювачів вимірювального контролю куткових положень на основі магніточутливих транзисторів.

Цей розділ присвячено розробленню структурної схеми радіовимірювального приладу вимірювального контролю куткових положень, схемотехнічних та програмних рішень, а також дослідженню параметрів пристрою, оцінюванню його метрологічних характеристик.

4.1 Розроблення структурної схеми радіовимірювального приладу вимірювального контролю куткових положень

Запропонований метод вимірювального контролю куткових положень базується на вимірюванні синусної та косинусної складових індукції магнітного поля, створених магнітом із діаметральним намагніченням. У розділі 3 наведені результати досліджень автогенераторних пристроїв в діапазоні магнітної індукції від мінус 60 мТл до 60 мТл. Вказаний діапазон є максимальним для засобів вимірювального контролю куткових положень. Як правило, амплітудні значення магнітної індукції не перевищують 35 – 45 мТл. Тому надалі розглядається робочий діапазон значень магнітної індукції – від мінус 40 мТл до 40 мТл.

Якщо вимірювання синусної та косинусної складових індукції магнітного поля виконують автогенераторні пристрої на основі двоколекторних магнітотранзисторів, доцільно вибрати магнітну систему на базі двох чутливих

елементів, розташованих під кутом 90° . Як було показано у розділі 3, частота генерації радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора в діапазоні магнітної індукції від -40 мТл до 40 мТл змінюється від $259,4$ кГц до $133,5$ кГц, тобто частота, яка відповідає зміні напрямку вимірюваної складової магнітної індукції на протилежний, одного порядку з амплітудним значенням частоти. Це означає, що немає необхідності застосовувати гетеродинування частотного сигналу [73] для підвищення відносної чутливості перетворення «магнітна індукція – частота» і зменшення похибки вимірювання частоти за методом дискретного рахунку.

Блок-схему радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень з використанням розроблених автогенераторних пристроїв на основі двоколекторних магнітотранзисторів наведено на рис. 4.1 та наведена в додатку К.

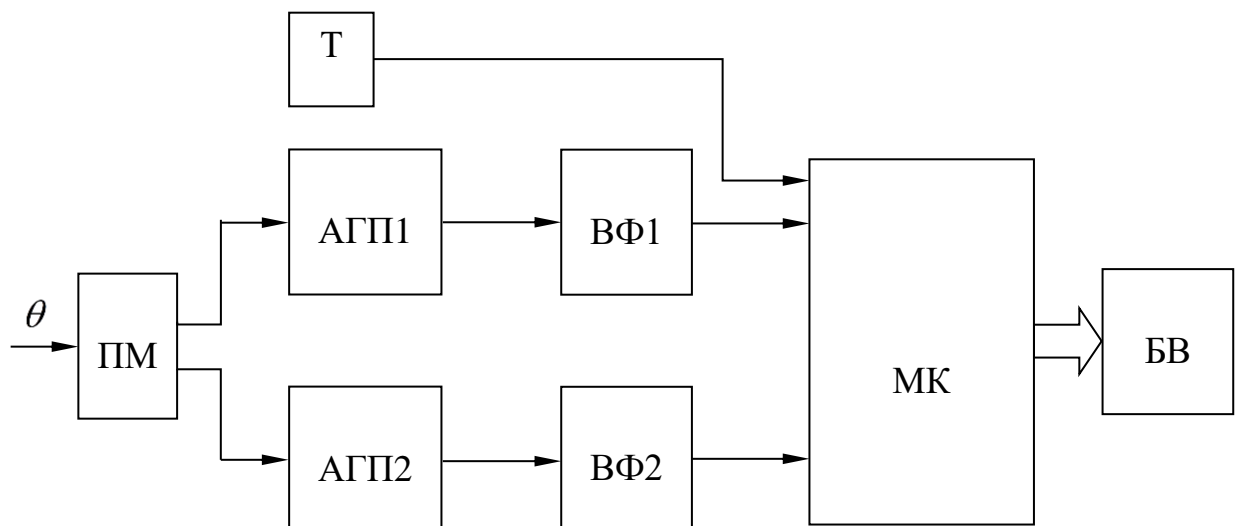


Рисунок 4.1 – Блок-схема радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень з використанням розроблених автогенераторних пристроїв на основі двоколекторних магніточутливих транзисторів

На схемі введено такі позначення: ПМ – постійний магніт, закріплений на валу контрольованого об'єкта; АГП1 та АГП2 – автогенераторні пристрої на основі магнітотранзисторів, які чутливі до зміни векторів магнітної індукції в точках, що відповідають кутовим положенням 0° і 90° ; ВФ1 та ВФ2 – вхідні формувачі, які забезпечують перетворення сигналу до вигляду, рівень і форма якого відповідають вимогам до сигналів на цифрових входах мікроконтролера; МК – мікроконтролер; БВ – блок виведення результатів вимірювального вимірювального контролю; Т – сенсор температури.

Пристрій працює наступним чином. Діаметрально намагнічений магніт співвісно з'єднаний із валом, кут повороту якого підлягає вимірювального контролю. При цьому створюється магнітне поле, індукція якого в кожній точці простору залежить від кутової координати за законом синуса. При обертанні валу навколо спільної з магнітом осі з'являється фазовий зсув магнітного поля від нульової мітки. В точках, що відповідають кутовим положенням 0° та 90° , розташовані два автогенераторних пристрої на основі двоколекторних магнітотранзисторів. Відповідно, АГП1 та АГП2 реагують на зміну синусної та косинусної складових магнітного поля. Частота сигналу на їх виході однозначно пов'язана зі значенням магнітної індукції. Вхідні формувачі ВФ1 та ВФ2 перетворюють гармонічний сигнал із виходів автогенераторних пристроїв в однополярну напругу з рівнем $5V$ та частотою, що дорівнює частоті гармонічного сигналу.

Оброблення сигналів сенсорів часто організовують із використанням універсальних систем на базі промислових комп'ютерів чи апаратно-програмних комплексів, проте такі системи дорогі (оскільки вони багатофункціональні), складні для обслуговування і в даному випадку є надлишковими. А мікроконтролерні прилади малогабаритні, мають низьку вартість і споживану потужність при забезпеченні високих технічних показників [77].

Тому вимірювання частот реалізовано за допомогою мікроконтролера – пристрою, в якому інтегровано потужний процесор, оперативну та постійну пам'ять, а також набір додаткових периферійних пристроїв. Перевагами такого технічного рішення є простота схеми, економічність та можливість безпосереднього виконання оброблення вимірюваної частоти.

Мікроконтролер виконує перетворення вимірюваних значень частот спочатку в значення магнітної індукції шляхом використання однієї із сімейства заданих характеристик автогенераторних пристроїв на основі двоколекторних транзисторів, а потім і в значення вимірюваного кутового положення згідно із запропонованим методом. Після цього здійснюється порівняння отриманого кутового положення із нормованим значенням та виведення результатів.

Розроблення засобів вимірювального контролю кутових положень на основі двоколекторного магнітотранзисторів потребує дещо інших підходів, ніж були застосовані для засобів на основі двоколекторних транзисторів. Це пояснюється отриманими у розділі 3 теоретичними та експериментальними результатами: частота генерації радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора на основі двоколекторного магнітотранзистора в діапазоні магнітної індукції від -40 мТл до 40 мТл (що відповідає діапазону зміни магнітної індукції поля постійного магніту) змінюється від $496,6$ кГц до $545,4$ кГц, тобто амплітудне значення частоти на порядок менше, ніж частота генерації на межі зміни напрямку вимірюваної складової магнітної індукції на протилежній. Безпосереднє вимірювання такого частотного сигналу та його оброблення є недоцільними, потрібно здійснювати перенесення спектру вимірюваного сигналу на нижчі частоти.

Це зумовлює доцільність вибору магнітних систем із чотирма чутливими елементами, що потребують виконання певних операцій над частотними сигналами перед їх надходженням на вимірювальний блок: знаходження різниці двох синусних і двох косинусних складових, при чому зсув фаз в обох парах дорівнює 180° . Оскільки частота сигналу не може набувати від'ємних значень,

перед відніманням потрібно здійснювати перенесення спектру одного із сигналів на деяке значення частоти, тобто створювати зміщення різницевої частоти відносно нуля за допомогою гетеродину [78]. Водночас, в такому випадку з'являється можливість підвищення стійкості показів при розсуміщенні осей магніту та вимірювальної системи за рахунок використання чотирьох чутливих елементів з мінімальним ускладненням схеми вимірювання.

Блок-схему пристрою вимірювального контролю кутових положень на основі двоколекторних магнітотранзисторів показано на рис. 4.2 та наведена в додатку Л, де використано такі самі позначення, як і в схемі на рис. 4.1, а також: АГП3, АГП4 – автогенераторні пристрої на основі двостокових магнітотранзисторів, що чутливі до зміни векторів магнітної індукції в точках, що відповідають кутовим положенням 180° та 270° ; ППЧ1, ППЧ2 – підвищувальні перетворювачі частоти; ПВЧ1, ПВЧ2 – пристрої віднімання частоти. Пристрій на основі двоколекторних магнітотранзисторів працює за тим самим методом, що й пристрій на основі двоколекторних транзисторів, різниця полягає лише у попередній обробці сигналів та функції перетворення для обчислення кутів.

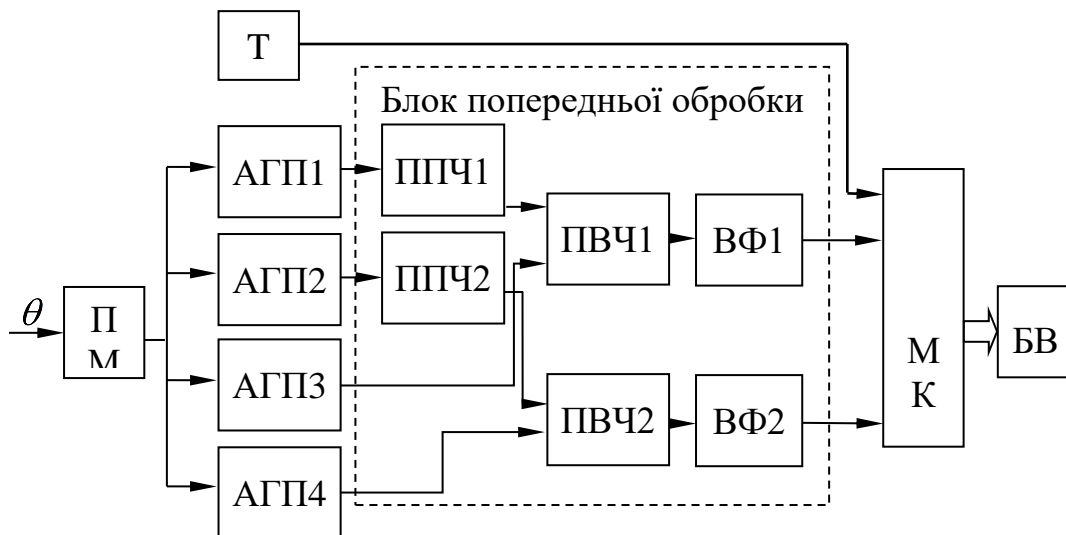


Рисунок 4.2 – Блок-схема радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень на основі двоколекторних магніточутливих транзисторів

В точках, що відповідають кутовим положенням 0° , 90° , 180° , 270° розташовані чотири автогенераторних пристрої на основі двоколекторних магнітотранзисторів. Відповідно, АГП1–АГП4 реагують на зміну синусної та косинусної складових магнітного поля.

Вихідні частотні сигнали з АГП1 та АГП2 надходять на підвищувальні перетворювачі частоти для перенесення їх спектру на певне значення частоти, що повинно бути більшим, ніж подвоєне амплітудне значення. На виходах пристроїв віднімання частот ПВЧ1 та ПВЧ2 присутні сигнали, значення частот яких дорівнює різниці вхідних частот без врахування її знаку. Зменшення частоти сигналу на одному автогенераторному пристрої через зсув магніту в горизонтальній площині компенсується зростанням частоти сигналу на протилежному, а на різницю частот це суттєво не впливає (похибка з'являється лише через нелінійну залежність частоти від магнітної індукції). На вхідні формувачі ВФ1 та ВФ2 надходять частотні сигнали, зміщення частот яких одного порядку із амплітудним значенням. Мікроконтролер виконує ті самі операції, що й у засобі, схема якого була наведена на рис. 4.1.

4.2 Схемотехнічна та програмна реалізація засобів вимірювального контролю кутових положень

Принципова електрична схема пристрою вимірювального контролю кутових положень на основі двоколекторних магніточутливих транзисторів зображена на рис. 4.3 та наведена в додатку М. Перший генераторний пристрій реалізований на транзисторах VT1, VT2 та VT5, резисторах R1, R2, R5, R7 та конденсаторах C1, C5, а другий – на транзисторах VT3, VT4 та VT6, резисторах R3, R4, R6, R8 та конденсаторах C2, C6.

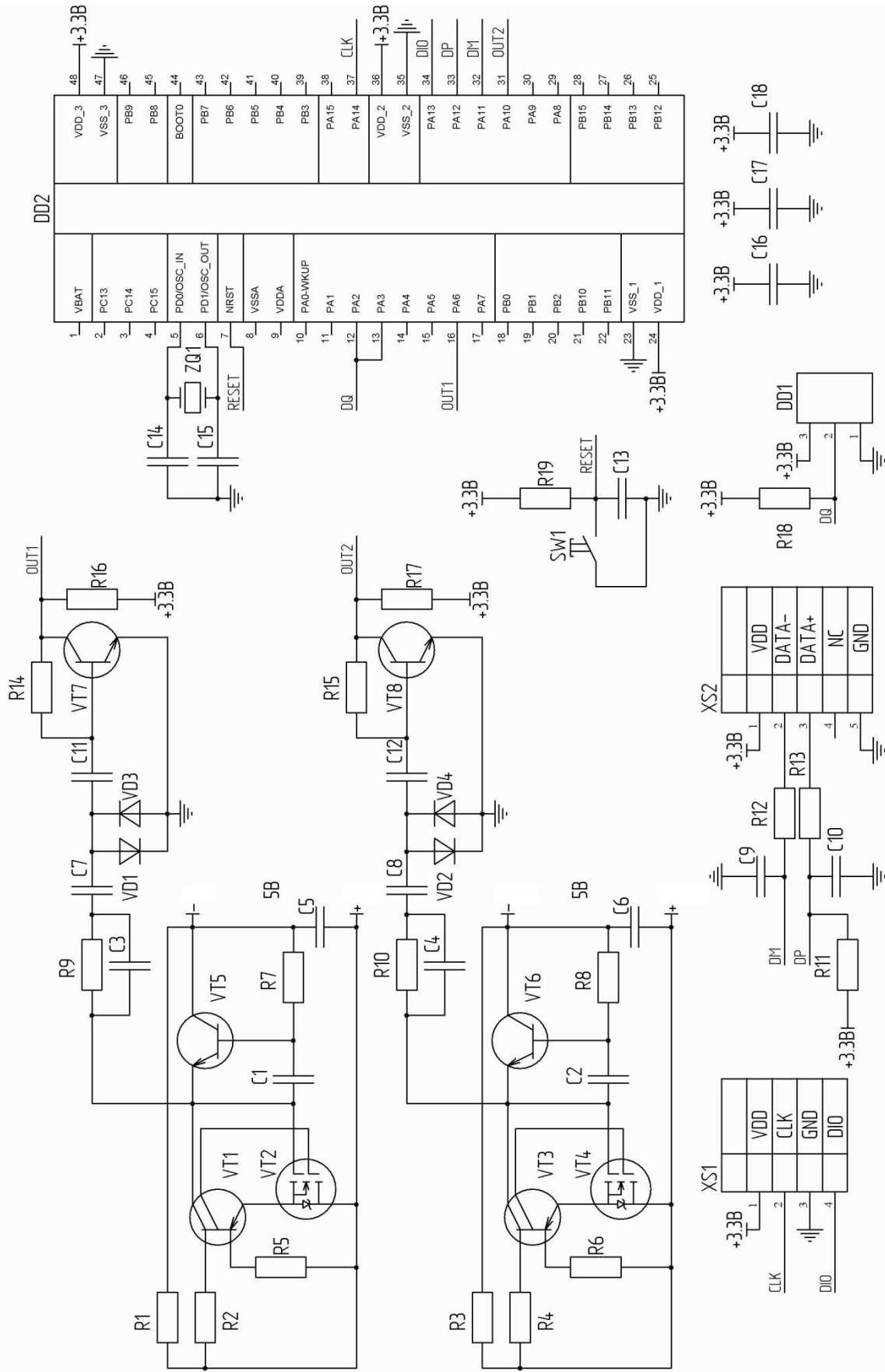


Рисунок 4.3 – Принципова електрична схема радіовимірювального приладу контролю кутових положень

Важливе значення мають вхідні формувачі, призначені для отримання рівня і форми сигналу, достатніх для стабільного вимірювання частоти за допомогою мікроконтролера. Вхідний формувач усуває постійну складову сигналу (точніше, перетворює його на однополярний), регулює амплітуду (підсилює або послаблює), перетворює сигнал синусоїдальної форми на прямокутний. Формувач не повинен працювати як шунт, тому його вхідний опір має бути високим, а вхідна ємність – малою. Крім того, сформований на виході сигнал не повинен містити паразитних імпульсів, які збільшують похибку вимірювання частоти [79].

Вхідний формувач першого радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора на основі двоколекторного транзистора виконаний на транзисторі VT7, діодах VD1 та VD3, конденсаторах C3, C7, C11, резисторах R9, R14, R16, а формувач другого – на транзисторі VT8, діодах VD2 та VD4, конденсаторах C4, C8, C12, резисторах R10, R15, R17.

Поріг чутливості вхідного формувача – 50 мВ , вхідний опір – 8 кОм , діапазон частоти – від 10 Гц до 400 МГц , максимальна амплітуда вхідного сигналу – 30 В .

Основою схеми оброблення частотних сигналів автогенераторних пристроїв на основі магніточутливих транзисторів є мікроконтролер (МК), тому його вибір є важливим питанням. Потрібно враховувати вартість МК (для отримання недорогого приладу в цілому), але він повинен задовольняти, в першу чергу, вимоги до технічних характеристик: потужності, надійності, об'єму пам'яті, наявності потрібних периферійних блоків тощо.

Для пристрою вимірювального контролю кутових положень вибрано 32-розрядні МК STM32. Перевагами даних МК є не лише 32-розрядність ядра (на відміну від AVR і PIC) і висока швидкодія, а й наявність бібліотеки периферійних пристроїв, яка дозволяє швидко створювати програмне забезпечення розроблених засобів.

Лінійка контролерів STM32 має багато варіантів їх внутрішнього наповнення вбудованою периферією, від чого залежить і вартість МК [80]. Враховуючи низьку вартість та потрібні технічні характеристики, для засобів вимірювального контролю кутових положень обрано МК STM32F103C8T6 на ядрі Cortex-M3, який має тактову частоту до 72 МГц, 128 Кбайт флеш-пам'яті, 20 Кбайт SRAM (оперативної пам'яті), 37 портів введення-виведення, 3 таймери загального призначення і 1 спеціальний таймер, інтерфейси I²C, USART, SPI, CAN, USB 2.0 тощо [81].

Вимірювання частот сигналів здійснюється за методом дискретного зворотного рахунку (кількість значень для усереднення обирається з урахуванням діапазону частот та допустимої похибки вимірювання частоти).

Для вимірювання частоти автогенераторних пристроїв на основі двоколекторних транзисторів можуть використовуватися чотири 16-розрядних таймери (*Advanced-control timer* TIM1 – таймер спеціального призначення, *General-purpose timers* TIM2, TIM3, TIM4 – таймери загального призначення), які мають спеціальний режим роботи Input Capture (захоплення вхідних імпульсів). У даному режимі виявлення зміни рівня сигналу на вході мікроконтролера приводить до копіювання вмісту лічильного регістра таймера у спеціальний регістр захоплення, заповнення якого може викликати або переривання, або запит прямого доступу до пам'яті. Це дозволяє виміряти період вхідного сигналу (для низьких з точки зору МК частот) або синхронізувати початок вимірювання із фронтом сигналу вхідної частоти (для вимірювання вищих частот за методом дискретного рахунку).

Зовнішній сигнал слід подавати на вивід МК, що є одним із каналів таймера, а також провести ініціалізацію відповідного виводу та самого таймера. Налаштування таймера складається з таких кроків:

- 1) вибір активного входу: регістр захоплення TIMx_CCR1 повинен бути пов'язаний із входом TI1, тому в розряди CC1S регістра TIMx_CCMR1 потрібно записати «01»; коли значення CC1S буде відрізнятися від «00», канал

конфігурується як вхід, і регістр TIMx_CCR1 стає доступним лише для читання;

2) програмування тривалості дії вхідного фільтра залежно від параметрів сигналу, який надходить на ТП1 (задається в розрядах IC1F регістра TIMx_CCMR1);

3) вибір активного фронту імпульсу: вибір переднього або заднього фронту імпульсу на вході ТП1, при появі якого спрацьовує захоплення сигналу, здійснюється шляхом запису потрібного значення в розряд CC1P регістра TIMx_CCER;

4) програмування вхідного діляника: якщо захоплення сигналу виконується при кожному зафіксованому фронті імпульсу, тобто коефіцієнт ділення дорівнює 1, в розряди IC1PS регістра TIMx_CCMR1 слід записати «00»; можна зберігати вміст лічильника, що відповідає кожному другому, кожному четвертому або кожному восьмому імпульсу;

5) дозвіл захоплення: потрібно встановити біт CC1E в регістрі TIMx_CCER;

6) дозвіл запиту DMA (прямого доступу до пам'яті) – встановлення біта CC1DE в регістрі TIMx_DIER.

Подія захоплення полягає в тому, що в момент, коли воно відбувається, вміст лічильника таймера переноситься у спеціальний 16-розрядний регістр TIMx_CCR1. Потім, залежно від біта CC1DE, генерується запит DMA. Тому режим захоплення на інші функції таймера не впливає. При проведенні точних вимірювань слід врахувати, що між захопленням і копіюванням лічильного регістра є затримка тривалістю кілька тактів (захоплення відбувається синхронно з тактовим сигналом, тому розкид може становити один такт).

Налаштування блока DMA здійснюється через регістр DMA_CCRx (x – номер каналу). Спочатку задаються прямі адреси в просторі пам'яті, для чого призначені два регістри: DMA_CPARx (базова адреса периферії) і DMA_CMARx (базова адреса пам'яті). Потім задається загальна кількість даних

(кількість транзакцій) через регістр DMA_CNTDRx (по суті, це лічильник з початковим значенням, яке декрементується на одиницю після кожного пересилання даних). Також зазначаються інші параметри: рівні пріоритету каналів, напрямок передавання даних, звичайний чи циклічний режим роботи, розмірність даних периферії та пам'яті, режим інкремента адрес периферії та пам'яті (значення інкремента адреси обчислюється автоматично, залежно від розмірностей даних джерела та одержувача), режим пам'ять – пам'ять. Після всіх налаштувань, канал DMA можна активувати встановленням біта EN у регістрі DMA_CCRx.

Перший вимірюваний сигнал надходить на вхід першого каналу таймера TIM3, а другий – на вхід першого каналу таймера TIM4. Після захоплення імпульсу першого вимірюваного сигналу вміст регістра TIM3_CCR1 передається за допомогою блока DMA в пам'ять МК. Блок DMA налаштовано в циклічний режим роботи з подвійним буфером (*Double Buffer Mode*). Заповнення буфера викликає переривання DMA, що сигналізує про наявність даних для передавання або оброблення. В той час, коли дані з одного буфера зчитуються, інший буфер налаштований на приймання нових значень з регістра TIM3_CCR1. Для другої вимірюваної частоти всі операції проходять аналогічно, тільки використовується таймер TIM4.

Розрахунок частоти здійснюється за формулою (2.22), зразковою частотою є частота тактування таймера – тактова частота МК (кількість n імпульсів зразкової частоти – сума імпульсів таймера, що відповідають кількості m імпульсів вхідної частоти). Верхня межа вимірювання частоти дорівнює половині тактової частоти мікроконтролера, точність та швидкодія залежить від вхідної частоти та кількості m імпульсів вхідної частоти (кількості значень для усереднення).

Подальше оброблення частотних сигналів автогенераторних пристроїв на основі двоколекторних магніточутливих транзисторів полягає у відновленні

значень синусної та косинусної складових магнітної індукції за вимірним значенням частот генерації.

Оскільки функція перетворення радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора (див. рис. 3.3) має високу лінійність, залежність магнітної індукції від частоти можна було б апроксимувати прямою лінією, однак степеневий поліном краще наближує модельовану функцію перетворення до реальної. Експериментальна та апроксимована залежність індукції магнітного поля від частоти на виході радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора за температури $T = 298 \text{ K}$ наведені на рис. 4.4.

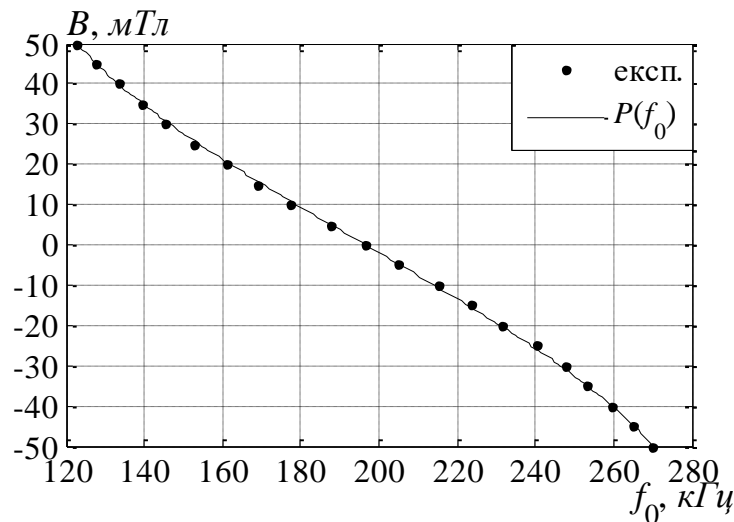


Рисунок 4.4 – Експериментальна та апроксимована залежність магнітної індукції від частоти на виході радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора

Апроксимація функції перетворення є необхідною умовою, оскільки завантаження мікроконтролера виконанням додаткових математичних операцій негативно впливає, в першу чергу, на швидкодію та похибки вимірювання. Тим більше, алгоритм запропонованого методу вимірювального контролю кутових положень передбачає збереження набору функцій перетворення, які відповідають різним значенням максимальної та мінімальної індукції

магнітного поля при проходженні повного оберту валу. Для кожної апроксимованої функції це чотири коефіцієнти, що дозволяє оптимально використовувати пам'ять МК.

Радіовиміррювальний прилад контролю кутових положень на основі двоклекторного магніточутливого транзистора містить чотири автогенераторних пристрої, два підвищувальних перетворювачі частоти, два пристрої віднімання частоти, а решта схеми не відрізняється від пристрою виміррювального контролю кутових положень на основі двоклекторних магніточутливих транзисторів. Схема, яка реалізує ППЧ1, ППЧ2, ПВЧ1, ПВЧ2 (див. рис. 4.2), наведена на рис. 4.5.

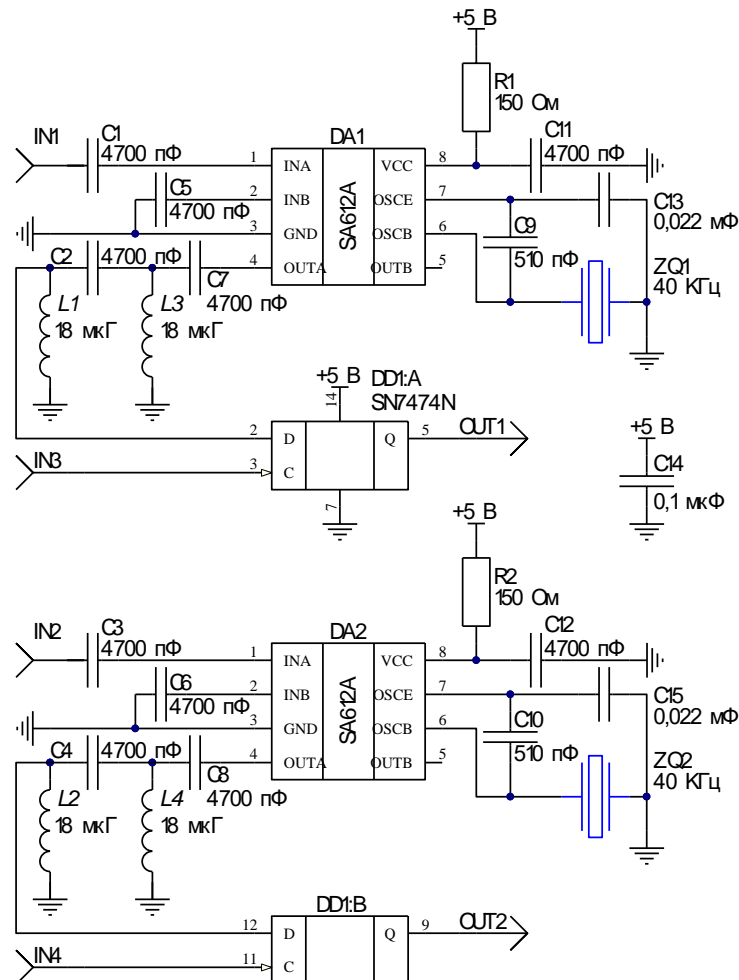


Рисунок 4.5 – Електрична схема частини блока попереднього оброблення пристрою виміррювального контролю кутових положень на основі двоклекторного магнітотранзистора

До входів IN1 – IN4 цієї частини пристрою підключаються виходи автогенераторних пристроїв на основі двостокових магнітотранзисторів АГП1 – АГП4, а сигнали з виходів OUT1 та OUT2 подаються на входні формувачі ВФ1 та ВФ2. Підвищувальні перетворювачі частоти виконані на основі мікросхеми подвійного балансного змішувача частот SA612A [78]. На один вхід мікросхеми подається вхідна частота, а на інший – частота гетеродину. Відповідно, на виході з’являється сигнал, основні складові якого є гарМДНіками з частотою, що дорівнює сумі двох частот, та з різницевою частотою. Оскільки підвищувальні перетворювачі частоти потребують виділення суми частот, на вихід (вивід 4 мікросхеми SA612A) підключено фільтр верхніх частот, частота зрізу якого знаходиться між максимальним значенням різниці частот та мінімальним значенням їх суми. Найпростішим варіантом пристрою віднімання частот є D-тригер, який і було використано в даній схемі.

Отже, на входи мікроконтролера частотні сигнали надходять після попереднього оброблення:

$$f_{\sin} = f_H + f(B1) - f(B3), \quad (4.1)$$

$$f_{\cos} = f_H + f(B2) - f(B4), \quad (4.2)$$

де f_H – частота гетеродину.

На рис. 4.6 показано апроксимовану залежність магнітної індукції від частоти на вході мікроконтролера пристрою вимірювального контролю кутів положень на основі двостокового МДН-магнітотранзистора.

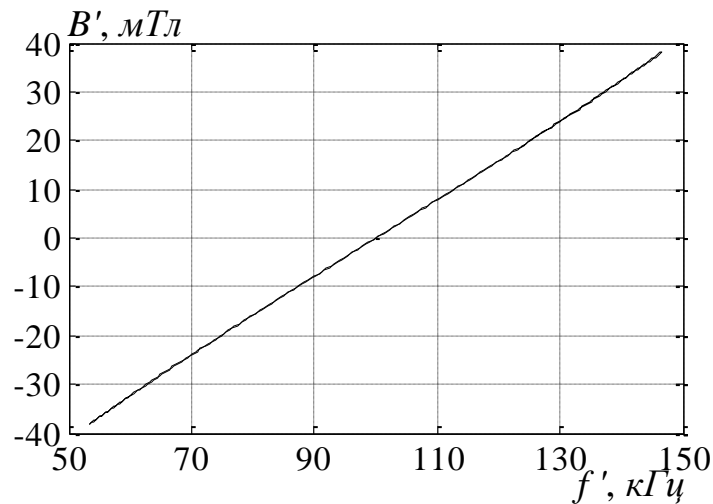


Рисунок 4.6 – Апроксимована залежність магнітної індукції від частоти на вході мікроконтролера пристрою на основі двостокового магнітотранзистора

В даному випадку роль гетеродину виконує кварцовий генератор з частотою 100 кГц , а залежність наближено поліномом третього степеня в діапазоні магнітної індукції від -40 мТл до 40 мТл , як і при апроксимації функції перетворення радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора на основі двоколекторного магнітотранзистора.

Якщо в апроксимаційний вираз підставити частоти f'_{\sin} , f'_{\cos} , присутні на виході блока попередньої обробки, то отримаємо синусні та косинусні складові магнітної індукції

$$B'_{\sin} = (B1 - B3) / 2, \quad B'_{\cos} = (B2 - B4) / 2. \quad (4.3)$$

Програма для МК розроблена з використанням компілятора GCC ARM Embedded та безкоштовного середовища розроблення для ARM Cortex мікроконтролерів Coocox CoIDE, яке має всі необхідні інструменти для створення мікроконтролерних програм високої якості. Зокрема, у середовищі Coocox CoIDE є можливість налагодження з використанням ST-Link або ST-Link / V2, що входить до складу плати STM32F4 Discovery [82].

4.3 Оцінювання метрологічних характеристик пристрою вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів

Метрологічні характеристики пристрою вимірювального контролю є технічними характеристиками, які описують властивості пристрою та впливають на результати і похибки вимірювань, дають можливість оцінити технічний рівень і якість пристрою вимірювання [88].

Залежність параметрів системи «об'єкт – пристрій вимірювального контролю» від впливу зовнішніх умов обумовлює неоднозначність відображення фізичної величини, що підлягає вимірювального контролю. До інших джерел неточності вимірювань належать [88]: незбіг моделі вимірюваної величини та справжньої властивості об'єкта; небажаний взаємний вплив засобів та об'єкта; інструментальний фактор; невідповідності між динамічними властивостями використовуваних технічних засобів і вимірюваних сигналів; прийняті наближення і спрощення у методі та процедурі вимірювання; недостатній обсяг отриманих первинних результатів; недосконалість обчислень; втрати і спотворення під час передавання, відображення та зберігання цифрових даних тощо.

Тому для оцінювання метрологічних характеристик пристрою вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів потрібно не лише розрахувати статичні характеристики, а й розглянути наведені вище чинники, оцінити пов'язані з ними похибки, а також розрахувати помилки першого і другого роду, вірогідність вимірювального контролю.

4.3.1 Статична характеристика пристрою вимірювального контролю кутових положень

Статична характеристика перетворення встановлює залежність інформативного параметра вихідного сигналу вимірювального перетворювача

від інформативного параметра вхідного сигналу. При застосуванні поняття статичної характеристики до вимірювальних приладів незалежною змінною вважається значення вимірюваної величини (або інформативного параметра вхідного сигналу), а залежною величиною – покази приладу [88].

Робота запропонованого пристрою вимірювального контролю кутових положень базується на опосередкованому вимірюванні: вхідною величиною є кутове зміщення магнітного поля постійного магніту відносно початкового положення, а вихідною – виміряне кутове положення контрольованого об'єкта (валу). Схема функціональних перетворень пристрою вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів зображена на рис. 4.8 та наведена в додатку Н.

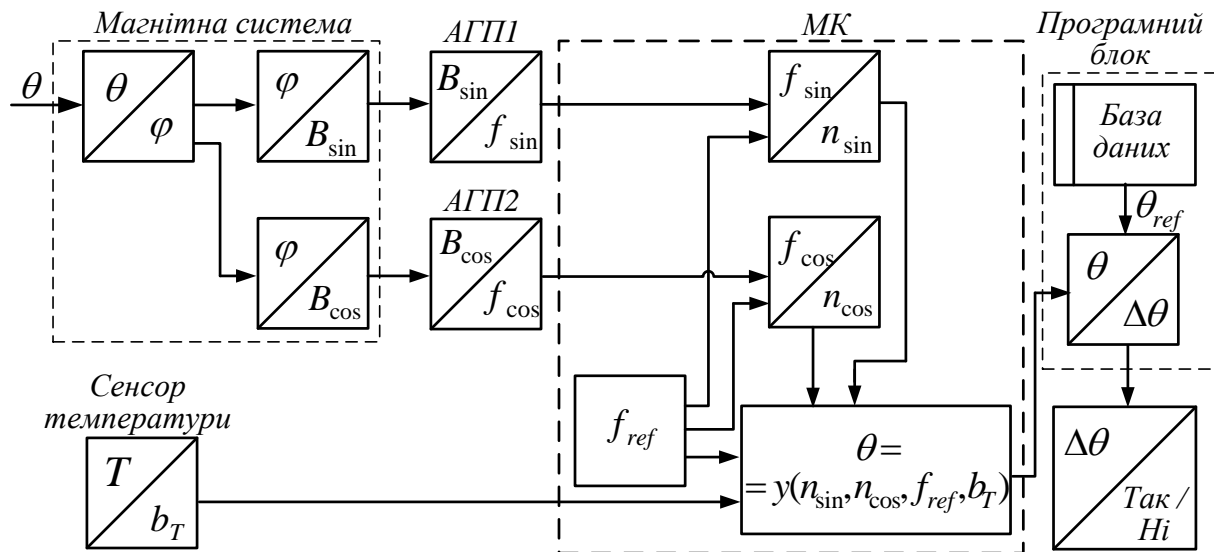


Рисунок 4.8 – Схема функціональних перетворень пристрою вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів

Магнітна система (система «постійний магніт – чутливі елементи») перетворює кутове положення об'єкта в кутове зміщення магнітного поля постійного магніту відносно початкового положення, а потім – в синусні й косинусні складові магнітої індукції. Автогенераторні пристрої здійснюють перетворення магнітної індукції в частоту, а розрахунок вихідної величини за

отриманими значеннями частот (із врахуванням температури) проводить мікроконтролер. Тому функція перетворення пристрою вимірювального контролю кутових положень на основі двоколекторних магніточутливих транзисторів має вигляд

$$\theta = \arctg\left(\frac{B'_{\sin}(f_{\sin})}{B'_{\cos}(f_{\cos})}\right) + \alpha_{\varphi} = \arctg\left(P_{k\sin} \left[\frac{R_{\text{вмп}2c}(B_{01} + B_{A1} \sin \varphi)}{L_{\text{екв}2c}} \times \right. \right. \\ \times \sqrt{\frac{R_{\text{д}2c}^{(-)}(B_{01} + B_{A1} \sin \varphi) C_{\text{екв}2c}(B_{01} + B_{A1} \sin \varphi) - 1}{L_{\text{екв}2c}}} \left. \right] / P_{k\cos} \left[\frac{R_{\text{вмп}2c}(B_{02} + B_{A2} \cos \varphi)}{L_{\text{екв}2c}} \times \right. \\ \left. \left. \times \sqrt{\frac{R_{\text{д}2c}^{(-)}(B_{02} + B_{A2} \cos \varphi) C_{\text{екв}2c}(B_{02} + B_{A2} \cos \varphi) - 1}{L_{\text{екв}2c}}} \right] \right) + \alpha_{\varphi}, \quad (4.4)$$

де f_{\sin} , f_{\cos} – частоти вихідних сигналів автогенераторних пристроїв на основі двоколекторних магніточутливих транзисторів;

$B'_{\sin}(f_{\sin})$, $B'_{\cos}(f_{\cos})$ – складові магнітної індукції, розраховані мікроконтролером на основі частот f_{\sin} , f_{\cos} ;

α_{φ} – кутовий коефіцієнт, який залежить від знаку складових магнітної індукції:

$$a_{\varphi} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } (B'_{\sin} > 0), (B'_{\cos} > 0), \\ 180^{\circ}, & \text{якщо } (B'_{\cos} < 0), \\ 360^{\circ}, & \text{якщо } (B'_{\sin} < 0), (B'_{\cos} > 0); \end{cases}$$

$P_{k\sin}(x) = p_{0\sin}x^n + p_{1\sin}x^{n-1} + \dots + p_{n\sin}$, $P_{k\cos}(x) = p_{0\cos}x^n + p_{1\cos}x^{n-1} + \dots + p_{n\cos}$ – поліноміальні функції з коефіцієнтами $p_{0\sin/\cos} \dots p_{n\sin/\cos}$, що описують апроксимовані залежності $B'_{\sin}(f_{\sin})$, $B'_{\cos}(f_{\cos})$;

$R_{\text{вмп}2c}(B_{\sin/\cos})$ – опір втрат у коливальному контурі радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора:

$$R_{\text{вмп}2c}(B_{\sin/\cos}) = R_{\text{вмп}02c} + 2 \left(R_{B0} + \frac{kT}{qI_0} e^{\frac{qU_{E0}}{kT}} \right) c \mu_p^2 B_{\sin/\cos}^2;$$

R_{emp02c} – початковий опір втрат у коливальному контурі (автогенератор не поміщений у зовнішнє магнітне поле):

$$R_{emp02c} = R_1 + R_2 + R_3 + (R_{B_1} + R_{B_2} + R_{E_1} + R_{E_2})_{B=0} + R_{B_1B_2} + R_{C_1} + R_{C_2} + R_{B_3} + R_{C_3} + R_{E_3} + R_{(C_1)} + R_{(C_2)};$$

$R_{\partial 2c}^{(-)}(B_{\sin/\cos})$ – диференціальний від’ємний диференційний опір радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора;

$C_{екв2c}(B_{\sin/\cos})$ – еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора;

$L_{екв2c}$ – еквівалентна індуктивність активного індуктивного елемента на основі біполярного транзистора з фазозсувним колом;

$B_{\sin} = B_{01} + B_{A_1} \sin \varphi$, $B_{\cos} = B_{02} + B_{A_2} \cos \varphi$ – складові магнітної індукції в точках з кутовими координатами 0° та 90° ;

B_{01} , B_{02} – постійна складова (ненульовий зсув) синусної та косинусної складових магнітної індукції;

B_{A_1} , B_{A_2} – амплітуда синусної та косинусної складових магнітної індукції.

Функція перетворення радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень на основі магнітотранзистора має вигляд:

$$\begin{aligned} \theta = \arctg\left(\frac{B'_{\sin}(f'_{\sin})}{B'_{\cos}(f'_{\cos})}\right) + \alpha_\varphi = \arctg\left(A_{k \sin} \left(f_H + \frac{R_{emp2d}(B_{01} + B_{A_1} \sin \varphi)}{L_{екв}} \times \right. \right. \\ \times \sqrt{\frac{R_{\partial 2d}^{(-)}(B_{01} + B_{A_1} \sin \varphi) C_{екв2d}(B_{01} + B_{A_1} \sin \varphi)}{L_{екв2d}} - 1} - \frac{R_{emp2d}(B_{03} - B_{A_3} \sin \varphi)}{L_{екв2d}} \times \\ \left. \left. \times \sqrt{\frac{R_{\partial 2d}^{(-)}(B_{03} - B_{A_3} \sin \varphi) C_{екв2d}(B_{03} - B_{A_3} \sin \varphi)}{L_{екв2d}} - 1} \right) \times \right. \\ \left. A_{k \cos} \left(f_H + \frac{R_{emp2d}(B_{02} + B_{A_2} \cos \varphi)}{L_{екв2d}} - \right. \right. \\ \left. \left. \sqrt{\frac{R_{\partial 2d}^{(-)}(B_{02} + B_{A_2} \cos \varphi) C_{екв2d}(B_{02} + B_{A_2} \cos \varphi)}{L_{екв2d}} - 1} - \frac{R_{emp2d}(B_{04} - B_{A_4} \cos \varphi)}{L_{екв2d}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \sqrt{\frac{R_{\partial 2d}^{(-)}(B_{04} - B_{A_4} \cos \varphi) C_{екв2d}(B_{04} - B_{A_4} \cos \varphi)}{L_{екв2d}} - 1} \right)^{-1} + a_\varphi \right), \end{aligned} \quad (4.5)$$

де $A_{k\sin}(x) = a_{0\sin}x^n + a_{1\sin}x^{n-1} + \dots + a_{n\sin}$, $A_{k\cos}(x) = a_{0\cos}x^n + a_{1\cos}x^{n-1} + \dots + a_{n\cos}$ – поліноміальні функції з коефіцієнтами $a_{0\sin/\cos} \dots a_{n\sin/\cos}$, що описують апроксимовані залежності $B'_{\sin}(f'_{\sin})$, $B'_{\cos}(f'_{\cos})$;

$R_{emp2d}(B_{\sin/\cos})$ – опір втрат у коливальному контурі радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора:

$$R_{emp2d}(B_{\sin/\cos}) = R_{emp.02d} + (R_{DS1} + R_{DS2})_{B=0} c\mu_p^2 B_{\sin/\cos}^2;$$

$R_{emp.02d}$ – початковий опір втрат у коливальному контурі:

$$R_{emp.02d} = R1 + R2 + R_L + (R_{DS1} + R_{DS2})_{B=0} + R_{BB1} + R_{D1} + R_{D2} + R_{S1} + \\ + R_{G1} + R_{S3} + R_{BB3} + R_{DS3} + R_{DS4} + R_{D3S4} + R_{D4} + R_{G3} + R_{G4} + R_{(C1)} + R_{(C2)};$$

$R_{\partial 2d}^{(-)}(B_{\sin/\cos})$ – диференціальний від'ємний диференційний опір радіовимірювального перетворювача кутових положень на основі магніточутливого транзистора;

$C_{екв2d}(B_{\sin/\cos})$ – еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора;

$L_{екв2d}$ – індуктивність коливального контуру;

$B1 = B_{01} + B_{A1} \sin \varphi$, $B2 = B_{02} + B_{A2} \cos \varphi$, $B3 = B_{03} - B_{A3} \sin \varphi$, $B4 = B_{04} - B_{A4} \cos \varphi$ – складові магнітної індукції в точках з кутовими координатами 0° , 90° , 180° та 270° ;

B_{01} , B_{02} , B_{03} , B_{04} – ненульове зміщення складових магнітної індукції;

B_{A1} , B_{A2} , B_{A3} , B_{A4} – амплітуда складових магнітної індукції.

Залежність вимірюваного кутового положення контрольованого об'єкта від кутового зсуву магнітного поля постійного магніту відносно початкового положення, тобто функція перетворення приладу вимірювального контролю

кутових положень на основі магніточутливих транзисторів, наведена на рис. 4.9.

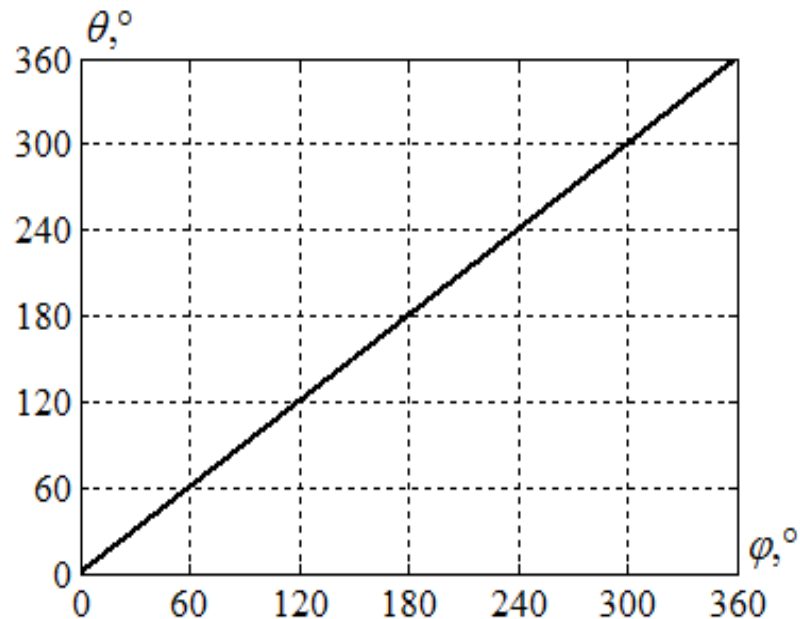


Рисунок 4.9 – Теоретична функція перетворення приладу вимірювального контролю кутів положень на основі магніточутливих транзисторів

Отримані статичні характеристики пристрою вимірювального контролю кутів положень є лінійними в діапазоні повного оберту контролюваного валу. Це пояснюється високою лінійністю перетворення кутового положення в частоту змінної напруги і використанням функції арктангенса для отримання результату вимірювання.

4.4 Вибір параметрів при інженерному проектуванні радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутів положень на основі магніточутливих транзисторів

Для розроблення радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутів положень на основі магніточутливих транзисторів потрібно обрати параметри магнітної системи (постійний магніт – чутливі елементи), автогенераторних пристроїв, тип мікроконтролера, параметри персонального

комп'ютера. Алгоритм, який описує послідовність дій розробника при проектуванні пристрою вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів, зображена на рис. 4.10 та наведена в додатку О.

На сьогодні основними типами матеріалів, із яких виготовляють магніти, є AlNiCo, SmCo і NdFeB. При виборі матеріалу для магніту слід враховувати вимоги до технічних характеристик, умов експлуатації та вартості. Магніти на основі матеріалу SmCo мають малий температурний коефіцієнт, високу корозійну стійкість і можуть експлуатуватися при температурах до 350 °С, проте вартість таких магнітів висока. Магніти на основі AlNiCo легко розмагнічуються, тому що мають дуже малу коерцитивну силу [87]. Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що оптимальним є використання магнітів NdFeB з нікелевим або цинковим покриттям для захисту від корозії. Рекомендується застосовувати магніти на основі NdFeB типу BMN-35H (Bomatec Switzerland) або 81X0564-2 (Arnold Magnetics).

Вибір параметрів магнітної системи обумовлений конструкцією об'єкта вимірювального контролю: потрібно проаналізувати можливість встановлення постійного магніту безпосередньо на торці контрольованого валу, обрати розміри постійного магніту, розташування і кількість чутливих елементів.

При виборі типу магнітної системи слід враховувати, яку точність позиціонування чутливих елементів відносно магніту можливо забезпечити в конкретному випадку.

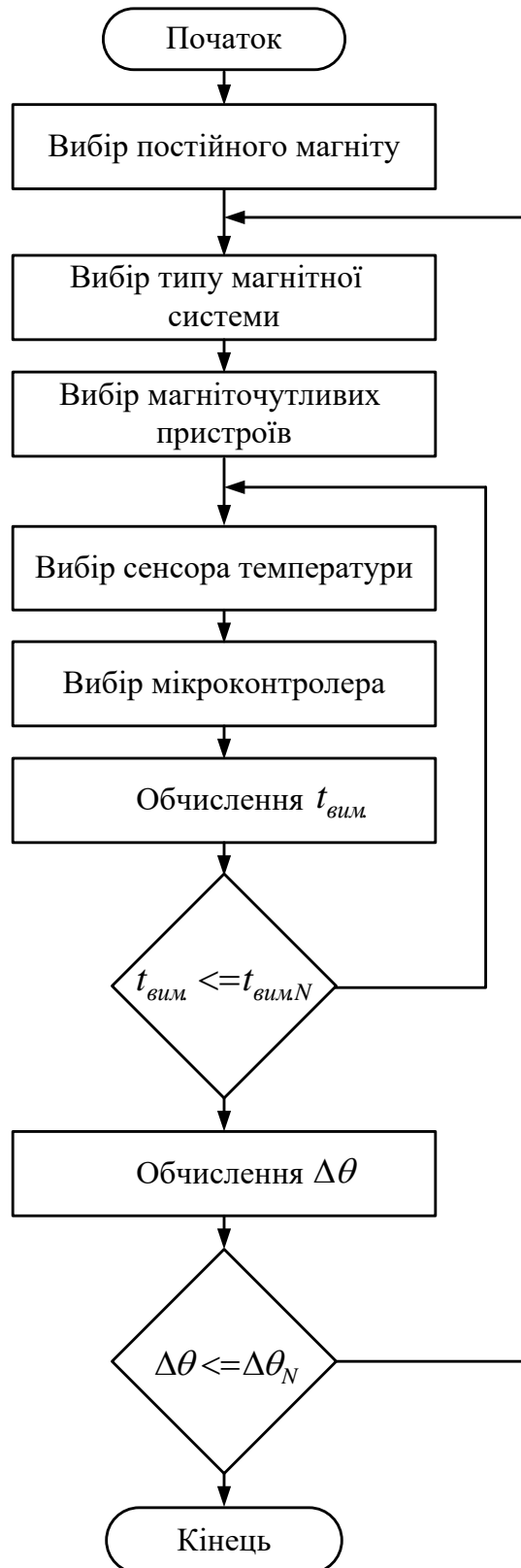


Рисунок 4.10 – Алгоритм проектування пристрою вимірального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів

4.5 Алгоритм вимірювального контролю кутових положень

Робота радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів базується на виконанні алгоритму. Спочатку потрібно закріпити постійний магніт на валу об'єкта вимірювального контролю, встановити пристрій вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів.

Для підвищення точності вимірювання кутових положень передбачено режим електронного калібрування, тобто оцінки точності суміщення осей обертання магніту та точки перетину осей чутливих елементів. Для цього потрібно привести в рух контрольований вал і на вкладці «Калібрування» натиснути кнопку «Старт», після чого програма надсилає мікроконтролеру запит на вимірювання синусної та косинусної складових індукції магнітного поля, і відображає отримані дані у вигляді часових діаграм. Після натиснення кнопки «Стоп» виконується усереднення пікових значень (отримується значення F_{\max} та F_{\min}).

Вважається, що магніт відцентрований відносно чутливих елементів. Якщо програма отримує незадовільні значення розсуміщення осей магніту та системи магніточутливих елементів, користувач отримує відповідне повідомлення. Якщо ж зміщення осей знаходиться в допустимих межах, програма розраховує значення поправочних коефіцієнтів, які частково компенсують похибку, що виникає через розсуміщення осей.

При близькому розташуванні магніту та площини сенсорів або при застосуванні магніту з великою залишковою магнітною індукцією значення магнітної індукції можуть виявитися більшими. Такі магніти необхідно калібрувати за мінімальною різницею між максимальним і мінімальним значенням при повному повороті магніту навколо своєї осі. У режимі електронного калібрування можна досягти точності центрування магніту до $\pm 0,49$ мм.

Послідовність калібрувальних операцій:

- 1) ввімкнення пристрою, встановлення магніту в початкове положення (обертанням проти часової стрілки);
- 2) вимірювання температури;
- 3) вимірювання значень частот F'_{\sin} та F'_{\cos} , що відповідають синусній та косинусній складовим магнітної індукції, у вигляді залежності від часу (за умови обертання контрольованого об'єкта) або від значень кутового положення зразкового пристрою вимірювань;
- 4) розрахунок амплітуди, частот $F'_{\sin}(B=0)$ та $F'_{\cos}(B=0)$, значення фазової корекції лівого повороту;
- 5) встановлення магніту в початкове положення (обертанням за часовою стрілкою);
- 6) вимірювання значень частот F'_{\sin} та F'_{\cos} (як описано вище);
- 7) розрахунок амплітуди, частот $F'_{\sin}(B=0)$ та $F'_{\cos}(B=0)$, значення фазової корекції правого повороту;
- 8) обчислення середніх значень амплітуд, частот $F'_{\sin}(B=0)$ та $F'_{\cos}(B=0)$, значень фазової корекції.

Після калібрування пристрою вимірювального контролю кутових положень потрібно встановити нуль, після чого можна розпочинати безпосередньо процедуру вимірювального контролю.

Автоматично виконується вимірювання температури (через певні інтервали часу), на основі отриманих значень температури вибирають коефіцієнти апроксимації функції перетворення автогенераторних пристроїв.

Наступні кроки відповідають реалізації методу вимірювального контролю, що було описано у підрозділі 2.2.

4.6 Висновки до розділу

1. Розроблено структурну схему та програмне забезпечення радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливого транзистора.

2. Проведено експериментальні дослідження радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень, які підтвердили справедливості розроблених математичних моделей приладу.

3. Розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера, яке реалізує алгоритм роботи радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливого транзистора.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Науково-технічна розробка має право на існування та впровадження, якщо вона відповідає вимогам часу, як в напрямку науково-технічного прогресу та і в плані економіки. Тому для науково-дослідної роботи необхідно оцінювати економічну ефективність результатів виконаної роботи.

Магістерська кваліфікаційна робота з розробки та дослідження на тему «Радіовимірвальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора» відноситься до науково-технічних робіт, які орієнтовані на виведення на ринок (або рішення про виведення науково-технічної розробки на ринок може бути прийнято у процесі проведення самої роботи), тобто коли відбувається так звана комерціалізація науково-технічної розробки. Цей напрямок є пріоритетним, оскільки результатами розробки можуть користуватися інші споживачі, отримуючи при цьому певний економічний ефект. Але для цього потрібно знайти потенційного інвестора, який би взявся за реалізацію цього проекту і переконати його в економічній доцільності такого кроку.

Для наведеного випадку нами мають бути виконані такі етапи робіт:

- 1) проведено комерційний аудит науково-технічної розробки, тобто встановлення її науково-технічного рівня та комерційного потенціалу;
- 2) розраховано витрати на здійснення науково-технічної розробки;
- 3) розрахована економічна ефективність науково-технічної розробки у випадку її впровадження і комерціалізації потенційним інвестором і проведено обґрунтування економічної доцільності комерціалізації потенційним інвестором.

5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту дослідження за темою «Радіовимірjuвальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора» є оцінювання науково-технічного рівня та рівня комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті науково-технічної діяльності.

Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу рекомендується здійснювати із застосуванням 5-ти бальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, наведеними в табл. 5.1 [89].

Таблиця 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
1	2	3	4	5	6
Технічна здійсненність концепції					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція не підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена практиці	Перевірено на працездатність продукту в реальних 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 аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів

Продовження таблиці 5.1 - Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

1	2	3	4	5	6
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну 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	Конкуренція немає
Практична здійсненість					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити 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 ідеї відсутні	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 використовуються 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 років	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 науково-технічного рівня та комерційного потенціалу науково-технічної розробки потрібно звести до таблиці.

Таблиця 5.2 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки експертами

Критерії	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
	Бали:		
1. Технічна здійсненність концепції	4	4	4
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	2	2	2
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	2	2	2
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	2	3	3
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	2	2	3
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	3	3	3
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	2	2	3
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	4	4	4
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	2	2	2
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	2	2	2
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	4	3	4
12. Практична здійсненність (розробка документів)	3	3	3
Сума балів	32	32	35
Середньоарифметична сума балів $СБ_c$	33,0		

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 5.2, зробимо висновок щодо науково-технічного рівня і рівня комерційного потенціалу розробки. При цьому використаємо рекомендації, наведені в табл. 5.3 [89].

Таблиця 5.3 – Науково-технічні рівні та комерційні потенціали розробки

Середньоарифметична сума балів СБ , розрахована на основі висновків експертів	Науково-технічний рівень та комерційний потенціал розробки
41...48	Високий
31...40	Вище середнього
21...30	Середній
11...20	Нижче середнього
0...10	Низький

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Радіовимірjuвальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора» становить 33,0 бала, що, відповідно до таблиці 5.3, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

5.2 Оцінювання рівня новизни розробки

Виводячи на ринок новинку виробник вважає, що тієї новизни, якою наділена нова розробка є достатньо для того, щоб вона була сприйнята споживачем як нова. Але це не завжди так, в силу того, що споживач і виробник неоднозначно визначають її рівень новизни. Тому доцільним є визначення рівня новизни розробки отриманої в результаті досліджень за темою «Радіовимірjuвальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора».

Саме визначення рівня і ступеня інтегральної новизни є найбільш актуальним, оскільки її рівень визначає ступінь однакового позитивного сприйняття новизни розробки 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 технічної розробки [90].

Рівень новизни нової продукції розраховуємо 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 встановлюємо відносно рівня аналога (або продукту, 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 5.4).

Таблиця 5.4 – Лист оцінювання рівня новизни експертами

Види та чинники		Бали та експерти		
		Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3
i		2	3	4
Споживча новизна	Питома вага 0,225	Максимальний бал $B_{i\ MAX}$		25
1. Зміна поведінкових звичок споживача		3	2	3
2. Ступінь задоволення потреб і запитів		2	2	2
3. Спосіб задоволення потреби		3	3	3
4. Формування нової потреби		0	0	0
5. Формування нового споживача		0	0	0
Середній бал експертів $B_{i\ omp}$		8		
Товарна новизна	Питома вага 0,217	Максимальний бал $B_{i\ MAX}$		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	3	4
2. Якість продукції по відношенню до конкурентів		4	4	4
3. Функціональні зміни		3	2	2
Середній бал експертів $B_{i\ omp}$		19		
Виробнича новизна	Питома вага 0,042	Максимальний бал $B_{i\ MAX}$		25
1. Рівень унікальності товару для підприємства		5	4	5
2. Рівень унікальності для галузі		2	3	2
3. Рівень унікальності товару для країни		0	0	0
4. Зміна виробничої системи		4	4	4
5. Відносно існуючого асортименту		2	2	1

Продовження таблиці 5.4 – Лист оцінювання рівня новизни експертами

Середній бал експертів $B_{i\ oмп}$		13	
Прогресивна новизна	Питома вага 0,179	Максимальний бал $B_{i\ MAX}$	25
1. Зміна технології виготовлення		4	4
2. Рівень застосування нових компонентів і матеріалів		1	2
3. Зміна технологічного принципу дії виробу		1	2
4. Зміна конструктивного виконання		3	2
5. Рівень застосування інновацій		2	2
Середній бал експертів $B_{i\ oмп}$		11	
Ринкова новизна	Питома вага 0,12	Максимальний бал $B_{i\ MAX}$	20
1. Новий виріб на новому ринку		0	0
2. Новий виріб на відомому ринку		1	1
3. Модернізований виріб		2	2
4. Нова модель		1	2
Середній бал експертів $B_{i\ oмп}$		5	
Екологічна новизна	Питома вага 0,035	Максимальний бал $B_{i\ MAX}$	20
1. Рівень екологічної чистоти технології виробництва		4	4
2. Рівень впровадження мало- та безвідходних технологій		4	4
3. Рівень екологічно небезпечних режимів експлуатації продукції		1	1
4. Рівень забруднення навколишнього середовища		1	1
Середній бал експертів $B_{i\ oмп}$		9	
Соціальна новизна	Питома вага 0,036	Максимальний бал $B_{i\ MAX}$	20
1. Використання нового товару приводить до покращення стану здоров'я нації		0	0
2. Використання нового товару приводить до зростання доходів населення		0	0
3. Виробництво нового товару приводить до збільшення (зменшення) кількості робочих місць на підприємстві		4	5
4. Виробництво нового товару приводить до підвищення кваліфікації персоналу		2	3
Середній бал експертів $B_{i\ oмп}$		7	
Маркетингова новизна	Питома вага 0,146	Максимальний бал $B_{i\ MAX}$	20
1. Нові методи маркетингових досліджень		0	0
2. Вживання нових стратегій сегментації ринку		1	1
3. Вибір нової маркетингової стратегії обхвату і розвитку цільового сегмента		2	3
4. Побудова нових каналів збуту		2	2
Середній бал експертів $B_{i\ oмп}$		5	

Значення i -го виду новизни розрахуємо за формулою [90]

$$I_i = \frac{B_{i\text{отр}}}{B_{i\text{MAX}}}, \quad (5.1)$$

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

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

Загальний рівень інтегральної новизни розраховуємо шляхом перемноження отриманого значення i -го виду новизни на її вагомість, причому вагомість i -го виду новизни визначаємо експертним методом, за формулою [90]

$$N_{\text{инт}} = \sum_i^n W_i \cdot I_i, \quad (5.2)$$

де $N_{\text{инт}}$ – рівень інтегральної (сукупної) новизни;

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

n – загальна кількість видів новизни.

$$N_{\text{инт}} = (0,225 \cdot 8/25) + (0,217 \cdot 19/30) + (0,042 \cdot 13/25) + (0,179 \cdot 11/25) + (0,12 \cdot 5/20) + (0,035 \cdot 9/20) + (0,036 \cdot 7/20) + (0,146 \cdot 5/20) = 0,40.$$

Отримане значення інтегрального рівня новизни зіставляємо зі шкалою, що наведена в табл. 5.5 [89].

Таблиця 5.5 – 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 5.5 розробка відповідає рівню при значенні інтегральної новизни 0,40 - достатня новизна; за характеристикою: принципова технологічна модифікація товару; вид розробки - новий товар, що наділений ознаками інноваційності (інноваційний товар).

5.3 Визначення рівня конкурентоспроможності розробки

В процесі визначення економічної ефективності науково-технічної розробки також доцільно провести прогноз рівня її конкурентоспроможності за сукупністю параметрів, що підлягають оцінюванню.

Одиничний параметричний індекс розраховуємо за формулою [89]

$$q_i = \frac{P_i}{P_{базі}}, \quad (5.3)$$

де q_i – одиничний параметричний індекс, розрахований за i -м параметром;

P_i – значення i -го параметра виробу;

$P_{базі}$ – аналогічний параметр базового виробу-аналога, з яким проводиться порівняння.

Загальні технічні та економічні характеристики розробки представлено в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Основні техніко-економічні показники аналога та розробки, що проектується

Показники (параметри)	Одиниця вимірювання	Аналог	Проектований пристрій	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
Напруга живлення	В	12	12	1	0,15
Кількість виконуваних функцій	шт.	1	1	1	0,15
Маса	кг	5,3	3,9	1,36	0,25
Термін безвідмовної роботи	год.	5000	8000	1,6	0,2

Продовження таблиці 5.6 – Основні техніко-економічні показники аналога та розробки, що проектується

Швидкість та легкість налаштування	бали	5	8	1,6	0,25
Експлуатаційні витрати	грн	250	160	0,64	0,45
Ціна пристрою	грн	5600	3800	0,68	0,55

Нормативні параметри оцінюємо показником, який отримує одне з двох значень: 1 – пристрій відповідає нормам і стандартам; 0 – не відповідає.

Груповий показник конкурентоспроможності за нормативними параметрами розраховуємо як добуток частинних показників за кожним параметром за формулою [89]

$$I_{III} = \prod_{i=1}^n q_i, \quad (5.4)$$

де I_{III} – загальний показник конкурентоспроможності за нормативними параметрами;

q_i – одиничний (частинний) показник за i -м нормативним параметром;

n – кількість нормативних параметрів, які підлягають оцінюванню.

За нормативними параметрами розроблюваний пристрій відповідає вимогам ДСТУ, тому $I_{III} = 1$.

Значення групового параметричного індексу за технічними параметрами визначаємо з урахуванням вагомості (частки) кожного параметра [89]

$$I_{TII} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot \alpha_i, \quad (5.5)$$

де I_{TII} – груповий параметричний індекс за технічними показниками (порівняно з виробом-аналогом);

q_i – одиничний параметричний показник i -го параметра;

α_i – вагомість i -го параметричного показника, $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$;

n – кількість технічних параметрів, за якими оцінюється конкурентоспроможність.

Проведемо аналіз параметрів згідно даних таблиці 5.4.

$$I_{mn} = 1 \cdot 0,15 + 1 \cdot 0,15 + 1,36 \cdot 0,25 + 1,6 \cdot 0,2 + 1,6 \cdot 0,25 = 1,36.$$

Груповий параметричний індекс за економічними параметрами розраховуємо за формулою [89]

$$I_{EP} = \sum_{i=1}^m q_i \cdot \beta_i, \quad (5.6)$$

де I_{EP} – груповий параметричний індекс за економічними показниками;

q_i – економічний параметр i -го виду;

β_i – частка i -го економічного параметра, $\sum_{i=1}^m \beta_i = 1$;

m – кількість економічних параметрів, за якими здійснюється оцінювання.

Проведемо аналіз параметрів згідно даних таблиці .

$$I_{EP} = 0,64 \cdot 0,45 + 0,68 \cdot 0,55 = 0,66.$$

На основі групових параметричних індексів за нормативними, технічними та економічними показниками розраховуємо інтегральний показник конкурентоспроможності за формулою [89]

$$K_{INT} = I_{HP} \cdot \frac{I_{TP}}{I_{EP}}, \quad (5.7)$$

$$K_{INT} = 1 \cdot 1,36 / 0,66 = 2,05.$$

Інтегральний показник конкурентоспроможності $K_{INT} > 1$, отже розробка переважає відомі аналоги за своїми техніко-економічними показниками.

5.4 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Радіовимірвальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.4.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [89]

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.8)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 12470,00 \cdot 21 / 21 = 12470,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник проекту	12470,00	593,81	21	12470,00
Інженер-розробник радіоелектронних схем	11630,00	553,81	21	11630,00
Технік	7200,00	342,86	12	4114,29
Інженер-метролог	11500,00	547,62	4	2190,48
Всього				30404,76

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Радіовимірювальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора» розраховуємо за формулою

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.9)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.10)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=2379,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [89];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_l = 2379,00 \cdot 1,10 \cdot 1,65 / (21 \cdot 8) = 25,70 \text{ грн.}$$

$$Z_{pl} = 25,70 \cdot 8,00 = 205,61 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.8 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинн а тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Установка обладнання	8,00	2	1,10	25,70	205,61
Підготовка робочого місця розробника	10,00	3	1,35	31,54	315,43
Інсталяція програмного забезпечення розробки (моделювання)	6,00	4	1,50	35,05	210,29
Підготовка бази даних	11,00	3	1,35	31,54	346,97
Монтаж блоків радіовимірювального пристрою визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора	12,00	5	1,70	39,72	476,65
Випробування блоків	4,20	5	1,70	39,72	166,83
Налагодження пристрою	15,00	6	2,00	46,73	700,96
Технічна підтримка експериментів	25,00	3	1,35	31,54	788,57
Всього					3211,31

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$Z_{\text{доп}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (5.11)$$

де $H_{\text{доп}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{доп}} = (30404,76 + 3211,31) \cdot 10 / 100\% = 3361,61 \text{ грн.}$$

5.4.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доп}}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (5.12)$$

де H_{zn} – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (30404,76 + 3211,31 + 3361,61) \cdot 22 / 100\% = 8135,09 \text{ грн.}$$

5.4.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Радіовимірjuвальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора».

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{в}j}, \quad (5.13)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$M_1 = 2,00 \cdot 96,00 \cdot 1,1 - 0,000 \cdot 0,00 = 211,20$ грн.

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.9 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір офісний	96,00	2,00	-	-	211,20
Папір для заміток	41,00	2,00	-	-	90,20
Начиння канцелярське	173,00	4,00	-	-	761,20
Органайзер офісний	101,00	4,00	-	-	444,40
Картридж для принтера	1025,00	2,00	-	-	2255,00
Диск оптичний	12,10	3,00	-	-	39,93
FLASH-пам'ять	350,00	2,00	-	-	770,00
Склотекстоліт СТФ 2–1.5	100,00	0,10	-	-	11,00
Хлорне залізо	260,00	0,05	-	-	14,30
Дріт монтажний	80,00	0,05	-	-	4,40
Лак УР-231	360,00	0,05	-	-	19,80
Спирт етиловий	92,00	0,25	-	-	25,30
Припій ПОС-61	590,00	0,03	-	-	19,47
Флюс БС-2	120,00	0,01	-	-	1,32
Кабель силовий	52,00	0,21	-	-	12,01
Всього					4679,53

5.4.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Радіовимірвальний пристрій визначення кутових положень на основі

магніточутливого транзистора», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.14)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$K_e = 0 \cdot 0,00 \cdot 1,1 = 0,00$ грн.

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.10 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Конденсатори	-	-	-
SMD 0805	18	6,00	118,80
Резистори	-	-	-
SMD 0805	19	2,00	41,80
Кварцовий резонатор	-	-	-
16МГц	1	15,80	17,38
Мікросхеми	-	-	-
STM32	1	260,00	286,00
STM8	1	60,00	66,00
Транзистори	-	-	-
BC847	4	4,00	17,60
PSMN009	2	60,00	132,00
M2АПК0522	2	54,00	118,80
Роз'єми	-	-	-
Чотирьохпровідний	1	50,00	55,00
П'ятипровідний	1	150,00	165,00
Діоди	-	-	-
SMD 0805	4	5,00	22,00
Вимикач	-	-	-
IRS-201	1	30,00	33,00
Всього			1073,38

5.4.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (5.15)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 16200,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 17820,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Метрологічна станція МС-ХЧК з комплектом інтерфейсів вимірювання кутових положень	1	16200,00	17820,00
Всього			17820,00

4.4.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних

засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

$$B_{npz} = \sum_{i=1}^k C_{inprz} \cdot C_{npz.i} \cdot K_i, \quad (5.16)$$

де C_{inprz} – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{npz.i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{npz} = 5500,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 6050,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці.

Таблиця 5.12 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
ОС Windows	1	5500,00	6050,00
Прикладний пакет Microsoft Office	1	5100,00	5610,00
Система імітаційного комп'ютерного моделювання	1	8300,00	9130,00
Всього			20790,00

5.4.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

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

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б.}}{T_{г}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.17)$$

де $Ц_{б.}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{г}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (24800,00 \cdot 1) / (2 \cdot 12) = 1033,33 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.13 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Персональний комп'ютер ПЕОМ Everglade E7	24800,00	2	1	1033,33
Обчислювальний комплекс обробки даних	26400,00	2	1	1100,00
Робоче місце розробника (офісні меблі)	10300,00	5	1	171,67
Пристрій виводу інформації	6400,00	4	1	133,33
Оргтехніка	10200,00	4	1	212,50

Продовження таблиці 5.13 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Приміщення	310000,00	25	1	1033,33
Частотомір цифровий ЧМ- СЦ12	5100,00	4	1	106,25
Всього				3790,42

5.4.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (5.18)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 4,50$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,25 \cdot 160,0 \cdot 4,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 180,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.14 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер ПЕОМ Everglade E7	0,25	160,0	180,00
Обчислювальний комплекс обробки даних	0,36	160,0	259,20
Робоче місце розробника (спліт-система)	0,30	95,0	128,25
Пристрій виводу інформації	0,40	9,0	16,20
Оргтехніка	0,56	7,5	18,90

Продовження таблиці 5.14 – Витрати на електроенергію

Частотомір цифровий ЧМ-СЦ12	0,10	95,0	42,75
Метрологічна станція МС-ХЧК з комплектом інтерфейсів вимірювання кутових положень	0,26	35,0	40,95
Всього			686,25

5.4.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Радіовимірювальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cb} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cb}}{100\%}, \quad (5.19)$$

де H_{cb} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{cb} = 20\%$.

$$B_{cb} = (30404,76 + 3211,31) \cdot 20 / 100\% = 6723,21 \text{ грн.}$$

5.4.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (5.20)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo $H_{cn} = 35\%$.

$$B_{cn} = (30404,76 + 3211,31) \cdot 35 / 100\% = 11765,63 \text{ грн.}$$

5.4.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (5.21)$$

де H_{ie} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{ie} = 55\%$.

$$I_e = (30404,76 + 3211,31) \cdot 55 / 100\% = 18488,84 \text{ грн.}$$

5.4.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів;

витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.22)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 115\%$.

$$B_{нзв} = (30404,76 + 3211,31) \cdot 115 / 100\% = 38658,48 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Радіовимірвальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{доо} + Z_n + M + K_v + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (4.18)$$

$$B_{заг} = 30404,76 + 3211,31 + 3361,61 + 8135,089436 + 4679,53 + 1073,38 + 17820,00 + 20790,00 + 3790,42 + 686,25 + 6723,21 + 11765,63 + 18488,84 + 38658,48 = 169588,51 \text{ грн.}$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.23)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta=0,9$.

$$ZB = 169588,51 / 0,9 = 188431,68 \text{ грн.}$$

5.5 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором

В ринкових умовах узагальнюючим позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів цієї чи іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

Результати дослідження проведені за темою «Радіовимірювальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора» передбачають комерціалізацію протягом 4-х років реалізації на ринку.

В цьому випадку майбутній економічний ефект буде формуватися на основі таких даних:

ΔN – збільшення кількості споживачів пристрою, у періоди часу, що аналізуються, від покращення його певних характеристик;

Показник	1-й рік	2-й рік	3-й рік	4-й рік
Збільшення кількості споживачів, осіб	800	1000	1000	800

N – кількість споживачів які використовували аналогічний пристрій у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, прийmemo 5000 осіб;

C_o – вартість пристрою у році до впровадження результатів розробки, прийmemo 3500,00 грн;

$\pm \Delta C_o$ – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-технічної розробки, прийmemo 260,00 грн.

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора $\Delta \Pi_i$ для кожного із 4-х років, протягом яких очікується отримання позитивних

результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховуємо за формулою [89]

$$\Delta\Pi_i = (\pm\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\mathcal{G}}{100}\right), \quad (5.24)$$

де λ – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2021 році ставка податку на додану вартість складає 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту).

Прийmemo $\rho = 25\%$;

\mathcal{G} – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2021 році $\mathcal{G} = 18\%$;

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

$$\Delta\Pi_1 = (260,00 \cdot 5000,00 + 3760,00 \cdot 800) \cdot 0,83 \cdot 0,25 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 733006,20 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

$$\Delta\Pi_2 = (260,00 \cdot 5000,00 + 3760,00 \cdot 1800) \cdot 0,83 \cdot 0,25 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 1372770,20 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

$$\Delta\Pi_3 = (260,00 \cdot 5000,00 + 3760,00 \cdot 2800) \cdot 0,83 \cdot 0,25 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 2012534,20 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

$$\Delta\Pi_4 = (260,00 \cdot 5000,00 + 3760,00 \cdot 3600) \cdot 0,83 \cdot 0,25 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 2524345,40 \text{ (грн.)}$$

Приведена вартість збільшення всіх чистих прибутків $\Pi\Pi$, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки

$$\Pi\Pi = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (5.25)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, грн;

T – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні, $\tau=0,05$;

t – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

$$\begin{aligned} III &= 733006,20/(1+0,05)^1 + 1372770,20/(1+0,05)^2 + 2012534,20/(1+0,05)^3 + \\ &+ 2524345,40/(1+0,05)^4 = 698101,14 + 1245143,04 + 1738502,71 + 2076785,21 = \\ &= 5758532,10 \text{ (грн.)}. \end{aligned}$$

Величина початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки

$$PV = k_{инв} \cdot 3B, \quad (5.26)$$

де $k_{инв}$ – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію, приймаємо $k_{инв}=2$;

$3B$ – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, приймаємо 188431,68 (грн.).

$$PV = k_{инв} \cdot 3B = 2 \cdot 188431,68 = 376863,35 \text{ (грн.)}.$$

Абсолютний економічний ефект $E_{абс}$ для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки становитиме

$$E_{абс} = III - PV \quad (5.27)$$

де $ПП$ – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 5758532,10 грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 376863,35 грн.

$E_{абс} = ПП - PV = 5758532,10 - 376863,35 = 5381668,75$ грн.

Внутрішня економічна дохідність інвестицій E_e , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$E_e = T_{ж} \sqrt[4]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1, \quad (5.28)$$

де $E_{абс}$ – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 5381668,75 грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 376863,35 грн;

$T_{ж}$ – життєвий цикл науково-технічної розробки, тобто час від початку її розробки до закінчення отримання позитивних результатів від її впровадження, 4 роки.

$$E_e = T_{ж} \sqrt[4]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1 = (1 + 5381668,75/376863,35)^{1/4} = 0,98.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій $\tau_{мін}$

$$\tau_{мін} = d + f, \quad (5.29)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2021 році в Україні $d = 0,1$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, прийmemo 0,06.

$\tau_{\min} = 0,1 + 0,06 = 0,16 < 0,98$ свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій E_g , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки вища мінімальної внутрішньої дохідності. Тобто інвестувати в науково-дослідну роботу за темою «Радіовимірювальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора» доцільно.

Період окупності інвестицій $T_{ок}$ які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g}, \quad (5.30)$$

де E_g – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{ок} = 1 / 0,98 = 1,02 \text{ р.}$$

$T_{ок} < 3$ -х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

5.6 Висновки до розділу

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Радіовимірювальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора» становить 33,0 бала, що, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

При оцінюванні рівня конкурентоспроможності, згідно узагальненого коефіцієнту конкурентоспроможності розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 2,05 рази.

Також термін окупності становить 1,02 р., що менше 3-х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може

спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

Отже можна зробити висновок про доцільність проведення науково-дослідної роботи за темою «Радіовимірвальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора».

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Поява нової техніки, сировини, нових технологічних процесів та засобів праці вимагає постійного підвищення вимог до професійної підготовки і загального технічного рівня працюючих. Зміна конкретних умов праці свідчить про те, що набуті персоналом знання виявляються недостатніми, а правила з охорони праці і нормативні документи, вивчені раніше, з часом забуваються. Періодично змінюються і нормативні документи. Все це вимагає створення на галузевих об'єктах спеціальної системи навчання нормам і правилам з охорони праці, навичкам безпечної праці.

Дослідження на тему «Радіовимірювальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора» відбудуватиметься в приміщенні, яке обладнане робочими місцями з ПК. На дослідника можливий вплив таких небезпечні та шкідливі виробничі факторів (згідно ГОСТ 12.0.003-74 [92]):

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; підвищена чи понижена іонізація повітря; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження; розумове перевантаження; емоційні перевантаження.

6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

6.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Під час аналізу умов праці на робочому місці необхідно оцінити відповідність параметрів приміщення НПАОП 0.00-7.15-18 [98] та відповідність параметрів мікроклімату ДСН 3.3.6.042-99 [97].

Згідно із НПАОП 0.00-7.15-18 [98] площу приміщень, в яких розташовують ПК, визначають згідно з чинними нормативними документами з розрахунку на одне робоче місце, обладнане ПК: площа – не менше 6,0 кв. м, обсяг – не менше 20,0 куб. м, з урахуванням максимальної кількості осіб, які одночасно працюють у зміні.

Згідно з ГОСТ 12.2.032-78 [93] конструкція робочого місця і взаємне розташування всіх його елементів повинне відповідати гігієнічним, антропометричним, фізіологічним і психологічним вимогам.

Гігієнічні вимоги визначають умови життєдіяльності і працездатності людини у процесі взаємодії з технікою і середовищем; показниками є рівень освітлення, температура, вологість, шум, вібрація, токсичність, загазованість тощо.

Антропометричні вимоги визначають відповідність конструкцій техніки антропометричним характеристикам людини (зріст, розміри тіла та окремі рухові ланки). Показниками є раціональна робоча поза, оптимальні зони досягнення, раціональні трудові рухи.

Фізіологічні та психофізіологічні вимоги визначають відповідність техніки і середовища можливостям працівника щодо сприйняття, переробки інформації, прийняття і реалізації рішень.

Велике значення має також характер роботи. Зокрема, при організації робочого місця дослідника повинні бути дотримані наступні основні умови: оптимальне розміщення обладнання, що входить до складу робочого місця; достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні рухи і переміщення; необхідно природне і штучне освітлення для виконання поставлених завдань; рівень акустичного шуму не повинен перевищувати допустимого значення; достатня вентиляція робочого місця.

Характеристики робочого місця під час проектування роботи на тему «Радіовимірвальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора»: висота робочої поверхні столу 750 мм; висота

простору для ніг 650 мм; висота сидіння над рівнем підлоги 450 мм; поверхня сидіння м'яка з закругленим переднім краєм; передбачена можливість розміщення документів праворуч і ліворуч; відстань від ока до екрана 700 мм; відстань від ока до клавіатури 400 мм; відстань від ока до документів 500 мм; можливе регулювання екрана по висоті, по нахилу, у лівому і в правому напрямках.

6.1.2 Електробезпека приміщення

Основне завдання електробезпеки – мінімізувати можливість негативного впливу електричного струму на людину. Досягти цієї мети можна за допомогою таких заходів і засобів: безпечною і надійною конструкцією електроустановок; організаційними та технічними заходами щодо безпечної експлуатації електроустановок та використання електричної енергії; технічними засобами захисту.

За ступенем небезпеки враження електричним струмом приміщення можна класифікувати як таке, що має категорію «без підвищеної небезпеки», оскільки вся зазначена офісна техніка має захисне заземлення, передбачене її конструкцією, і повністю виключає можливість випадкового контакту із частинами, що перебувають під небезпечною для людини напругою [99].

Лінія електромережі для живлення ЕОМ, периферійних пристроїв ЕОМ та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ЕОМ в досліджуваному приміщенні виконана як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів.

Для запобігання електротравмам у приміщенні здійснюються:

- 1) ізоляція нормально струмоведучих елементів електроустаткування відповідно з вимогами нормативів;
- 2) захисне заземлення із використанням природних заземлювачів;

3) систематичне проходження інструктажу з елетробезпеки.

6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Мікроклімат

Стан навколишнього виробничого середовища характеризується такими метеорологічними умовами: температурою, відносною вологістю, барометричним тиском і швидкістю руху повітря. Вищеназвані параметри, які ще називають параметрами мікроклімату, визначають умови теплообміну організму працівника із довкіллям.

Дослідження на тему «Радіовимірювальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора» згідно гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу [91] за енерговитратами відноситься до категорії I б. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [97] наведені в табл.6.1.

Таблиця 6.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	40-60	0,1-0,3
Холодний	20-24	75	0,2

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату передбачено система водяного опалення, теплоізолююча обробка зовнішніх стін приміщення та припливно-витяжна вентиляція.

6.2.2 Склад повітря робочої зони

Шкідливі речовини, що потрапили в організм людини, спричинюють порушення здоров'я лише в тому випадку, коли їхня кількість у повітрі перевищує граничну для кожної речовини величину. Під гранично допустимою концентрацією (ГДК) шкідливої речовини у повітрі робочої зони розуміють таку максимальну концентрацію даної речовини, яка при щоденній (крім вихідних днів) роботі протягом 8 год чи іншої тривалості (але не більше 40 год на тиждень) не призводить до зниження працездатності й захворювання в період трудової діяльності та у наступний період життя, а також не чинить несприятливого впливу на здоров'я нащадків.

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Формальдегід	0,035	0,03	2
Фенол	0,01	0,01	3
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,01	1

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено використання механічної вентиляції та систематичне вологе прибирання.

6.2.3 Виробниче освітлення

У приміщенні, де відбувалося дослідження на тему «Радіовимірвальний пристрій визначення кутових положень на основі магнітотливого транзистора» використовується природне однобічне бічне освітлення.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату відповідно до ДБН В.2.5-28-2006 [94]) при природному та сумісному освітленні для розробника зазначені у таблиці 2.3.

Таблиця 6.3 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнювання	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість, лк		КПО, %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимально можливе бічне природне освітлення.
- 2) Штучне освітлення в приміщеннях з робочим місцем, обладнаним ВДТ, має здійснюватись системою загального рівномірного освітлення. Як джерело штучного освітлення мають застосовуватись люмінесцентні лампи ЛБ.
- 3) Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють прямі та відбиті відблиски з поверхні екранів ПК і клавіатури повинні бути передбачені сонцезахисні пристрої, вікна повинні мати жалюзі або штори.

6.2.4 Виробничий шум

Джерелами шуму під час роботи є жорсткий диск ПК, вентилятор блока живлення мережі, вентилятор, розташований на процесорі, швидкісні приводи

дисків, механічні сканери, пересувні механічні частини принтера. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в ДСН 3.3.6.037-99 [96]. Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску повинні наведені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Наукова і творча діяльність	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

6.2.6 Виробничі випромінювання

Джерелами змінних електричних і магнітних полів у ПК є вузли, у яких присутня висока змінна напруга, і вузли, що працюють з великими струмами. Рівні напруженості електромагнітних полів за електричними складовими та густиною магнітних потоків (індукції) у цих піддіапазонах регламентуються чинним в Україні нормативним актом ДСанПіН 3.3.2.007-98 [95] та загальноєвропейським стандартом MPR II, відомим під назвою «шведський стандарт». Ці ж діапазони розглядаються в універсальному рекомендаційному стандарті ТСО'99.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від комп'ютера наведені в табл. 6.5.

Таблиця 6.5 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/м ²
	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/м	
Напруженість електромагнітного поля, 6 кГц...3 МГц	50	5	
3 МГц...30МГц	2	-	
30 МГц...5 ГГц	-	-	10
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру: УФ-С (220...280 нм)			0,001
УФ-В (280...320 нм)			0,01
УФ-А (320...400 нм)			10,0
в інфрачервоній частині спектру: 0,76... 10,0 мкм			35,0.. 70,0
Напруженість електричного поля ВДТ			20 В/м

Для захисту людини від дії електромагнітних випромінювань передбачаються такі способи і засоби: зменшення параметрів випромінювання безпосередньо в самому джерелі випромінювання; екранування робочого місця; обмеження часу перебування персоналу в робочій зоні; встановлення раціональних режимів експлуатації установок і роботи працюючого персоналу.

6.2.6 Напруженість праці

У процесі роботи з комп'ютером необхідно дотримуватися правильного режиму праці та відпочинку. Інакше у працівників спостерігається незадоволеність роботою, головний біль, роздратування, порушення сну, втома і больові відчуття в очах, попереку, у ділянці шийта рук. Для збереження

здоров'я працівників, запобігання професійним захворюванням і підтримки працездатності слід передбачати внутрішньозмінні регламентовані перерви для відпочинку для операторів комп'ютерного набору — 10 хв. після кожної години роботи. Для профілактики напруженості органів зору важливими є: дотримання режимів праці та відпочинку; характеристики та налаштування монітору ПК: яскравість екрана, зернистість, відсутність близькості тощо, наприклад, неясні кольори менше втомлюють очі, ніж яскраві. Для зниження нервово-емоційного напруження і втоми очей, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії доцільно деякі перерви використовувати для виконання комплексу вправ, наведених у додатку 7 до ДСанПіН 3.3.2.007-98 (див. с.70,71). Отже, за умови дотримання Правил № 65 та ДСанПіН 3.3.2.007-98 робота з ПК не належить до категорії із шкідливими умовами праці.

6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи радіовимірювального пристрою визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора в умовах надзвичайних ситуацій

Під стійкістю роботи радіовимірювального пристрою визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора розуміють здатність його виконувати задані функції, що відповідають вимогам відповідних тестів в умовах надзвичайних ситуацій, а також пристосованість цього пристрою до відновлення в умовах його ушкодження.

На основі вивчення факторів, які впливають на стійкість роботи пристрою і оцінки стійкості елементів проти уражаючих факторів, необхідно завчасно організувати і провести організаційні, інженерно-технічні й технологічні заходи для підвищення стійкості роботи пристрою.

До загальних інженерно-технічних заходів можна віднести: розміщення пристрою в заглиблених приміщеннях, а також використання спеціальних захисних пристосувань, закріплення пристрою, застосування контрфорсів для

підвищення стійкості проти перекидання обладнання, зменшення кількості неекранованих струмопровідників.

6.3.1 Дослідження стійкості роботи радіовимірального пристрою визначення кутових положень в умовах дії іонізуючих випромінювань

Визначаємо граничні значення дози опромінення $D_{\text{гр}i}$, для елементної бази пристрою, при яких виникають незворотні зміни. Отримані дані заносимо в таблицю 6.6.

Таблиця 6.6 – Граничні значення експозиційних доз пристрою

Блоки пристрою	Елементи пристрою	$D_{\text{гр}i}, P$	$D_{\text{гр}}, P$
Блок перетворення сигналів з GSM	Мікросхема LM317	10^5	10^4
	Діод 1N4004	10^4	
	Резистор C2-23	10^7	
	Конденсатор К50-6	10^4	
Блок формування сигналу програмування	Діод 1N4148	10^4	10^4
	Резистор C2-33	10^7	
	Транзистор 2SA1271	10^4	
Блок широкоформатного друку	Резистор C2-29B	10^8	
	Транзистор 2SA1271	10^4	

Проаналізувавши дані таблиці 6.6, визначили, що самим уразливим елементом пристрою з мінімальною дозою $D_{\text{гр}i} = 10^4 P$ є такі як світло діоди, транзистори та діоди. Визначаємо можливу дозу опромінення за формулою

$$D_m = \frac{2 \cdot P_1 (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_{\text{п}}})}{K_{\text{осл}}}, \quad (6.1)$$

де P_1 – максимальне значення рівня радіації ($P_1 = 8,76 P/\text{год}$);

t_k – час кінця опромінення ($t_k = 43800$ год);

$t_{\text{п}}$ – час початку опромінення ($t_{\text{п}} = 1$ год).

$K_{\text{осл}}$ – коефіцієнт послаблення радіації ($K_{\text{осл}} = 4$).

$$D_m = \frac{2 \cdot 8,76 (\sqrt{43800} - \sqrt{1})}{4} = 912,28 \text{ (P)}.$$

Оскільки $D_{\text{грi}} > D_m$, то даний пристрій стійкий до дії радіації. Визначимо допустимий час роботи пристрою в заданих умовах за формулою

$$t_d = \frac{D_{\text{гр}} \cdot K_{\text{осл}} + 2 \cdot P_1 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot P_1}, \quad (6.2)$$

$$t_d = \left(\frac{10^4 \cdot 4 + 2 \cdot 8,76 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 8,76} \right)^2 = 2284,1 \text{ (год)}.$$

Отже, можлива доза опромінення елементної бази $D_m = 912,28 \text{ P}$, а допустима - 10^4 P . Отже, розроблений радіовимірювальний пристрій визначення кутових положень є стійким в умовах дії іонізуючого випромінювання. Допустимий час роботи пристрою в заданих умовах становить 2284 год., при рівні радіації 8,76 P/год.

6.3.2 Дослідження стійкості роботи радіовимірювального пристрою визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора в умовах дії електромагнітного імпульсу

Визначимо горизонтальну складову напруженості електромагнітного поля

$$E_r = 9,62 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} = 9,62 \text{ (В/м)}.$$

Визначаємо горизонтальну та вертикальну напругу наводки.

$$U_r = 9,62 \cdot 10^3 \cdot 0,5 = 4810 \text{ (В)}.$$

$$U_v = 9,62 \cdot 0,5 = 4,81 \text{ (В)}.$$

Визначаємо допустимі коливання напруги живлення для різних блоків

$$U_d = U_{\text{ж}} + \frac{U_{\text{ж}}}{100} \cdot N, \quad (6.3)$$

де N – відсоток допуску.

$$U_{\text{д}} = 3 + \frac{3}{100} \cdot 5 = 3,15 \text{ (В)},$$

$$U_{\text{д}} = 5 + \frac{5}{100} \cdot 5 = 5,25 \text{ (В)},$$

$$U_{\text{д}} = 12 + \frac{12}{100} \cdot 5 = 12,6 \text{ (В)}.$$

Визначаємо коефіцієнти безпеки для кожної ділянки

$$K_{\text{Б}} = 20 \cdot \lg \frac{U_{\text{д}}}{U_{\text{в(г)}}} \geq 40 \text{ [дБ]}, \quad (6.4)$$

де $U_{\text{д}}$ - допустиме коливання напруги живлення, В;

$U_{\text{в(г)}}$ - напруга наведена за рахунок електромагнітних випромінювань у вертикальних (горизонтальних) струмопровідних частинах, В.

Горизонтальної

$$K_{\text{Б}_{\text{г1}}} = 20 \cdot \lg \frac{3,15}{4810} = -63,2 \text{ (дБ)},$$

$$K_{\text{Б}_{\text{г2}}} = 20 \cdot \lg \frac{5,25}{4810} = -58,85 \text{ (дБ)},$$

$$K_{\text{Б}_{\text{г3}}} = 20 \cdot \lg \frac{12,6}{4810} = -51,25 \text{ (дБ)}.$$

Вертикальної

$$K_{\text{Б}_{\text{в1}}} = 20 \cdot \lg \frac{3,15}{4,81} = -3,2 \text{ (дБ)},$$

$$K_{\text{Б}_{\text{в2}}} = 20 \cdot \lg \frac{5,25}{4,81} = 1,15 \text{ (дБ)},$$

$$K_{\text{Б}_{\text{в3}}} = 20 \cdot \lg \frac{12,6}{4,81} = 8,75 \text{ (дБ)}.$$

Отримані дані заносимо в таблицю 6.7.

Таблиця 6.7 – Значення коефіцієнтів безпеки пристрою

№	Найменування блоків	$Kb_{г}, \text{дБ}$	$Kb_{в}, \text{дБ}$	Результат дії
1	Блок живлення, 12 В	-63,2	-3,2	Нестійкий
2	Блок друку, 5 В	-58,85	1,15	Нестійкий
3	Блок формування, 3 В	-51,25	8,75	Нестійкий

Границя стійкості роботи блоків пристрою, що розробляється $Kb_{\text{мін}} = -63,2 \text{ дБ}$, а $Kb_{\text{гр}} = 8,75$. Отже, радіовимірювальний пристрій визначення кутових положень є нестійким в умовах дії електромагнітного імпульсу.

6.4 Розробка заходів по забезпеченню високої стійкості роботи пристрою в умовах надзвичайних ситуацій

При радіоактивному зараженні використовують протирадіаційний захист: плівки; зміна приміщень; протирадіаційне екранування, яке полягає в тому, що між джерелом небезпеки пристроєм встановлюється перешкода, яка гарантує захист від небезпеки. Застосовуються, як правило, різноманітні за конструкцією суцільні екрани. Тому дія підвищення стійкості роботи пристрою необхідно використовувати екранування РЕА.

Перехідне гасіння енергії електричного поля екраном для сталі

$$A = 40 - Kb_{\text{мін}}, \quad (6.5)$$

для БЖ

$$A_1 = 40 + 63,2 = 103,2 \text{ (дБ)};$$

для БД

$$A_2 = 40 + 58,85 = 98,85 \text{ (дБ)};$$

для БФ

$$A_3 = 40 + 51,25 = 91,25 \text{ (дБ)}.$$

Розрахуємо товщини захисних екранів виготовлених з сталі

$$t = \frac{A}{5,2 \cdot \sqrt{f}}, \quad (6.6)$$

де f - найбільш характерна частота, ($f = 15$ кГц).

Для БЖ

$$t_1 = \frac{103,2}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,162 \text{ (см)};$$

для БД:

$$t_2 = \frac{98,85}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,155 \text{ (см)};$$

для БФ:

$$t_3 = \frac{91,25}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,143 \text{ (см)}.$$

Отже, при екрануванні блоку живлення екраном товщиною 0,162 см, блоку друку 0,155 см, а блоку формування 0,143 см відповідно із сталі, пристрій буде стійкою в умовах дії електромагнітного імпульсу.

Також в даному розділі було проведено ряд розрахунків та на основі них визначено, що стійкість роботи радіовимірювального пристрою визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора забезпечена при заданому рівні радіації 8,76 Р/год. До дії електромагнітних імпульсів радіовимірювального пристрою визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора виявився нестійким. Застосування екранування РЕА суттєво підвищує його стійкість в умовах дії електромагнітного імпульсу.

В результаті застосування екранів пристрій буде працювати стійко аж до значення напруженості вертикальної складової 9,62 кВ/м. Ще одним варіантом підвищення стійкості апаратури до дії ЕМІ є зменшення довжини струмопровідників шляхом вдосконалення схемоустаткування РЕА. Крім цього необхідно екранувати кабелі живлення.

ВИСНОВКИ

1. На підставі проведеного аналізу літературних джерел, показано, що існує велика кількість приладів вимірювального контролю кутових положень, які відрізняються як за фізичними принципами, так і за технічними характеристиками. Наприклад, наявні на ринку сенсорної техніки механічні та потенціометричні прилади мають низьку точність, малий термін служби і обмежену кількість циклів переміщення, а використання муфти з'єднання погіршує технічні параметри фотоелектричних приладів. Виходячи з принципу їх роботи, магнітні кутові енкодери дозволяють отримати високу роздільну здатність, вони мають невеликі габарити, низьку ціну, споживають малу потужність та прості в експлуатації. Однак недоліками є обмежений діапазон вимірювання кутів, або ж доповнення пристрою складними конструкціями для розширення діапазону. Крім того, більшість магнітних приладів базуються на використанні елементів Холла та магніторезисторів. З іншого боку, для зменшення частоти появи помилок у процесі вимірювального контролю потрібно підвищувати чутливість і зменшувати похибки вимірювання кутових положень.

2. Серед перетворювачів магнітного поля найбільш перспективними є магнітотранзистори. Біполярні двоколекторні магнітотранзистори характеризуються високою чутливістю в області слабких полів (до $500 \text{ мВ} / \text{мТл}$), однак при використанні в аналогових схемах недоліком є великі значення керувальних струмів та високий рівень шумів.

3. Радіовимірювальні перетворювачі з частотним виходом дозволяють підвищити чутливість і зменшити похибки вимірювання фізичних величин, оскільки поєднують простоту і універсальність аналогових перетворювачів з точністю і завадостійкістю перетворювачів з кодовим виходом.

4. Розглянуто метод вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливих транзисторів, який відрізняється від існуючих

безконтактним перетворенням кутового положення в частотний сигнал за допомогою радіовимірювальних перетворювачів з частотним виходом, у яких магніточутливі транзистори виконують роль чутливих перетворювачів та активних елементів.

5. Представлено аналітичні вирази, які описують розподіл магнітного поля постійного діаметрально намагніченого магніту та залежність аксіальної складової магнітної індукції від кутового положення.

6. Теоретично встановлено і підтверджено залежність реактивних властивостей двоколекторних магнітотранзисторів від індукції магнітного поля, що дозволило використати їх для побудови автогенераторних пристроїв. Чутливість активної складової повного опору двостокового транзистора складає Абсолютна чутливість активної складової повного опору знаходиться в діапазоні від $0,1 \text{ Ом/мТл}$ до $0,25 \text{ Ом/мТл}$, а реактивної – до $5,75 \text{ Ом/Тл}$. Чутливість активної складової повного опору двоколекторного магнітотранзистора досягає $6,75 \text{ Ом/мТл}$, реактивної – $5,52 \text{ Ом/мТл}$. Отримані результати підтверджують можливість використання магнітореактивного ефекту в магніточутливих транзисторах для розроблення автогенераторних пристроїв, чутливих до дії магнітного поля.

7. Розроблено структурну схему та програмне забезпечення радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливого транзистора.

8. Проведено експериментальні дослідження радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень, які підтвердили справедливність розроблених математичних моделей приладу.

9. Розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера, яке реалізує алгоритм роботи радіовимірювального приладу вимірювального контролю кутових положень на основі магніточутливого транзистора.

Також у магістерській кваліфікаційній роботі проведено розрахунки економічної частини, розділу охорони праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. T. Wyatt. (2011, July). What to Consider When Choosing a Rotary Encoder [Online]. Available: http://www.heidenhain.com/fileadmin/redakteure/com/Automation_Newsletter_July2011_01.pdf. [Accessed June 10, 2014].
2. E. Eitel. (2014, May 7). Basics of rotary encoders: overview and new technologies [Online]. Available: <http://machinedesign.com/sensors/basics-rotary-encoders-overview-and-new-technologies-0>. [Accessed June 10, 2014].
3. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та О. М. Жагловська, “Огляд гальваномагнітних вимірювачів параметрів магнітного поля,” Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Збірник наукових праць. Серія: Автоматика та приладобудування, № 8 (982), с. 76–83, 2013.
4. Г. А. Егиазарян и В. И. Стафеев, Магнитодиоды, магниторезисторы и их применение. Москва, СССР: Радио и связь, 1987.
5. И. М. Викулин и В. И. Стафеев, Физика полупроводниковых приборов. Москва, СССР: Советское радио, 1980.
6. И. М. Викулин, Л. Ф. Викулина, и В. И. Стафеев, “Магниточувствительные транзисторы,” Физика и техника полупроводников, т. 35, №1, с. 3–10, 2001.
7. В. Вуйцік, З. Ю. Готра, В. В. Григор’єв, В. Каліта, О. М. Мельник, та Є. Потенцкі, Мікроелектронні перетворювачі фізичних величин, т. 1. Львів, Україна: Ліга-Прес, 2002.
8. В. С. Осадчук та О. В. Осадчук, Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999.
9. В. С. Осадчук та О. В. Осадчук, Напівпровідникові перетворювачі інформації. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2004.
10. В. С. Осадчук та О. В. Осадчук, Перетворювачі тиску і магнітного поля. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.

11. О. В. Осадчук, Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від’ємним диференційним опором. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000.
12. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та В. В. Мартинюк, “Дослідження частотного перетворювача магнітної індукції на основі двох біполярних транзисторів,” Вісник Вінницького політехнічного інституту, № 6, с.111–112, 2003.
13. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та В. В. Мартинюк, “Частотний магнітний сенсор,” Патент України 7409, Черв. 15, 2005.
14. В. С. Осадчук та О. В. Осадчук, “Пристрій для вимірювання переміщень,” Патент України 76529, Серп. 15, 2006.
15. К вопросу о точности угловых энкодеров. Renishaw, 2005. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-933.pdf>. [Дата обращения: Июнь 10, 2014].
16. R. S. Popovic, Hall effect devices, 2nd ed. Bristol, UK: Institute of Physics Publishing, 2004.
17. T. Ytterdal, Y. Cheng, and T. A. Fjeldly, Device Modeling for Analog and RF CMOS Circuit Design. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
18. Jr. Kalb and C. Jeffrey, “Triple drain magneto field effect transistor with high conductivity central drain,” U. S. Patent 5757055, May 26, 1998.
19. W. Kordalski, M. Polowczyk, and M. Panek, “Horizontally-split-drain MAGFET – a highly sensitive magnetic field sensor,” Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical sciences, vol. 55, no. 3, pp. 325–329, 2007.
20. M. Daricek, M. Donoval, and A. Satka, “Behavior of various geometry MagFET structures” presented at the Circuit Theory and Design, European Conference on, Antalya, Turkey, Aug. 23-27, 2009, doi: 10.1109/ECCTD.2009.5275146.

21. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та Н. С. Кравчук, Мікроелектронні перетворювачі температури з частотним виходом. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007.
22. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та В. В. Мартинюк, “Магнітний частотний сенсор,” Вісник Хмельницького національного університету, № 4, с. 128–131, 2005.
23. В. С. Осадчук та О. В. Осадчук, “Мікроелектронний частотний перетворювач магнітного поля з активним індуктивним елементом,” Вісник Вінницького політехнічного інституту, №2, с. 92–96, 2007.
24. В. С. Осадчук та О. В. Осадчук, “Мікроелектронний сенсор для виміру магнітної індукції,” Патент України 77810, Січ. 15, 2007.
25. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Стівбчата, “Дослідження параметрів магніточутливого симістора,” Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, № 2, с. 100–103, 2010.
26. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Стівбчата, та В. В. Мартинюк, “Дослідження повного опору магніточутливого тиристора,” Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, № 1, с. 107–110, 2011.
27. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Стівбчата, та В. В. Мартинюк, “Мікроелектронний перетворювач магнітної індукції з частотним виходом,” Вісник Вінницького політехнічного інституту, № 5, с. 157–163, 2011.
28. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, “Вольт-амперна характеристика перетворювача магнітного поля з частотним виходом,” Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, № 2, с. 96–101, 2011.
29. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, “Перетворювач магнітного поля з частотним виходом,” Вісник Хмельницького національного університету, № 5, с. 149–154, 2011.

30. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, “Аналіз конструкцій та класифікація польових магніточутливих елементів,” Вісник Хмельницького національного університету, № 3, с. 75–79, 2012.
31. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, “Моделювання статичних характеристик двостокового магніточутливого МДН-транзистора,” Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, № 4 (81), с. 64–68, 2013.
32. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, “Прилад вимірювального контролю кутових положень з використанням автогенераторних магніточутливих пристроїв,” Вісник Хмельницького національного університету, № 5 (217), с. 110–114, 2014.
33. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, та О. П. Стівбчата, “Огляд магнітних сенсорів на основі магнітодіодного ефекту,” на VII междунар. практ. конф. Бъдещите изследвания – 2011, София, т. 15, с. 28–32.
34. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. В. Мартинюк, та О. П. Стівбчата, “Перетворювачі магнітного поля на основі біполярних транзисторів,” на VII mezinár. ved.-prakt. konf. Vêda a technológie: krok do budoucnosti – 2011, Praha, díl 17, s. 54–60.
35. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Стівбчата, “Сенсор магнітного поля з частотним виходом,” Патент України 62366, Серп. 25, 2011.
36. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Стівбчата, “Вимірювач магнітного поля з частотним виходом,” Патент України 62367, Серп. 25, 2011.
37. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. А. Ющенко, та О. П. Білилівська, “Мікроелектронний сенсор магнітного поля,” Патент України 70968, Черв. 25, 2012.
38. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. А. Ющенко, та О. П. Білилівська, “Вимірювач магнітної індукції з активним індуктивним елементом,” Патент України 70967, Черв. 25, 2012.

39. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та Я. О. Осадчук, “Сенсор магнітного поля з активним індуктивним елементом,” Патент України 86606, Січ. 10, 2014.
40. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та Я. О. Осадчук, “Сенсор магнітного поля на базі магніторезистора,” Патент України 86605, Січ. 10, 2014.
41. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та Я. О. Осадчук, “Вимірювач індукції магнітного поля,” Патент України 90927, Черв. 10, 2014.
42. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та Я. О. Осадчук, “Мікроелектронний пристрій для вимірювання магнітної індукції з частотним виходом,” Патент України 105400, Трав. 12, 2014.
43. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. П. Білилівська, та Я. О. Осадчук, “Мікроелектронний пристрій для вимірювання магнітної індукції,” Патент України 105401, Трав. 12, 2014.
44. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, та О. П. Білилівська, “Спосіб визначення кутових положень з використанням автогенераторних магніточутливих пристроїв,” Патент України 97242, Берез. 10, 2015.
45. Оптоэлектронные преобразователи угловых перемещений. ОАО “СКБ ИС”. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.skbis.ru/index.php?p=14>. [Дата обращения: Июнь 10, 2014].
46. Датчики угла поворота – энкодеры, датчики угла наклона – инклинометры. BG electric. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.germany-electric.ru/1>. [Дата обращения: Июнь 10, 2014].
47. Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов, Ю. А. Коломенский, и Ю. Д. Ульяницкий, Радиотехнические системы. Москва, СССР: Высшая школа, 1990.
48. В. Г. Баунин и Б. В. Новоселов, “Проблемы проектирования и производства управляемых опорно-поворотных устройств антенн радиосвязи,” Известия ТулГУ. Технические науки, вып. 5, ч. 1, с. 21–30, 2011.

49. И. Могилевский. Система управления поворотным устройством с интерфейсом RS232. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.tularadio.ru/?pg=content/kontroler-povorotki>. [Дата обращения: Июнь 10, 2014].
50. AS5040 Rotary Sensor. AMS. [Online]. Available: <http://ams.com/eng/Products/Magnetic-Position-Sensors/Angle-Position-On-Axis/AS5040>. [Accessed June 10, 2014].
51. Н. В. Гусев и В. Г. Букреев, Системы цифрового управления многокоординатными следящими электроприводами. Томск, РФ: Издательство Томского политехнического университета, 2007.
52. С. Сысоева, “Концепции применения потенциометров для автомобильных задач измерения положения,” Компоненты и технологии, №6, с. 46–54, 2007.
53. А. В. Кирьянов и В. П. Кирьянов, “Способ повышения точности измерения угла поворота,” патент РФ 2433413, Нояб. 10, 2011.
54. С. Сысоева, “Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 14. Итоговый сравнительный анализ, выводы и обновление,” Компоненты и технологии, №7, с. 40–53, 2006.
55. С. Сысоева, “Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Часть 11. Емкостные датчики – новые устройства на автомобильном рынке,” Компоненты и технологии, №4, с. 14–24, 2006.
56. А. Борисов, “Современные АМР-датчики для детектирования скорости, положения и слабых магнитных полей,” Компоненты и технологии, №7, с. 56–60, 2006.
57. К. Б. Клаасен, Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. Москва, РФ: Постмаркет, 2000.

58. Three-Axis Magnetic Sensor HMC1043. Honeywell, 2012. [Online]. Available:<https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Honeywell%20PDFs/HMC1043.pdf>. [Accessed June 10, 2014].
59. S. Tumanski, Thin Film Magnetoresistive Sensors. Bristol, UK: Institute of Physics Publishing, 2001.
60. А. Гауф и А. Гусева, “Магнитные датчики угла поворота (энкодеры) EcoTurn,” Компоненты и технологии, №1, с. 38–41, 2012.
61. А. Щерба, “Магнитные энкодеры производства austriamicrosystems. Позиционирование магната над корпусом микросхемы,” Компоненты и технологии, №7, с. 50–52, 2008.
62. AS5048A High-Resolution Position Sensor. AMS. [Online]. Available: <http://ams.com/eng/Products/Magnetic-Position-Sensors/Angle-Position-On-Axis/AS5048A>. [Accessed June 10, 2014].
63. G.M. Sung, “Error correction for transformed concave and conve MAGFETs with dc supply voltage,” Sensors and Actuators, A117. – pp. 41–49, 2005.
64. О. А. Агеев, В. М. Мамиконова, В. В. Петров, В. Н. Котов, и О. Н. Негоденко, Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин. Таганрог, РФ: ТРТУ, 2000.
65. E. P. Furlani, Permanent Magnet and Electromechanical Devices. New York, USA: Academic Press, 2001.
66. U. Ausserlechner, “A Theory of magnetic angle sensors with hall plates and without fluxguides,” Progress In Electromagnetics Research B, vol. 49, pp. 77–106, 2013.
67. C. Steele and S. Rossmann, “An Ultraminiature Rotary Encoder, Based on Magnetic Microsystems Technology,” Sensor. Technology and Design, 2012. [Online]. Available: <http://archives.sensorsmag.com/articles/0902/rotary/main.shtml>. [Accessed June 10, 2014].

68. В. И. Нефедов, А. С. Сигов, В. К. Битюков, и В. И. Хахин, Метрология и радиоизмерения, 2-е изд. Москва, РФ: Высшая школа, 2006.
69. І. А. Большакова, Р. Л. Голяка, А. П. Мороз, В. Е. Єрашок, та Т. А. Марусенкова, “Сенсорні пристрої магнітного поля на сенсорах Холла з розщепленою структурою,” Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, № 646, с. 38–45, 2009.
70. E. Yosry, W. Fikry, A. El-henawy, and M. Marzouk, “Compact Model of Dual-Drain MAGFETs Simulation,” International Journal of Electronics, Communications and Computer Engineering, vol. 1, no. 1, pp. 112–116, 2009.
71. В. Д. Разевиг, Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ, вып. 2. Москва, РФ: Радио и связь, 1992.
72. J. Heremans, “Solid state magnetic field sensors and applications,” Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 26, no 8, pp. 1149–1168, 1993.
73. Д. С. Дьюб, Электроника: схемы и анализ. Москва, РФ: Техносфера, 2008.
74. K. Hess, Advanced theory of semiconductor device. New York, USA: Wiley-IEEE Press, 1999.
75. R. Rodriguez-Torres, R. Klima, and S. Selberherr, “Three-Dimensional Analysis of a MAGFET at 300 K and 77 K,” in Proc. 32nd Europ. Solid-State Device Research Conf., Firenze, Italy, 2002, pp. 151–154.
76. В. Д. Разевиг, Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. Москва, РФ: Горячая линия – Телеком, 2003.
77. А. В. Белов, Конструирование устройств на микроконтроллерах. Санкт-Петербург, РФ: Наука и Техника, 2005.
78. M. A. Covington, “Single-Chip Frequency Converter,” Radio-Electronics, pp. 49–52, Apr. 1990.

79. Р. Д. Точки и Н. С. Уидмер, Цифровые системы, 8-е изд. Теория и практика. Москва, РФ: Издательский дом “Вильямс”, 2004.
80. K. Paprocki, Mikrokontrolery STM32 w praktyce. Legionowo, Polska: BTC, 2009.
81. STMicroelectronics, “Medium-density performance line ARM®-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. interfaces,” STM32F103x8, STM32F103xB datasheet, Aug. 2013 [Revised 2016].
82. STMicroelectronics, “STM32F4 high-performance discovery board,” STM32F4DISCOVERY datasheet, Sept. 2011 [Revised 2011].
83. Г. Шилдт, Полный справочник по C#. Москва, РФ: Издательский дом “Вильямс”, 2004.
84. Ч. Петцольд, Программирование для Microsoft Windows на C#, т. 1. Москва, РФ: Русская редакция, 2002.
85. А. В. Фролов и Г. В. Фролов, Язык C#. Самоучитель. Москва, РФ: Диалог-Мифи, 2003.
86. В. П. Шевчук, Расчет динамических погрешностей интеллектуальных измерительных систем. Москва, РФ: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
87. H. Kronmüller and S. Parkin, Eds., Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2007.
88. В. В. Кухарчук, С. Ш. Кацев, та В. В. Усов, “Оцінка невизначеності вимірювального каналу кутових положень крокових двигунів,” Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія, №1, с. 233–238, 2008.
89. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
90. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепка – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с.

91. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>
92. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
93. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://vsegost.com/Catalog/31/31970.shtml>
94. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення. – Мінбуд України. – К.: 2006
95. ДСан Пін 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/derz-nor4881.html>
96. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>
97. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
98. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php
99. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

Додаток А
(обов'язковий)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри РТ ВНТУ,
д.т.н., професор
_____ О.В. Осадчук
“ ____ ” _____ 2021 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
на виконання кваліфікаційної роботи
**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ
ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА**
08-36.МКР.002.00.000 ТЗ

Керівник роботи:
_____ д. т. н., професор Осадчук О.В..
“ ____ ” _____ 2021 р.

Розробив студент гр. РТ-20м
_____ Овчарук А.О.
“ ____ ” _____ 2021 р.

Вінниця ВНТУ 2021

1. ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету № 277 « 24 » 09 2021 р. та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: “02” вересня 2021 р.

Дата закінчення: “ 21” грудня 2021 р.

2. МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою роботи є підвищення чутливості та точності вимірювання кутових положень за рахунок методу безконтактного перетворення кутового положення в частотний сигнал за допомогою радіовимірювального перетворювача, у якому магніточутливий транзистор виконує роль чутливого і активного елемента.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання кутових положень.

Предметом дослідження є радіовимірювальний пристрій визначення кутових положень на основі магніточутливого транзистора.

Поставлена мета в магістерській кваліфікаційній роботі можлива за рахунок розв'язання наступних *задач*:

1. Провести аналіз методів і пристроїв визначення кутових положень та обґрунтувати переваги пристроїв на основі магніточутливих транзисторів.

2. Розглянути метод визначення кутових положень, який базується на безконтактному перетворенні кутового положення в частотний сигнал за допомогою радіовимірювального пристрою.

3. Розробити радіовимірювальний пристрій на основі магніточутливого транзистора, який би забезпечував перетворення індукції магнітного поля, у частотний сигнал з високою точністю та чутливістю визначення кутових положень.

Методи дослідження базуються на використанні рівнянь математичної фізики; основних положень теорії функції комплексної змінної для визначення функцій перетворення та рівнянь чутливості; теорії розрахунку нелінійних

електричних кіл з використанням методу вузлових потенціалів для визначення повного опору; теорії вимірювань для оцінювання метрологічних характеристик запропонованого пристрою визначення кутових положень.

3. ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

1. Осадчук В. С. та Осадчук О. В., Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999.
2. Осадчук В. С. та Осадчук О. В., Напівпровідникові перетворювачі інформації. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2004.
3. Осадчук В. С. та Осадчук О. В., Перетворювачі тиску і магнітного поля. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.
4. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
5. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепка – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с.
6. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
7. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://vsegost.com/Catalog/31/31970.shtml>

4. ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра радіотехніки,
студент групи РТ-20м Овчарук Артем Олександрович

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Абсолютна чутливість активної складової повного опору знаходиться в діапазоні від 0,1 Ом/мТл до 0,25 Ом/мТл а реактивної – до 10 Ом/мТл
Чутливість активної складової повного опору двоколекторного магнітотранзистора досягає 10 Ом/мТл реактивної – 6 Ом/мТл

Чутливість вимірювання магнітної індукції в діапазоні від -75 мТл до $+75$ мТл. Чутливість радіовимірювальних пристроїв на основі двоколекторних магнітотранзисторів до зміни кутового положення знаходиться в межах від 500 Гц/ $^{\circ}$ до 1000 Гц/ $^{\circ}$ в діапазоні кутів від 0° до 360° .

6. ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
		Початок	Закінчення		
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження МКР.	03.09.2021	14.09.2021	Проведено огляд літературних джерел. Вибрана тема	Узгодження теми МКР по кафедрі
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів.	15.09.2021	21.09.2021	Аналіз літературних джерел. Підготовлений матеріал основних розділів.	Вступ
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання.	22.09.2021	25.09.2021	Розроблене ТЗ	Наказ ВНТУ про затвердження теми. Додаток А
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми.	26.09.2021	09.10.2021	Проведений аналіз. Розроблені схеми пристрою	Вступ. Розділ 1-2. Звіт по переддипломній практиці.
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	10.10.2021	03.11.2021	Проведені розрахунки та дослідження.	Розділ 3-4.
6.	Розділ моделювання	04.11.2021	12.11.2021	Проведено моделювання	Результати моделювання
7.	Розробка графічної частини МКР	13.11.2021	18.11.2021	Структурні та електричні схеми	Графічна частина
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	19.11.2021	24.11.2021	Економічна частина	Розділ 5
9.	Охорона праці (ОП)	25.11.2021	30.11.2021	Частина БЖД	Розділ 6
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	01.12.2021	08.12.2021	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
11.	Нормконтроль	09.12.2021	12.12.2021	Підпис нормконтроля	Оформлена ПЗ та графічна частина
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання рецензування МКР	13.12.2021	19.12.2021	Позитивні відзиви	Відзив. Рецензія
13.	Захист МКР ЕК	21.12.2021	23.12.2021	Позитивний захист	Протокол ЕК

7. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи буде зроблено:

- Розроблено електричну принципову схему радіовимірювального пристрою на основі двостокового магніточутливого транзистора.
- Розроблено принципову електричну схему пристрою визначення кутових положень на основі двоколекторних магніточутливих транзисторів.
- Розроблено математичну модель радіовимірювального пристрою контролю кутових положень.
- Результати комп'ютерного моделювання радіовимірювального пристрою контролю кутових положень.
- Проведено результати дослідження радіовимірювального пристрою контролю кутових положень.

8. МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬ 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 роботи повинна містити:

- електричну принципову схему радіовимірювального пристрою на основі двоколекторного магніточутливого транзистора.
- принципову електричну схему пристрою визначення кутових положень на основі двоколекторних магніточутливих транзисторів.
- математичну модель радіовимірювального пристрою контролю кутових положень.
- дослідження питань охорони праці.

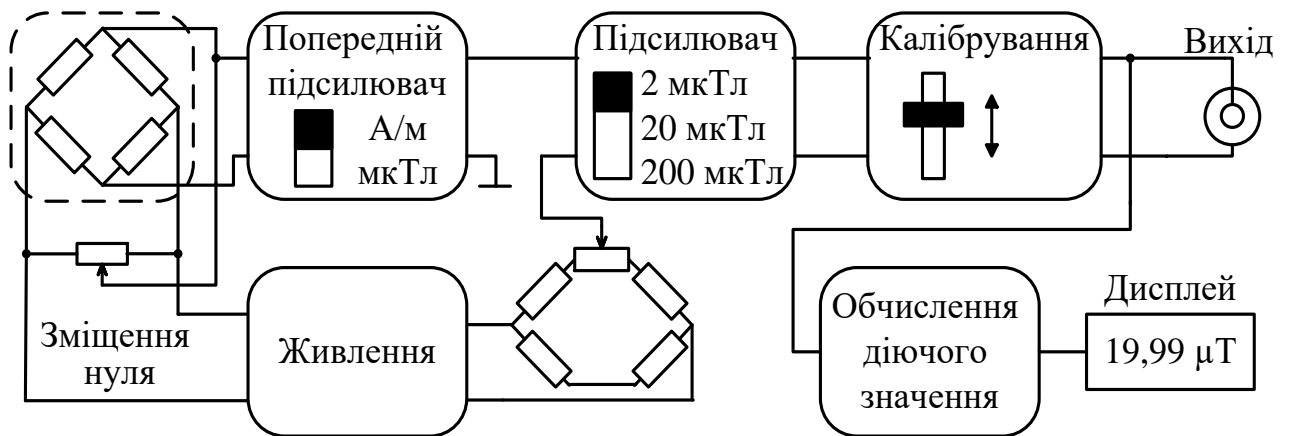
11. ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

Додаток Б
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ
ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА**

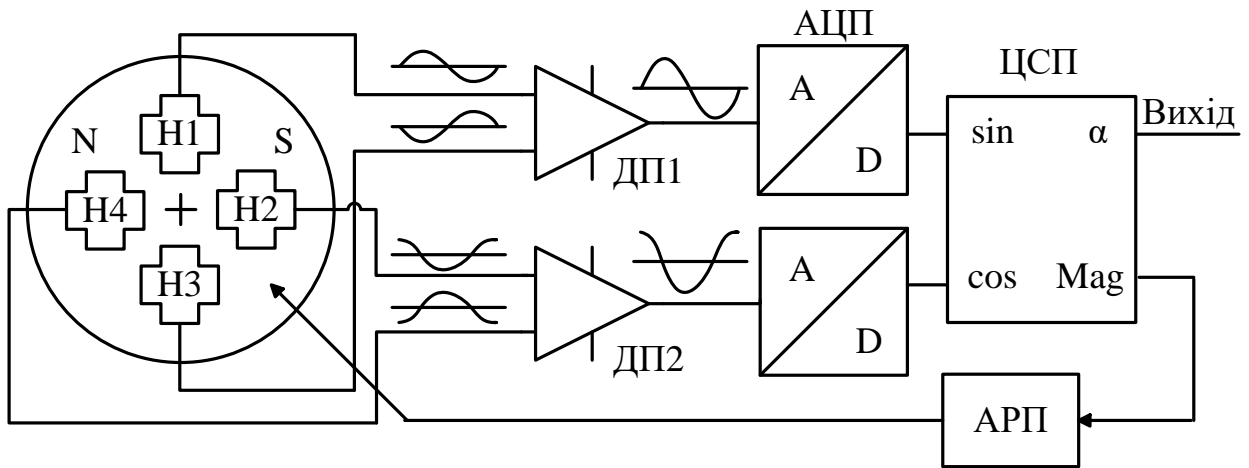
Магніторезистивний пристрій вимірювання
магнітного поля



Додаток В
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ
ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА**

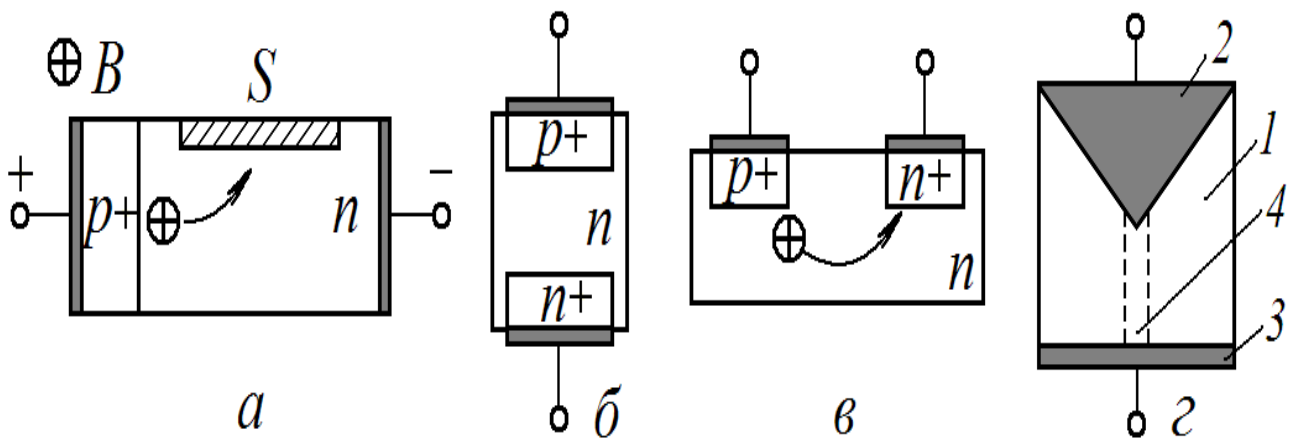
Функціональна схема сенсора кута повороту серії AS5000



Додаток Д
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ
ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА**

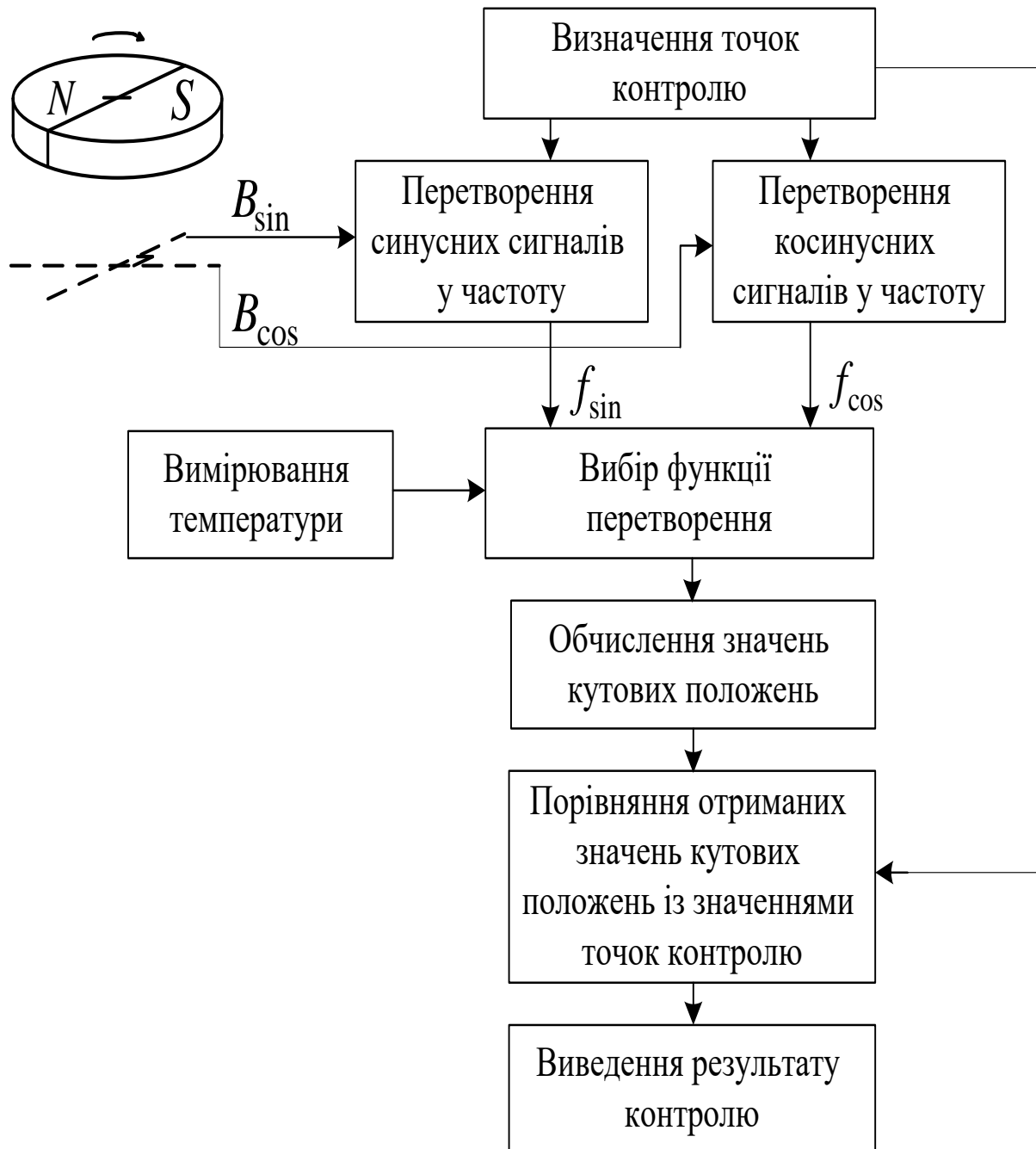
Структурне зображення магнітодіодів: a – з областю високої швидкості рекомбінації,
 b – торцева структура, v – планарна структура, z – із контактом у формі
рівнобедреного трикутника



Додаток Е
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ
ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА**

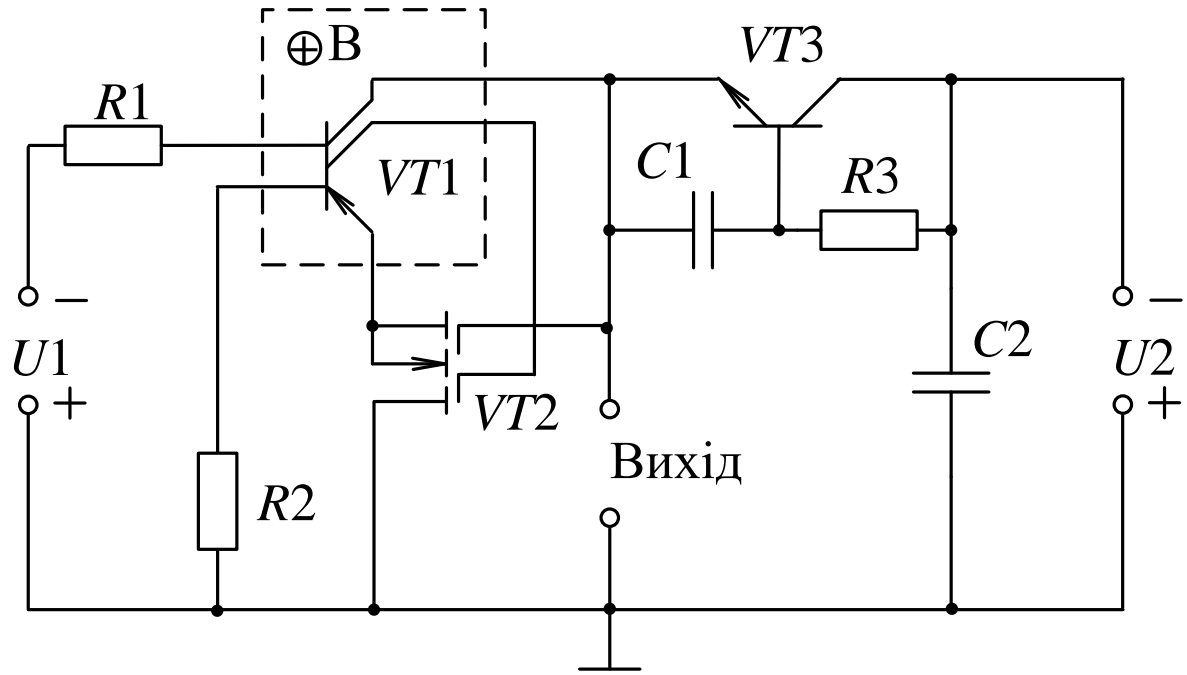
Структурна схема методу вимірювального контролю кутових положень



Додаток Ж
(обов'язковий)

**РАДІОВІМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ
ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА**

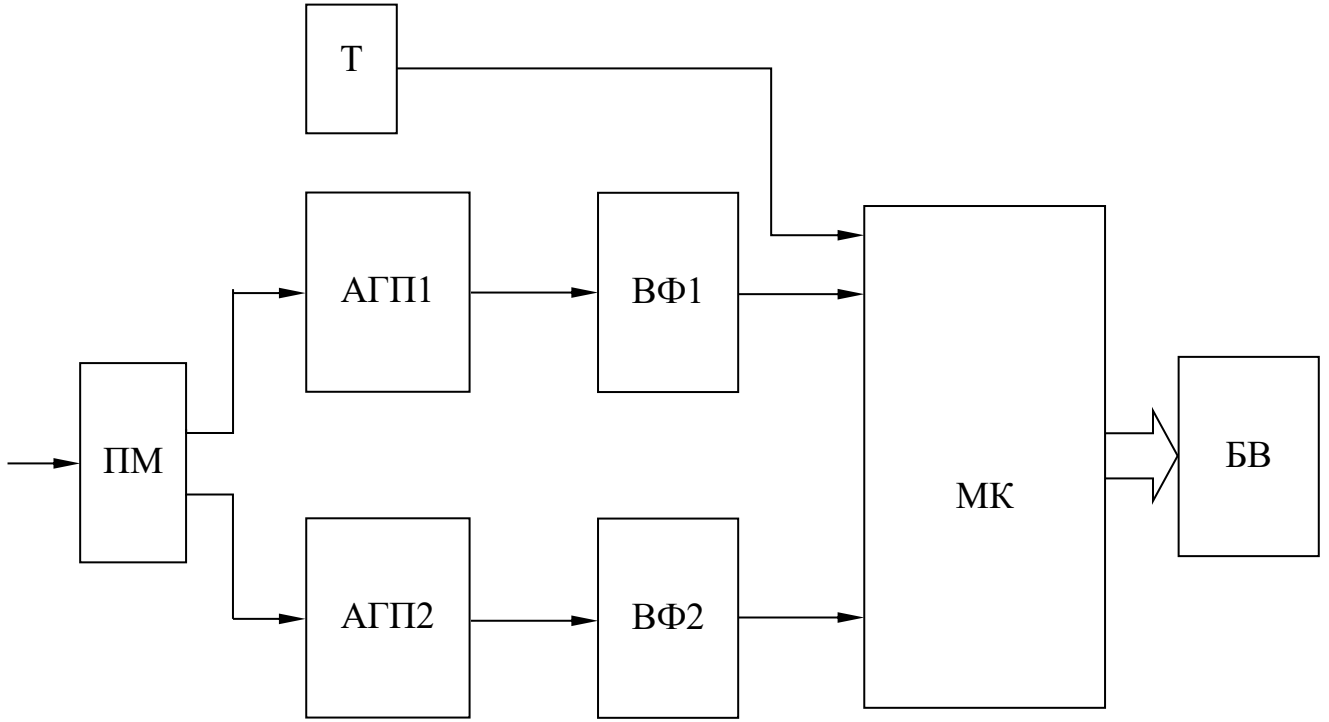
Електрична схема радіовимірювального перетворювача куткових положень на
основі магніточутливого транзистора



Додаток К
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ
ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА**

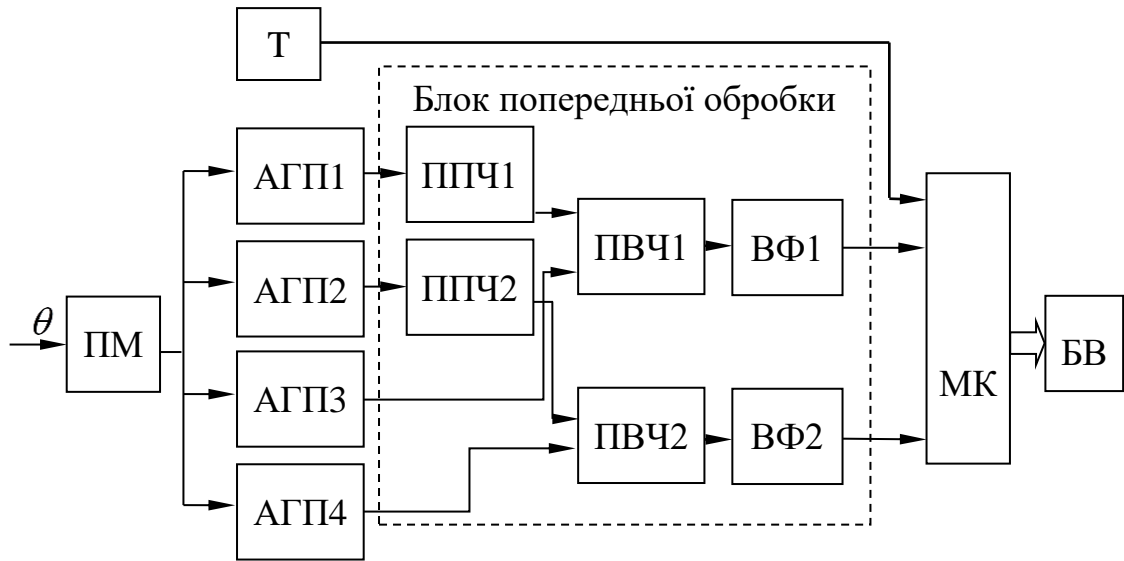
Блок-схема радіовимірювального приладу вимірювального контролю куткових положень з використанням розроблених автогенераторних пристроїв на основі двоколекторних магніточутливих транзисторів



Додаток Л
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ
ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА**

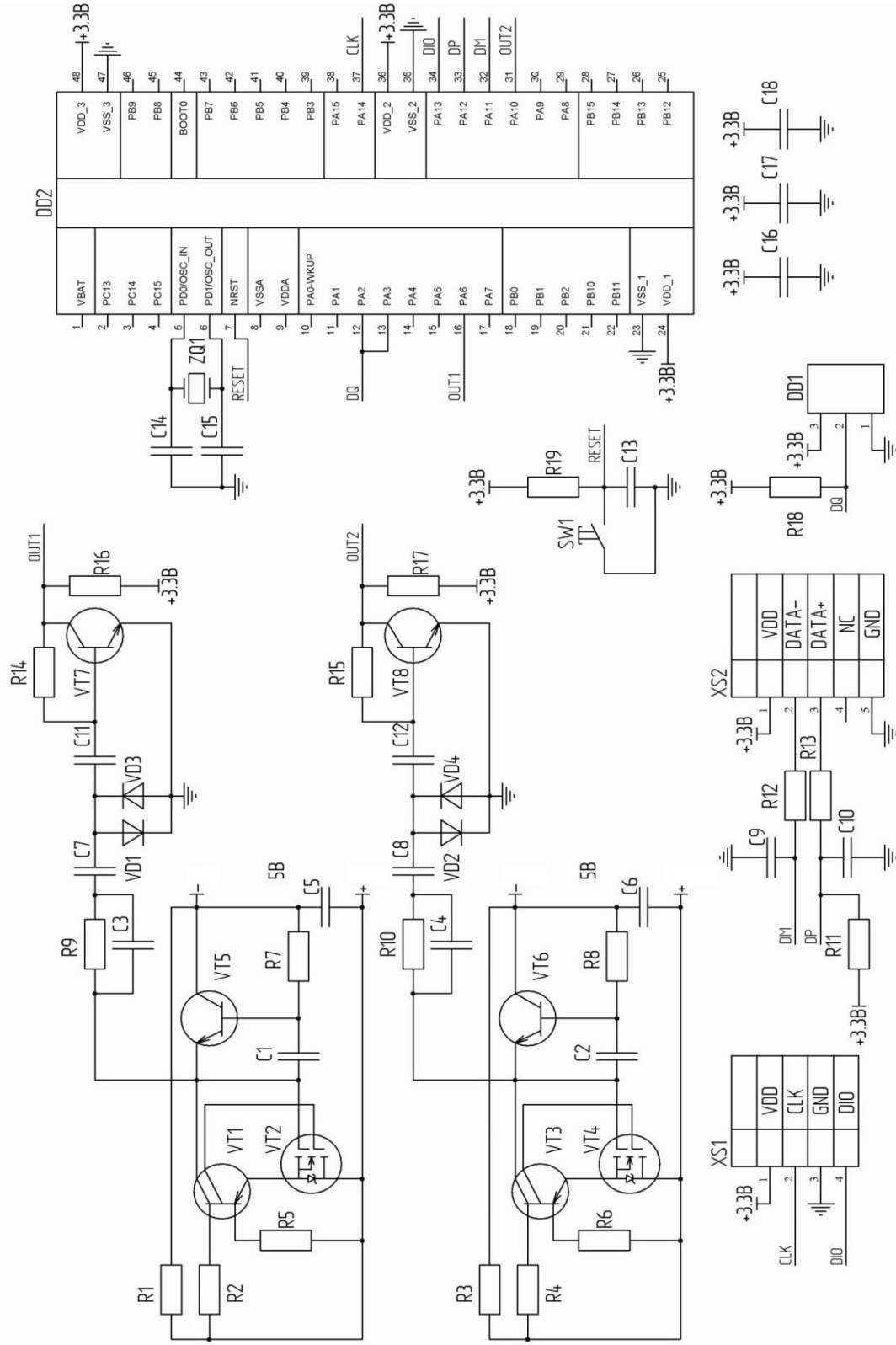
Блок-схема радіовимірювального приладу вимірювального контролю куткових положень на основі двоколекторних магніточутливих транзисторів



Додаток М
(обов'язковий)

**РАДІОВІМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ
ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА**

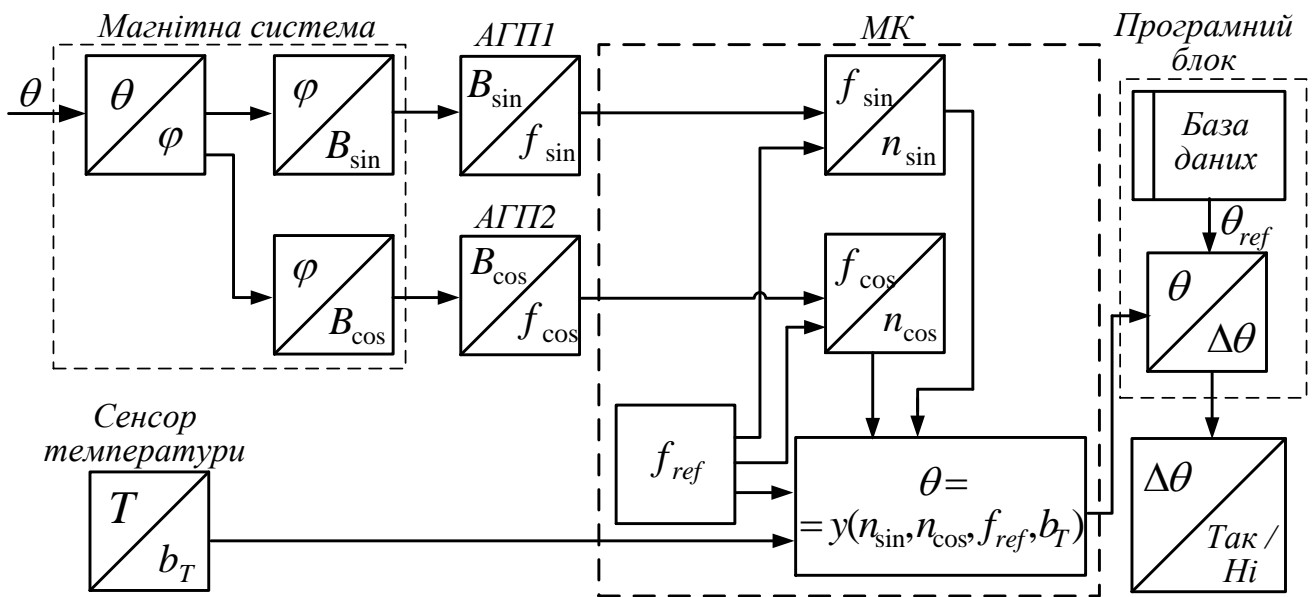
Схема електрична принципова радіовимірювального приладу контролю
кутових положень



Додаток Н
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ
ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА**

Схема функціональних перетворень пристрою вимірювального контролю
кутових положень на основі магніточутливих транзисторів



Додаток О
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ КУТОВИХ
ПОЛОЖЕНЬ НА ОСНОВІ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ТРАНЗИСТОРА**

Алгоритм проектування пристрою вимірювального контролю куткових
положень на основі магніточутливих транзисторів

